

Porovnání průmyslových technologií pro získávání 3D dat

Comparison of Industrial Technologies for 3D Data Acquisition

Bc. Tomáš Moj

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Bilík, Ph.D.

Ostrava, 2022

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Moj

Studijní program:

N0714A150001 Řídicí a informační systémy

Téma:

Porovnání průmyslových technologií pro získávání 3D dat
Comparison of Industrial Technologies for 3D Data Acquisition

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Oblast bezkontaktního 3D měření se v poslední době velmi rychle rozvíjí a dovoluje řešit úlohy, které nelze řešit standardními 2D kamerami. 3D měření lze s úspěchem využít v průmyslu 4.0, pro který tyto snímače představují cenný zdroj dat pro následné zpracování. Díky bouřlivému rozvoji na tomto poli je dnes problém se orientovat v jednotlivých technologiích snímání/snímačů. Předmětem této práce je rešerše jednotlivých snímacích metod v oblasti 3D a následné praktické ověření a výběr vhodných metod snímání pro vybrané úlohy.

Body zadání:

1. Rešerše principů 3D získávání dat (technologie scannerů atd.).
2. Představení jednotlivých technologií, jejich výhod a nevýhod pro různé úlohy použití.
3. Praktické ověření jednotlivých snímacích technologií, získání mračna bodů a jejich vzájemné porovnání.
4. Ověření možností prostorových kalibrací pro jednotlivé snímací technologie.
5. Ověření přesnosti a spolehlivosti snímání na jednotlivých površích.
6. Nasazení závěrů teoretického a praktického rozboru v průmyslové oblasti s využitím LabVIEW.
7. Závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. Začínáme s LabVIEW. 1. vyd. Ilustrace Viktorie Vlachová. Praha: BEN – technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [2] FRYER, John, MITCHELL, Harvey, CHANDRER, Jim H. Applications of 3D Measurement from Images
- [3] ANDREASSON, Henrik, LILIENTHAL, Achim, TRIEBEL, Rudolph. Vision based Interpolation of 3D Laser Scans
- [4] SCHUON, Sebastian; THEOBALT, Christian; DAVIS, James; THRUN, Sebastian. High-quality scanning using time-of-flight depth superresolution IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2021

Datum odevzdání: 30.04.2022

prof. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jan Platoš, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o různých principech získávání 3D dat. Zaměřena je na optické metody, které jsou v této práci podrobněji popsány. Jedná se o metodu laserové triangulace, tedy měření vzdálenosti pomocí promítaného laserového paprsku, „Time of Flight“ technologie, která měří dobu letu světla k cíli a zpět a na základě této doby vypočte skutečnou vzdálenost od měřeného předmětu, technologii fotogrammetrie, která provádí rekonstrukci 3D modelu z pořízených fotografií. Součástí práce je praktické ověření některých optických snímacích metod. Porovnání získaných mračen bodů je provedeno pomocí aplikace vytvořené v grafickém prostředí LabVIEW. Dále je pomocí technologie fotogrammetrie ověřena kalibrace a přesnost snímání na různých typech povrchů.

Klíčová slova

LabVIEW; Time of Flight; Fotogrammetrie; laserová triangulace; 3D skener; mračno bodů

Abstract

This diploma thesis deals with various principles of 3D data acquisition. It focuses on optical methods, which are described in more detail in this work. It is a method of laser triangulation, ie measuring distance using a projected laser beam, "Time of Flight" technology, which measures the flight time of light to the target and back and calculates the actual distance from the measured object, photogrammetry technology, which performs 3D reconstruction model from the taken photos. Part of the work is a practical verification of some optical scanning methods. The comparison of the obtained point clouds is performed using an application created in the LabVIEW graphical environment. Furthermore, the calibration and accuracy of scanning on various types of surfaces is verified using photogrammetry technology.

Keywords

LabVIEW; Time of Flight; Photogrammetry; laser triangulation; 3D scanner; point of cloud

Poděkování

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. za trpělivost a rady při vypracovávání diplomové práce. Dále bych rád poděkoval za odbornou pomoc kolegům z firmy ATEsystem s.r.o.. Také bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při vypracování této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
1 Úvod	12
2 Teorie 3D získávání dat	13
2.1 Reverzní inženýrství	13
2.2 Popis nástrojů pro zpracování 3D dat	13
2.2.1 LabVIEW	13
2.2.2 MVTec HALCON	14
2.2.3 AliceVision Meshroom	15
2.3 Výstupní formáty 3D skenerů	16
2.3.1 Formát XYZ, PLY	16
2.3.2 Formát STL	17
2.3.3 Formát OBJ	17
3 3D skenery a jejich rozdělení	18
3.1 Kontaktní 3D skenery	19
3.1.1 Kontaktní destruktivní skenery	19
3.1.2 Kontaktní nedestruktivní skenery	19
3.2 Bezkontaktní 3D skenery	20
3.2.1 Transmisivní systémy	20
3.2.2 Reflektivní systémy	20
3.2.3 Radarové skenery	21
3.2.4 Sonarové skenery	21
3.3 Optické 3D skenery	21
3.3.1 Aktivní optické 3D skenery	22

3.3.2	Laserová triangulace	22
3.3.3	Metoda Time of Flight	24
3.3.4	Stereoaktivní metoda	24
3.3.5	Pasivní optické 3D skenery	25
3.3.6	Stereoskopie	25
3.3.7	Fotogrammetrie	28
4	Praktické ověření jednotlivých snímacích technologií	30
4.1	Kamera s technologií Time of Flight	31
4.2	Kamera s technologií laserové triangulace	36
4.3	Technologie fotogrammetrie	41
4.4	Porovnání získaných mračen bodů pomocí LabVIEW	44
4.5	Porovnání metod pro získání 3D dat	46
5	Ověření prostorových kalibrací pro jednotlivé snímací technologie	47
5.1	Digitalizace obrazu a jeho zkreslení	47
5.2	Kalibrace a výpočet 3D dat kamery Basler Blaze	50
5.3	Kalibrace technologie laserové triangulace	51
5.4	Kalibrace technologie fotogrammetrie	53
6	Ověření přesnosti a spolehlivosti snímání na jednotlivých površích	56
6.1	Druhy povrchů	56
6.2	Ověření přesnosti pomocí kalibračních vzorů	57
7	Nasazení závěrů teoretického a praktického rozboru v průmyslové oblasti s využitím LabVIEW	60
7.1	Kontrola cínových spojů elektrického polotovaru	60
7.2	Použitá snímací technologie	60
7.3	Kontrola snímků pomocí aplikace LabVIEW	61
8	Závěr a zhodnocení	63
	Literatura	64
	Přílohy	66
A	Přílohy v IS EDISON	67

Seznam použitých zkratek a symbolů

1D	– one-dimensional (jednorozměrný)
2D	– two-dimensional (dvourozměrný)
3D	– three-dimensional (trojrozměrný)
CAD	– Computer aided design (počítačem podporované projektování)
CCD	– Charge-coupled device (elektronická součástka pro zachycení obrazové informace)
CMM	– Coordinate Measuring Machine (souřadnicový měřicí stroj)
RGB	– RedGreenBlue (barevný model pro míchání barev)
LabVIEW	– Grafické programovací prostředí (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench)
LIDAR	– Light Detection and Ranging (Detekce světla a měření)
OBJ	– Wavefront 3D Object File (Univerzální formát s 3D daty)
PLY	– Polygon File Format (Trojrozměrný obrazový formát)
QR code	– Quick Response code (2D kód sloužící k přenosu informace)
STL	– Stereolithography (Stereolitografie)
TIFF	– Tagged Image File Format (3D technologie s měřením doby letu)
ToF	– Time of flight (3D technologie s měřením doby letu)
USB	– Universal Serial Bus (Univerzální sériová sběrnice)

Seznam obrázků

2.1	Ukázka čelního panelu vývojového prostředí LabView	14
2.2	Ukázka vývojového prostředí MVTec HALCON [4]	15
2.3	Ukázka vývojového prostředí AliceVision MESHROOM	16
2.4	Srovnání formátů point cloud, control mesh, result [7]	17
2.5	Ukázka STL formátu	17
3.1	Rozdělení 3D skenovacích metod [8]	18
3.2	Standartní souřadnicový měřicí přístroj od společnosti Mitutoyo [9]	20
3.3	Rozdělení optických skenerů [8]	22
3.4	Triangulační trojúhelník [11]	23
3.5	Vada nasvícení kulovitého tvaru [11]	23
3.6	Doba letu světelného pulzu odraženého od snímaného předmětu [12]	24
3.7	Sestava stereoaktivní snímací metody [13]	25
3.8	Průřezík promítaných paprsků udávající 3D bod [8]	26
3.9	Parametry stereoskopického snímání [11]	26
3.10	Epipolární linie [16]	27
3.11	Socha sedící ženy, rekonstruovaný model sochy, vytištěný zmenšený model sochy [17]	28
3.12	Snímky sklenice, 3D model [17]	29
4.1	Modely kalibračních vzorů, komolý jehlan a krychle.	31
4.2	Kamera Basler Blaze 101 [18]	32
4.3	Sestava s kamerou Basler Blaze	33
4.4	Zobrazovací prostředí Blaze Viewer	34
4.5	Snímek kalibračního vzoru krychle.	35
4.6	3D kamera společnosti Automation Technology C5 [19]	36
4.7	Použitý lineární posuv [20]	37
4.8	Sestava pro vytvoření snímků pomocí 3D kamery Autoamtion Technology	37
4.9	Závislost intenzity světla na vlnové délce filtru BP-660 [21]	38
4.10	Závislost intenzity světla na vlnové délce filtru BP-465 [21]	38

4.11	Programové prostředí CXExplorer	39
4.12	Promítaný laserový paprsek v řezu pro výpočet těžiště.	40
4.13	Ukázka 2D snímku krabičky pořízený pomocí mobilního telefonu	41
4.14	Popis aplikace Meshroom. 1. část pro nahrání 2D snímků, 2. okno zobrazující aktuální 3D model, 3. sekvence jednotlivých operací převodu	42
4.15	Okno pro vložení 2D obrázků	43
4.16	Spuštění kontroly vytvořených fotografií	43
4.17	Výsledný 3D model krabice s texturou ve formátu „OBJ“	44
4.18	Knihovna 3D Picture Control „OBJ“	44
4.19	Struktura programu převodu a úpravy dat pro 3D kameru Basler Blaze	45
4.20	Porovnání získaných mračen bodů	46
5.1	Parametry dírkové komory [23]	48
5.2	Radiální zkreslení [23]	48
5.3	Ukázka kalibračních vzorů. Vlevo matice kruhů, vpravo šachovnice.	49
5.4	Princip laserové triangulace [26]	52
5.5	Kalibrační soustředné kruhy uspořádané do čtverce 80mm x 80mm	53
5.6	Rozmístění bodů v 3D prostoru	54
5.7	Konfigurace funkce SfMTransform	55
6.1	Kalibrační krychle s různými povrchy.	58
6.2	Rekonstrukce 3D modelu sklenice.	59
7.1	Zobrazení 3D modelu v aplikaci LabVIEW.	61
7.2	Reprezentace mračna bodů pomocí barevné hloubkové mapy v prostředí CloudCompare.	62

Seznam tabulek

4.1	Pracovní režimy kamery Blaze	33
4.2	Parametry pro výběr vhodné 3D technologie [22].	46
6.1	Základní druhy povrchů [28]	57
6.2	Srovnání naměřených a vypočtených hodnot krychle.	58

Kapitola 1

Úvod

Pro svou diplomovou práci jsem si vybral téma porovnání průmyslových technologií pro získávání 3D dat. V rámci bakalářské práce jsem se zabýval problematikou strojového vidění, kde jsem se zabýval optickou kontrolou a snímáním pomocí plošných a řádkových kamer. V rámci této práce jsem navázal na bakalářskou práci a věnoval jsem se snímání předmětů rozšířených o třetí rozměr.

Oblastí, kde nestačí standartní kontrola plošnou či řádkovou kamerou v poslední době přibývá. Díky 3D snímacím technologiím je možné kromě získaného třetího rozměru pro další výpočty (např. objem) navádět robotická ramena při obrábění nebo na automatizované výrobní lince.

Teoretická část se zabývá rozdělením jednotlivých snímacích technologií pro získání 3D dat. Základní rozdělení snímacích metod je na kontaktní a bezkontaktní, kde je podrobněji popsána skupina optických 3D skenerů. Dále jsou zde uvedeny nejčastější výstupní formáty, do kterých jsou data ukládána.

Praktická část práce je zaměřena na praktické ověření snímacích technologií laserové triangulace, metody ToF, která měří dobu letu světla a technologie fotogrammetrie, která vytváří 3D model na základě pořízených fotografií klasickou plošnou kamerou. V této části práce je popsán postup získání dat pomocí těchto technologií a jejich možnosti výstupních datových formátů. V další části je popsána problematika optické rekonstrukce obrazu, vznik aberací a jejich kompenzace. V práci je provedeno praktické ověření snímání na jednotlivých površích pomocí technologie fotogrammetrie a ověření přesnosti na základě výpočtu objemu snímaného předmětu. V předposlední části práce je provedeno nasazení zjištěných poznatků teoretické části a praktické části v průmyslu s využitím LabVIEW, které bylo provedeno na úloze z praxe. Závěr se zaměřuje na zhodnocení celé práce.

Kapitola 2

Teorie 3D získávání dat

2.1 Reverzní inženýrství

Jedná se o digitalizaci samotného výrobku a následné vytvoření 3D modelu, popřípadě výkresu. Reverzní inženýrství je opakem klasického inženýrství, kde se prvně vytvoří model v CAD systému a následně se vytvoří výkresy pomocí kterých se z modelu vyrobí reálný výrobek. Reverzní inženýrství se snaží získat co nejlepší kopii původního (originálního) výrobku. Pro různé typy výrobků se používají různé typy skenerů, pomocí kterých se předmět naskenuje a převede do formátu, který je možné dále upravovat v CAD/CAM systému [1].

2.2 Popis nástrojů pro zpracování 3D dat

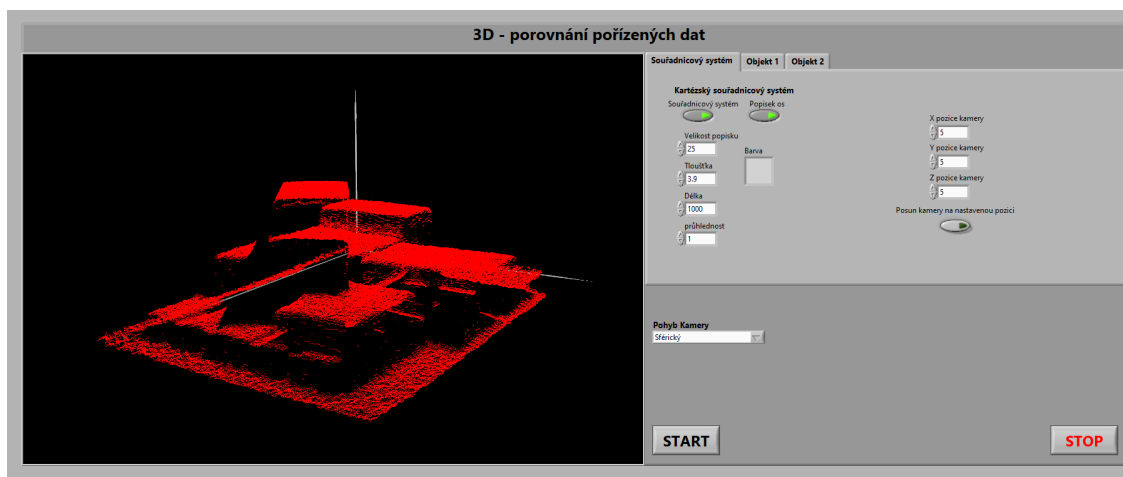
Zpracování 3D dat lze řešit v řadě vývojových prostředí, která jsou přizpůsobena k tomuto účelu (knihovny, ovladače). Při výběru vhodného prostředí je zapotřebí myslet na jednoduchý návrh aplikace a zpracování získaných 3D dat. LabVIEW je díky grafickému programovacímu jazyku velice intuitivní a pro širokou škálu aplikací dostačujícím prostředím. V této práci pro rychlejší cestu vývoje budu používat programovací prostředí LabView od společnosti NI.

2.2.1 LabVIEW

Programovací a vývojové prostředí LabVIEW (z anglického názvu Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) v překladu „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“, je produktem americké společnosti NI, která je největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace.

Prostředí LabVIEW, někdy nazývané jako „grafický“ programovací jazyk, je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů, nebo také programování FPGA (programovatelných hradlových polí). Je možno říci, že programové prostředí LabVIEW nemá žádné velké omezení svého použití.

Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahradit jednoúčelové, objemné a mnohdy i finančně nákladné zařízení řešením virtuálním. Tento hardware rozšířen o grafický program, který poskytne uživateli názornost v dané oblasti použití. Pomocí toho řešení je možné poměrně jednoduše aplikace rozšiřovat, modifikovat nebo provádět změny v konfiguraci. Provádění těchto změn s použitím standartních měřících nástrojů jsou často nákladné nebo nemožné [2].

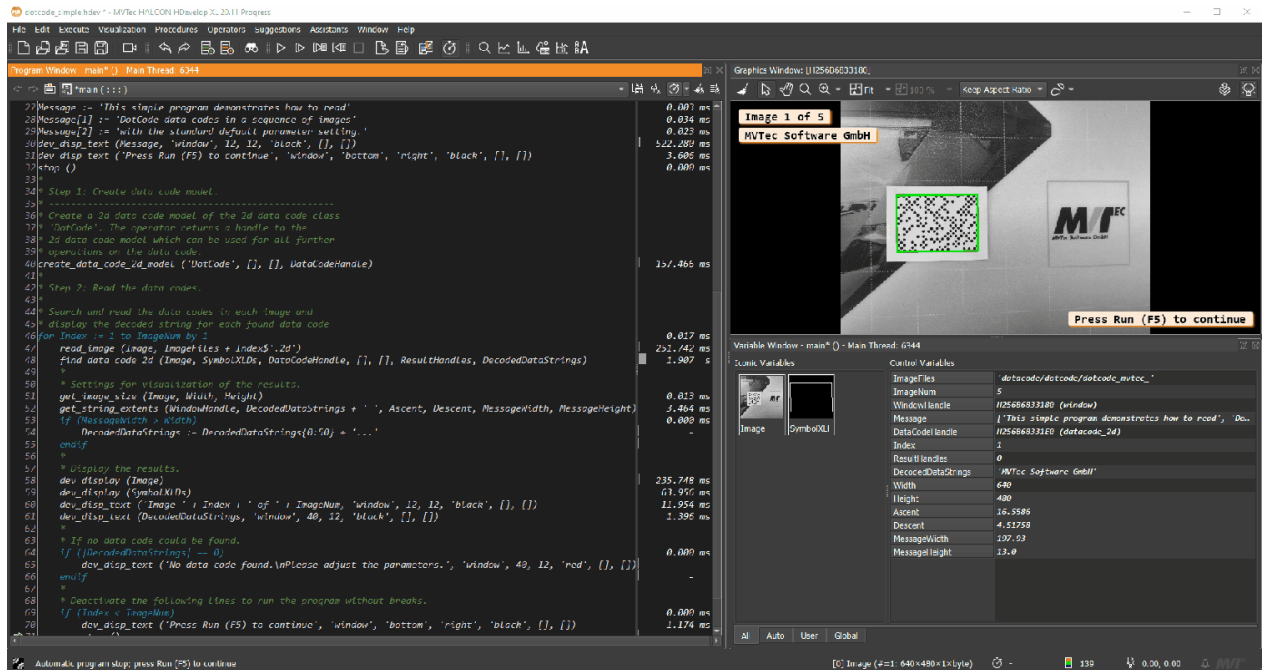


Obrázek 2.1: Ukázka čelního panelu vývojového prostředí LabView

2.2.2 MVTec HALCON

MVTec HALCON je komplexní standardní software pro strojové vidění s integrovaným vývojovým prostředím (HDevelop), který se používá po celém světě. Umožňuje úsporu nákladů a zkrácení doby uvedení na trh. Flexibilní architektura HALCON umožňuje rychlý vývoj jakéhokoli druhu aplikace strojového vidění. MVTec HALCON poskytuje vynikající výkon a komplexní podporu vícejádrových platforem, speciálních instrukčních sad jako AVX2 a NEON a také akceleraci GPU. Slouží všem průmyslovým odvětvím, s knihovnou používanou ve stovkách tisíc instalací ve všech oblastech zobrazování, jako je analýza kapek, morfologie, párování, měření a identifikace. Software poskytuje nejnovější nejmodernější technologie strojového vidění, jako je komplexní 3D vidění a algoritmy hlubokého učení.

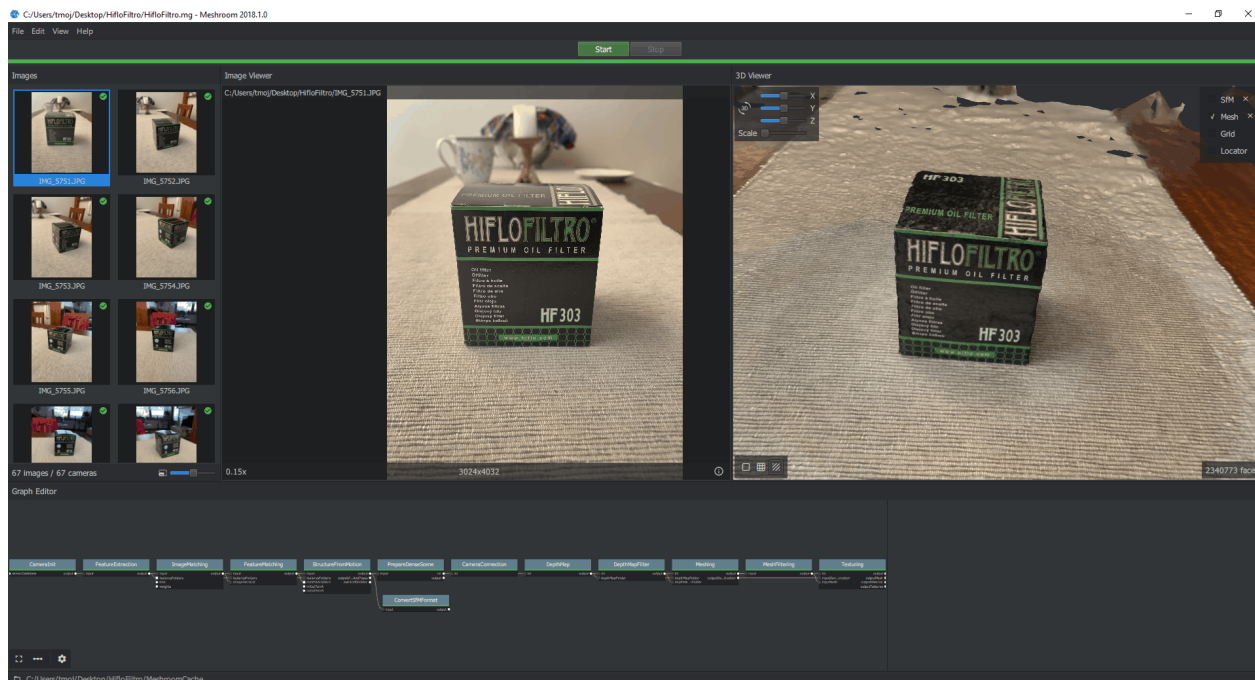
Software zajišťuje dobrou investici tím, že podporuje širokou škálu operačních systémů a poskytuje rozhraní pro stovky průmyslových kamer a frame grabberů, zejména podporou standardů jako GenICam, GigE Vision a USB3 Vision. Ve výchozím nastavení běží MVTec HALCON na platformách vestavěného vidění na bázi mikrokontrolérů s procesory ARM. Software je tedy ideálně vhodný pro použití v rámci vestavěných systémů. [3].



Obrázek 2.2: Ukázka vývojového prostředí MVTEC HALCON [4]

2.2.3 AliceVision Meshroom

Jedná se o zcela bezplatný, open-source softwarové pro 3D rekonstrukci obrazu pomocí 2D snímků. AliceVision je fotogrammetrický "Computer Vision Framework", který poskytuje algoritmy pro 3D rekonstrukci a 3D sledování pozic kamer. AliceVision zde přichází se silným softwarovým základem a nejmodernějšími algoritmy počítačového vidění, které lze testovat, analyzovat a znovu používat. Tento projekt je výsledkem spolupráce mezi akademickou obcí a průmyslem s cílem poskytnout špičkové algoritmy s robustností a kvalitou požadovanou pro produkční využití.[5]



Obrázek 2.3: Ukázka vývojového prostředí AliceVision MESHROOM

2.3 Výstupní formáty 3D skenerů

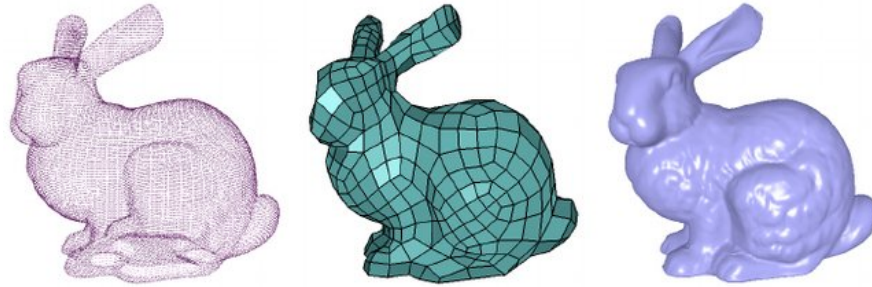
Data získaná z 3D skenerů jsou nejčastěji reprezentována ve třech dimenzích. Typ dat získaný ze skenovacího zařízení má zásadní vliv na další zpracování v aplikacích nebo programech. Každý skener má předem definovaný typ dat, který je schopen exportovat.

Nejčastěji 3D skenery používají tyto typy formátů[6].

- Formát .XYZ, .PLY
- Formát .OBJ
- Formát .STL

2.3.1 Formát XYZ, PLY

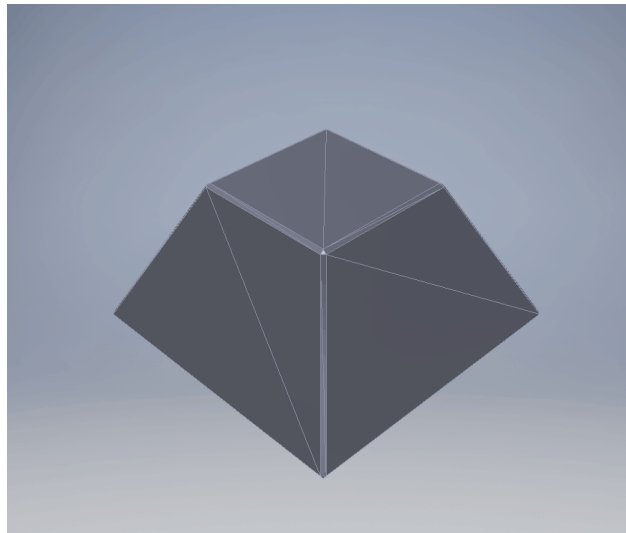
Jedná se o mračno bodů, které definují objekt pomocí souřadnic X, Y a Z jednotlivých bodů. Mimo tyto souřadnice mohou také obsahovat hodnoty o směru normály nebo informaci o barvě v daném bodě. Jednotlivé body nejsou mezi sebou nijak spojené. Vizuálně se s mračnem bodů hůře pracuje, jelikož netvoří celistvou plochu ale pouze jednotlivé body. Při provádění řezu mračnem bodů se v této rovině zobrazují pouze protnuté body [6].



Obrázek 2.4: Srovnání formátů point cloud, control mesh, result [7]

2.3.2 Formát STL

Data jsou reprezentována pomocí trojúhelníkové sítě. Tento formát dat je pro člověka mnohem přehlednější pro další úpravu než mračno bodů, jelikož trojúhelníky tvoří povrch modelu a vytvářejí dojem plošného modelu. Tyto data dokáže otevřít většina CAD systémů jako grafický formát dat. Všechny 3D tiskárny využívají tento typ dat pro přímý tisk. Tento typ souboru představuje nejjednodušší vyjádření tvaru 3D modelu. [6].



Obrázek 2.5: Ukázka STL formátu

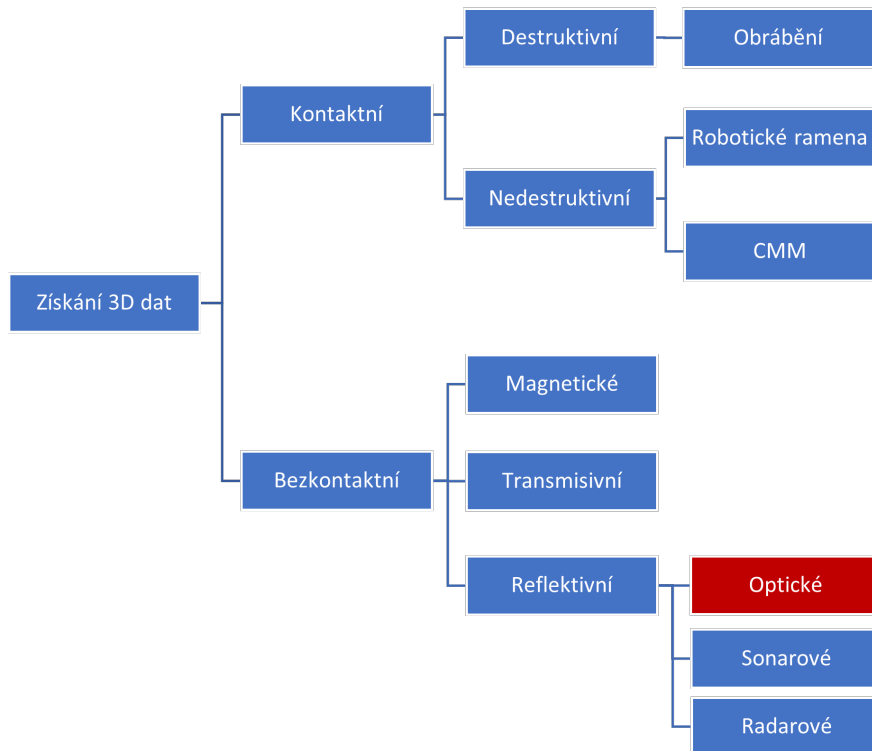
2.3.3 Formát OBJ

Tento typ souboru reprezentuje data pomocí trojúhelníkové sítě jako výše zmíněný formát STL. Data jsou přehledná pro následující úpravy, protože trojúhelníky také tvoří povrch modelu. Oproti formátu STL obsahují tato data informaci o textuře, kterou vytvoří snímky během skenování.

Kapitola 3

3D skenery a jejich rozdělení

Základním rozdělením 3D skenerů je na kontaktní a bezkontaktní. Jeden typ skeneru se fyzicky dotýká povrchu skenovaného předmětu (kontaktní) a druhý skenuje předmět bez toho, aniž by se ho fyzicky dotýkal (bezkontaktní). Tyto dvě základní skupiny skenerů se dále ještě dělí do podskupin. V této práci se budu zabývat skupinou bezkontaktních optických skenerů [8, 6].



Obrázek 3.1: Rozdělení 3D skenovacích metod [8]

3.1 Kontaktní 3D skenery

Kontaktní 3D skenery fungují na principu zkoumání povrchu objektu pomocí fyzického dotyku. Existují dva základní typy metod získání 3D dat, první je souřadnicový měřicí systém (CMM) a systém s kloubovým ramenem. Nejčastěji používaný je souřadnicový měřicí stroj (CMM), kde je sonda připevněna na svislém rameni a posouvá se podél vodorovné roviny. Pohyb je tvořen pomocí tří ortogonálních os. Výsledkem měření je posunutí aktuátoru podél každé z os, kde je důležité zajistit, aby se objekt nacházel nad referenční rovinou, kde je sonda dovede prozkoumat. Pohyb sondy u tohoto systému může být ovládán ručně nebo automaticky. Obecně má tento typ systému dobrou přesnost řádově jednotky μm . I když tyto systémy dosahují poměrně velké přesnosti, mají také nevýhody, kterými jsou omezený prostor pro skenovaný předmět konstrukcí skenovacího zařízení. Dále nejsou tyto skenovací systémy vhodné pro skenování křehkých popřípadě jedinečných předmětů jako jsou například archeologické artefakty. Nedestruktivní skenovací systémy je možné nahradit například ultrazvukovým senzorem, a vytvořit bezkontaktní měření [8].

3.1.1 Kontaktní destruktivní skenery

Tato metoda je v rámci kontaktních skenerů nejméně používaná, protože jak už z názvu vyplývá, tak při skenování dochází k nevratnému zničení skenovaného objektu. Před samotným skenováním se skenovaný objekt zalije do pomocného materiálu, který zateče do všech dutin a otvorů. Důležité je, aby zalévací materiál byl jiné barvy než skenovaný předmět. Následně se tento celek frézuje vrstvou po vrstvě a vytváří se sada 2D fotografií s informací o dané výšce pořízení. Z pořízených snímků se softwarově vytvoří obrys objektu, kde jednotlivé obrysové křivky jsou složeny z bodů. Následně se všechny snímky poskládají a vznikne 3D mračno bodů [8].

3.1.2 Kontaktní nedestruktivní skenery

Kontaktní skenovací metody získávají 3D data pomocí kontaktu se skenovaným objektem. Jedná se o nejstarší možnost získávání 3D dat, kde se v dnešní době používají s kombinací bezdotykovými skenery. V této skupině existují dva základní typy, CMM (souřadnicové měřicí stroje) a systémy s kloubovým ramenem. První metoda používá kontaktní sondu připevněnou na svislém rameni, kterou lze posouvat podél vodorovné roviny. Pohyb je vytvářen podél tří ortogonálních os měřicího zařízení [8]. Na obrázku 3.2 je zobrazen standartní souřadnicový měřicí přístroj od společnosti Mitutoyo. Tyto měřicí souřadnicové stroje pracují s rozlišením $0,0001\text{mm}$ 3.2.



Obrázek 3.2: Standartní souřadnicový měřicí přístroj od společnosti Mitutoyo [9]

3.2 Bezkontaktní 3D skenery

Bezkontaktní skenery jsou charakteristické tím, že emitují určitý druh záření, který působí na měřený objekt. Podle toho, zda má záření procházet objektem nebo je od povrchu skenovaného předmětu odraženo, dělíme tyto systémy do dvou kategorií, transmisivní a reflektivní [8].

3.2.1 Transmisivní systémy

Do této skupiny se řadí neznámější skener CT (Computed Tomography), který se používá nejčastěji ve zdravotnictví. Výpočetní tomografie je metoda, která slouží nejčastěji k zobrazení vnitřních orgánů a tkání, popřípadě tam, kde je potřeba zobrazit vnitřní strukturu nějakého objektu s velmi vysokou rozlišovací schopností a tím nejdůležitějším je schopnost zobrazení snímku ve 3D. Princip tohoto skeneru je poměrně jednoduchý díky tomu, že různé materiály pohlcují rentgenové záření rozdílně. Na snímku jsou pak materiály rozlišeny podle útlumu rentgenového záření, který prochází materiály[10].

3.2.2 Reflektivní systémy

Reflektivní 3D skenery využívají odraz záření od povrchu skenovaného objektu pro následný výpočet polohy bodů na měřeném objektu. Tato skupina se dále rozděluje podle typu použitého záření na

optické, mikrovlnné a akustické. Optické skenery využívají optické záření (vlnové délky cca. 300nm – 900nm), ostatní skupiny využívají pro detekci jiný typ záření.

3.2.3 Radarové skenery

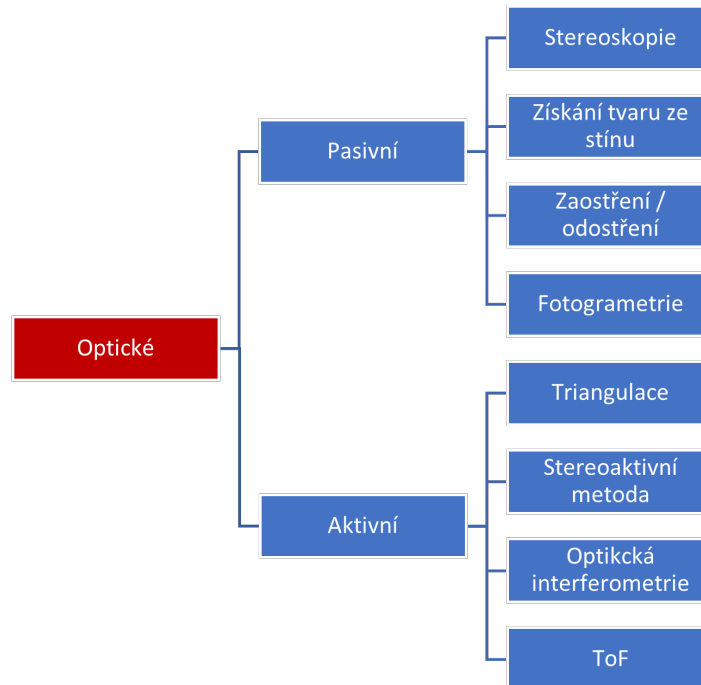
Radarové skenery jsou založeny na principu elektromagnetických vln, kdy se měří doba mezi vyslanou a přijatou elektromagnetickou vlnou. Doba mezi přijatou a odeslanou elektromagnetickou vlnou je rovna dvojnásobku vzdálenosti mezi vysílačem a měřeným objektem. Radarové skenery mají velmi dobrou hloubku ostrosti a tím pádem mohou snímat objekty na velké vzdálenosti.

3.2.4 Sonarové skenery

Sonarové skenery využívají zvukové či ultrazvukové vlny. Tento systém funguje stejně jako radarový skener pouze s tím rozdílem, že využívá jiný zdroj záření. Tato metoda se používá zejména pod vodní hladinou, kde se mnohem lépe šíří zvukové či ultrazvukové vlny. U optických či elektromagnetických vln by došlo pod vodou k velkému zkreslení či zeslabení. I když tento systém umožňuje skenovat pod vodou, vyznačuje se nízkou přesností v důsledku malého odstupu měřicího signálu od šumu.

3.3 Optické 3D skenery

Nejrozšířenější skupinou 3D skenerů v dnešní době jsou optické skenery. Schopnost rekonstrukce skenovaného objektu bez nutnosti fyzického kontaktu má velké výhody především při skenování drahých cenností, památek, velkých objektů (budovy, krajiny). Tyto skenery dále dělíme na aktivní 3D skenery a pasivní 3D skenery viz. Obrázek 3.3.



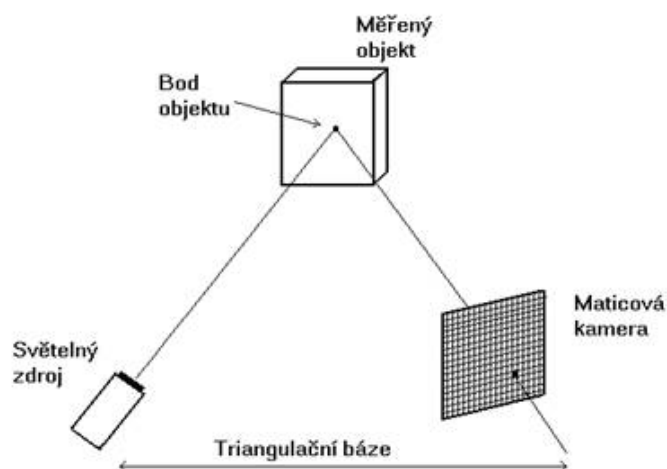
Obrázek 3.3: Rozdělení optických skenerů [8]

3.3.1 Aktivní optické 3D skenery

Aktivní 3D skenery potřebují externí zdroj elektromagnetického záření, který se promítne na skenovaný objekt a zachytí se pomocí senzoru například pomocí kamery. Z analýzy zachyceného elektromagnetického záření je možné získat polohu jednotlivých bodů skenovaného předmětu. Nejčastěji jde o skenovací systémy založené na principu měření doby letu světla (ToF), aktivní triangulace a fázového posunu snímků [8].

3.3.2 Laserová triangulace

Technika aktivní triangulace spočívá ve fotogrametrické rekonstrukci snímaného objektu nasvícením jeho povrchu světelným zdrojem (laserem) a současným snímáním CCD snímačem. Zdroj světla, kamera a zkoumaný bod na objektu tvoří tzv. triangulační trojúhelník viz. obrázek 3.4. Spojnici mezi kamerou a zdrojem světla nazýváme triangulační báze [11].

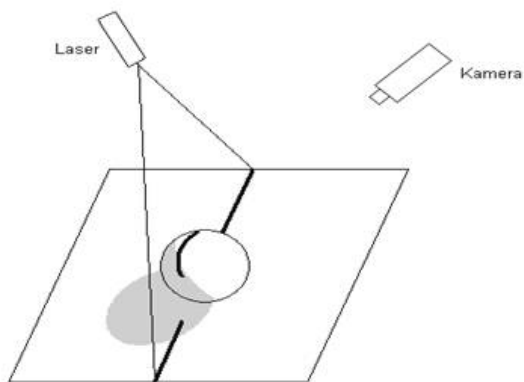


Obrázek 3.4: Triangulační trojúhelník [11]

K nasvícení struktury objektu se využívají níže uvedené světelné paprsky:

- Světelný paprsek (bod) - 1D triangulace
- Světelný pruh - 2D triangulace
- Strukturované světlo (projekce) - 3D triangulace

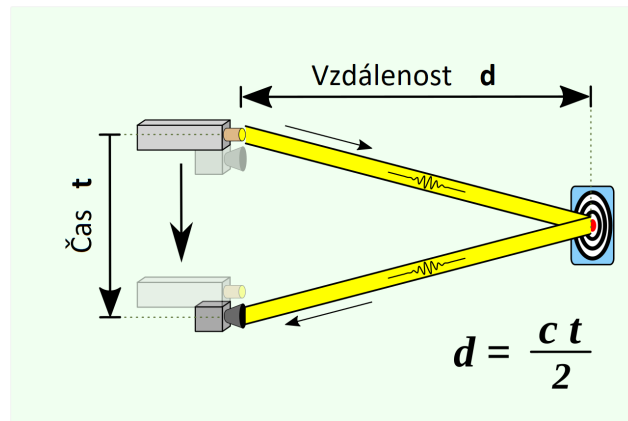
Triangulační metoda má velkou nevýhodu a to, že když je snímáný objekt kulovitěho tvaru nebo se na objektu nacházejí malé hluboké otvory, tak promítaný paprsek, pruh nebo strukturované světlo není viditelné a v tomto místě nemůžeme určit povrch objektu. Na obrázku 3.5 je vidět problém při laserové triangulaci koule, kde laser nasvítí pouze vrchní polovinu koule.



Obrázek 3.5: Vada nasvícení kulovitěho tvaru [11]

3.3.3 Metoda Time of Flight

Jak už z názvu vyplývá metoda Time of Flight je metoda, která měří délku letu světelného paprsku na základě známé rychlosti světla. Kamerový systém měří čas letu světelného signálu mezi zdrojem (kamerou) a snímaným předmětem pro každý bod obrazové scény viz. obrázek 3.6. Tato metoda je součástí skupiny skenerů LIDAR (Light Detection and Ranging), kde je zachycena celá scéna s každým impulsem laseru jiným světelným zdrojem. Tato technologie není žádnou novinkou na trhu, ale v posledních letech se začala objevovat čím dál víc v mobilních telefonech, v automobilech s autonomním řízením. Nebo před pár lety s touto technologií přišla společnost Microsoft s názvem Kinect sloužící k herní konzoli Xbox.



Obrázek 3.6: Doba letu světelného pulzu odraženého od snímaného předmětu [12]

Jelikož má světlo velmi vysokou rychlost $300 \cdot 10^6 m/s$, tak je jeho doba od vyslání k přijetí na čip kamery velmi malá. Na příkladu níže je vypočteno, jak dlouho poletí světelný paprsek od měřeného předmětu, který je umístěn čtyři metry od kamery a světla.

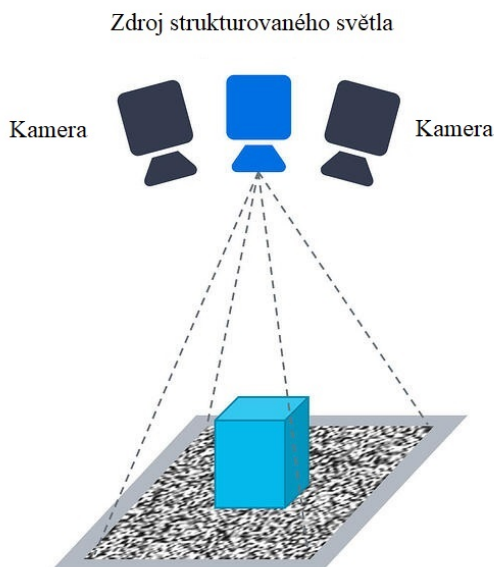
$$t_D = 2 \cdot \frac{D}{c} = 2 \cdot \frac{4}{300 \cdot 10^6} = 26,667 \cdot 10^{-9} s = 26,667 ns \quad (3.1)$$

Díky takto malým časovým hodnotám doby letu světla je u této technologie nejdůležitější osvětlovací jednotka. Aby bylo docíleno krátkého časového světelného impulsu vyslaného od zdroje světla, je potřeba použít speciální LED světla nebo lasery. Nejčastěji se využívají laserové osvětlovací jednotky v IR pásmu, popřípadě jiném než viditelném, aby nedocházelo k rušení snímání okolním světlem [12].

3.3.4 Stereoaktivní metoda

Stereoaktivní metoda funguje stejně jako stereoskopie viz. kapitola 3.3.6. K této pasivní metodě je přidán projektor nejčastěji laserový, který na povrch skenovaného předmětu promítá náhodný vzor viz. obrázek 3.7. Tento vzor slouží k nasvícení skenovaného objektu a tím k vytvoření vzoru

na homogenní ploše. Při pasivní stereo metodě je poměrně složité zjistit třetí rozměr u velkých rovných ploch, které mají stejnou barvu a nemají žádnou strukturu (např. bílé stěny místnosti). Tato technologie taktéž najde využití v oblastech, kde je nedostatek světla [13].



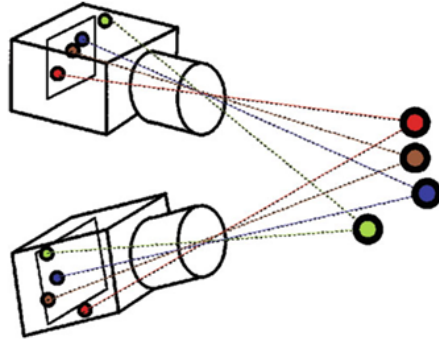
Obrázek 3.7: Sestava stereoaktivní snímací metody [13]

3.3.5 Pasivní optické 3D skenery

Pasivní 3D skenery nepotřebují pro naskenování objektu žádný emitující zdroj elektromagnetického záření. K naskenování se využívá pouze pasivní zdroj elektromagnetického záření, který se odrazí od skenovaného objektu. Nejčastěji jsou tyto skenery založeny na snímačích CCD používaných u klasických digitálních fotoaparátů. Tyto 3D systémy jsou poměrně levné, ale nejsou schopny vytvořit dostatečné množství bodů (nedosahují takových přesností jako aktivní skenery). K vytvoření 3D snímku z vytvořených fotografií je zapotřebí vysoký výpočetní výkon. Pasivní optické 3D skenery se hodí na skenování méně náročných objektů o větším rozměru.

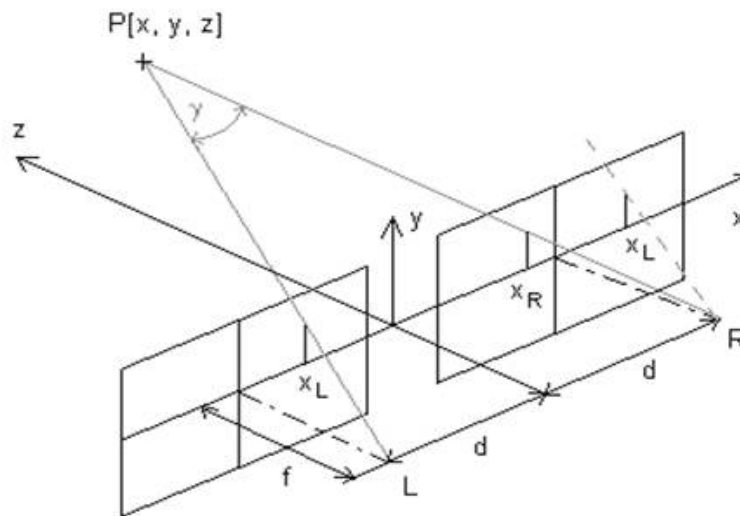
3.3.6 Stereoskopie

Stereoskopie též stereo vidění, jedná se o nejpoužívanější pasivní metodu. Princip této metody spočívá v zachycení scény pomocí dvou nebo více kamer, které jsou od sebe vzdáleny cca. 65mm (přibližně stejně jako je rozteč lidských očí). Tato metoda funguje podobně jako lidský zrak. Při rekonstrukci se nejprve provede nalezení 2D bodu v obou snímcích. Z nalezených 2D bodů lze určit jejich přidružený 3D bod jako průsečík zpětně promítnutých paprsků viz. Obrázek 3.8 [14, 15].



Obrázek 3.8: Průsečík promítaných paprsků udávající 3D bod [8]

Stereoskopické snímky, jsou dva perspektivní obrazy, které jsou pořízeny pomocí dvou kamer. Měřený bod P je na čipu kamer zobrazen s úhlem γ , což je tzv. úhlová paralaxa. Pomocí tohoto úhlu je možno následně odvodit vzdálenost bodu P v prostoru, pokud se bude měřený bod nacházet blízko, bude tento úhel velký, naopak tomu bude, pokud se bod bude nacházet daleko od snímacího zařízení. Bod P je měřený bod na daném předmětu, body L a R jsou ohniskové vzdálenosti u objektivů kamer, dvakrát vzdálenost d je vzdálenost mezi optickými osami kamer [11].



Obrázek 3.9: Parametry stereoskopického snímání [11]

Souřadnice X , Y a Z bodu P můžeme zjistit pomocí následujících vztahů:

$$x = x_L \frac{2d}{x_L - x_P} \tag{3.2}$$

$$y = y_L \frac{2d}{x_L - x_P} \quad (3.3)$$

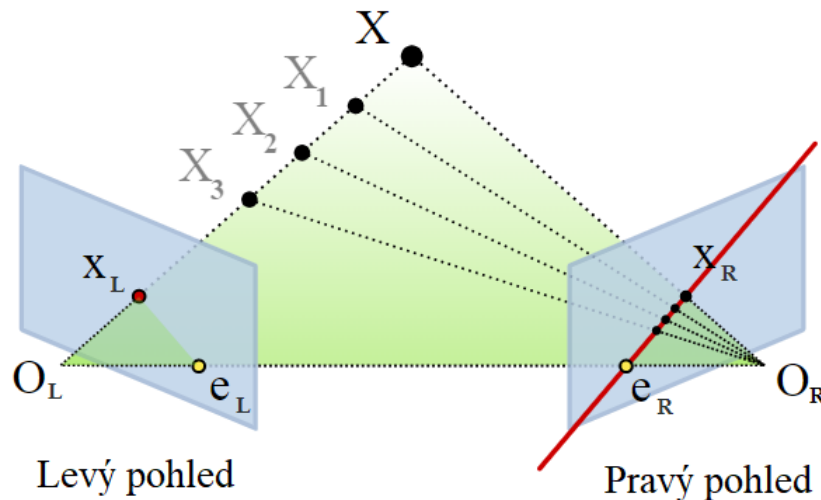
$$z = \frac{2df}{x_L - x_P} - f \quad (3.4)$$

[11]

"2d" je vzdálenost mezi optickými osami kamer, f je ohnisková vzdálenost, x_L , x_P a y_L jsou souřadnice X v obrazové rovině.

Výše uvedené vztahy jsou použitelné pouze tehdy, jsouli optické osy obou kamer rovnoběžné s osou "Z" souřadnicového systému. Stereovidění lze použít i v případě, když se nepodaří dodržet výše uvedené podmínky, je ale potřeba použít korekční vztahy [11].

Problém automatického nalezení bodu v obrazech levé či pravé kamery je zjednodušen pomocí epipolární geometrie. Jelikož jsou optické středy obou kamer odlišné, promítne se každý z optických středů do odlišného bodu obrazové roviny druhé kamery. Tyto body označené e_L a e_R se nazývají epipolární body. Oba epipolární body a oba optické středy značené O_L a O_R se nacházejí v jedné rovině. Přímka $O_L - X$ je vidět na levé kamere jako bod, protože leží na optické ose této kamery. Pravá kamera tuto přímku vidí ve své obrazové rovině jako přímku $e_R - X_R$. Stejně to platí i v opačném případě, kde přímka $O_R - X$ je promítána na obrazové rovině levé kamery jako přímka $e_L - X_L$ viz. obrázek 3.10.



Obrázek 3.10: Epipolární linie [16]

Úskálím této metody je určení bodů ze dvou nebo více různých obrazů kamer. Hlavní body jako jsou například hrany budou identifikovány, ale problém nastává u detekce bodů na rovných jedobarevných plochách bez textury. Tato vada může vést k malému množství bodů v celkovému mračnu bodů. Tento problém je možno téměř odstranit použitím laserového nebo strukturované světla viz. kapitola 3.3.4. Vzhledem k požadavkům na výpočet třetího rozměru je tato metoda

většinou využívána pro skenování statických objektů nebo pro skenování s dostatečným časovým rozestupem.

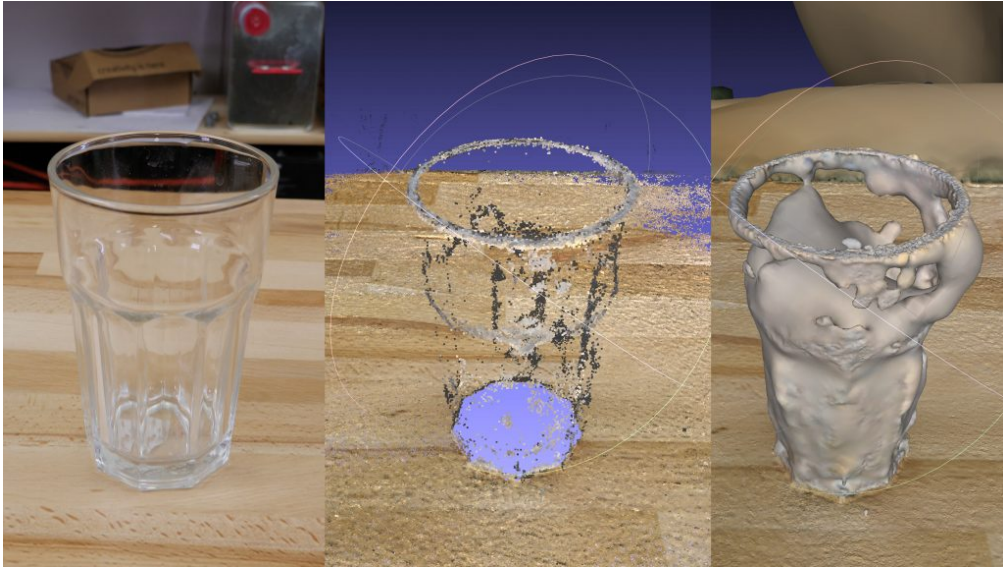
3.3.7 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie (někdy také nazýván krátce SFM - Structure From Motion) je proces, který vypočte umístění bodů v trojrozměrném prostoru použitím fotografií nasnímaného objektu z více úhlů pomocí plošné kamery, fotoaparátu či mobilního telefonu. Tyto snímky se následně vloží do speciálního softwaru, který následně hledá společné prvky na všech fotografiích a snaží se pomocí společných prvků dopočítat, z jakého úhlu byla pořízena fotografie předmětu. Následně s informací o pozici a úhlu kamery, dokáže software vytvořit bod v 3D prostoru, který je zachycen na 2D snímku.



Obrázek 3.11: Socha sedící ženy, rekonstruovaný model sochy, vytištěný zmenšený model sochy [17]

Velkou výhodou fotogrammetrie, je možnost vytvoření 3D modelu pomocí klasické plošné kamery či mobilního telefonu, který je v dnešní době nedílnou součástí našeho života. Dále tato metoda umožňuje vytvořit mnohdy lepší výsledek, než je vytvořen pomocí nejlevnějších 3D skenovacích zařízení. Díky této metodě jsme schopni vytvořit modely jak poměrně malých předmětů tak i předmětů jako je například rodinný dům či obchodní centrum. Fotogrammetrie má ale také nespočet nevýhod a tou první je poměrně výpočetně a časově náročná rekonstrukce 3D snímku z pořízených fotografií. Je totiž zapotřebí prve vytvořit poměrně dost velké množství 2D snímků (50-100 snímků) zkoumaného předmětu, které se následně musí upravit ve speciálním softwaru. Další nevýhodou je vytvoření 3D modelu z lesklých, průhledných nebo poloprůhledných předmětů, jako je například sklenice viz. obrázek 3.12. Hladké průhledné plochy bez výrazné textury zůstanou softwarem během generování 3D modelu zcela ignorovány. Tato nevýhoda se dá částečně eliminovat tím, že předmět ošetříme matným nátěrem popřípadě použijeme papírovou maskovací pásku (pokud nám to daný předmět umožní)[17].



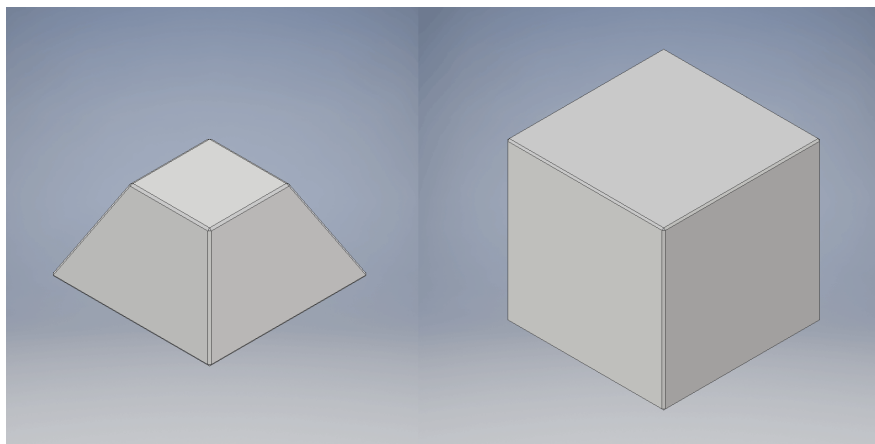
Obrázek 3.12: Snímky sklenice, 3D model [17]

Kapitola 4

Praktické ověření jednotlivých snímacích technologií

V průmyslových aplikacích se využívají pro různé typy úloh různé typy 3D záznamových zařízení. Pro různé typy úloh je vhodná jiná technologie pro získání 3D dat. Tyto technologie budou popsány a vyzkoušeny v následující části práce.

Praktické ověření bylo provedeno pomocí dvou kalibračních vzorů vyrobených z ocelového materiálu. Jednalo se o tvar krychle s délkou hrany 20 mm viz. obrázek 4.1. Dále byl k dispozici komolý jehlan viz. obrázek 4.1 s rozměrem podstavy 20 x 20 mm, výškou 10mm a rozměrem horní podstavy 10 x 10 mm. Na základě těchto kalibračních vzorů a naměřených hodnot, byly vytvořeny modely. Modely byly vytvořeny v programu Inventor Professional od společnosti Autodesk. Vytvořené modely byly exportovány do formátu STL, který model reprezentuje pomocí trojúhelníkové sítě a tím je vytvořený model mnohem lépe čitelnější pro lidské oko. Z důvodu velké odrazivosti povrchu, byla u dvou dalších kalibračních vzorů provedena úprava povrchu pomocí bílého matného papíru a následně pomocí modré maskovací pásky, kterou byl model potažen.



Obrázek 4.1: Modely kalibračních vzorů, komolý jehlan a krychle.

4.1 Kamera s technologií Time of Flight

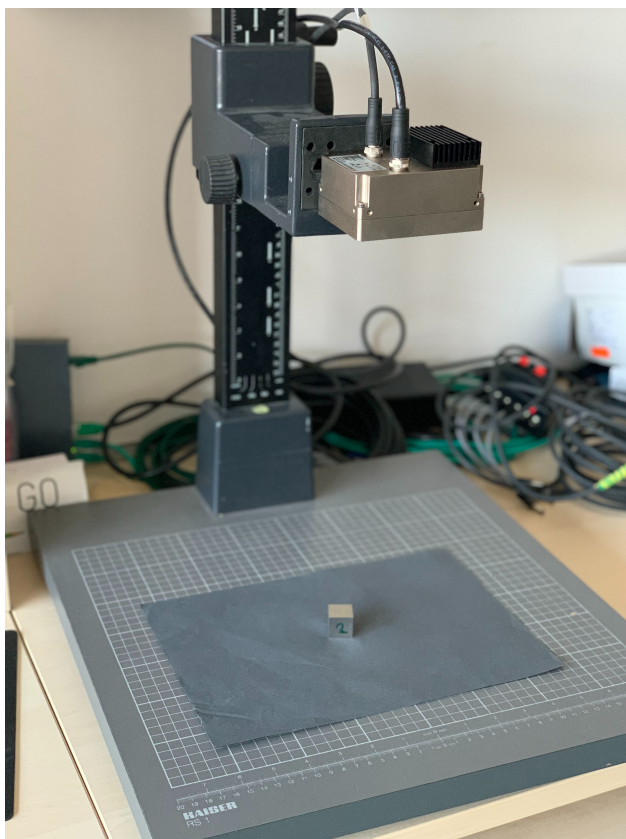
Kamera s technologií „Time of Flight“ využívá známou rychlost světla pro měření a následné zobrazení hloubky. Kamerový systém změří dobu letu světelného signálu od zdroje (osvětlovače) následné odražení od měřeného předmětu zpět na kameru.

K pořízení snímků touto technologií byla použita kamera Blaze-101 od německé firmy Basler. Kamera je v kompaktním a zároveň v robustním pouzdře s krytím IP67. Na levé straně pouzdra se nachází plošná monochromatická kamera se senzorem IMX556 od firmy Sony s rozlišením 640x480px a snímkovací frekvencí 30fps. Na pravé straně pouzdra se nachází osvětlovač viz. obrázek 4.2. Kamera je připojena k 24 V zdroji pomocí průmyslového osmižilového kabelu s konektorem M12. Tato kamera komunikuje s počítačem pomocí Ethernetového kabelu. Kabel je na jednom konci zakončen také konektorem M12 a druhý konec je zakončen konektorem RJ45, kterým je kamera připojena k počítači nebo ethernetovému rozbočovači.[18].



Obrázek 4.2: Kamera Basler Blaze 101 [18]

Pořízení snímků kalibračních vzorů bylo provedeno pomocí kopírovacího stojanu Kaiser, na kterém byla 3D kamera připevněna pomocí stativového závitu. Kamera byla umístěna do vzdálenosti 35cm od podložky. Bylo zjištěno, že vzdálenost 35cm byla nejmenší možná vzdálenost, ze které bylo možné zaostřit a získat informaci o třetím rozměru.



Obrázek 4.3: Sestava s kamerou Basler Blaze

Pomocí této technologie bylo otestováno nasnímání kompilakovaného předmětu a tím je kulovitý předmět. Vyzkoušel jsem vytvořit jeden snímek ocelové kuličky ložiska o průměru 20mm. U kulovitého tvaru je problém při vytváření 3D skenu, jelikož kulovitý tvar vytvoří stín a dojde k naskenování pouze horní části koule a druhá polovina koule se bude jevit jako válec. Jedná se o obdobnou vadu jako je zmíněna v kapitole 3.3.2.

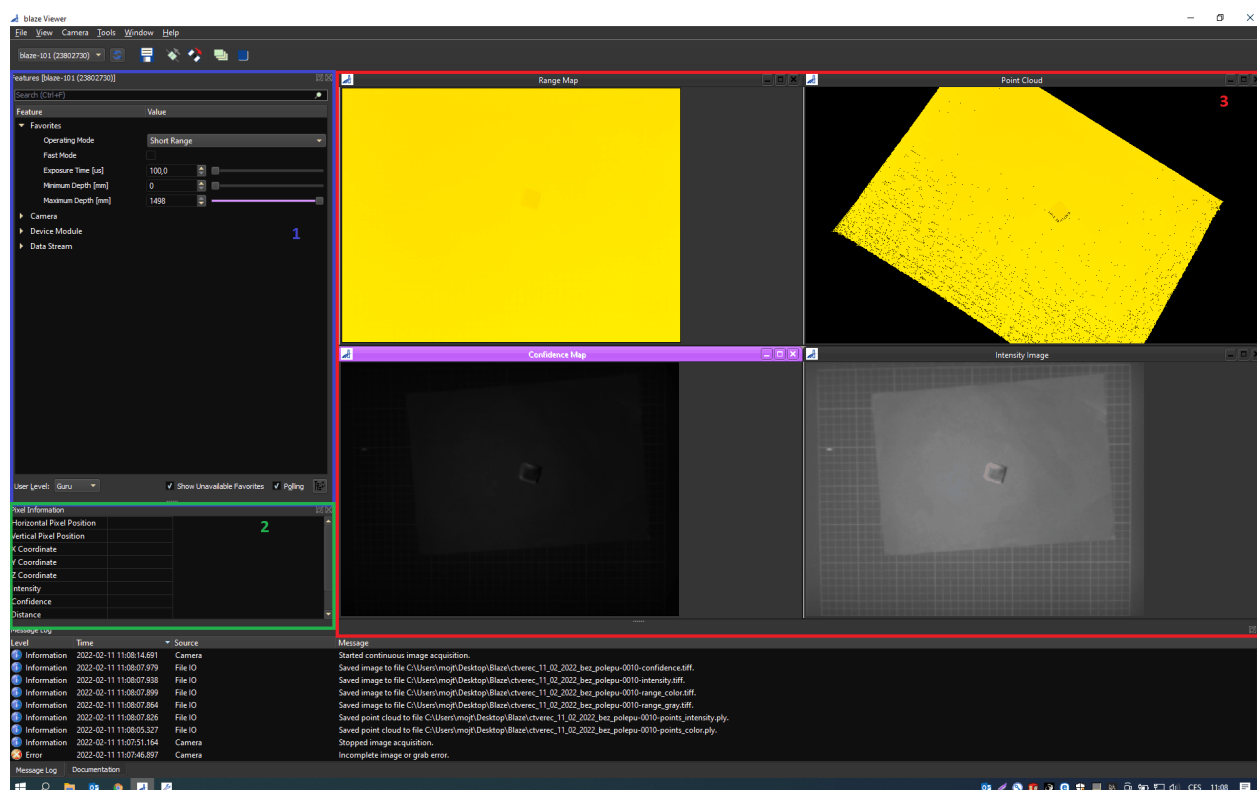
Snímky byly získány pomocí prostředí Basler Blaze Viewer, které slouží k nastavení základních parametrů kamery, jako je doba expozice popřípadě pracovní režimy Short range a Long range pomocí kterého má kamera pracovat viz. tabulka 4.1.

Tabulka 4.1: Pracovní režimy kamery Blaze

	Short range	Long Range
Rozsah	0.3 - 1.5 m	0.3 - 10 m
Přesnost	+/- 5mm	+/- 5mm

Zobrazovací prostředí kamery Basler Blaze je poměrně intuitivní a skládá ze tří základních

oken. První okno slouží k nastavení parametrů kamery, které je možné rozdělit podle uživatelské úrovně. Před začátkem samotného získání snímku je potřeba nastavit dva základní parametry. První parametr s názvem "Operating mode" slouží jak už z názvu vyplývá k nastavení pracovního režimu kamery. Pracovní režim má dva rozsahy, snímání předmětu do 1,5m od kamery nebo do 10m od kamery. Pro snímání kalibračních vzorů byl vybrán pracovní režim "Short range" jelikož byl snímán malý předmět z nejmenší možné pracovní vzdálenosti. Druhý parametr je nastavení doby expozice, jelikož zde není možné nastavit mechanickou clonu objektivu, pomocí které se reguluje množství dopadajícího světla na čip kamery. Tento parametr určuje po jakou dobu bude vystaven senzor kamery okolnímu světlu .



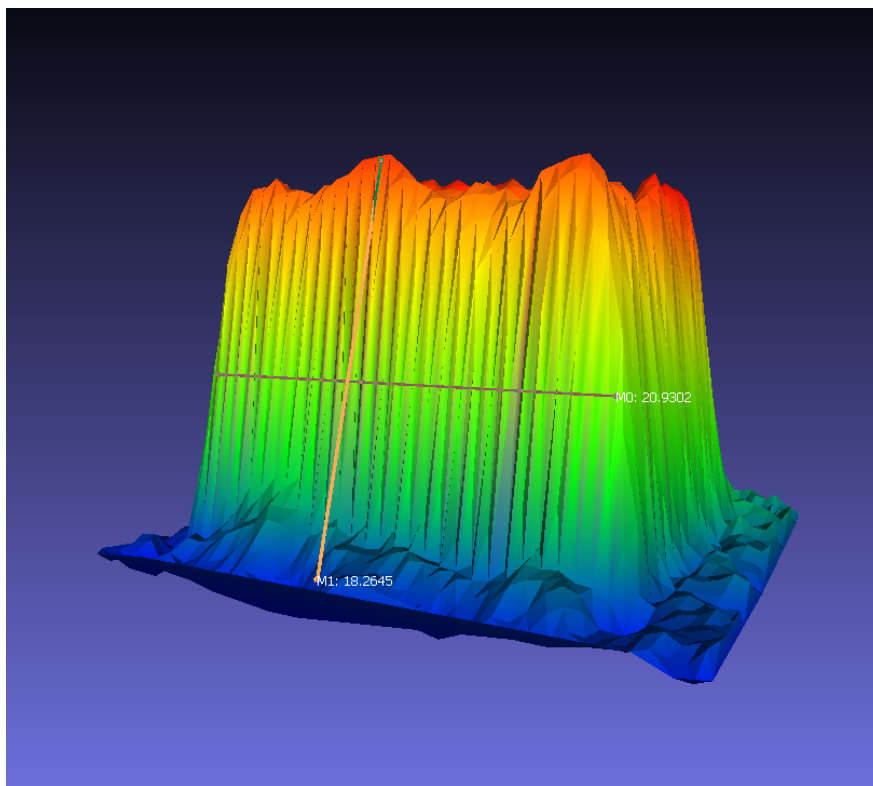
Obrázek 4.4: Zobrazovací prostředí Blaze Viewer

Druhé okno slouží k zobrazení parametrů bodu, který lze vložit do okna s naskenovaným objektem. Bod je možno umístit do jakéhokoliv místa naskenovaného předmětu a v okně se zobrazí souřadnice X,Y,Z bodu, intenzita světla v daném bodě s šestnáctibitovým rozlišením nabývající hodnot od 0 - 65535.

Třetí okno se skládá ze čtyř podoken, které slouží k zobrazení aktuálního zorného pole kamery. Okno s názvem "Range map" slouží k zobrazení třetího rozměru pomocí barevné mapy. Místo, které se nachází mimo rozsah měření je reprezentováno pomocí černé barvy. Druhé okno s názvem "Point cloud" jak už z tohoto názvu vyplývá slouží k zobrazení jednotlivých bodů rozmístěných v prostoru,

které reprezentují naskenovaný objekt. Další okno s názvem "Confidence Map" slouží k zobrazení mapy spolehlivosti jednotlivých pixelů obrazu s rozlišovací schopností 16 bitů. Tedy pro každý pixel je vypočítána hodnota spolehlivosti v rozmezí hodnot 0 až po hodnotu 65535. Mapa spolehlivosti představuje míru spolehlivosti jednotlivých hloubkových obrazových dat. Čím vyšší je hodnota, tzv. čím více světla dopadne na čip kamery, tím je měření spolehlivější. Poslední okno s názvem "Intensity image" slouží k zobrazení jasu odražených světelných pulzů od snímaného předmětu. Čím bude předmět blíže ke kameře, tím se zobrazí předmět jasnějšími pixely na tomto snímku.

Výsledný 3D model je možné z této kamery uložit jako soubor tvořený polygonovou sítí s RGB parametry jednotlivých bodů, které slouží k vytvoření barevné textury. Tato data jsou uložena do souboru s příponou .ply (polygon model file). Dále je možnost uložit snímky v rastrové grafice, které slouží pro uložení 3D modelu reprezentovaného pomocí barevné hloubkové mapy. Jedná se o uložení snímku, který byl na čelním panelu programu v okně s názvem Range Map.



Obrázek 4.5: Snímek kalibračního vzoru krychle.

Výsledný snímek z kamery Basler Blaze není při použití takto malého předmětu kvalitní, protože tato 3D technologie je vhodná pro snímání rozměrnějších předmětů, jako jsou například krabice v třídícím centru přepravních společností. Krabice se přesouvají po dopravním páse na třídící lince a kontroluje se jejich rozměr a přítomnost pro následné uspořádání do nákladových prostor přepravních zařízení.

4.2 Kamera s technologií laserové triangulace

Pro ověření snímací technologie laserové triangulace byla vybrána 3D kamera od společnosti Automation Technoly s označením C5. Tato kamera má rozlišení 2048 x 1088 pixelů a velikost jednoho pixelu 5,5 x 5,5 um. Použitou kamerou je možné vidět na obrázku 4.6 [19]. Tato kamera komunikuje a posílá data skrz Gigabitové Ethernetové rozhraní, kde jeden konec, který je připojen do kamery, je zokončen průmyslovým konektorem M12, a druhý konec kabelu je zakončen klasickým konektorem RJ45. K této kameře byl vybrán 5 Mpx C-mount objektiv od společnosti Computar s ohniskovou vzdáleností 35mm pro velikost čipu kamery až 2/3". Aby bylo možné zaostřit z menší pracovní vzdálenosti pomocí tohoto objektivu, byl použit 5 mm distanční kroužek. Zorné pole kamery bylo pomocí tohoto objektivu a distančního kroužku nastaveno na velikost skenovaného předmětu, aby byla zaručena větší přesnost.



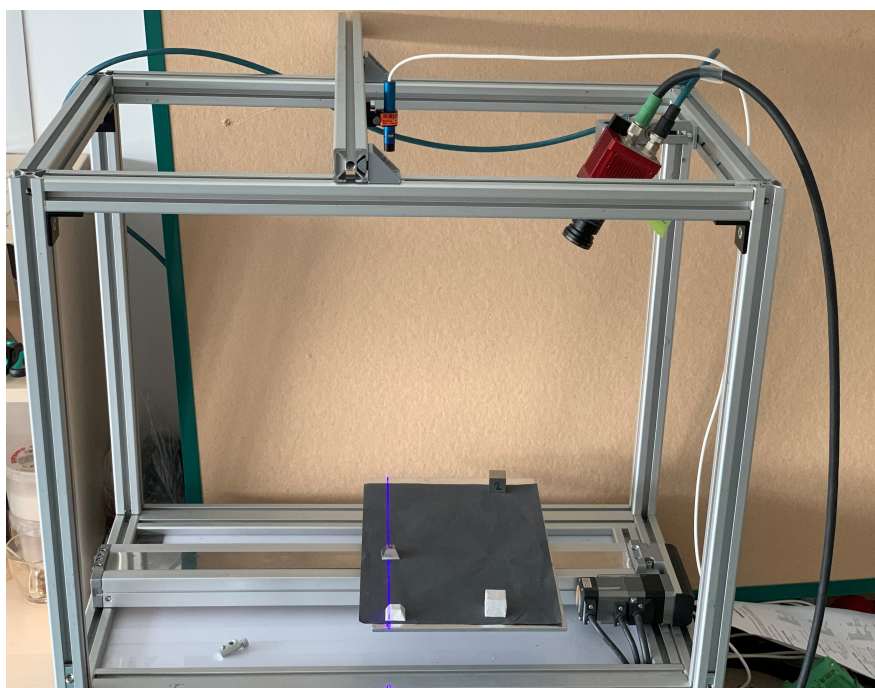
Obrázek 4.6: 3D kamera společnosti Automation Technology C5 [19]

U této technologie je nutné zajistit pevný úhel, který svírá kamera a laser. Dále, aby bylo možné zjistit třetí rozměr, je potřeba vytvořit pohyb předmětu pod sestavou 3D kamery a laserového paprsku. Jelikož se jedná prakticky o řádkovou kameru, není možné pořídit staticky snímek pomocí této technologie. Pohyb snímaných předmětů byl zajištěn pomocí sestavy vytvořené z hliníkových konstrukčních profilů, na který byl umístěn elektrický lineární posuv. Lineární posuv je od firmy Orientalmotor s lineární dráhou posunu 500mm. Napájení je zajištěno pomocí 24V spínaného zdroje, který slouží k napájení řídicí jednotky motoru. Ovládání řídicí jednotky motorů je zajištěno pomocí USB rozhraní připojeného k počítači. Posuv byl konfigurován pomocí programu MEX02, taktéž od společnosti Orientalmotor, který slouží pro základní nastavení parametrů řídicí jednotky motorů připojených skrz USB rozhraní. V případě řádkového skenování je velice důležité, aby byl zajištěn plynulý a kontinuální chod samotného motoru.



Obrázek 4.7: Použitý lineární posuv [20]

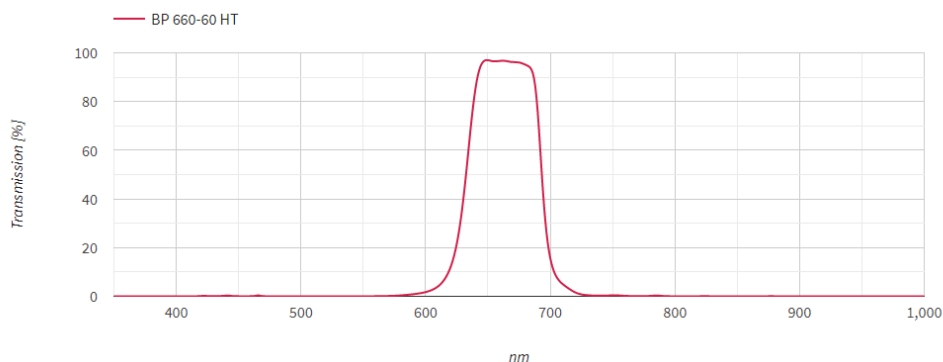
Na hliníkovou lesklou podložku, která je umístěna na posuvu, byla pro lepší výsledky snímání umístěna matná podložka z neodrazivého materiálu. Na tuto podložku byly umístěny skenované předměty, kalibrační vzory jehlanu a krychle viz. obrázek 4.8.



Obrázek 4.8: Sestava pro vytvoření snímků pomocí 3D kamery Autoamtion Technology

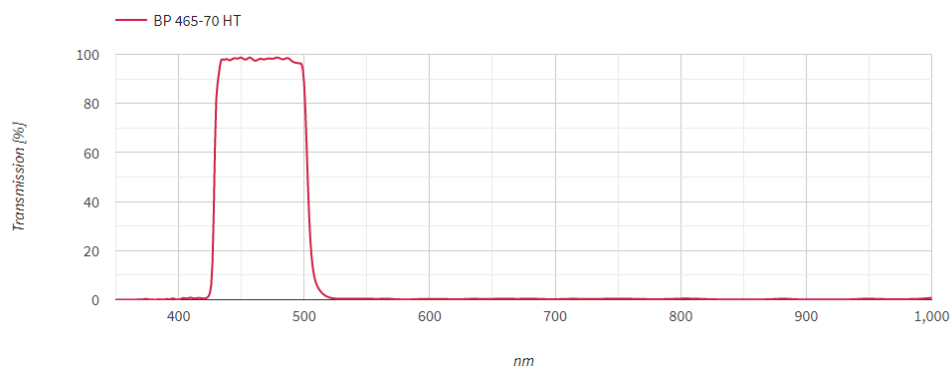
K pořízení snímků byly použity dva liniové lasery o různých vlnových délkách. Prve bylo pracováno s červeným laserem o vlnové délce 660nm a k tomuto laseru byl použit pásmový spektrální filtr, který byl umístěn na objektiv 3D kamery. Tento filtr slouží k eliminaci okolního světla a propouští

skrz objektiv na čip kamery pouze určité spektrum světla. Tím tolik nedochází ke zkreslení pruhu laseru a tím je zaručena lepší kvalita skenovaného objektu. Na obrázku 4.9 je vidět průběh vlnové délky v závislosti na intenzitě světla filtru typu pásmová zádrž. Tento filtr propustí vlnové délky od 630 nm do 690 nm což je ideální pro zvolený typ laseru, který má vlnovou délku 660nm.



Obrázek 4.9: Závislost intenzity světla na vlnové délce filtru BP-660 [21]

Dále byly pořízeny snímky pomocí liniového laseru o vlnové délce 450nm. K tomuto laseru byl taktěž vybrán filtr typu pásmová propust o vlnové délce 465nm. Tento filtr má rozsah 70nm, což znamená, že propouští vlnové délky od 430nm do 500nm. Průběh závislosti intenzity světla na vlnové délce je vyobrazen na obrázku 4.10. Díky tomuto filtru dopadnou na čip kamery pouze vlnové délky potřebné k rekonstrukci objektu.

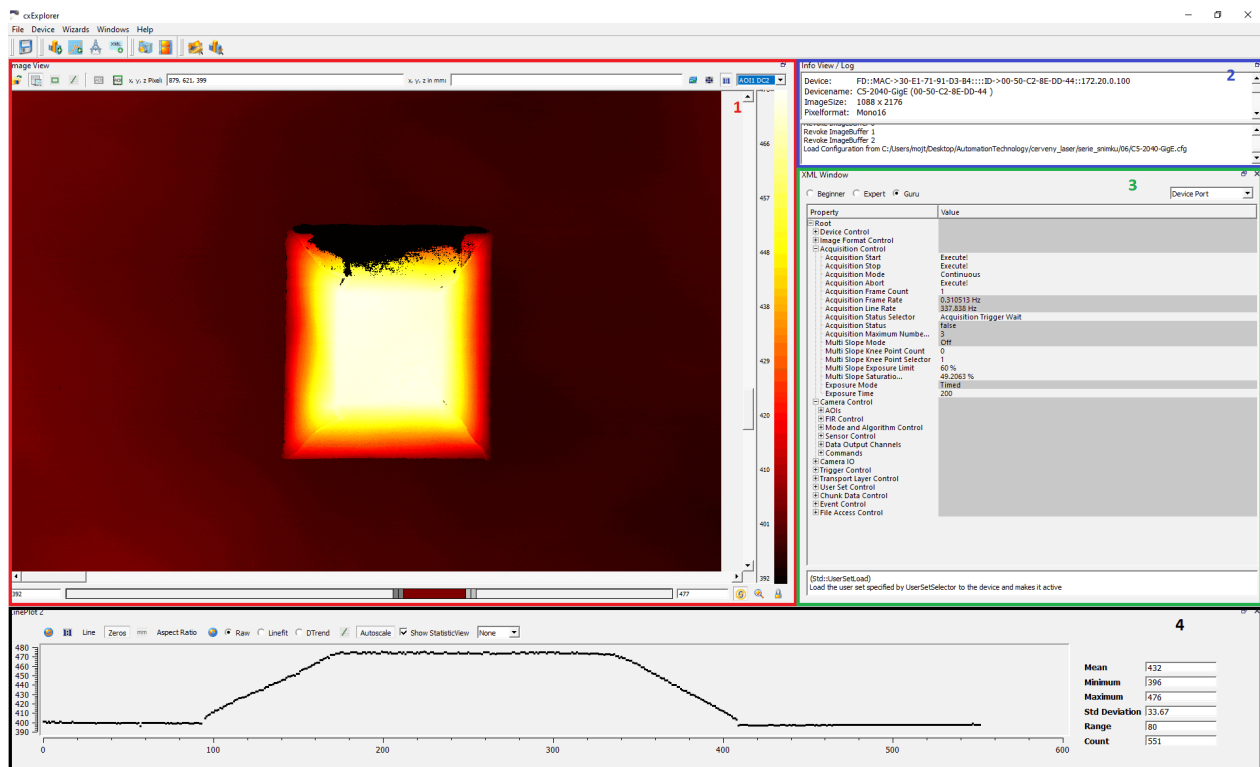


Obrázek 4.10: Závislost intenzity světla na vlnové délce filtru BP-465 [21]

Hlavním rozdílem mezi modrým a červeným laserem je, že modrý laser má vlnovou délku dále od viditelného spektra, a tím nedochází k ovlivňování snímaného předmětu viditelným červeným zářením, jak toho je u červeného laseru. Modré lasery jsou vybaveny modrou diodou, která má kratší vlnovou délku než laser s červenou diodou. Kratší vlnové délky světelného zdroje mají velkou výhodu, že u nich nedochází k průchodu paprsku snímaným objektem, a tím na povrchu vznikne ostrá linka.

Skenování objektu pomocí modrého laseru má velké uplatnění při skenování rozžhavených kovových předmětů, jelikož na tomto povrchu by standartní červený laser nebyl vidět.

K pořízení snímku pomocí této technologie byl použit software s názvem CXExplorer od stejného výrobce, jako je kamera. Tento software je sestaven ze čtyř základních oken viz. obrázek 4.11 . Okno č. 1 slouží k zobrazení nasnímaného objektu. Může zde být zobrazen výsledný 3D model, kde informace o hloubce jsou reprezentovány pomocí barevného modelu. Je možné vybrat z celé palety barev. Na obrázku 4.11 je použita paleta s názvem *flame*. U této palety nejtmavší odstín červené reprezentuje největší vzdálenost předmětu od kamery a žlutá až téměř bílá barva představuje předmět umístěný nejbliž k objektivu 3D kamery.



Obrázek 4.11: Programové prostředí CXExplorer

Okno s označením 2 slouží k informování uživatele o typu připojeného hardwaru a o jeho stavu, rozlišení kamery a výstupním formátu. Dále se v druhé části okna zobrazují informace o uložení nebo načtení konfigurace kamery. Třetí okno s názvem XML window slouží k nastavování parametrů kamery, ukládání a načtení konfigurace kamery.

V posledním čtvrtém okně s názvem LinePlot se zobrazuje orientační řez naskenovaným předmětem, který se zobrazí na základě nakreslené úsečky v okně s naskenovaným předmětem. V případě obrázku 4.11 byla přímka nakreslena skrz vodorovně naskenovaný komolý jehlan. V pravé části to-

hoto okna se nachází maximální, minimální a průměrné hodnoty nalezené při měření. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v milimetrech.

Před samotným pořízením snímků je potřeba nastavit snímací algoritmus. 3D kamery řady C5 umožňují pracovat v různých režimech detekce linie laseru. Pro tento případ snímání byl použit režim snímání COG (Center of Gravity). V tomto režimu se počítá těžiště profilu laserového paprsku. Pro výpočet tohoto těžiště se musí nejprve provést výpočet následujících hodnot: Prve je potřeba zjistit prahovou hodnotu intenzity laserového paprsku levého okraje P_L , dále součet hodnot intenzity podle:

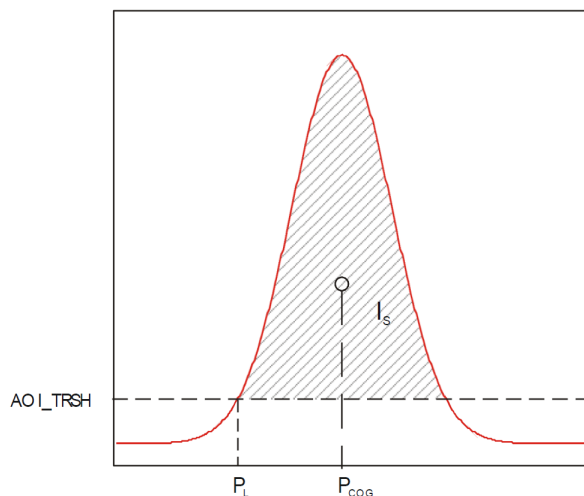
$$I_s = \sum I_P, \quad (4.1)$$

dále výpočet momentové charakteristiky prvního řádu:

$$M_s = \sum I_P * P. \quad (4.2)$$

Výsledná hodnota polohy laserové čáry (těžiště profilu laserového paprsku) se získá výpočtem:

$$P_{COG} = P_L + \frac{M_s}{I_s}. \quad (4.3)$$



Obrázek 4.12: Promítaný laserový paprsek v řezu pro výpočet těžiště.

Výsledek je zobrazen pomocí datového kanálu DC2, který slouží pro zobrazení 3D dat na základě vypočtené hodnoty těžiště laserového paprsku algoritmem COG.

Výsledný snímek 3D modelu je možné uložit do dvou formátů. První z nich je možnost uložení 3D modelu do formátu .xyz, který představuje data jako mračno bodů v prostoru. V tomto souboru jsou uloženy pouze hodnoty X, Y a Z jednotlivých bodů. Další možností je uložit data do formátu .stl, který 3D data reprezentuje pomocí trojúhelníkové sítě bez barvy a textury. Také jako u kamery

Basler Blaze je možno uložit výstupní data jako 2D obrázek v rastrové grafice, kde třetí rozměr (hloubka) je reprezentován ve stupních šedé.

4.3 Technologie fotogrammetrie

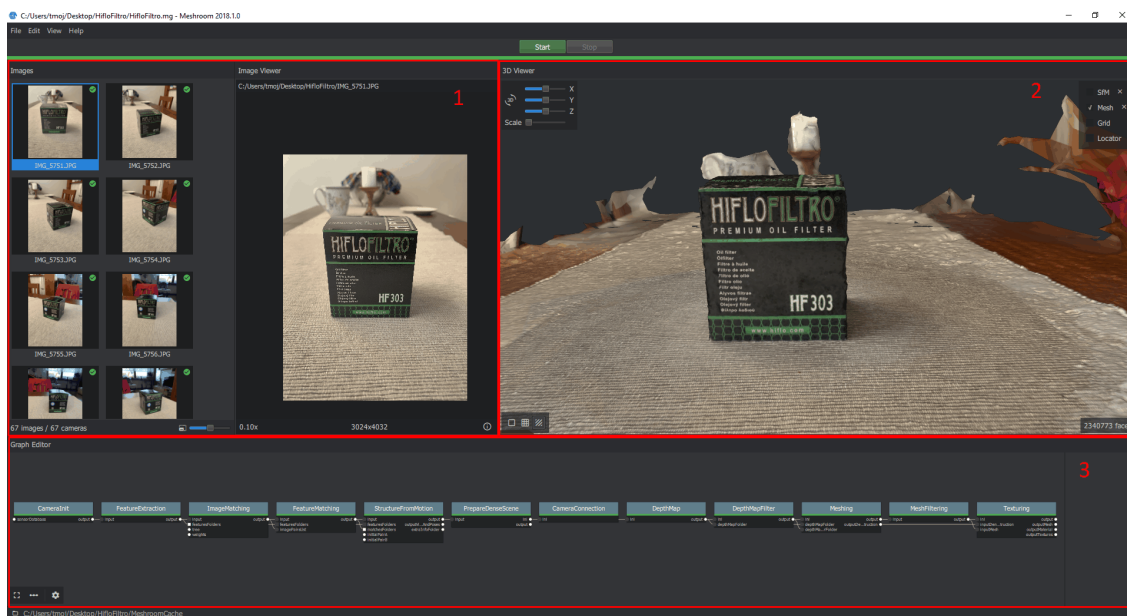
Tato technologie je poměrně zajímavá, jelikož není zapotřebí nikterak složité a drahé snímací zařízení, ale postačí pouze standartní průmyslová plošná 2D kamera nebo se použije standartní fotoaparát či mobilní telefon. Dále ale budeme potřebovat pro následující zpracování snímku, tak jak bylo již uvedeno v kapitole 3, dost výkonný hardware pro zpracování pořízených 2D snímků do 3D podoby.

Na rekonstrukci 2D snímků do 3D podoby bylo použito open-source software Meshroom od společnosti AliceVision, jak bylo již uvedeno v kapitole 2. Prve bylo provedeno nasnímání předmětu pomocí fotoaparátu z mobilního telefonu. Papírová krabice s potiskem byla umístěna na vhodnou podložku a po celou dobu snímání se předmět nesměl pohybovat, aby nedošlo k posunutí snímaného předmětu vůči pozadí. Na obrázku 4.13 je ukázka jednoho ze čtyřiceti 2D snímků, pomocí kterých se provedla rekonstrukce do 3D modelu.



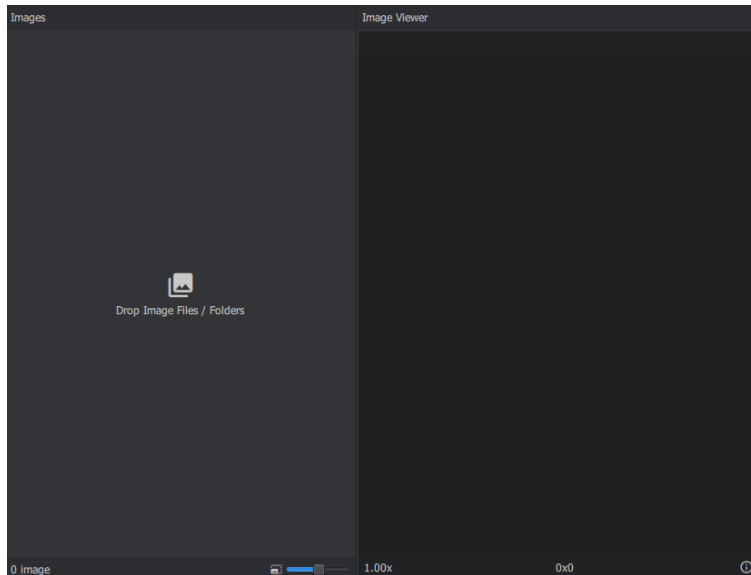
Obrázek 4.13: Ukázka 2D snímku krabičky pořízený pomocí mobilního telefonu

Software Meshroom se rozděluje na tři základní okna. První okno s názvem „Images“ slouží pro vložení všech pořízených fotografií zkoumaného předmětu. U jednotlivých fotografií se po provedení převodu zobrazí, jestli byla fotografie použita či nikoliv (zelená fajfka nebo červená pomlčka). Druhé okno s názvem „3D View“ slouží pro zobrazení 3D modelu s možností pohybovat 3D modelem v kartézském souřadnicovém systému. Poslední třetí okno „Graph Editor“ slouží pro úpravu sekvence výsledného 3D modelu viz. obrázek 4.14. V tomto okně je při založení nového projektu vytvořena základní programová sekvence, která se dá podle potřeby upravit.



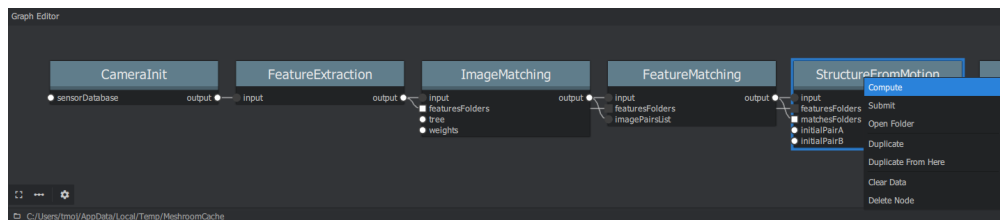
Obrázek 4.14: Popis aplikace Meshroom. 1. část pro nahrání 2D snímků, 2. okno zobrazující aktuální 3D model, 3. sekvence jednotlivých operací převodu

Prve do nově založeného projektu byly nahrány vytvořené fotografie skenovaného předmětu. To bylo uděláno pomocí přetažení všech fotografií ze složky s uloženým projektem do pole „Images“ viz. obrázek 4.15. Po načtení všech fotografií bylo ověřeno, kolik fotografií je použitelných pro rekonstrukci 3D modelu. To bylo provedeno pomocí funkce „StructureFromMotion“ z okna, „Graph Editor“ na kterou bylo kliknuto pravým tlačítkem myši a vybrána funkce „Compute“ (sloužící pro výpočet) viz. obrázek 4.16



Obrázek 4.15: Okno pro vložení 2D obrázků

Pokud po spuštění této funkce bude zjištěno, že u velké části fotografií, v okně „Images“ se zobrazí červená pomlčka, bude potřeba vytvořit fotografie nové. Fotografie, které budou označeny červenou pomlčkou, nebudou použity k rekonstrukci 3D modelu a tím dojde ke zhoršení kvality. V mém případě bylo vytvořeno 67 fotografií předmětu a všech 67 fotografií bylo použitelných pro následující rekonstrukci 3D modelu. Všechny fotografie jsou načteny a zkontrolovány, rekonstrukce byla spuštěna pomocí tlačítka „Start“, které je umístěno v horní části obrazovky. Doba rekonstrukce je závislá na vytvořeném počtu fotografií a výkonnosti počítače, ale může trvat klidně i několik desítek minut.



Obrázek 4.16: Spuštění kontroly vytvořených fotografií

Výsledek se základním nastavením je uveden na obrázku 4.17. Standartně program Meshroom vytváří 3D model ve formátu „OBJ“. Aby jsme dostali jako výsledek pouze mračno bodů například ve formátu „PLY“, je potřeba použít funkci pro převod formátů „ConvertSfMFormat“. Výstup funkce „StructureFromMotion“ spojíme se vstupem funkce pro převod, které nastavíme výstupní formát „PLY“. Po propojení a nastavení této funkce, označíme funkci pravým tlačítkem a zvolíme „Compute“.

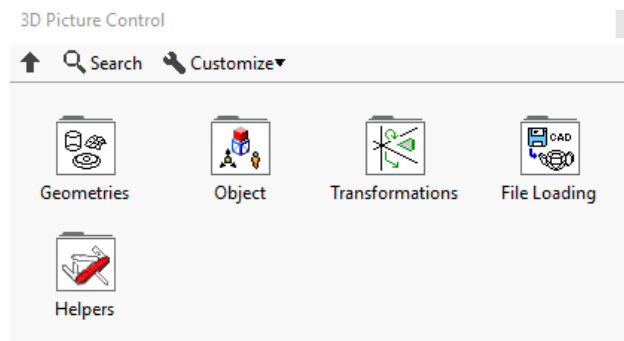


Obrázek 4.17: Výsledný 3D model krabice s texturou ve formátu „OBJ“

Výsledek nalezeneme ve složce, kterou otevřeme kliknutím pravým tlačítkem myši na danou funkci a zvolením položky „Open Folder“. Zde nalezneme soubor s názvem „sfm.ply“, jedná se o soubor, ve kterém se nachází souřadnice jednotlivých bodů a jejich RGB barevné hodnoty.

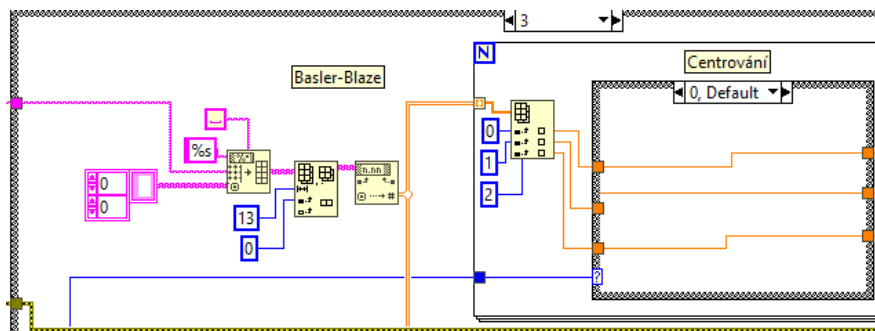
4.4 Porovnání získaných mračen bodů pomocí LabVIEW

V této kapitole se budu zabývat vytvořením aplikace v prostředí LabVIEW, která bude sloužit k zobrazení a srovnání získaných mračen bodů pomocí jednotlivých snímacích technologií. Tato aplikace umožňuje nahrát získaná data ze dvou zařízení do jednoho 3D zobrazovacího grafu. Pro práci s 3D daty jsem využil knihovnu „3D picture control“ z palety „Graphics & Sound“.



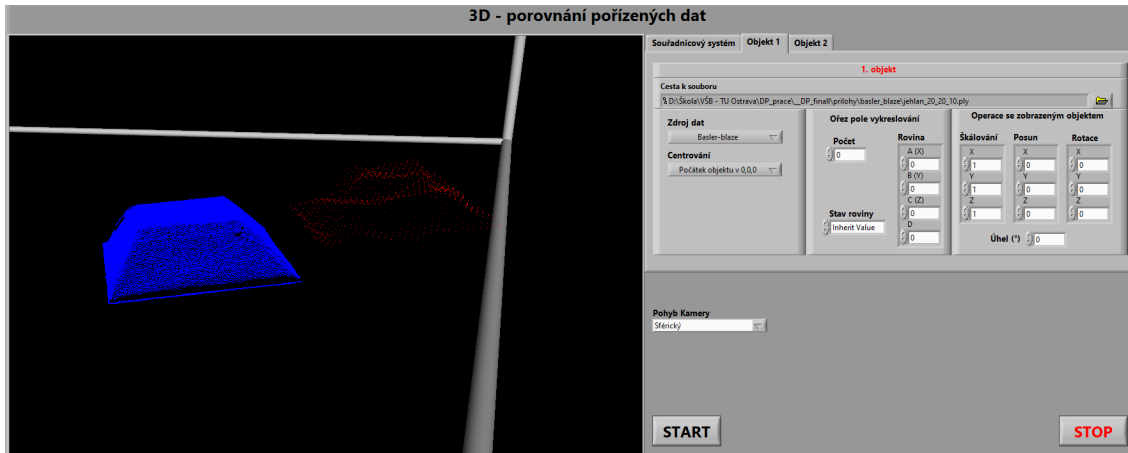
Obrázek 4.18: Knihovna 3D Picture Control „OBJ“

Díky tomu, že výstupní data z jednotlivých skenovacích technologií nemají stejnou unifikovanou strukturu datových souborů, bylo potřeba prve jednotlivé soubory s naměřenými daty dekodovat. Dekódování jsem provedl otevřením v libovolném textovém souboru a zjištěním jakou mají data strukturu. U některých souborů se na prvních několika řádcích může nacházet tzv. „hlavička“ souboru. Tato hlavička může obsahovat řádek s názvem formátu (.ply, .xyz), dále s typem formátu souboru, jestli jde o textový formát nebo binární, popřípadě barevné kódování jednotlivých bodů reprezentováno pomocí RGB stupnice. Nejprve jsem tedy zjistil kolik řádků má tato hlavička a tyto první tři řádky jsem odstranil, dále jsem zjistil, jak jsou odděleny jednotlivé souřadnice bodů. Některé typy souborů používají jako oddělovač bodů „X, Y, Z“ čárku, některé středník nebo třeba pouze mezeru. Na základě tohoto oddělovacího znaku jsem nastavil převod z datového typu „string“ do pole, díky kterému je možné dále jednoduše pracovat a provádět matematické operace. Po převodu do pole jsem nejprve toto pole zmenšil o hlavičku souboru, což v případě kamery Blaze bylo 13 řádků viz. obrázek 4.19. V případě technologie fotogrammetrie je u souboru „.PLY“ za jednotlivými souřadnicemi jednotlivých bodů také RGB hodnoty, které je nutné odstranit.



Obrázek 4.19: Struktura programu převodu a úpravy dat pro 3D kameru Basler Blaze

Dále se po načtení dat ze souboru vybere zdroj dat, podle toho z jaké technologie jsou data načteny. Dále se vybere způsob centrování, jestli bude objekt umístěn vůči souřadnicovému systému, tak jak byl nasnímán, nebo se posune počáteční bod do počátku souřadnicového systému. Poslední možností je umístit střed souřadnicového systému do vypočteného bodu těžiště objektu. Dále se na čelním panelu u každého načteného objektu nachází souřadnice „X, Y, Z“ každého z mračna bodů. Při vykreslování většího 3D modelu je možné oříznout jednotlivé roviny souřadnicového systému, aby jsme zpřehlednili výsledek zobrazený v souřadnicovém systému. Na obrázku 4.20 jsou načtena data ze dvou snímacích technologií do souřadnicového systému.



Obrázek 4.20: Porovnání získaných mračen bodů

Na obrázku 4.20 je ukázka načtených mračen bodů pořízených pomocí kamery Basler Blaze a Automation Technology. Už na první pohled je vidět, že data získané pomocí technologie laserové triangulace (modré mračno bodů) mají mnohem větší přesnost díky hustší síti oproti mračnu bodů pořízených pomocí technologie ToF.

4.5 Porovnání metod pro získání 3D dat

Stejně jako u získávání plošných 2D dat, je možné využít plošné nebo řádkové kamery, které se vzájemně doplňují, a každá z těchto technologií se používá pro různé aplikace. Obdobně je to v oblasti 3D, kde každá technologie je vhodná pro specifický typ aplikace. Každá z 3D technologií je založena na rozdílném principu získávání třetího rozměru a má různé výhody a nevýhody. Srovnání základních principů podle jednotlivých parametrů je uvedeno v tabulce [22].

	Stereovize	Strukturované světlo	Laserová triangulace	Time of Flight
Rozsah snímání	střední až velký	střední	malý	velký
Rozlišení	střední	střední	vysoké	vysoké
Složitost softwaru	vysoká	střední	vysoká	malá
Hloubková přesnost	střední až velmi přesné při krátkých pracovních vzdálenostech	střední až velmi přesné při krátkých pracovních vzdálenostech	velmi vysoká	střední
Kompatibilita v Real-Time aplikacích	špatná	špatná	špatná	dobrá
Chování při slabém osvětlení	špatné	dobré	dobré	dobré
Kompaktnost	střední	střední	špatná	dobrá
Materiálové náklady	střední	vysoké	vysoké	střední až vysoké
Celkové náklady	vysoké	střední až vysoké	vysoké	střední až vysoké

Tabulka 4.2: Parametry pro výběr vhodné 3D technologie [22].

Kapitola 5

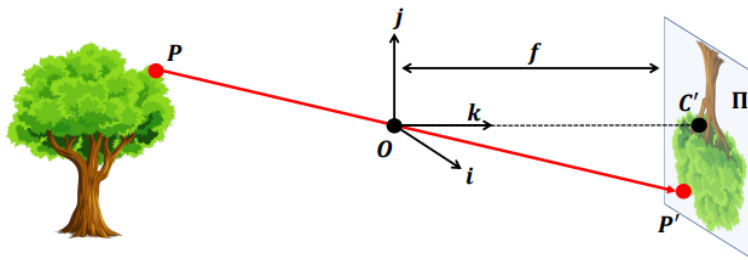
Ověření prostorových kalibrací pro jednotlivé snímací technologie

Při různých aplikacích nestačí pracovat s relativními rozměrovými daty. V těchto případech je potřeba provést kalibraci, která slouží k převedení relativních hodnot na hodnoty fyzické délky. Níže je popsán princip digitalizace obrazu a základní princip kalibrace. Praktické ověření kalibrace je provedeno pomocí technologie fotogrammetrie.

5.1 Digitalizace obrazu a jeho zkreslení

Pinhole camera neboli dírková komora, je historicky nejstarší způsob modelace obrazu. K omezení odražených paprsků ze snímaného 3D předmětu je použita clona s velmi malým otvorem ideálně pouze o velikosti jednoho bodu, kterým by se dostal světelný paprsek s informací na 2D plochu. Na obrázku 5.1 jsou zobrazeny parametry jednoduché dírkové komory. Parametr f představuje ohniskovou vzdálenost, což je vzdálenost mezi otvorem (clonou) a snímacím zařízením (například čipem kamery). Bod P představuje libovolný bod v 3D obraze a má parametry $P = [x, y, z]$. Tento bod P z 3D prostoru je převeden na 2D rovinu záznamového zařízení, kde vznikne bod $P' = [x', y']$. Na rovinu záznamového zařízení je taktéž zobrazen bod clony, který je reprezentován jako bod C' . Souřadnicový systém clony $[i, j, k]$ je označován jako souřadnicový systém kamery a střed toho souřadnicového systému bývá středem obrazové roviny. Pokud spojíme body O , C' a P' dostaneme trojúhelník, který je podobný trojúhelníku složený z bodů O , P a bodu $0, 0, z$, kde z představuje vzdálenost od středu obrazové roviny k objektu rovnoběžně s optickou osou. Pomocí těchto trojúhelníků je možné využít věty o podobnosti trojúhelníků, ze které se zjistí souřadnice obrazových bodů P' [23]:

$$P' = [x' y']^T = [f \frac{x}{z} f \frac{y}{z}]^T \quad (5.1)$$



Obrázek 5.1: Parametry dírkové komory [23]

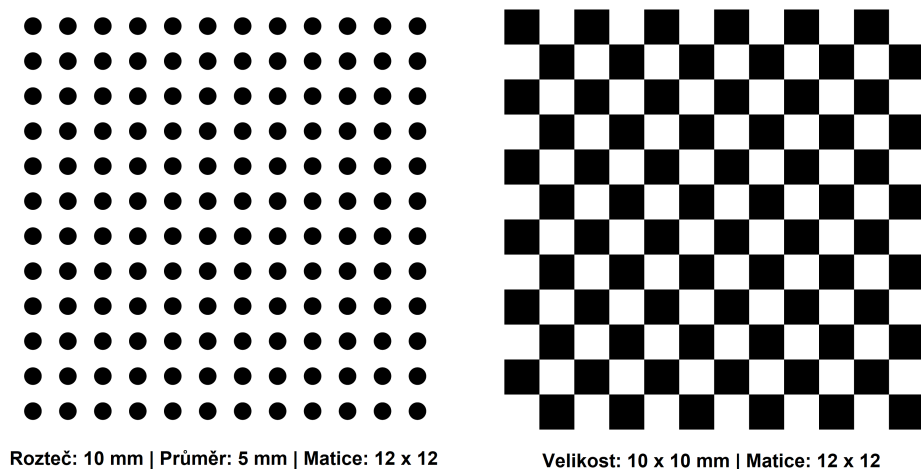
Princip dírkové komory vychází z faktu, že otvor ve cloně je o velikosti maximálně jednoho zobrazovaného bodu. V reálném případě ale není možné clonu s takovou velikostí clony vyrobit. Při zvětšování velikosti otvoru dopadá světlo z více bodů 3D předmětu a tím dochází k rozostření výsledného obrazu. Pokud bude otvor clony malý neprojde dostatek světla z reálného předmětu a obraz bude tmavý a hůř čitelný [23].

Na základě známé matice kamery a matice vnějších parametrů je možné vytvořit kalibrační proces. Kalibrace kamery spočívá v analýze obrazu několika fotografií kalibračního vzoru s předem známými parametry. Pro kalibraci se používají rovinné šachovnicové nebo kruhové kalibrační obrazy. U šachovnice je známý rozměr jednotlivých čtverců. U kalibračního vzoru s kruhy, je znám průměr těchto kruhů a rozteč mezi jednotlivými středy kruhů. Pomocí této kalibrace je možné zjistit zkreslení, které vzniká lomem světla v objektivu kamery. Rozdělujeme dva základní druhy zkreslení radiální a tangenciální zkreslení. Radiální typ zkreslení způsobuje, že rovné předměty jsou v obraze kamery reprezentovány jako zakřivené popřípadě značně deformované. Radiální zkreslení je největší na okraji obrazu, čím jsme blíže optickému středu, zkreslení téměř zanikne viz. obrázek 5.2. Jednotlivé typy radiálních zkreslení nesou název podle svého vzhledu.



Obrázek 5.2: Radiální zkreslení [23]

K tangenciálnímu zkreslení dochází, pokud nebudou čočky, z kterých je složen objektiv, správně vycentrovány (optické osy čoček objektivu musí být rovnoběžné s hlavní optickou osou). Pro korekci těchto zkreslení se používají kalibrační vzory, jako je například šachovnice nebo kalibrační vzor kruhových značek viz. obrázek 5.3.



Obrázek 5.3: Ukázka kalibračních vzorů. Vlevo matice kruhů, vpravo šachovnice.

Existují i další zkreslení, ale ty se týkají vad barevného spektra, jako je například chromatická aberace nebo vinětace. Vinětace je optická vada, která se projevuje nižším jasem světla na okrajích obrazu. Tato vada je často způsobena nedokonalostí čoček objektivu. Chromatická aberace je barevná vada čočky objektivu, kdy rozdílné vlnové délky světla mají rozdílný index lomu. Při průchodu světla čočkou dojde k jinému lomu a na výsledném snímku je tento efekt znázorněn jako barevné lemování mezi světlem a stínem. Tato barevná vada se dá eliminovat použitím objektivu, který má čočky vyrobeny z minerálu fluoridu vápenatého, který má velmi malý index lomu. Dále je možné použít difrakční elementy, které mají barevnou vadu přesně opačnou a tím dojde ke kompenzaci této barevné vady. Korekce těchto výše uvedených vad je možná pomocí použití kvalitnějších čoček nebo pomocí korekce obrazu. K těmto zkreslením dochází většinou u levných kamer a nebo kamer s velkým zorným polem. V dnešní době k těmto typům zkreslení nedochází v takové míře, které by mohlo ovlivnit výsledný obraz.

Linearizace obrazu se provádí pomocí korekce zkreslení bodů x a y . Pro korekci radiálního a tangenciálního zkreslení se nejčastěji používá Brown-Conradyho model. Korekce radiálního zkreslení se charakterizuje jako řada polynomů vyššího řádu[24].

$$x_{cor} = x \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \quad (5.2)$$

$$y_{cor} = y \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \quad (5.3)$$

V praxi z důvodu jednoduchých sestav čoček objektivů stačí počítat pouze s koeficienty k_1 a k_2 . Hodnota r se vypočte pomocí geometrického součtu souřadnic x a y :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.4)$$

Pro souřadnice x, y zkresleného bodu se provede korekce a bod se posune na nové souřadnice x_{cor}, y_{cor} .

Korekce bodů x, y tangenciálního zkreslení se provede pomocí následujících vzorců:

$$x_{cor} = x + [2p_1xy + p_2 \cdot (r^2 + 2x^2)] \quad (5.5)$$

$$y_{cor} = y + [p_1 \cdot (r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (5.6)$$

kde koeficienty k_1, k_2 a k_3 představují radiální zkreslení a koeficienty p_1 a p_2 představují koeficienty tangenciálního zkreslení.[24]

5.2 Kalibrace a výpočet 3D dat kamery Basler Blaze

Výrobce kamery Basler Blaze uvádí, že je každá kamera kalibrována již z výroby. Každá kamera má individuální kalibraci pro zkreslení objektivu, chybu měření vzdálenosti a kompenzaci teplotního driftu. Tato technologie umožňuje převést 16-ti bitové hodnoty hloubkové mapy šedé barvy na souřadnice Z v milimetrech pomocí následujícího vzorce:

$$z = gray2mm \cdot g[mm] \quad (5.7)$$

kde hodnota g představuje hodnotu šedého odstínu z hloubkové mapy, $gray2mm$ je hodnota parametru *Scan3dCoordinateScale*.

K výpočtu souřadnic X a Y slouží následující dva vzorce:

$$x = (u - cx) \cdot \frac{z}{f}[mm] \quad (5.8)$$

$$y = (v - cy) \cdot \frac{z}{f}[mm] \quad (5.9)$$

kde hodnoty u a v jsou sloupce a řádky v hloubkové mapě, f je parametr objektivu, respektive se jedná o ohniskovou vzdálenost objektivu použitého v 3D skeneru. Tato hodnota se nachází v parametru kamery "Scan3dFocalLenght". Hodnoty cx a cy jsou hodnoty parametrů "Scan3dPrincipalPointU" a "Scan3dPrincipalPointV", které představují hlavní bod v obraze [25].

Na základě souřadnic bodu x, y a z v milimetrech je možné zjistit vzdálenost bodu k optickému středu kamery pomocí vzorce:

$$d = \sqrt{x \cdot x + y \cdot y + z \cdot z} \quad (5.10)$$

Počátek souřadnicového systému se nachází v optickém středu kamerové soustavy, který je uvnitř krytu 3D skeneru. Pro lepší práci je možno použít souřadnicový systém, který je umístěn na přední straně 3D skeneru. Vzdálenost bodu od přední části krytu kamery je vypočtena pomocí vzorce:

$$d' = \sqrt{x \cdot x + y \cdot y + z' \cdot z'} \quad (5.11)$$

kde hodnota z' představuje novou vzdálenost vypočtenou od přední stěny kamery. Od souřadnice z je potřeba odečíst konstantu posunu (offset), která je uložena v parametru "ZOffsetOriginToCameraFront".

$$z' = z - z_{offset} \quad (5.12)$$

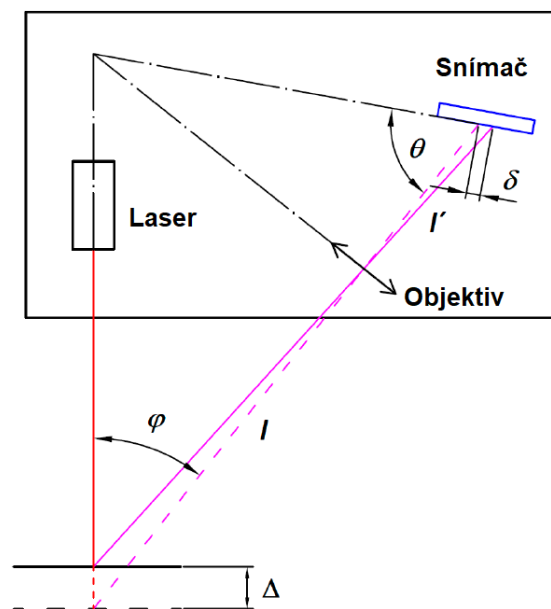
Tyto hodnoty se nastavují pomocí vytvořeného kódu například v programovacím jazyku C++ [25].

5.3 Kalibrace technologie laserové triangulace

Kalibrace této technologie se provádí za účelem převodu pixelových jednotek na jednotky využívané v běžném životě (např. milimetry). Kalibrace se provádí na předmětech s předem známým rozměrem. Červená přímka na obrázku 5.4 představuje promítaný laserový paprsek na snímáný předmět. Fialová přímka představuje odražený laserový paprsek od snímaného předmětu na snímač záznamového zařízení. Změna výšky snímaného předmětu se na záznamovém zařízení projeví jako posunutí laserového bodu či paprsku. Aby mohl být sledován pohyb laserového paprsku, musí být úhel mezi laserovým paprskem a osou objektivu nenulový. Vztah mezi polohou laserového bodu a posunutím obrazu δ je možné vyjádřit pomocí principu podobnosti dvou trojúhelníků [26]:

$$\delta = \frac{\Delta l' \cdot \sin \theta}{l \sin \theta \pm \Delta \sin (\varphi + \theta)} \quad (5.13)$$

Pokud dojde k posunutí předmětu k objektivu snímací soustavy, použije se ve vzorci pro výpočet posunutí bodu na záznamovém zařízení $+$. Pokud se předmět posune dál od snímače, použije se ve vzorci znaménko $-$.



Obrázek 5.4: Princip laserové triangulace [26]

Kamery od společnosti Automation Technology rozlišují dvě kalibrační metody. Jedna je pro kalibraci všech tří rozměrů a druhá s názvem statická je pro kalibraci pouze osy x a z . Plnohodnotná kalibrace se používá ke kalibraci triangulačního systému ve všech třech rozměrech a pro tuto kalibraci je potřeba kalibračního obrazce ve tvaru diamantu. Automaticky se pomocí tohoto kalibračního obrazce identifikují triangulační parametry a orientace mezi kamerou a laserem.

Statická nebo také jednorázová kalibrace se používá ke kalibraci triangulačního systému v příčném a výškovém rozměru. Pro tuto kalibraci je vyžadován pouze jeden snímek s promítaným laserem na kalibračním vzoru. Tato kalibrace je možná pouze u konfigurace, kdy bude osa světelného paprsku kolmá na snímáný objekt. Výhodou této kalibrace je, že nemusí být zajištěn pohyb snímaného předmětu. Tato metoda má nevýhodu, že je použitelná pouze pro jednoduchý tvar snímaného předmětu.

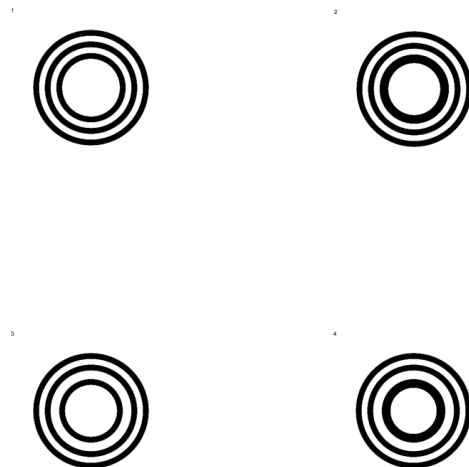
Starší modely 3D kamery umožňovali použití výše uvedených kalibračních metod přímo v aplikaci CXExplorer. Kde kromě těchto dvou metod bylo možné provést korekci objektivu pomocí tečkové matice nebo šachovnicového vzoru. Nasnímaný vzor by měl zabírat co největší plochu obrazu kamery. Vzdálenost mezi jednotlivými body nebo rozměr jednotlivých polí šachovnice by měl být 30 pixelů. Dále se do kalibračního průvodce přidá počet řádků a sloupců nasnímaného kalibračního vzoru a vybere se z nabídky o jaký model se jedná. V další části kalibrace se provede nastavení parametrů mezi dvěma vytvořenými snímky. Jelikož se jedná o statickou kalibraci, je potřeba zadefinovat vzdálenost mezi dvěma snímky v ose y , tato hodnota je uváděna v milimetrech. Dále je potřeba zapsat hodnoty v pixelech mezi okrajem snímku a kalibračním vzorem, a to jak pro pravou tak pro levou stranu. Tyto hodnoty vyčteme z grafu *LinePlot* vytvořeným pomocí řezu v ose

x. Pokud byla provedena korekce objektivu, je potřeba zadat počet bitů subpixelů z předchozího kroku. Na základě této kalibrace bude provedena korekce zkreslení použitého objektivu a převedeny pixelové hodnoty na hodnoty v metrických jednotkách[27].

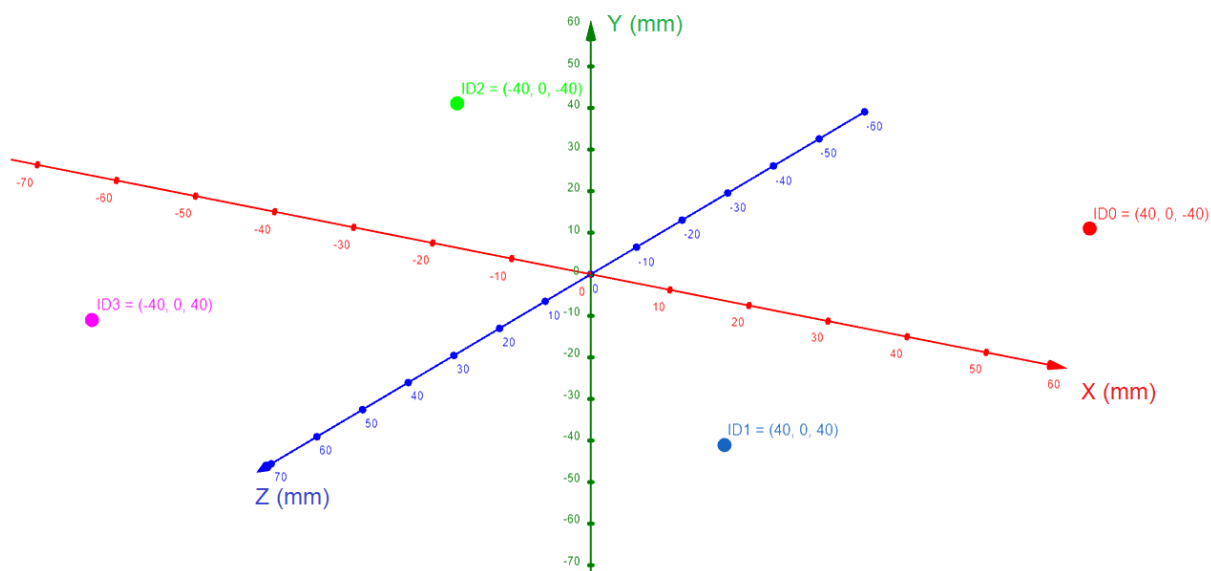
5.4 Kalibrace technologie fotogrammetrie

Pro kalibraci a škálování modelu pořízených pomocí technologie fotogrammetrie je potřeba použít kódové značky. Různé fotogrammetrické softwary využívají různé identifikační značky, například software Metashape využívá kódové značky tvořené kruhovou výsečí. Každý z použitých identifikačních značek musí být jedinečný a má taky svoje zakódované ID, podobně jak tomu je u 1D nebo 2D kódů například QR (Quick Response) kódy. Kalibrační značky se při vytváření snímků umístí do zorného pole kamery s předem známou roztečí, například umístění do čtverce nebo do kruhu. Daný software při rekonstrukci 3D modelu z pořízených fotografií dovede identifikovat kalibrační značku. Podle nastavených souřadnic jednotlivých kalibračních značek zjistí, jaká je mezi značkami vzdálenost v pixelech, a tu převede na nastavenou vzdálenost.

Fotogrammetrický software Meshroom využívá pro kalibraci snímků jedinečné kalibrační značky třech soustředných kruhů s názvem CCTAG. Tyto značky, jak je možné vidět na obrázku 5.5, mají rozdílné průměry a tloušťky jednotlivých kružnic. Tyto kalibrační značky mají díky rozdílným tloušťkám kruhů zakódované jedinečné identifikační číslo. Na základě tohoto identifikačního čísla přiřadí software souřadnice jednotlivým kalibračním bodům vůči nulovému počátečnímu bodu. V případě kalibrační kostky byly středy kalibračních bodů umístěny do čtverce o délce strany 80mm. Do středu tohoto čtverce byla umístěna kalibrační krychle o délce hrany 20mm.



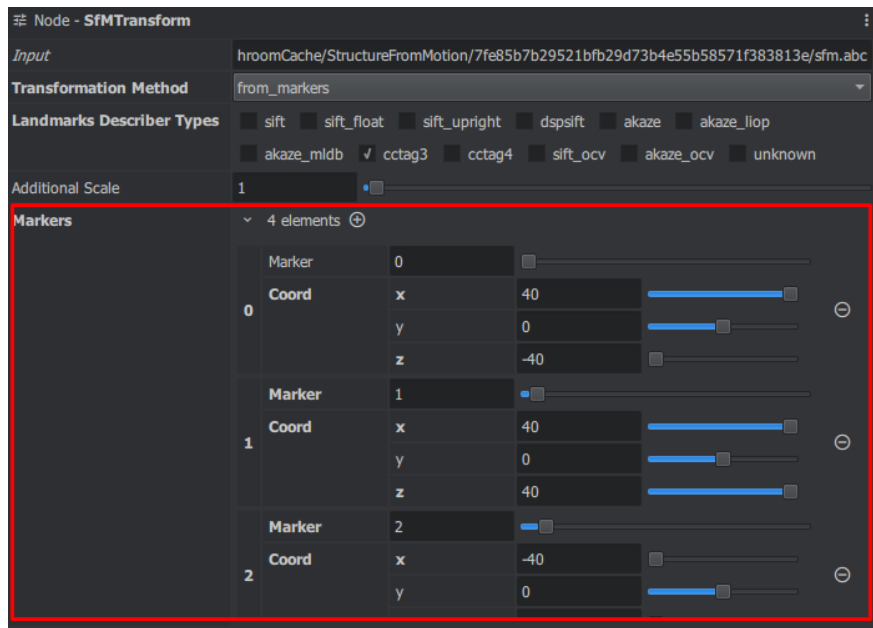
Obrázek 5.5: Kalibrační soustředné kruhy uspořádaný do čtverce 80mm x 80mm



Obrázek 5.6: Rozmístění bodů v 3D prostoru

V programu Meshroom byla pro kalibraci použita funkce s názvem SfMTransform. Díky této funkci byla použita transformační metoda z nalezených kalibračních značek v obraze. V této funkci byly přidány souřadnice všech čtyřech jedinečných kalibračních značek. Souřadnice jsou vztaženy k počátku souřadnicového systému, který se nachází uprostřed těchto soustředných značek viz. obrázek 5.6. Souřadnicový systém fotogrammetrie má zaměněny osy Y a Z, tedy osa Y v tomto případě představuje hloubku. Jelikož se kalibrační značky nacházejí v jedné rovině, je hodnota Y souřadnice každého bodu nulová.

Funkce SfMTransform byla vložena mezi funkce StructureFromMotion a PrepereDenseScene. V této funkci je potřeba nastavit transformační metodu z kalibračních značek. Dále bylo potřeba vybrat o jaký typ značek se jedná, tedy v tomto případě se jednalo o značky ctag3 (tři soustředné kruhové značky). V další části nastavení je potřeba přidat samotné čtyři značky. Do těchto čtyř značek je potřeba zadat jedinečné ID (číslo 0 - 3) a dále samotné souřadnice podle souřadného systému viz. obrázek 5.6. Nastavení souřadnic kalibračních značek a transformační metody je zobrazeno na obrázku 5.7. Souřadnice jednotlivých bodů jsou v milimetrech, výsledný model bude v milimetrových jednotkách.



Obrázek 5.7: Konfigurace funkce SfMTransform

Výsledkem této kalibrace je získání 3D modelu, který bude odpovídat reálným rozměrům. To je zajištěno pomocí přiloženého kalibračního listu, na kterém jsou značky soustředných kruhů umístěny s předem známou vzdáleností. Ověření této kalibrace bylo provedeno pomocí softwaru MeshLab, který umožňuje změřit libovolné body vytvořeného modelu viz. obrázek. Pomocí programu CloudCompare byl proveden ořez modelu od snímané podložky a vypočten objem pomocí funkce *Volume*. Díky tomu, že je snímáný model kalibrován v milimetrech, je výsledná hodnota objemu v milimetrech krychlových.

Kapitola 6

Ověření přesnosti a spolehlivosti snímání na jednotlivých površích

Jelikož v různých aplikacích se nacházejí různé druhy materiálů a spousty povrchových úprav, je poměrně důležité si uvědomit pomocí jaké technologie a jakého postupu získat 3D data. V dnešní době je na trhu spousta možností, jak bez poškození nebo jiného nevratného zásahu upravit povrch skenovaného předmětu. Jedním z nejrozšířenějších způsobů je použití sublimačního skenovacího spreje. Tyto spreje vytvoří na povrchu skenovaného předmětu tenkou matnou homogenní vrstvu (řádově $10\mu\text{m}$), která se po pár hodinách samovolně odpaří a není potřeba předmět ani jeho okolí důkladně čistit.

6.1 Druhy povrchů

Ideálním objektem pro 3D skenování je objekt, který je málo členitý, nemá velké množství malých detailů a nemá příliš velké plochy. Z hlediska samotného povrchu je dobré, aby rozhodně nebyl průhledný (skleněný), nejlépe matný s výraznější texturou. Při skenování členitých objektů, je dobré pohyblivé části pevně zajistit nebo pokud je to možné, úplně je demontovat. Skleněné a lesklé materiály je potřeba před samotným skenováním opatřit například práškovou křídou ve spreji popřípadě jiným antireflexním nástřikem, aby byl povrch neprůhledný a nedocházelo k odrazům světla. Čistě bílé povrchy velké rozlohy bez výrazných hran a textur je taktéž obtížné nasnímat. Při snímání různých materiálů narážíme na různé druhy povrchů. Může se jednat o lesklé či matné povrchy popřípadě o pórovité nebo hladké povrchy [28].

	Tmavý povrch	Lesklý povrch	Průhledný povrch
Typ povrchu			
Lom světla	Povrch absorbuje většinu světla	Odraz světla pod různými úhly	Většina světla prochází skrz povrch
Příklady	černé povrchy, pneumatiky, pryž	Kovy, zrcadlové povrchy, reflexní prvky	Sklo, čiré plexisklo

Tabulka 6.1: Základní druhy povrchů [28]

6.2 Ověření přesnosti pomocí kalibračních vzorů

Pomocí kalibračních vzorů, které byly použity v předešlých kapitolách této práce, bylo zjištěno, jak je důležité vybrat vhodnou povrchovou úpravu předmětu pro vytvoření snímků skenovaného předmětu. Jelikož jsou kalibrační vzory vyrobeny z oceli a následně s určitou přesností opracovány a zabroušeny, je jejich povrch poměrně hladký a hlavně lesklý. Toto je dost nevhodná kombinace, jelikož při téměř všech výše použitých technologiích je potřeba použít aktivního zdroje světla a nasvítit daný objekt. Na lesklých a hladkých materiálech dojde k velké odrazivosti světla a k přexponování dané scény, tím i ke ztrátě třetího rozměru a také k velmi nepřesnému vytvoření hran objektu.

Před samotným snímáním je potřeba upravit samotný povrch snímaného předmětu. Nejčastěji se pro úpravu povrchu využívají speciální antireflexní nástřiky, které snižují odrazivost povrchu. Touto úpravou se docílí lepší přesnosti výsledného 3D modelu. Pro demonstraci přesnosti snímání na jednotlivých površích byla zvolena kovová krychle. Jelikož se jedná o poměrně jednoduchý tvar, tak pro následnou povrchovou úpravu byla zvolena maskovací páska, pomocí které bylo možné jednoduše upravit povrch skenovaného předmětu viz. obrázek 6.1.

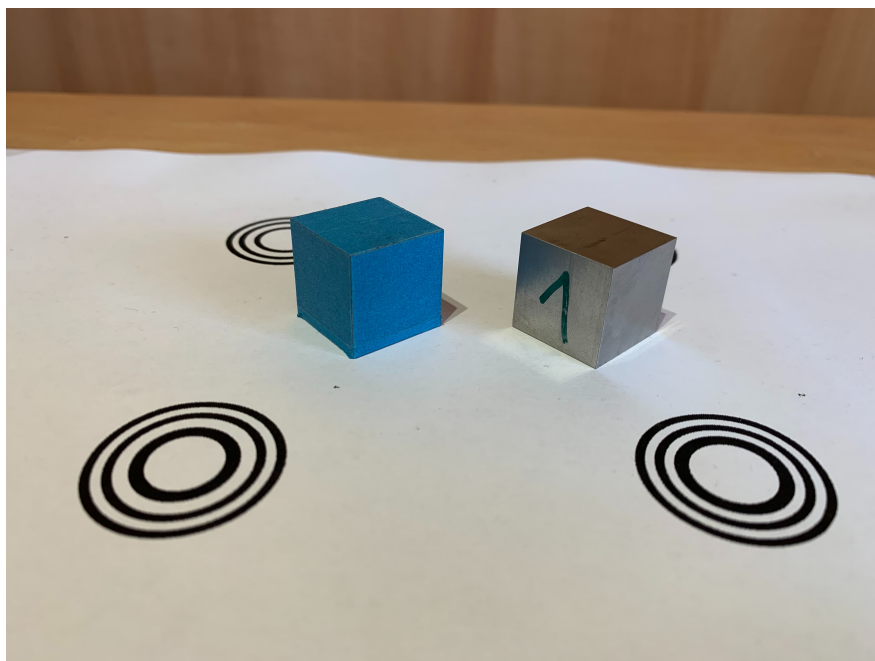
Použitá maskovací páska je modré barvy a zlepšila kontrast mezi podkladem s kalibračními soustřednými kruhy a jednotlivými stěnami snímané krychle. Hlavním úkolem této povrchové úpravy je eliminace odrazivosti povrchu a tím ke zlepšení kvality pořízených 3D modelů. K porovnání kvality na jednotlivých površích byla použita technologie fotogrammetrie. Pomocí pořízených 2D snímků byla provedena rekonstrukce do 3D oblasti programem Meshroom. Rekonstruovaný 3D model byl pomocí funkce *ConvertMesh* převeden do formátu *.stl*. Tato síť mračna bodů byla importována do programu *CloudCompare*, díky kterému je možné vypočítat objem tělesa. Objem reálného modelu s polepem a bez něj byl proveden ručním změřením rozměrů hran podstavy a výšky hrany krychle. Měření bylo provedeno posuvným měřidlem značky SOMET ČSN251231 s dělením stupnice 0,02mm a přípustnou odchylkou měření $\pm 0,03mm$. Z naměřených rozměrů byl dle vzorce pro výpočet objemu

tělesa krychle vypočten objem. Na základě vypočtených hodnot objemu naskenovaných modelů a vypočtených hodnot objemů reálných modelů byla vytvořena tabulka 6.2, ve které jsou srovnány hodnoty objemů a procentuální vyjádření odchylky 3D modelu od reálného modelu krychle. Hodnoty jsou srovnány jak pro krychli s polepem, tak bez polepu.

	Objem (mm^3)	Odchylka od modelu (mm^3)	Odchylka od modelu (%)
Model bez polepu	7952	-	-
Model s polepem	8390	-	-
Naskenovaný model s polepem	8243	147	1,75
Naskenovaný model bez polepu	5078	2874	36,14

Tabulka 6.2: Srovnání naměřených a vypočtených hodnot krychle.

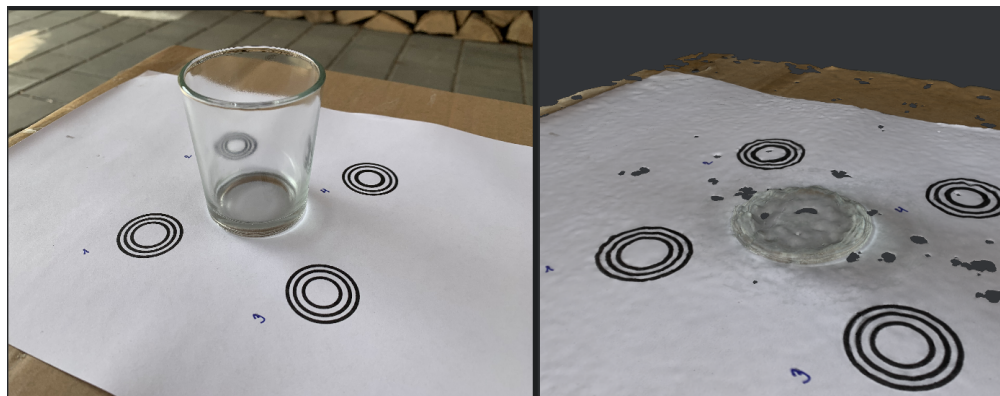
Z vypočtených a naměřených hodnot uvedených v tabulce 6.2 je vidět, že model opatřen maskovací páskou, má mnohem lepší výsledek než skenovaný objekt bez povrchové úpravy. 3D model krychle, který je opatřen maskovací páskou má objem oproti objemu reálného tělesa menší o 1,75%. 3D model, který je skenovaný bez povrchové úpravy, má povrch leskle kovový a jeho objem je o 36,14% menší než objem reálného tělesa.



Obrázek 6.1: Kalibrační krychle s různými povrchy.

Další ověření bylo provedeno na skleněné čiré sklenici pomocí stejné technologie. Jak už bylo zmíněno, skleněné respektive průhledné povrchy nejsou vhodné ke skenování. U těchto povrchů dochází k odleskům a v případě použití aktivní snímáči technologie průchodu aktivního světla snímaným objektem, které se nedostane na čip záznamového zařízení. Na obrázku 6.2 je vidět,

že při vytváření 3D modelu došlo pouze k rekonstrukci ve formě kruhu, který nemá odpovídající hodnotu třetího rozměru.



Obrázek 6.2: Rekonstrukce 3D modelu sklenice.

Kapitola 7

Nasazení závěrů teoretického a praktického rozboru v průmyslové oblasti s využitím LabVIEW

V této kapitole bude popsána úloha s použitím 3D snímací technologie a následným zobrazením snímků pomocí aplikace vytvořené v programovém prostředí LabVIEW, která byla vytvořena v kapitole 4.4. V průmyslové oblasti je dost odvětví, kde kontrola pomocí 2D plošné nebo řádkové kamery je nedostatečná a je potřeba použít technologie s informací o třetím rozměru.

7.1 Kontrola cínových spojů elektrického polotovaru

V této průmyslové úloze je úkolem provádět kontrolu cínovaných spojů. V této úloze nepostačovala kontrola pomocí klasické plošné kamery, protože pomocí plošné kamery není možné zjistit množství cínu na cínovaném spoji. Díky 3D snímací technologii je možné zjistit třetí rozměr a tím i samotnou výšku cínovaného spoje. Jelikož se jedná o studii proveditelnosti, která byla provedena pro společnost ATEsystem s.r.o., není zde možné uvádět bližší informace a fotografie z tohoto testování.

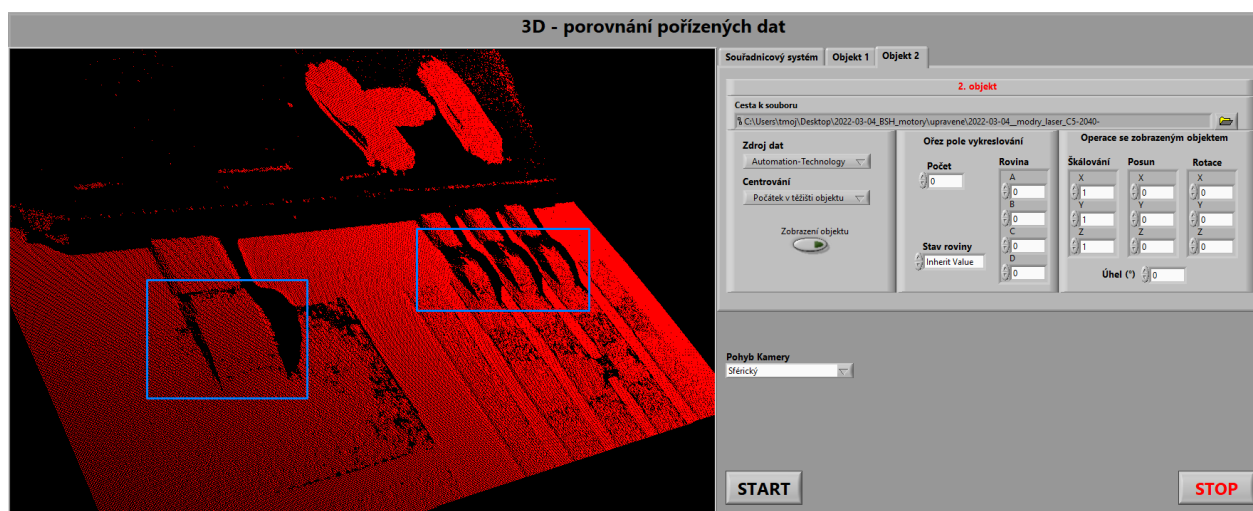
7.2 Použitá snímací technologie

Jelikož cínovaný spoj je velmi malého rozměru, byla pro tuto úlohu použita 3D technologie laserová triangulace viz. kapitola 4.2. K vytvoření 3D modelu řady cínových spojů byla použita kamera od společnosti Automation Technology společně s modrým líniovým laserem o vlnové délce 450nm. Pro odfiltrování okolního světla, které by mohlo vytvářet na cínovaném spoji odlesky a ty by dále zachytila kamera, byl použit optický filtr typu pásmová zádrž o podobné vlnové délce jako je vlnová délka laseru, tedy 465nm. Tento filtr má šířku pásma, které propustí dále na čip kamery 70nm, tedy propustí světlo o vlnové délce v rozsahu od 430nm - 500nm viz. obrázek 4.10. Jelikož je tato

metoda založena na sledování výšky laseru, bylo potřeba zajistit pohyb snímaným předmětem pod tímto líniovým laserem. Pohyb byl zajištěn pomocí stejného lineárního elektrického pojezdu jako v kapitole 4.2.

7.3 Kontrola snímků pomocí aplikace LabVIEW

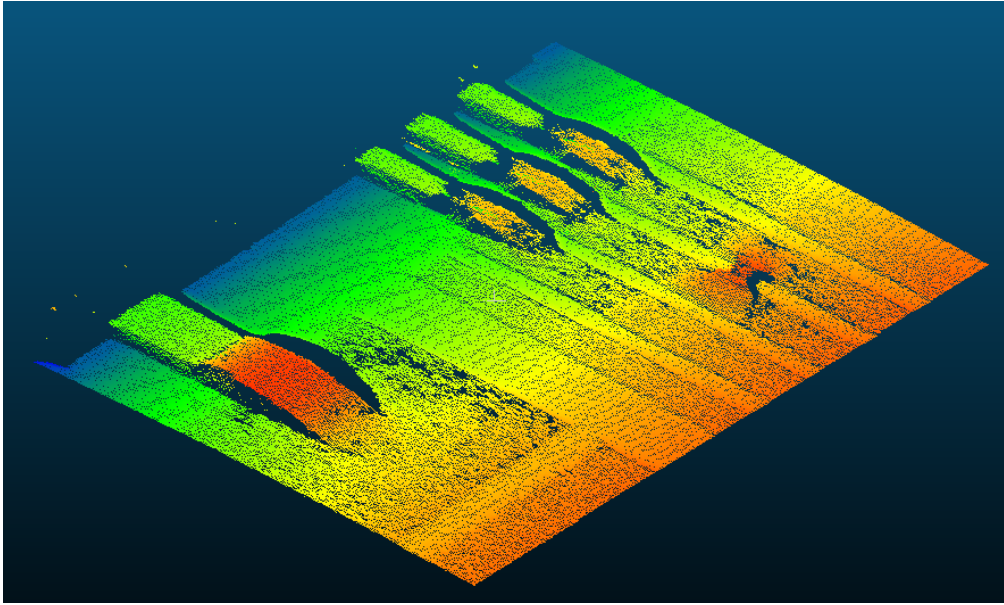
Vytvořené snímky byly uloženy a následně importovány do aplikace vytvořené pomocí programového prostředí LabVIEW. V této aplikaci je možno pohybovat naskenovaným objektem v kartézském souřadném systému, přiblížit mračno bodů a dále provádět základní úpravy. K úpravě rozměrů mračna bodů v jednotlivých osách slouží manuální škálování. Pokud by existoval model tohoto výrobku, bylo by možné tvar a velikost těchto cínovaných spojů srovnat s tímto modelem a zjistit jak se liší cínovaný spoj od reálného.



Obrázek 7.1: Zobrazení 3D modelu v aplikaci LabVIEW.

Na obrázku 7.1 je zobrazen naskenovaný model ve vytvořené aplikaci pomocí programového prostředí LabVIEW. Modrými obdélníky jsou zvýrazněny kontrolované cínové spoje. V levém obdélníku se nachází jeden větší cínový spoj a v pravém obdélníku se nachází tři menší cínové spoje. Pomocí vytvořené aplikace je možné modelem pohybovat v prostoru a opticky zjistit popřípadě srovnat mračno bodů z jiným mračnem bodů.

Pro ukázkou byl nasnímaný model zobrazen v aplikaci Meshlab, kde výšková hodnota je reprezentována pomocí barevné hloubkové mapy. Reprezentace pomocí barevné hloubkové mapy je lépe čitelná lidským okem.



Obrázek 7.2: Repräsentace mračna bodů pomocí barevné hloubkové mapy v prostředí CloudCompare.

Kapitola 8

Závěr a zhodnocení

Cílem této práce bylo vytvoření rešerše jednotlivých snímacích metod pro získání 3D dat a jejich praktické ověření. Diplomová práce obsahuje rozřazení jednotlivých snímacích metod do kategorií. V práci jsou popsány jednotlivé principy získávání 3D dat. Vzhledem k tomu, že je skupina optických skenovacích metod poměrně obsáhlá, vybral jsem některé nejpoužívanější metody, které jsem prakticky ověřil nasnímáním kalibrační krychle a komolého jehlanu. K porovnání získaných mračen bodů jsem vytvořil aplikaci v programovém prostředí LabVIEW. Ve vytvořené aplikaci je možno zobrazit dvě mračna bodů získané pomocí různých snímacích technologií. V další části diplomové práce jsem se zabýval optickými aberacemi a jejich kompenzacemi, které jsou nedílnou součástí téměř všech objektivů. Pro reprezentaci objektu v metrických jednotkách, jsem provedl kalibraci technologie fotogrametrie. Jelikož nejsou vždy všechny povrchy ideální pro snímání optickými skenery, provedl jsem porovnání přesnosti snímání na různých površích, které jsem porovnal na základě vypočteného objemu snímaného tělesa. V poslední části jsem skloubil teoretickou a praktickou část, kterou jsem uplatnil na získání 3D dat z cínovaného spoje.

Závěrečnou práci by se dalo rozšířit o ověření jiných metod pro získání 3D dat a jejich možnosti kalibrací. Vytvořenou aplikaci pro porovnání získaných mračen bodů by se dalo rozšířit o měření rozměrů jednotlivých dat, popřípadě další matematické operace, jako je třeba výpočet objemu nasnímaného objektu.

V diplomové práci jsem uplatnil znalosti, které jsem získal jak během studia, tak i při realizaci bakalářské práce, která probíhala formou bakalářské praxe zabývající se oblastí strojového vidění. Předměty absolvované během studia, které se zaměřovaly na programování v prostředí LabVIEW a zpracování obrazu pro strojové vidění, byly velice přínosné. Diplomová práce mě obohatila o zkušenosti v oblasti získání 3D dat, kde nestačí použití standartních snímacích metod. Dále jsem získal zkušenosti se zobrazením 3D dat v prostředí LabVIEW.

Literatura

1. *Reverzní inženýrství* [online] [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://protolab.cz/reverzni-inzenyrstvi/>.
2. VLACH, Jaroslav; HAVLÍČEK, Josef; VLACH, Martin. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
3. *MVTec Halcon* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.mvtec.com/products/halcon>.
4. *Ukázka vývojového prostředí HALCON* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: https://www.mvtec.com/fileadmin/Redaktion/mvtec.com/products/halcon/newest_features/halcon_2011_hdevelop_facelift_dark.png.
5. *Meshroom* [online] [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/index.html%5C#>.
6. *3D skenování* [online] [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/>.
7. *Srovnání formátů* [online] [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221209194_A_Surface_Displaced_from_a_Manifold/figures?lo=1.
8. BELLOCCHIO, Francesco; BORGHESE, N. Alberto; FERRARI, Stefano; PIURI, Vincenzo. *3D Surface Reconstruction: Multi-Scale Hierarchical Approaches* [online]. New York, NY: Springer New York, 2013 [cit. 2021-11-30]. ISBN 978-1-4614-5632-2.
9. *Standartní souřadnicové měřicí stroje* [online] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.mitutoyo.com/products/coordinate-measuring-machines/standard-coordinate-measuring-machines/crysta-apex-v500-700-900/>.
10. *CT skenování* [online] [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/ct-skenovani/>.
11. *Optické metody měření 3D objektů* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>.
12. *Time of Flight* [online] [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera.

13. *Stereoaktivní metoda* [online] [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.zivid.com/3d-vision-technology-principles?hsLang=en>.
14. *Optické metody měření 3D objektů* [online] [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>.
15. *Parts of a Stereo Vision System* [online] [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372916T-01/nivisionconcepts/stereo_parts_of_a_stereo_vision_system/.
16. *Epipolární geometrie* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Epipolar_geometry%5C#/media/File:Epipolar_geometry.svg.
17. *Fotogrammetrie* [online] [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu_7811/.
18. *Basler* [online] [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/3d-cameras/basler-blaze/blaze-101/>.
19. *Automation Technology* [online] [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.automationtechnology.de/cms/c5-serie/>.
20. *Elektrický lineární posuv* [online] [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://catalog.orientalmotor.com/item/ezs-reversed-motor-type-linear-slides-az-dc/ezs4r-reversed-motor-type-linear-slides-az-dc/ezsm4le050azmk>.
21. *Spektrální filtr* [online] [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://schneiderkreuznach.com/en/industrial-optics/filters-bandpass>.
22. *2D or 3D Camera? Which 3D Camera Technology Fits Your Application?* [Online] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://www.baslerweb.com/fp-1575982966/media/en/downloads/documents/white_papers/BAS1909_White_Paper_3D_Technologies.pdf.
23. *Camera Models* [online] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://web.stanford.edu/class/cs231a/course_notes/01-camera-models.pdf.
24. *Brown-Conrady* [online] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://www.tangramvision.com/blog/camera-modeling-exploring-distortion-and-distortion-models-part-ii%5C#brown-conrady>.
25. *Basler Blaze výpočty* [online] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://docs.baslerweb.com/processing-measurement-results>.
26. HOŠEK, Jan; LINDUŠKA, Petr. Simple Modification of a Commercial Laser Triangulation Sensor for Distance Measurement of Slot and Bore Side Surfaces. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2021-10, roč. 21. Dostupné z DOI: 10.3390/s21206911.

27. *CX Camera Calibration* [online] [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/12/122192-Automation_Technology_AppNote_CX_Calibration.pdf.
28. *Skenování povrchů* [online] [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://gomeasure3d.com/blog/scan-dark-shiny-clear-surfaces-3d-scanner-video-demo/>.

Příloha A

Přílohy v IS EDISON

Všechny přílohy jsou připojeny v elektronické podobě v informačním systému EDISON.

Adresář příloh obsahuje podadresáře:

- aplikace_LabVIEW: adresář obsahující aplikaci pro porovnání získaných dat
- 3D_data: adresář, který obsahuje 3D data získané pomocí použitých technologií
- kalibracni_vzory: adresář, obsahující modely kalibračních modelů