



Zadání diplomové práce

Název:	Způsoby přesného snímání 3D objektů pro strojové vidění v průmyslu
Student:	Bc. Veronika Dolanská
Vedoucí:	Ing. Jakub Novák
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Znalostní inženýrství
Katedra:	Katedra aplikované matematiky
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2022/2023

Pokyny pro vypracování

Cílem práce je zmapovat možnosti přesného snímání trojrozměrných objektů pomocí technologií používaných v průmyslových aplikacích. Jedná se především o způsob využití laserových technologií, specifikace metodiky jejich použití, vhodnost použití z pohledu přesnosti, limitace materiálem a možnosti zlepšení výsledných nasnímaných 3D dat.

Úkoly:

- 1) Proveďte rešerši v oblasti metod přesného snímání technologiemi s využitím laseru.
- 2) Sestavte měřicí kamerový systém pro snímání materiálu.
- 3) Vytvořte metodiku měření včetně specifikace vhodnosti technologií a způsobů snímání.
- 4) Navrhněte algoritmy jak pro práci s technologií, tak pro úlohy měření.
- 5) Otestujte výsledky na průmyslových úlohách měření rozměrů.
- 6) Vizualizujte a diskutujte výsledky.



**FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLGIÍ
ČVUT V PRAZE**

Diplomová práce

Způsoby přesného snímání 3D objektů pro strojové vidění v průmyslu

Bc. Veronika Dolanská

Katedra aplikované matematiky
Vedoucí práce: Ing. Jakub Novák

3. ledna 2023

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Jakubu Novákovi za cenné rady a konstruktivní kritiku ohledně vypracování a psaní práce. Velké díky také patří Bc. Aleksandrovi Bazko pomoc se sestavením snímací konstrukce a ImproLabu za zapůjčení potřebné techniky. Nakonec poděkování patří i mým blízkým za morální podporu nejen v těch nejtěžších chvílích.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 2373 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů, tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu) licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 3. ledna 2023

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2023 Veronika Dolanská. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Dolanská, Veronika. *Způsoby přesného snímání 3D objektů pro strojové vidění v průmyslu*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2023.

Abstrakt

Práce se zabývá technikami přesného snímání 3D objektů v průmyslových aplikacích, zejména technikou laserové triangulace. Byla analyzována přesnost snímání v závislosti na materiálu snímaného objektu, geometrie a úhlu mezi kamerou a laserem, a barvě laseru.

Pro laserový profiler byla vytvořena univerzální snímací soustava s otočnými rameny. Analýza přesnosti byla provedena pomocí čtyř experimentů, ve kterých byl využit algoritmus RANSAC. V některých případech byla využita korekce rotovaných profilů a pro vyhodnocení metrika RMSE.

Při měření vlivu materiálu snímaného objektu bylo dosaženo nejlepších výsledků u matné mědi a dřeva, kdy maximální chyba naměřených rozměrů kostek byla 0,4 mm. Nejvyšší přesnosti při snímání dřevěné koule bylo dosaženo při laseru mířícím shora a kamery z boku, úhlu mezi kamerou a laserem o velikosti 30° a červenou barvou laseru, kdy byla chyba naměřeného poloměru koule 1 mm a RMSE 0,3458.

Nejvyšší přesnosti laserového profileru bylo dosaženo při snímání matných dřevěných objektů v geometrii 1 (laser shora, kamera z boku) s úhlem 30° a červeným laserem.

Klíčová slova počítačové vidění, 3D snímání, 3D měření rozměrů, laserová triangulace, laserový profiler, RANSAC

Abstract

The diploma thesis deals with precise 3D measuring techniques in industry use. The thesis is focused on the laser triangulation technique. The influence of scanned object material, laser triangulation geometry, the angle between camera and laser and laser color on the precision of measurement were analyzed.

A universal acquisition system with swing arms was introduced for a laser profiler. Precision was analyzed using four experiments using the RANSAC algorithm. In some cases, correction of rotated profiles and RMSE metric for evaluation was applied.

In material influence analysis, the best results were obtained in measurement of matte copper and wood. The maximal error in measured cube dimensions was 0.4 mm. Best precision when capturing a wooden ball was achieved with the laser pointing from above and the camera from the side, the angle between the camera and laser of 30° and red laser color. The radius error was 1 mm, and RMSE metric 0.3458.

The best laser profiler 3D measuring precision was achieved when scanning matte wooden objects using geometry 1 (laser pointing from above, camera from the side) with an angle of 30° and red laser.

Keywords computer vision, 3D image scanning, 3D dimension measurement, laser triangulation, laser profiler, RANSAC

Obsah

Úvod	1
1 Rešerše	3
1.1 Mapování prostoru	3
1.2 Kontrola defektů	3
1.3 Rešerše komerčních řešení	5
1.3.1 Automation Technology GmbH	5
1.3.2 Keyence	5
1.3.3 Sick	5
1.3.4 Micro Epsilon	6
1.3.5 Další výrobci	7
2 Teorie	9
2.1 Techniky 3D snímání	9
2.1.1 Stereo vision	9
2.1.2 LIDAR	10
2.1.3 Laserová triangulace	10
2.1.4 Interferometrie	11
2.2 Snímací soustava	12
2.2.1 Kamera	12
2.2.2 Objektiv	12
2.2.3 Optický filtr	13
2.3 Laserový profiler	14
2.3.1 Typy profilerů	14
2.3.2 Geometrie	14
2.3.3 Snímací módy	15
2.3.4 Kalibrace	16
2.3.5 Formát snímků	16
2.4 Vlivy na kvalitu snímání laserovým profilerem	17

2.4.1	Povrch snímaného objektu	18
2.4.2	Světelné podmínky	20
2.4.3	Vzdálenost kamery od objektu	20
2.5	Zpracování obrazu	20
2.5.1	RANSAC	21
2.5.2	RMSE	21
2.5.3	Rotace v 2D prostoru	22
2.5.4	Rozptyl	22
3	Teoretická část	23
3.1	Experimenty	23
3.1.1	Vliv materiálu	23
3.1.2	Vliv geometrie	24
3.1.3	Vliv úhlu kamery a laseru	24
3.1.4	Vliv barvy laseru	25
3.2	Metodika snímání	26
3.3	Snímací konstrukce	27
4	Praktická část	29
4.1	Snímací konstrukce	29
4.2	Data	32
4.3	Algoritmus vyhodnocení experimentu 1	32
4.3.1	Ořez	33
4.3.2	Odstranění artefaktů	33
4.3.3	Výpočet rozměrů	33
4.3.4	Výpočet rozptylu v ose z	34
4.4	Algoritmus vyhodnocení experimentů 2 – 4	34
4.4.1	Ořez	35
4.4.2	Rotace profilů	35
4.4.3	Výpočet chyby měření	36
5	Výsledky	39
5.1	Vliv materiálu	39
5.2	Vliv geometrie	40
5.3	Vliv úhlu kamery a laseru	41
5.4	Vliv barvy laseru	42
6	Diskuze	43
	Závěr	45
	Bibliografie	47
A	Seznam použitých zkratk	51

B Práce s kamerou C2040 a snímací konstrukcí	53
B.1 Instalace	53
B.2 cxExplorer	53
B.3 Python	55
B.3.1 Příprava virtuálního prostředí	55
B.3.2 Aktivace virtuálního prostředí	55
B.4 Ostření kamery	55
B.5 Kalibrace kamery	56
B.6 Snímání	58
B.6.1 Snímání pomocí cxExplorera	58
B.6.2 Snímání dvěma kamerami	58
B.6.3 Snímání pomocí pythonu	58
B.7 Multiple slope	58
B.8 FAQ	60
B.8.1 Nejede lineární pojezd	60
B.8.2 Při pokusu o získání snímku dostanu timeout	60
B.8.3 V Pythonu padá funkce <code>cx_waitForBuffer</code> s errorem 6	60
C Obsah příloženého CD	61

Seznam obrázků

1.1	Point cloud oblasti nasnímané v rámci geodetického zaměření [1]	4
1.2	Kontrola kvality pneumatik, (a) snímek pneumatiky, (b) rekonstrukce povrchu pneumatiky bez defektu, (c) rekonstrukce povrchu pneumatiky s defektem, (d) porovnání rekonstrukce pneumatiky s referenčním modelem [6]	4
1.3	Průmyslové využití laserových profilerů Keyence [10]	6
1.4	Průmyslové využití laserových profilerů Sick [11]	6
2.1	Snímky k stereo vision. Čtverečkem jsou označeny správně spárované body, kroužkem jsou označeny špatně spárované body. [18]	10
2.2	Princip laserové triangulace	11
2.3	Průmyslové kamery [22, 23]	12
2.4	Ohnisková vzdálenost f	13
2.5	Velikost zorného pole, s – vzdálenost, f – ohnisková vzdálenost, velikost senzoru	13
2.6	Snímky monochromatickou kamerou s barevnými filtry [26]	14
2.7	Možné <i>geometrie</i> kamery a laseru	16
2.8	Šedotónový obrázek s patrným stínem.	17
2.9	Point cloud skenu koule v softwaru CloudCompare [30]	18
2.10	Interakce paprsku s povrchem	19
2.11	Snímek černobílého spreje	19
2.12	Point cloud matné a lesklé koule	20
2.13	Metoda nejmenších čtverců [32]	21
3.1	Kostky k měření vlivu materiálu	24
3.2	Dřevěná koule o poloměru 29,5 mm	25
3.3	Návrh experimentu 2	25
3.4	Kalibrační objekt dodaný výrobcem	26
3.5	Návrh snímací konstrukce	27

4.1	Rozměry kalibračního objektu	30
4.2	Objektiv KOWA LM25SC [38]	30
4.3	Snímací konstrukce	31
4.4	Snímek kostek z různých materiálů	32
4.5	Snímek dřevěné koule	32
4.6	Prahy pro ořez snímku dřevěné kostky	33
4.7	Snímek kostky před a po odstranění artefaktů	34
4.8	Vznik <i>profilu</i> při nakloněném laseru	35
4.9	Snímek koule pořízený <i>geometrií 2</i> s úhlem laseru $\alpha = 30^\circ$	36
4.10	Snímek koule pořízený <i>geometrií 2</i> s úhlem laseru $\alpha = 30^\circ$ s orotovanými <i>profiley</i>	36
4.11	Model koule s parametry $r = 30,8$ mm, $s = (4,4$ mm, $75,2$ mm, $12,8$ mm)	37
5.1	Naměřené rozměry kostek	39
5.2	Závislost rozlišení v ose z na úhlu α a zvolené geometrii	41
B.1	Výběr kamery v cxExploreru	54
B.2	Hlavní stránka aplikace cxExplorer	54

Seznam tabulek

2.1	Definice značení použité pro <i>geometrie</i> kamery	15
3.1	Vzorky k měření vlivu materiálu	24
3.2	Návrh experimentu 3	26
4.1	Parametry kamery C2040 od Automation Technology [27]	29
4.2	Parametry objektivu KOWA LM25SC [38]	31
5.1	Experiment 1: výsledky měření rozměrů	40
5.2	Experiment 1: rozptyl v ose z	40
5.3	Výsledky experimentu 2	40
5.4	Výsledky experimentu 3	42
5.5	Výsledky experimentu 4	42

Úvod

V rámci automatizace procesů v průmyslu jsou stále častěji vyžadována bezkontaktní zařízení, která by byla schopna přesného a důkladného snímání trojrozměrných výrobků. Laserové profilometry, které pracují na principu laserové triangulace, jsou jedním z právě takových zařízení. Díky jejich vysoké přesnosti a relativní cenové dostupnosti jsou vyhledávány k nejrůznějším úlohám kontroly kvality, například přesné měření rozměrů 3D objektů, detekce nerovností, nebo kontroly správně vyraženého vzoru do objektu.

Laserové profilometry ale nejsou vhodným nástrojem pro inspekci za každých podmínek. Jejich přesnost je ovlivněna mnohými vnitřními i vnějšími parametry, mezi které se řadí mimo jiné i konstrukce snímací aparatury nebo vlastnosti a materiál snímaného objektu.

Práce se zabývá průzkumem technologií 3D snímání, zejména laserového profilometru. Zkoumána je vhodnost použití na různé úlohy 3D měření v průmyslu.

Cílem práce je sestavení univerzální snímací konstrukce pro laserový profiler a otestování vlivu nastavení parametrů snímací konstrukce, prvků snímací soustavy a materiálu snímaného objektu na kvalitu a přesnost snímání.

Rešerše

Existuje množství technologií na 3D snímání. Každá technologie má své výhody a omezení, proto je vhodná pro jiné účely. Různé technologie mohou snímat různě velké objekty s různou přesností, a také se liší pořizovací cenou.

1.1 Mapování prostoru

Jedním z průmyslových problémů 3D snímání je mapování prostoru. [1] se zabývá sestavením dronu k snímání a 3D rekonstrukci ploch pro geodetické zaměření staveb a pozemků. Plocha o rozměrech 200×85 m byla snímána kamerou z výšky 70 m. Bylo získáno celkem 64 snímků, z nichž byl vytvořen 3D snímek pomocí metody stereo vision. Výsledný point cloud je na obrázku 1.1. Průměrný výškový rozdíl 3D modelu oproti skutečnosti byl 1,9 cm.

V [2] se autoři zabývali vytvořením přenosného autonomního vozítka pro záchranné operace v neznámém neosvětleném terénu, zejména při nehodách v tunelech. Orientace v prostoru byla zajištěna pomocí technologie LIDAR. Kvůli vysoké ceně této technologie byl použit a optimalizován levnější LIDAR s jedním laserovým paprskem a s maximálním dosahem 40 m.

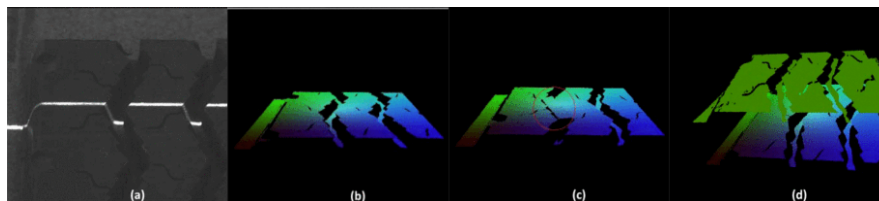
Klasickým tématem orientace v prostoru je vývoj samořídících osobních vozidel. V [3] je přehled různých technologií používaných v samořídících automobilech. Pro svou přesnost a velký dosah bývá používán LIDAR, ale někteří výrobci ho kvůli vysoké ceně nahrazují kombinací stereo vision, maticových kamer a radarů.

1.2 Kontrola defektů

Kontrola kvality je velkým odvětvím průmyslových aplikací strojového vidění a zahrnuje snímání objektů velikosti od několika metrů až po několik milimetrů.



Obrázek 1.1: Point cloud oblasti nasnímané v rámci geodetického zaměření [1]



Obrázek 1.2: Kontrola kvality pneumatik, (a) snímek pneumatiky, (b) rekonstrukce povrchu pneumatiky bez defektu, (c) rekonstrukce povrchu pneumatiky s defektem, (d) porovnání rekonstrukce pneumatiky s referenčním modelem [6]

V [4] se autoři zabývají konstrukcí snímací soustavy na principu laserové triangulace s nižší přesností než profesionální laserové 3D skenery, ale s nízkou pořizovací cenou. Soustava byla použita k detekci defektů betonu.

Na kontrolu kvality vyrobených autodílů bylo popsáno například použití techniky structured light s dosaženou přesností 0,18 mm. [5]

V [6] byla navržena snímací konstrukce obsahující laserový profiler k inspekci kvality pneumatik. Nebyl použit kompaktní senzor kvůli možným vibracím a pohyblivým částem na výrobní lince. Pneumatiky byly při snímání rotovány, aby byl nasnímán celý povrch. Získaný 3D model byl porovnáván oproti referenčnímu modelu. Při výrazné odchylce modelů byla detekována vada. Celý proces je znázorněn na obrázku 1.2.

Dalším úkolem pro kontrolu kvality pomocí strojového vidění je inspekce

správnosti provedení sváření. V [7] byl použit laserový 3D skener. Autoři detekovali defekty v rozsahu ± 3 mm v reálném čase.

Některé problémy vyžadují velmi přesné měření malých objektů. V [8] byla použita velmi přesná technika interferometrie na kontrolu kvality aplikace tenkých filmů na displeje. Detekce byla úspěšná u vrstev o tloušťce vyšší než 150 nm.

1.3 Rešerše komerčních řešení

Byla provedena rešerše dostupných komerčních řešení. Představeny jsou některé firmy zabývající se výrobou 3D laserových skenerů, jejich produkty a využití.

1.3.1 Automation Technology GmbH

Automation Technology je výrobcem 3D senzorů a infračervených kamer. Mezi nabízené zařízení patří kompaktní a modulární senzory. V závislosti na modelu lze dosáhnout až 4096 px na profil a rychlosti snímání až 200 tisíc profilů za sekundu.

Mezi příklady využití jejich laserových profilerů patří automobilový průmysl (kontrola pneumatik, gumových těsnění, svárů), inspekce elektroniky (ball grid array), zpracování dřeva (kontrola velikosti, tvaru, detekce suků) a 3D inspekce kolejnic. [9]

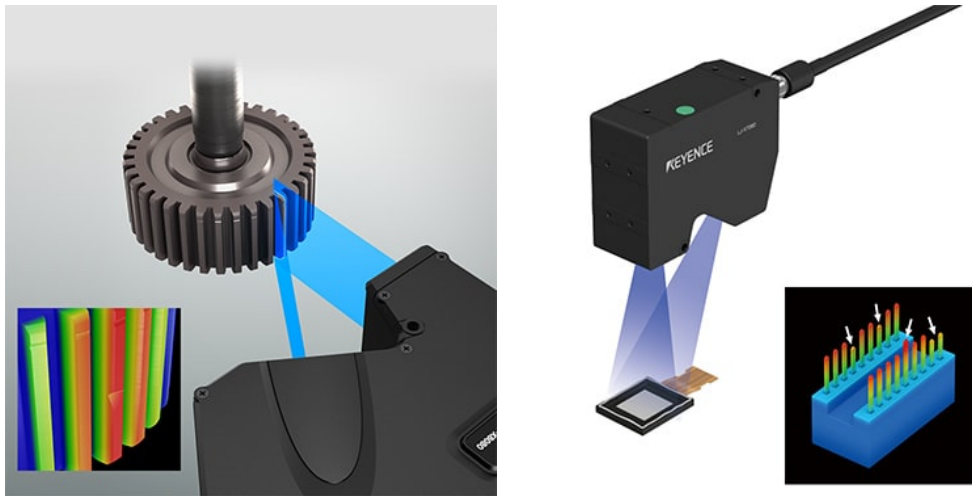
1.3.2 Keyence

Keyence se zabývá vývojem a výrobou vybavení pro průmyslovou automatizaci a kontrolu. Nabízí 3 typy laserových profilerů. Všechny jsou kompaktní s rozlišením 3200 px na frame a rychlostí snímání až 64 tisíc framů za sekundu. Využívají modrý laser a disponují také například korekcí zarovnání framů pro korekci vibrací během snímání.

Využití nabízí v automobilovém průmyslu (kontrola nanesení tmelu, kontrola svárů, mezery nebo úhlu mezi plechy, inspekce ozubených kol, ...), inspekce pinů konektorů, nanesení pájecí pasty nebo kontrola léků v platíčkách. Některé příklady jsou na obrázku 1.3. [10]

1.3.3 Sick

Firma Sick nabízí senzorová řešení pro průmyslové aplikace. Kromě pouhých zařízení nabízí i systémy se softwarem pro některé obecné problémy, například Pinspector 3D pro inspekci pinů desek plošných spojů. V nabídce jsou jak kompaktní přístroje, tak pouze samotné snímače, ke kterým je potřeba zvlášť objektiv a laser.

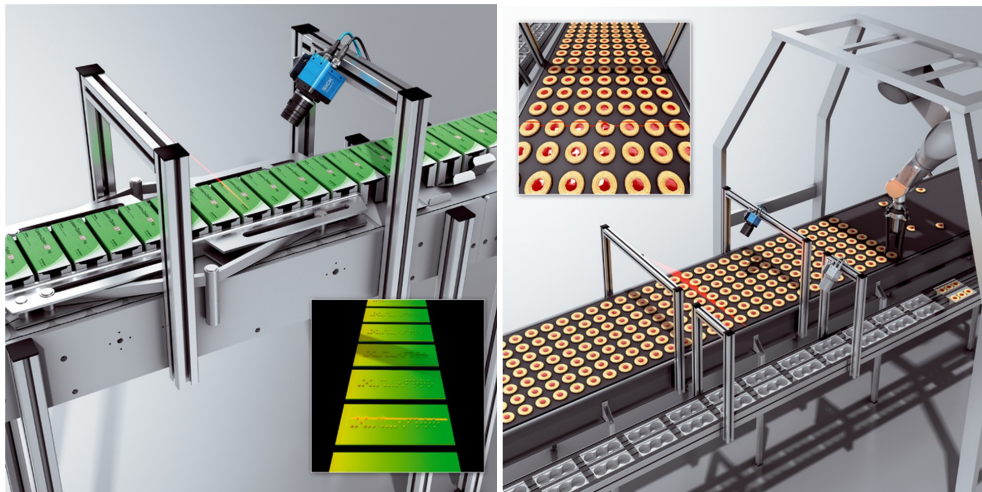


(a) Inspekce ozubených kol

(b) Inspekce pinů konektorů

Obrázek 1.3: Průmyslové využití laserových profilerů Keyence [10]

Příklady využití senzorů jsou: kontrola Braillových kódů, inspekce komponent vlaků, kontrola kvality pečiva a kontrola vyklopení housek z formy. Možná vizualizace snímacích soustav je na obrázku 1.4. [11]



(a) Kontrola Braillových kódů

(b) Kontrola kvality pečiva

Obrázek 1.4: Průmyslové využití laserových profilerů Sick [11]

1.3.4 Micro Epsilon

Micro Epsilon nabízí nejen 3D snímače s vysokou přesností, ale také senzory teploty, barevné snímače, zařízení pro měření rozměrů, vzdálenosti a

pro průmyslové aplikace. Profilometry má v nabídce kompaktní s červeným nebo unikátním patentovaným modrým laserem. Modrý laser má využití při měření žhavých povrchů (nad 700 stupňů Celsia) nebo pro transparentní objekty. Vyhodnocování získaných dat je integrováno do kamery, proto není potřeba žádný externí ovladač. Dostupný software dokáže vyřešit jednoduché, ale v průmyslu časté, úkoly měření dílů [12].

1.3.5 Další výrobci

Mezi další, ale neméně významné výrobce laserových profilerů patří například firmy Photonfocus [13], Panasonic [14] nebo Mech-Mind [15].

Teorie

V práci jsou použity pojmy a teorie z oblasti 3D snímání, snímacích soustav a zpracování obrazu.

2.1 Techniky 3D snímání

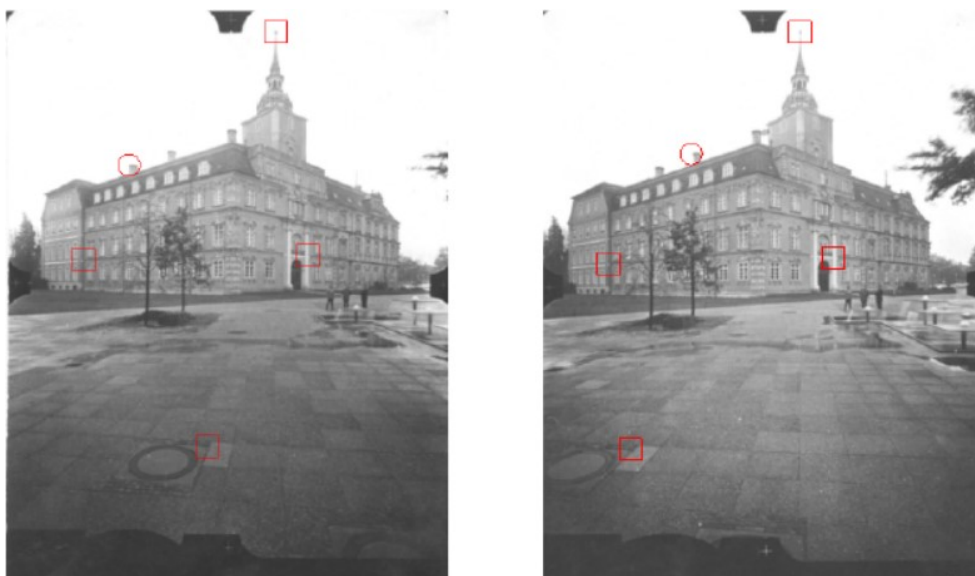
V sekci je uveden stručný přehled některých používaných technik 3D snímání s nastíněním principu jejich fungování a uvedením jejich základních limitací. Techniky se rozdělují na dvě skupiny, aktivní a pasivní. U aktivních metod se na snímáný objekt vysílá signál, například laserové záření, jehož odraz od objektu je následně přijímán a zpracováván. Pasivní techniky nevyužívají žádného vysílače, pouze přijímají obraz klasicky nasvícené scény. [16]

2.1.1 Stereo vision

Stereo vision je pasivní technika 3D snímání, při níž je objekt snímán dvěma kamerami zároveň. Před samotným snímáním je nutné provést přesnou kalibraci nasnímáním referenčních bodů. Ze znalosti pozice kamer a perspektivy je rekonstruován 3D obraz. Na stejném principu fungují oči a vidění.

Hlavním problémem techniky je rozpoznání stejných bodů na dvou obrázcích. Výsledek závisí na co nejlepší ostrosti obou snímků a na stejných světelných podmínkách pro obě kamery [16, 17, 18]. Snímky k rekonstrukci 3D obrazu pomocí metody stereo vision s rozpoznávanými stejnými body jsou na obrázku 2.1

Metoda lze použít pro malé, ale i velké vzdálenosti, proto je její využití v průmyslu, stavebnictví, nebo zpracování leteckých a družicových snímků [18, 16].



Obrázek 2.1: Snímky k stereo vision. Čtverečkem jsou označeny správně spárované body, kroužkem jsou označeny špatně spárované body. [18]

2.1.2 LIDAR

Jedná se o aktivní techniku 3D snímání fungující na principu time of flight [19]. Vzdálenost objektů od senzoru lze zjistit pomocí měření rychlosti světla. Zařízení vyšle na snímáný objekt laserový puls. Přijímač zaznamená tento signál a ze zpoždění vypočítá vzdálenost objektu od kamery.

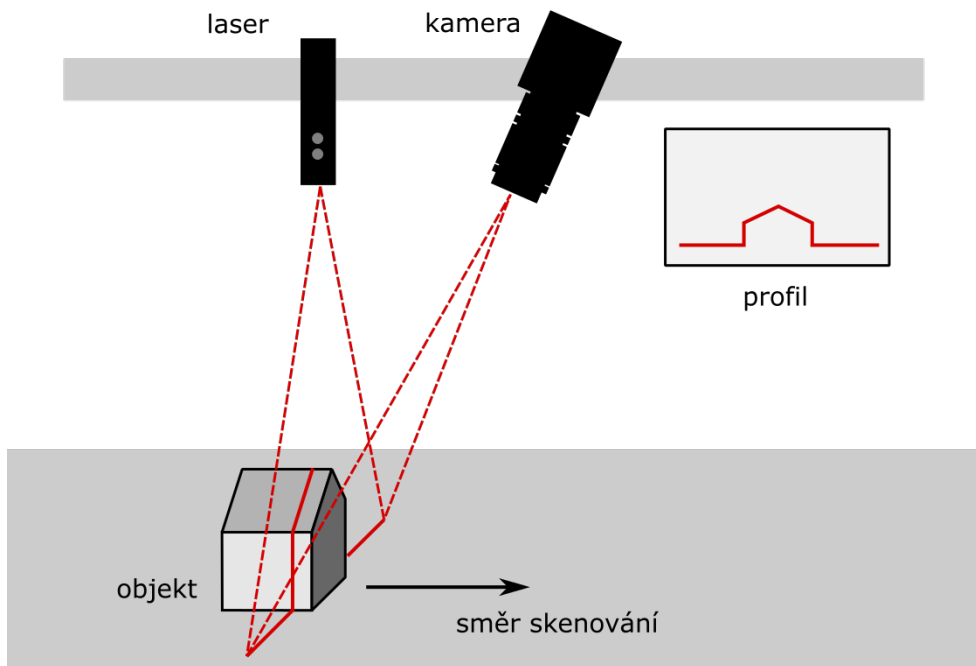
Metoda se hodí zejména na rozměrnější objekty vzdálené několik desítek metrů. Při menších vzdálenostech jsou rozdíly ve zpoždění odraženého paprsku velmi malé a těžko měřitelné.

Omezením je vzdálenost, na kterou dokáže opakovaně zasvítit laserový puls. S rostoucí vzdáleností také klesá rozlišení obrazu [17]. Dalším problémem jsou lesklé povrchy, které dokáží laser odklonit [16].

2.1.3 Laserová triangulace

Laserová triangulace je aktivní technika 3D snímání. Emitor vysílá na snímáný objekt laserový signál. Kamera snímá objekt pod jiným úhlem než laserový vysílač. Laserový paprsek dopadající na různě vzdálené plochy při pohledu z jiného úhlu vytvoří *profil*, paprsek se na různých rovinách do kamery odrazí pod jinými úhly. Princip laserové triangulace je zobrazen na obrázku 2.2. [17]

Typickým problémem laserové triangulace je kompromis mezi přesností, maximální velikostí objektu a velikostí stínů způsobených velkým úhlem mezi kamerou a laserovým emitorem.



Obrázek 2.2: Princip laserové triangulace

Výhodou laserové triangulace je její vysoká přesnost, jednoduchost a rychlost. [16]

Laserový profiler používá lineární laser. Pro získání celého obrazu objektu je nutné skenování – postupný posun laseru po celém povrchu snímaného objektu. Pohyb musí být kolmý na rovinu laserové úsečky. [17]

Technika structured light nepoužívá skenování, ale na objekt vysílá 2D vzor nekoherentního světla, tudíž dokáže zjistit podobu celého objektu bez pohybu [16].

2.1.4 Interferometrie

Interferometrie je aktivní technika 3D snímání založená na interferenci světla. Na objekt se vysílají dva paprsky se stejnou frekvencí světla, nejčastěji se používá laserový paprsek, který je rozštěpen na dva. Paprsky putují k objektu rozdílnými cestami, spojí se pak ve snímači, kde interferují. Z interference je možné spočítat vzdálenost objektu od snímače [20].

Metoda je velmi přesná, pracuje se zlomky vlnové délky světla [16].

2.2 Snímací soustava

Snímací soustavu obvykle tvoří kamera a objektiv. Mezi případné další prvky patří například speciální osvětlení nebo filtry. Všechny prvky snímací soustavy jsou voleny podle typu úlohy.

2.2.1 Kamera

Kamera je zařízení na zachycení obrázků. K zachycení obrázků dochází díky osvětlení kamerového senzoru.

Mezi hlavní parametry kamery patří velikost senzoru a rozlišení, které udává počet pixelů výsledného obrázku.

Kamery mohou být barevné nebo monochromatické (černobílé). Výhodou barevných je možnost snímání barevných snímků, oproti monochromatickým bývají ale pomalejší a dosahují nižšího rozlišení.

Průmyslové kamery se dělí na dvě hlavní kategorie, maticové a řádkové. Maticové kamery snímají obrázky pomocí obdélníkového snímače s pixely. Řádkové kamery jsou charakterizovány snímáním pouze jednoho řádku pixelů. K získání 2D obrazu je nutný pohyb a spojení více snímků. [21]

Příklad průmyslové maticové a řádkové kamery je na obrázku 2.3.



(a) Maticová kamera Basler ace 2 Pro

(b) Řádková kamera Basler Racer

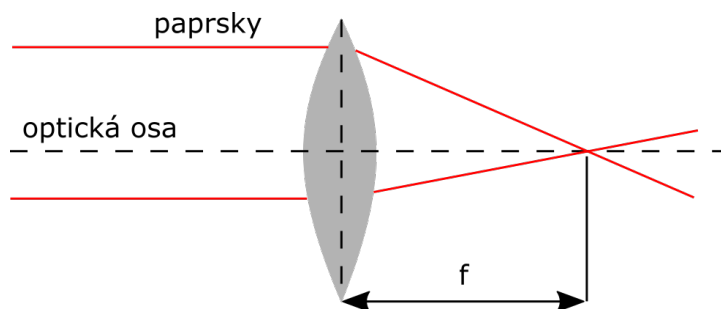
Obrázek 2.3: Průmyslové kamery [22, 23]

2.2.2 Objektiv

Cílem objektivu je usměrnění přicházejícího světla do senzoru kamery. Mezi klíčové parametry objektivu patří ohnisková vzdálenost, minimální pracovní vzdálenost a velikost senzoru kamery.

Ohnisková vzdálenost je vzdálenost bodu na optické ose, ve které se paralelní paprsky světla po průchodu čočkou protnou, viz obrázek 2.4. Ohnisková vzdálenost udává velikost zorného pole. Čím kratší je ohnisková vzdálenost, tím větší je zorné pole.

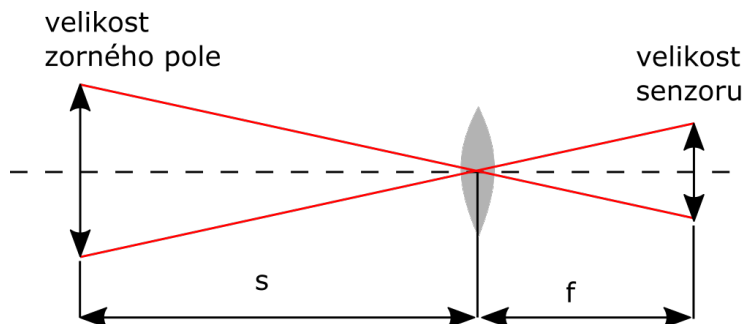
Minimální pracovní vzdálenost je minimální vzdálenost od konce objektivu, ve které musí být umístěn objekt zájmu. V případě nedodržení minimální pracovní vzdálenosti není možné zaostřit na povrch objektu.

Obrázek 2.4: Ohnisková vzdálenost f

Velikost senzoru je maximální velikost úhlopříčky senzoru kamery. Objektiv usměrňuje světlo právě do této oblasti. Spolu s typem závitu musí být tyto parametry kompatibilní s kamerou.

U optické soustavy platí následující rovnice, která vychází z obrázku 2.5. [24, 25]

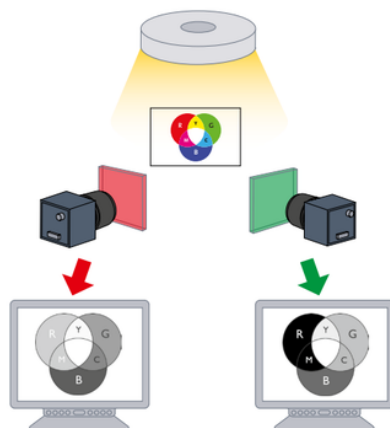
$$\frac{\text{velikost senzoru}}{\text{ohnisková vzdálenost}} = \frac{\text{velikost zorného pole}}{\text{vzdálenost}} \quad (2.1)$$

Obrázek 2.5: Velikost zorného pole, s – vzdálenost, f – ohnisková vzdálenost, velikost senzoru

2.2.3 Optický filtr

Optické filtry se používají k filtraci světla, než vstoupí do senzoru kamery. Existují například barevné nebo polarizační filtry.

Barevné filtry propouští jen určitou část spektra. Jejich použitím lze utlumit, nebo naopak zvýraznit některé části snímané scény. Příklad snímků stejné scény snímané monochromatickou kamerou s filtry různých barev je na obrázku 2.6. [26]



Obrázek 2.6: Snímky monochromatickou kamerou s barevnými filtry [26]

2.3 Laserový profiler

Laserový profiler má oproti klasickým 2D maticovým kamerám jistá specifika. Jsou popsány typy komerčně dostupných profilerů, některá základní nastavení kamery, kalibrace a formát snímků.

2.3.1 Typy profilerů

Existují dva typy laserových profilerů, kompaktní a modulární.

Kompaktní senzory jsou ve formě krabičky, kde se nachází jak laserový emitor, tak snímač kamery. Mají fixní *geometrii*, tj. nelze například nastavovat úhly mezi kamerou a laserovým paprskem. Každý model je nastaven a nakalibrován na určitou pracovní vzdálenost, zorné pole a maximální výšku objektu, s čímž souvisí i přesnost v osách z a x .

Modulární typ laserového profileru je samotná kamera s externím laserem. Její výhoda je, že je uživatelem libovolně konfigurovatelná. Je možné ji vybavit objektivy s různými ohniskovými vzdálenostmi, je možné nastavení libovolných úhlů a vzdáleností mezi kamerou a laserem, a také je možné snímat s různými typy laseru [9, 10, 12].

2.3.2 Geometrie

Výrobce Automation Technology GmbH v [27] popisuje 4 typické *geometrie* používané pro kameru a laser, viz obrázek 2.7. Je použito značení definované v tabulce 2.1.

ΔX	rozlišení v ose x (podél laserové linie)
ΔY	rozlišení v ose y (po směru pohybu)
ΔZ	rozlišení v ose z (výška)

Tabulka 2.1: Definice značení použité pro *geometrie* kamery

V první *geometrii* laser míří kolmo na podložku, kamera míří ze strany pod úhlem α . Přesnost v ose Z lze vyjádřit jako

$$\Delta Z \approx \Delta X / \sin(\alpha).$$

Druhou *geometrií* je kamera mířící kolmo na podložku a laser pod úhlem α . Přesnost lze aproximovat jako

$$\Delta Z \approx \Delta X / \tan(\alpha).$$

Ve třetí *geometrii* kamera míří pod úhlem α , laser svítí z druhé strany pod úhlem β . Přesnost výšky objektu je aproximována jako

$$\Delta Z \approx \Delta X \cdot \cos(\beta) / \sin(\alpha + \beta).$$

V případě, že $\alpha = \beta$ lze zjednodušit na

$$\Delta Z \approx \Delta X / 2 \sin(\alpha).$$

V poslední výrobce uváděné konfiguraci kamera míří pod úhlem α , laser vysílá ze stejné strany pod úhlem β , $\alpha \neq \beta$. Přesnost v ose Z lze vyjádřit

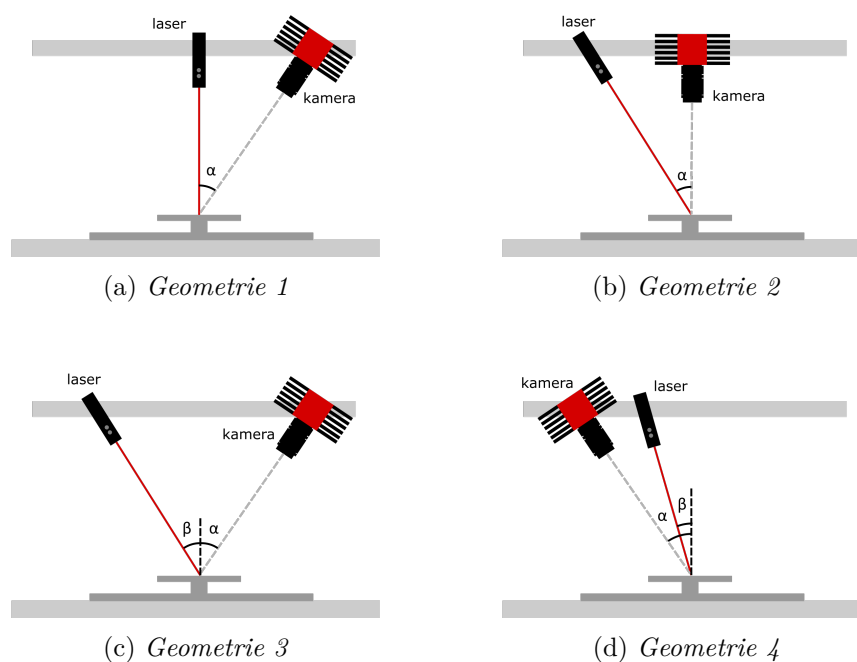
$$\Delta Z \approx \Delta X \cdot \cos(\beta) / \sin(\alpha).$$

2.3.3 Snímací módy

Kamera disponuje několika algoritmy na zpracovávání snímků, které je možné nastavovat podle potřeby. Rychlost snímání je nezávislá na použitém algoritmu.

V *image módu* kamera funguje podobně jako standardní maticová kamera. Dostáváme černobílý obraz s hloubkou 8 bit nebo 10 bit. *Image mód* neextrahuje *profily*, tudíž neprodukuje 3D data. Je získán pouze nezpracovaný jeden snímek. Mód je vhodný například na ostření objektivu nebo hledání vhodné pozice objektu na podložce.

Pro získání 3D dat je nutné kameru přepnout do *3D módu*. Zde jsou extrahovány *profily*, které jsou skládány do výsledného snímku. Extrakce *profilů* probíhá pomocí jednoduchého prahování a aproximace *profilu*. Aproximace *profilu* se zabývá získáním *profilu* ze snímku laserové linie, která může mít šířku několik pixelů. Je možné zvolit mezi čtyřmi algoritmy aproximace, Maximum intensity profile mód, Threshold mód, Center of gravity mód a FIR peak mód. [27]

Obrázek 2.7: Možné *geometrie* kamery a laseru

2.3.4 Kalibrace

Kalibrace kamery je potřebná pro získání informace o rozměrech snímaného objektu. S nezkalibrovanou kamerou je také možné snímat, ale výsledkem je pouze 2D šedotónový obrázek, kde víme, že světlejší pixely byly blíže kameře, než tmavší.

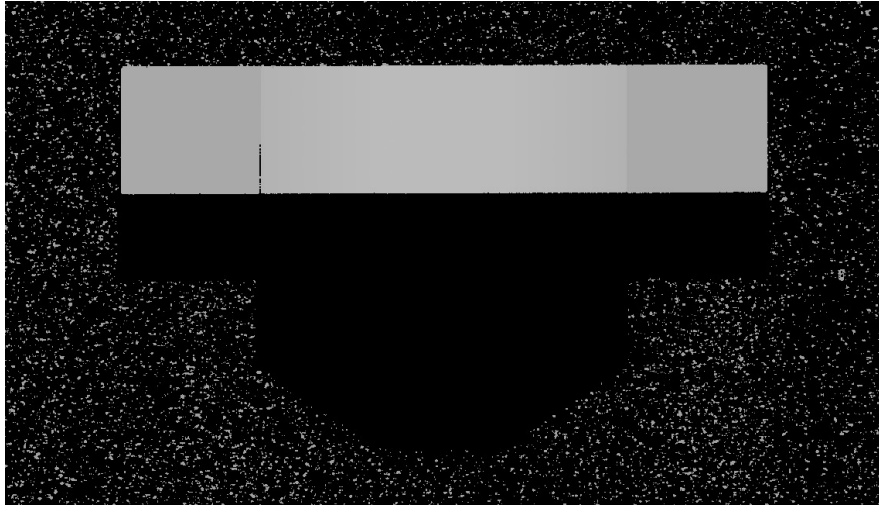
Kalibrace se provádí pomocí snímání speciálního kalibračního objektu, který byl dodán výrobcem. Objekty mají přesně zdefinovaný tvar a mají speciální povrchovou úpravu pro kvalitní snímání. Spolu s kalibračním objektem byl dodán kalibrační soubor, kde jsou informace o přesných rozměrech objektu.

Existují dva typy kalibrace, statická a dynamická. Pro každou je potřeba jiný typ kalibračního objektu. Statická provádí kalibraci v osách x a z , informace o rychlosti pohybu objektu je nutné zadat ručně. Dynamická kalibrace provádí kalibraci ve všech třech osách. [28, 29]

2.3.5 Formát snímků

Výsledný snímek je složen z dílčích snímků, kdy z každého dílčího snímku je extrahován *profil*. Po složení jednotlivých *profilů* je získán celkový obrázek. Pokud kamera není zkalibrovaná, výsledkem je pouze šedotónový 2D snímek, který lze uložit například ve formátu *.tif*. Snímek neobsahuje žádné informace o rozměrech a vzdálenostech, pouze, že čím světlejší je pixel, tím blíže byl

kameře. Černé pixely jsou body, ze kterých se neodrazilo do kamery žádné světlo. To může být způsobeno velkou vzdáleností, překážkou mezi kamerou a bodem (vznikají typické stíny za objekty), nedostatečně velkým zorným polem, nebo špatnými odrazivými vlastnostmi materiálu. Příklad šedotónového 2D snímku s typickým stínem je na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Šedotónový obrázek s patrným stínem.

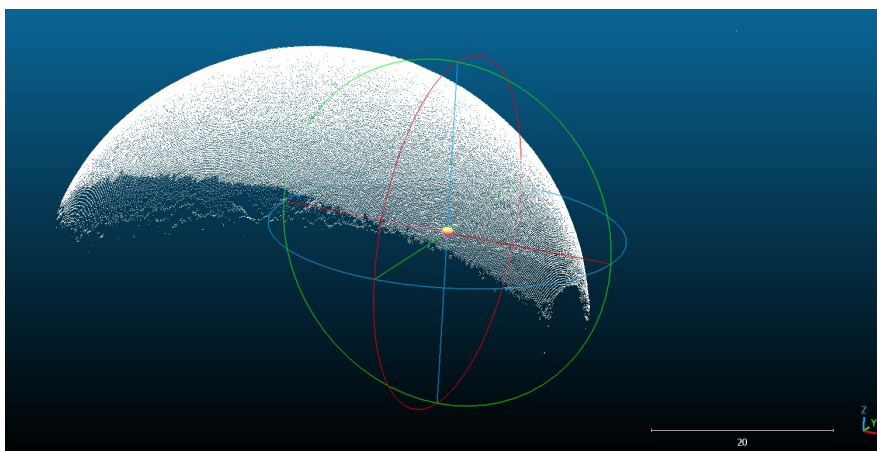
Pro řešení některých problémů počítačového vidění v průmyslu jsou informace získané z 2D obrázku dostatečné, například pro detekci škrábanců nebo výstupků na rovném povrchu.

Pokud je potřebná informace o rozměrech, je nutné před samotným snímáním kameru zkalibrovat. Díky kalibraci je ze snímku možné vygenerovat 3D snímek, takzvaný point cloud. Je to množina bodů v 3D prostoru, kde každý bod má své souřadnice (x, y, z) , které jsou udány v milimetrech. Point cloud je možné uložit například ve formátech *.xyz* nebo *.cop*. Point cloud části koule zobrazený v softwaru CloudCompare [30] je na obrázku 2.9. [28]

2.4 Vlivy na kvalitu snímání laserovým profilerem

K získání co nejlepších snímků pomocí laserového profileru je třeba znát fyzikální veličiny, které dokáží ovlivnit kvalitu výsledků. Díky tomuto povědomí je možné zvolit co nejvhodnější prostředí nebo upravit snímané objekty.

Pro kvalitní snímky pomocí techniky laserové triangulace je zásadní získat co nejlepší snímky laserové linie. Ideální snímek je takový, na kterém lze bezchybně prahováním oddělit laserovou linii od pozadí, a kde je laserová linie z důvodu přesnosti co nejtenčí. Takový snímek lze popsat následovně. Laserová linka je tenká, ostrá, kontrastní, ve všech částech stejně intenzivní a



Obrázek 2.9: Point cloud skenu koule v softwaru CloudCompare [30]

stejně široká. Na obrázku se nevyskytují žádné jiné výrazné světelné elementy. Zároveň se na snímku nevyskytují saturované pixely.

2.4.1 Povrch snímaného objektu

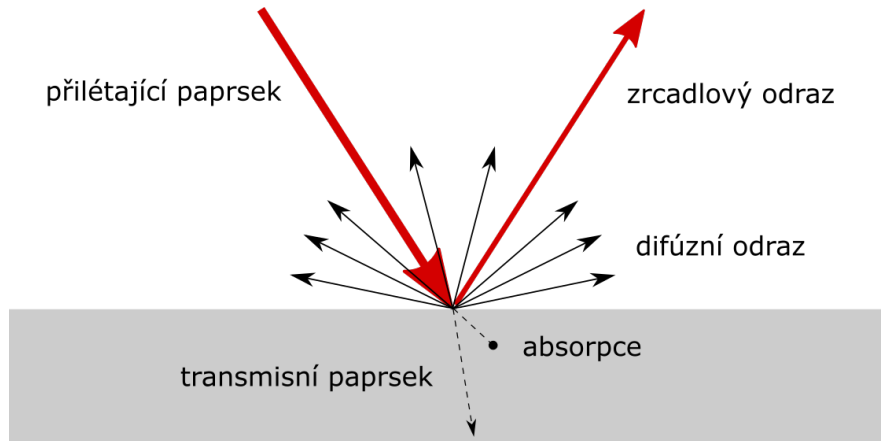
Na kvalitu fotografie laserové linie má zásadní vliv samotný objekt zájmu. Je nutné, aby se do snímače kamery dostalo dostatek odraženého světla z laseru po celé délce linie.

Každý materiál se po nasvícení může chovat jinak. Paprsek světla dopadající na povrch může pokračovat několika způsoby. Může vzniknout zrcadlový odraz, který ctí takzvaný zákon odrazu. Další variantou je difúzní odraz, kdy se paprsek rovnoměrně odrazí do všech stran. Třetí variantou je úplná absorpce paprsku, kdy k žádnému odrazu nedochází. Poslední variantou je, že paprsek pokračuje dál směrem pod povrch objektu, což se děje u průhledných a průsvitných materiálů. V praxi se vyskytují různé kombinace těchto čtyř variant, kdy poměr záleží na vlastnostech materiálu. Znázornění jednotlivých typů odrazu je na obrázku 2.10.

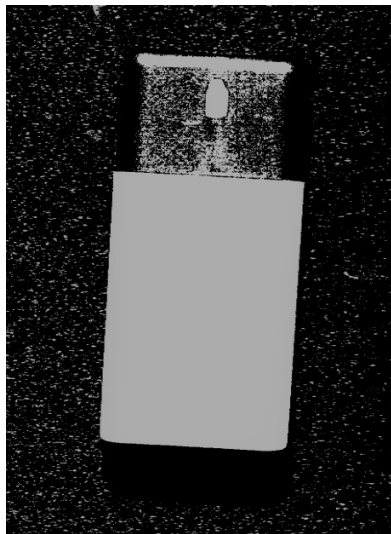
Pro snímání technikou laserové triangulace jsou naprosto nevhodné objekty obsahující průhledné prvky. Většina paprsku se od povrchu neodrazí, proto nemůže být odraz od povrchu zachycen kamerou.

Taktéž nejsou vhodné povrchy, které světlo absorbují. Do kamery se pak dostane málo světla. To je typické například pro černou barvu, nebo pokud je barva povrchu komplementární k barvě laseru. Šedotónový obrázek černobílého spreje je na obrázku 2.11. Řešením může být zvýšení intenzity laseru.

Objekty s povrchem, který odráží zrcadlově, jsou také problémové. Do kamery se odrazí příliš málo světla, pokud kamera není přímo pod odrazovým úhlem. V opačné situaci se do snímače odrazí světla příliš moc. Reálné objekty zpravidla mívají různé tvary, kdy při snímání dochází ke kombinaci těchto dvou



Obrázek 2.10: Interakce paprsku s povrchem

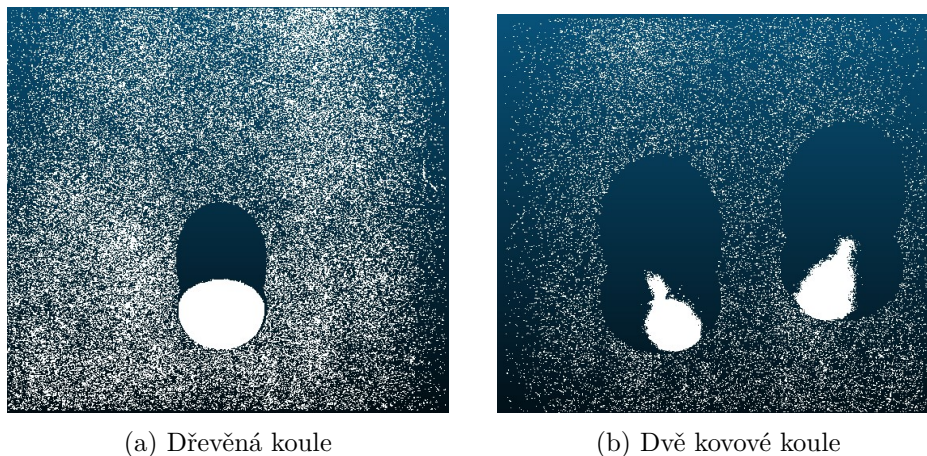


Obrázek 2.11: Snímek černobílého spreje

jevů a tedy fotografie laserové linky nemá homogenní intenzitu. Pokud je to možné, je vhodné na snímání objekt nanést matující vstvu, zde je ale nutné vzít v potaz tloušťku této vrstvy při měřicích úlohách.

Difúzní povrch je pro snímání laserovým profilerem ideální, protože nezáleží na vzájemném úhlu kamery a laseru, vždy je získána homogenní laserová linka.

Porovnání point cloudů lesklých kovových koulí a matné dřevěné koule je na obrázku 2.12.



Obrázek 2.12: Point cloud matné a lesklé koule

Reálné objekty jsou velmi často složeny z různé kombinace materiálů, barev a povrchových úprav. Pro nejlepší kvalitu snímání je ideální mít objekt s homogenními odrazovými vlastnostmi. [31]

2.4.2 Světelné podmínky

Kvalitu snímání ovlivňují také světelné podmínky okolí. Je třeba zajistit, aby na snímku nebyly žádné světlé elementy kromě laserové linky. Je proto vhodné se vyhnout bodovému osvětlení. Pomoci může také použití barevného filtru pro co nejužší interval vlnových délek, který obsahuje vlnovou délku laseru. Je nezbytné se vyhnout jiným zdrojům světla stejné nebo podobné barvy, jako má použitý laser, příkladem může být použití optické brány, která generuje také světelný signál. [31]

2.4.3 Vzdálenost kamery od objektu

Pro dosažení lepších výsledků je vhodné zařídit, aby kamera s laserem byla co nejbližší snímanému objektu. Při kratší vzdálenosti je možné dosáhnout tenčí laserové linky, tudíž i vyšší přesnosti měření. Také je pozitivně ovlivněno množství šumu v obrázku. [31]

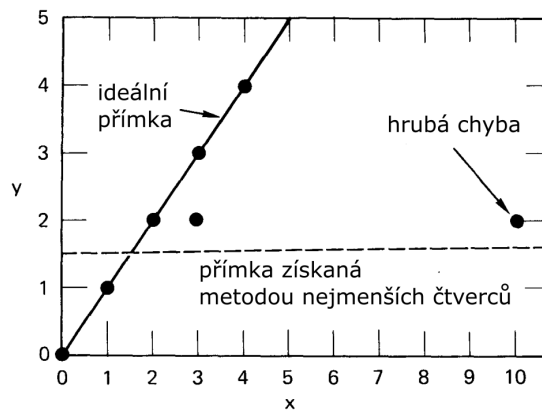
2.5 Zpracování obrazu

Zpracování obrazu následuje po získání snímků. Popsány jsou pojmy a algoritmy použité při zpracování nasnímaných point cloudů.

2.5.1 RANSAC

RANSAC je metoda pro fitování matematického modelu na pozorovaná data obsahující odlehlé hodnoty (*outliers*).

Výsledek metody nejmenších čtverců je ovlivněn všemi pozorovanými body. Pokud se v datech vyskytují odlehlé hodnoty, výsledný model může být ovlivněn těmito chybovými hodnotami, viz obrázek 2.13.



Obrázek 2.13: Metoda nejmenších čtverců [32]

RANSAC je iterativní metoda. Nejprve je náhodně (nebo kvazi-náhodně) vybráno několik bodů z pozorovaných dat, z nichž jsou vypočítány parametry ideálního modelu. Následně jsou všechna ostatní data testována, jestli odpovídají vypočítanému modelu. Pokud modelu odpovídá dostatečné množství dat, je model vyhodnocen jako dostatečný, v opačném případě algoritmus pokračuje další iterací. Body, které odpovídají výslednému modelu, se nazývají *inliers*, ostatní body jsou *outliers*. Pro zlepšení odhadu parametrů je možné vypočítat přesnější parametry pomocí všech *inliers*.

Pokud v žádné iteraci nebylo dosaženo dostatečného množství *inliers*, algoritmus na výpočet použije nejpočetnější nalezenou množinu *inliers*.

Významné parametry modelu jsou: maximální počet iterací, maximální vzdálenost, při které bod odpovídá modelu a minimální počet *inliers*, při kterém je model považován za dostatečný. [32]

2.5.2 RMSE

Root mean square error je metrika vyjadřující přesnost predikcí. Nejmenší vzdálenost nasnímaného bodu p_i od referenčního modelu je označena d_i a n je počet bodů v point cloudu. Pak

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2}. \quad [33]$$

2.5.3 Rotace v 2D prostoru

Rotace je transformace, kdy je objekt otočen o daný úhel kolem daného bodu. Rotaci je možné provést pomocí rotační matice. [34]

Rotační matice je lineární operátor, který rotuje zadaný vektor v_0 o úhel θ proti směru hodinových ručiček kolem počátku. [35]

$$v = Rv_0,$$
$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

2.5.4 Rozptyl

Střední hodnota diskrétní náhodné veličiny X , nabývající hodnot x_1, x_2, \dots je definována vztahem

$$EX = \sum_k x_k P(X = x_k). \quad [36]$$

Rozptyl náhodné veličiny X je definován jako průměrná čtvercová vzdálenost od střední hodnoty, tedy:

$$\text{var}X = E[(X - EX)^2]. \quad [36]$$

Teoretická část

Z rešerše plyne, že laserové 3D skenery jsou přesnou technologií používanou na snímání velké škály různých objektů. Pro svou přesnost, univerzálnost a schopnost snímání objektů různých rozměrů byl vybrán pro důkladnější zkoumání laserový profiler.

Přesnost snímání laserovým profilerem je ovlivněna například vlastnostmi povrchu snímaného objektu, světelnými podmínkami nebo vzdáleností kamery od objektu [31]. Pro rozšíření těchto poznatků bylo prozkoumáno několik dalších vnějších i vnitřních parametrů s cílem nalezení co nejvhodnějšího nastavení pro přesné měření v průmyslu.

3.1 Experimenty

K prozkoumání vlivu na přesnost snímání pomocí laserového profileru byly navrženy následující čtyři parametry: materiál snímaného objektu, použitá *geometrie* kamery, velikost úhlu mezi kamerou a laserem a barva laseru.

3.1.1 Vliv materiálu

Prvním experimentem je vyšetření vlivu materiálu snímaného objektu. Vliv materiálu byl zvolen k měření proto, že byl popsán výrazný vliv povrchových vlastností objektu na kvalitu snímání. V experimentu byly nasnímány kostky podobných rozměrů z následujících materiálů: dřevo, plast, hliník, železo, měď, mosaz a zinek. Fotografie snímaných vzorků je na obrázku 3.1. Přesné rozměry kostek jsou uvedeny v tabulce 3.1. Byl zkoumán šum v nasnímané vrchní ploše kostky a přesnost naměřených rozměrů.

Snímky byly vytvořeny se zafixovanými ostatními parametry: *geometrie 1* s úhlem $\alpha = 30^\circ$ s červeným laserem.

3. TEORETICKÁ ČÁST



Obrázek 3.1: Kostky k měření vlivu materiálu

materiál	dřevo	plast	hliník	železo	měď	mosaz	zinek
výška v mm	9,7	10	10	10	10	10	10
šířka v mm	9,7	10,1	9,9	9,9	10	9,9	10
hloubka v mm	9,8	9,9	9,9	9,9	10	10	10

Tabulka 3.1: Vzorky k měření vlivu materiálu

3.1.2 Vliv geometrie

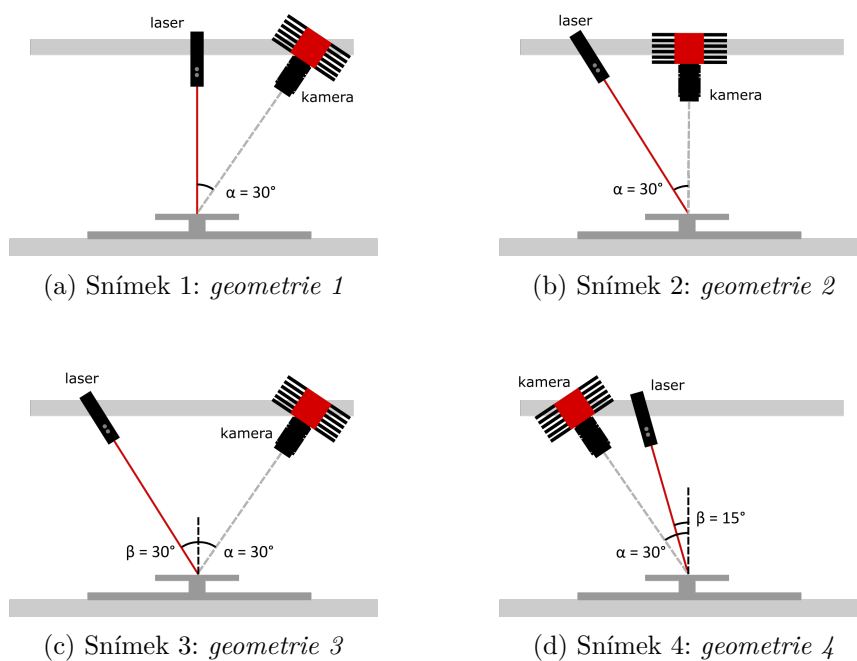
Dále byl prozkoumán vliv *geometrie* kamery a laseru. Jsou popsány 4 možné *geometrie*. Každou *geometrií* byla nasnímána koule z vhodného materiálu z prvního experimentu. Příklad takové koule je na obrázku 3.2. Úhel kamery byl u všech snímků $\alpha = 30^\circ$, u *geometrie 3* byl úhel laseru nastaven na $\beta = 30^\circ$ a u *geometrie 4* byla $\beta = 15^\circ$. Nastavení snímací konstrukce u jednotlivých snímků je na obrázku 3.3.

3.1.3 Vliv úhlu kamery a laseru

Následně byl zkoumán vliv velikosti úhlu kamery a laseru v jedné *geometrii* při snímání stejné koule jako v předchozím experimentu. Vhodná *geometrie* byla zvolena podle výsledků vlivu *geometrie* na přesnost snímání. K snímání byly vybrány úhly v tabulce 3.2.



Obrázek 3.2: Dřevěná koule o poloměru 29,5 mm



Obrázek 3.3: Návrh experimentu 2

3.1.4 Vliv barvy laseru

Posledním zkoumaným vlivem je barva laseru. Standardně se u laserových profílerů využívají červené a modré lasery [9, 10, 12]. Červené světlo má vlnovou délku 625 až 740 nm a nachází se na opačné straně viditelného spektra než modré světlo s vlnovou délkou 430 až 500 nm [37].

V experimentu byla za použití nejlepších parametrů z experimentů 2 – 3 nasnímána dřevěná koule.

snímek č.	1	2	3	4	5
úhel α	15°	22,5°	30°	37,5°	45°

Tabulka 3.2: Návrh experimentu 3

3.2 Metodika snímání

K snímání laserovým profilerem je nutné celý objekt postupně nasvítit lineárním laserem. Jakékoliv jiné formy osvětlení jsou nežádoucí. Pro eliminaci jiných světél je použit barevný filtr v barvě laseru.

Pro ovládání kamery byl použit software CXExplorer, který je součástí balíčku cxSupportPackage¹ od Automation Technology, GmbH.

Před získáním snímku je nejprve provedeno zaostření laseru a kamery. Laser se zaostřuje manuálně pomocí dvou imbusů. Zaostření kamery probíhá snímáním nepohybujícího se objektu nasvíceného laserem. Při nastavení kamery do *image módu* lze sledovat tloušťku a zaostření snímaného světla z laseru a díky tomu nastavit ideální zaostření objektivu.

Pro měření rozměrů nasnímaných objektů je nutné před samotným snímáním kameru zkalibrovat. Byla zvolena statická kalibrace, která probíhá nasnímáním speciálního kalibračního objektu (obrázek 3.4) na nepohyblivé podložce v *3D módu* kamery. Díky statické kalibraci kamera z nasnímaného kalibračního objektu získá informace o rozměrech o ose x a z (šířka a výška). Informace o rozměrech v ose y je vypočítána z rychlosti pohybu objektu a musí být zadána manuálně. Nová kalibrace musí proběhnout po každé změně *geometrie* a úhlu kamery nebo laseru.



Obrázek 3.4: Kalibrační objekt dodaný výrobcem

Samotný snímek je vytvořen na zaostřené a zkalibrované kameře nastavené v *3D módu* s pohybuujícím se objektem. Snímek je poté uložen k dalšímu zpracování.

¹<https://www.automationtechnology.de/cms/en/support-packages/>

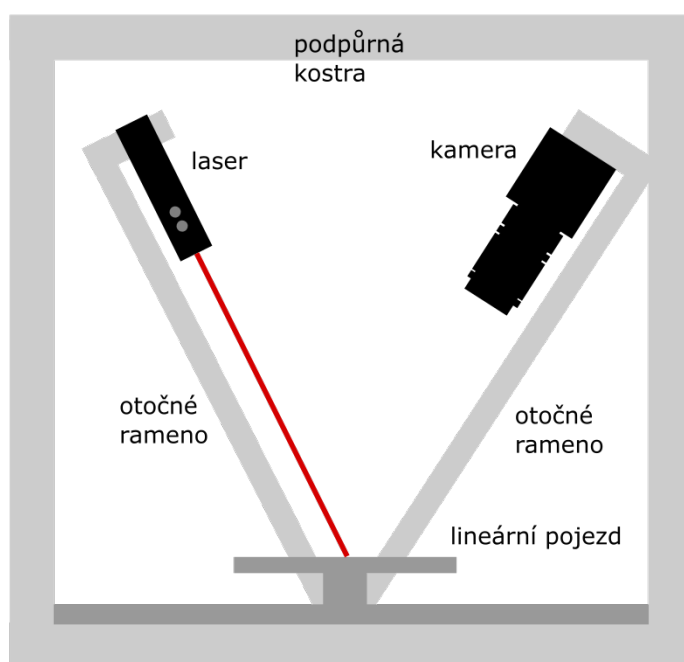
3.3 Snímací konstrukce

Pro získání snímků k měření vlivu zmíněných parametrů na přesnost je potřeba sestavit snímací konstrukci, která by umožňovala střídání všech potřebných nastavení.

Kamera musí umožnit nastavení všech *geometrií* a požadovaných úhlů kamery a laseru. Proto je třeba mít kameru a laser oddělitelné, naprosto nevhovující by bylo použití kompaktního senzoru.

Pro snímání je nezbytný rovnoměrný lineární pohyb. Bylo zvoleno pohybovat se snímaným objektem, aby stejné řešení bylo použitelné na průmyslové výrobní lince. K tomuto účelu bylo vybráno použití přesného motoru, který pohybuje s podkladovou deskou.

Navržená konstrukce má naspod lineární motor, který pohybuje s podkladovou deskou. Deska slouží k umístění snímaných objektů. Pro uchycení laseru a kamery konstrukce obsahuje dvě otočná ramena, díky kterým lze nastavovat různé úhly a *geometrie*. Stabilitu konstrukce zajišťuje vnější podpůrná kostra, ke které se dají přichytit otočná ramena nebo laser. Na konstrukci lze v případě potřeby namontovat i dvě kamery, které umožní skenovat zároveň z dvou stran. Nákres konstrukce je na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Návrh snímací konstrukce

Praktická část

Pro analýzu popsaných vlivů na přesnost snímání byla sestavena vhodná snímací konstrukce a nasnímány potřebné snímky. Byly navrženy algoritmy pro zpracování snímků a zjištění přesnosti snímání.

4.1 Snímací konstrukce

Sestavení snímací konstrukce bylo provedeno podle návrhu v sekci 3.3. Podpůrná kostra a otočná ramena konstrukce jsou smontovány z hliníkových profilů. Pro lehčí manipulaci s konstrukcí jsou přidána kolečka. Konstrukce také obsahuje desku s úchyty pro ovladače kamery, laseru a motoru. Fotografie a 3D model konstrukce jsou na obrázku 4.3.

Naspod konstrukce je lineární motor MEXE02. Je naprogramován, že při spuštění snímání zahájí pohyb o 21 cm rovnoměrnou rychlostí 15 mm za sekundu, a poté se navrátí do počáteční pozice.

Použita je kamera C2040 od Automation Technology s parametry viz tabulka 4.1. Kvůli nebezpečí přehřátí snímače jsou na tělo kamery umístěny chladiče. Kamera je napojena do počítačové sítě a je ovládána vhodným softwarem. Kamera spouští lineární motor a laser. Komunikaci mezi kamerou, motorem a laserem zajišťuje C2-I/O Panel.

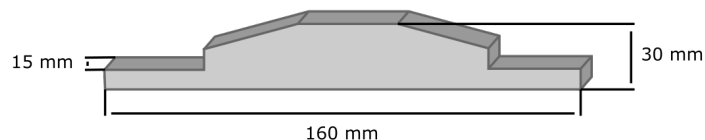
Při výběru objektivu byla klíčová velikost zorného pole, protože k úspěšné kalibraci kamery je nutné nasnímat celý kalibrační objekt. Rozměry kalibračního objektu jsou uvedeny v obrázku 4.1. Vzhledem k tvaru kalibračního

rozměry	44 mm × 44 mm × 66 mm
rozlišení	2048 × 1088 px
velikost senzoru	11,264 mm × 5,984 mm
snímkovací frekvence	až 340 fps

Tabulka 4.1: Parametry kamery C2040 od Automation Technology [27]

4. PRAKTICKÁ ČÁST

objektu je limitujícím rozměrem šířka 160 mm. Pro výpočet šířky zorného pole byla použita rovnice 2.1. Je vhodné počítat s minimálně o 10 % větším zorným polem než je velikost objektu, který zajistí rezervu 5 % z každé strany. Vzdálenost podložky od okraje objektivu je 400 mm. Centrum optické soustavy se nachází přibližně 24 mm za okrajem objektivu.



Obrázek 4.1: Rozměry kalibračního objektu

$$\begin{aligned} \text{ohnisková vzdálenost} &= \frac{\text{velikost senzoru} \times \text{vzdálenost}}{1,1 \times \text{velikost zorného pole}} \\ &= \frac{11,264 \times (400 + 24)}{1,1 \times 160} = 27,136 \text{ mm} \end{aligned}$$

Je nutné použít objektiv s ohniskovou vzdáleností 27 mm, nebo menší. Do snímací soustavy byl zvolen objektiv KOWA LM25SC s ohniskovou vzdáleností 25 mm, jehož fotografie je na obrázku 4.2. Více parametrů objektivu je v tabulce 4.2.



Obrázek 4.2: Objektiv KOWA LM25SC [38]

Reálná velikost zorného pole s objektivem KOWA LM25SC je vypočítána také z rovnice 2.1.

ohnisková vzdálenost	25 mm
minimální pracovní vzdálenost	0,15 m
velikost senzoru	1”
poloha středu optické soustavy	24 mm
typ závitu	C-mount

Tabulka 4.2: Parametry objektivu KOWA LM25SC [38]

$$\begin{aligned} \text{šířka zorného pole} &= \frac{\text{šířka senzoru} \times \text{vzdálenost}}{\text{ohnisková vzdálenost}} \\ &= \frac{11,264 \times (400 + 24)}{25} \approx 191,04 \text{ mm} \end{aligned}$$

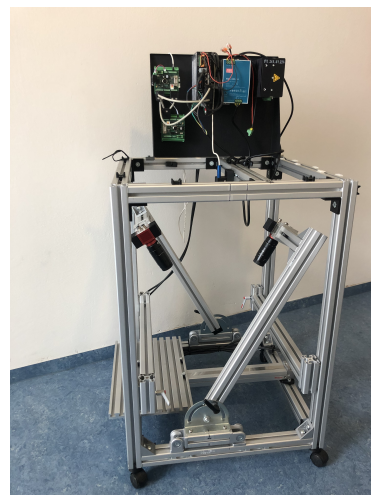
$$\begin{aligned} \text{výška zorného pole} &= \frac{\text{výška senzoru} \times \text{vzdálenost}}{\text{ohnisková vzdálenost}} \\ &= \frac{5,984 \times (400 + 24)}{25} \approx 101,49 \text{ mm} \end{aligned}$$

Pro zlepšení kvality snímků je používán barevný filtr barvy laseru.

Konstrukce umožňuje použití dvou kamer současně. Při tomto zapojení je jedna kamera zvolena jako ovládací. Při začátku snímání ovládací kamera spustí lineární pojezd a druhou kameru.



(a) 3D model



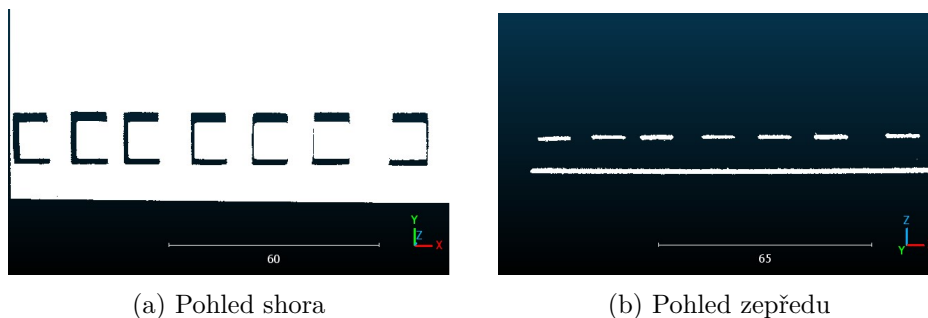
(b) Fotografie

Obrázek 4.3: Snímací konstrukce

4.2 Data

Zkalibrovanou kamerou byly získány snímky typu point cloud a uloženy ve formátu .xyz. Celkem bylo vytvořeno 12 snímků.

Pro experiment 1 byl vytvořen jeden snímek obsahující všechny zkoumané materiály 4.4. Ořezem snímku byl vytvořen snímek pro každou kostku.

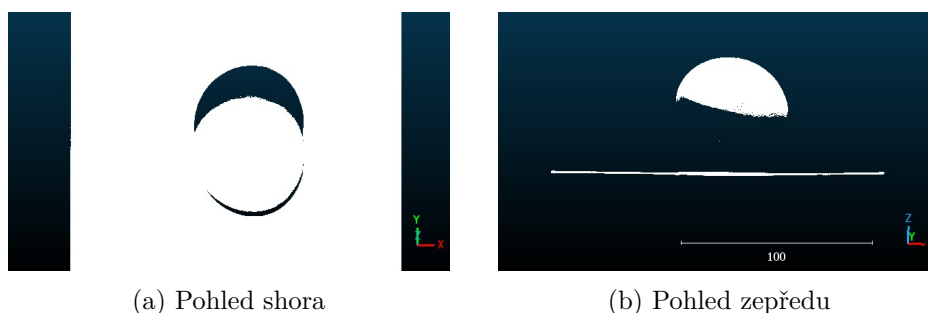


(a) Pohled shora

(b) Pohled zepředu

Obrázek 4.4: Snímek kostek z různých materiálů

Pro experiment 2 byly vytvořeny čtyři snímky koule, každý pomocí jiné *geometrie*. Experiment 3 byl vyhodnocován na pěti snímkách a experiment 4 na dvou. Příklad snímku koule je na obrázku 4.5.



(a) Pohled shora

(b) Pohled zepředu

Obrázek 4.5: Snímek dřevěné koule

4.3 Algoritmus vyhodnocení experimentu 1

Vyhodnocení vlivu materiálu na kvalitu snímání bylo provedeno pomocí následujícího algoritmu. Předzpracování snímků se skládá z ořezu snímku a odstranění artefaktů, poté byl proveden výpočet rozměrů kostek a rozptylu bodů v ose z .

Ořez a výpočet rozměrů a rozptylu byl naprogramován v jazyce Python v prostředí Jupyter notebooku s použitím knihoven Open3D² a Numpy³. Od-

²<http://www.open3d.org/>

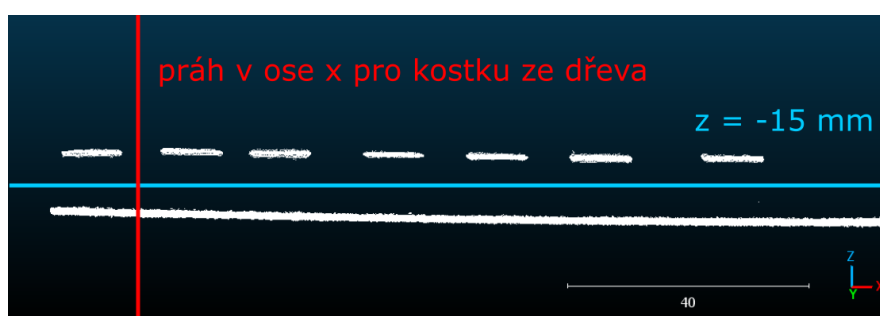
³<https://numpy.org/>

stranění artefaktů bylo naprogramováno v jazyce C++ s využitím knihovny Point Cloud Library⁴.

4.3.1 Ořez

Point cloud byl rozdělen na body podložky a body snímaných kostek. Práh v ose z byl zvolen ve výšce $z = -15$ mm, protože body podložky se nachází ve výšce $z \approx -20$ mm a body kostek mají výšku přibližně 10 mm.

Body kostek byly rozděleny na snímky po jednotlivých kostkách. Prahy pro ořez jedné z kostek jsou vizualizovány na obrázku 4.6.



Obrázek 4.6: Prahy pro ořez snímku dřevěné kostky

4.3.2 Odstranění artefaktů

Při snímání laserovým profilerem dochází k zachycení nechtěných artefaktů na přední a zadní hraně kostek. Artefakty mají podobu zvlněných okrajů přesahujících reálnou kostku, viz obrázek 4.7.

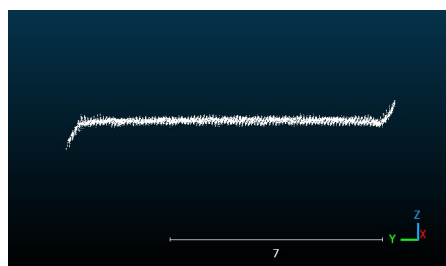
Aby bylo možné vypočítat rozměry kostek, je nutné artefakty odstranit. Byl použit algoritmus RANSAC, který aproximoval horní plochu kostky z obrázku a vyfiltroval z obrázku body, které odpovídají aproximovanému modelu, takzvané *inliers*, viz obrázek 4.7. *Inliers* byly uloženy pro každou kostku do samostatného souboru a byly použity k následnému výpočtu rozměrů.

4.3.3 Výpočet rozměrů

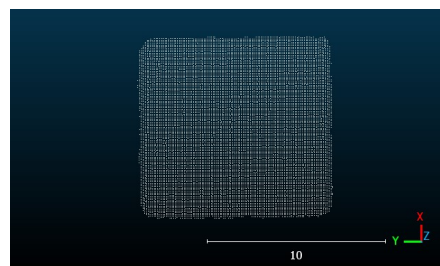
Výpočet výšky, šířky a délky kostek byl proveden ze snímku s odstraněnými artefakty. Šířka kostky byla vypočítána jako $x_{max} - x_{min}$, kde x_{max} , respektive x_{min} je maximální, respektive minimální hodnota v ose x přes všechny body. Podobně délka kostky byla vypočítána jako $y_{max} - y_{min}$, kde y_{max} , respektive y_{min} je maximální, respektive minimální hodnota v ose y přes všechny body.

Výška kostky byla vypočítána jako $z_{avg} - z_{podložka}$. Hodnota z_{avg} je průměrem hodnot všech bodů v ose z . Hodnota $z_{podložka}$ je průměrem hodnot bodů

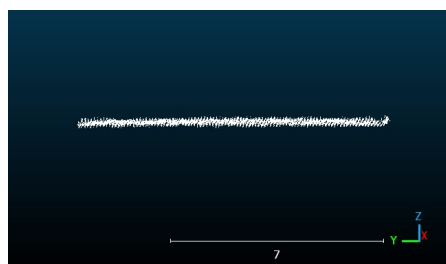
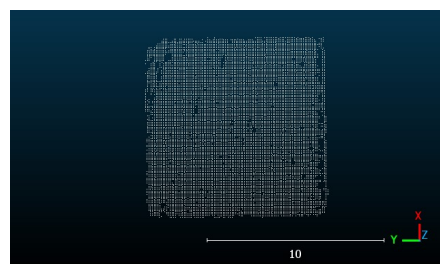
⁴<https://pointclouds.org/>



(a) Originální snímek, boční pohled



(b) Originální snímek, pohled shora

(c) *Inliers*, boční pohled(d) *Inliers*, pohled shora

Obrázek 4.7: Snímek kostky před a po odstranění artefaktů

podložky v 3 mm okolí kostky. Okolí kostky se používá pro vyšší přesnost, kdyby podložka nebyla vyrovnaná.

4.3.4 Výpočet rozptylu v ose z

Výpočet rozptylu bodů kostek v ose z byl proveden na upraveném originálním snímku kostky. *Inliers* jsou body, které mají danou maximální vzdálenost od aproximovaného modelu, ale v ploše mohou být i body s větší vzdáleností, které je nutné do výpočtu rozptylu zahrnout. Zároveň je potřeba omezit vliv artefaktů, které jsou mimo horní plochu kostky. Proto byl originální snímek oříznut pomocí hodnot x_{min} , x_{max} , y_{min} , y_{max} . Ze zbývajících bodů byl vypočítán jejich rozptyl v ose z .

4.4 Algoritmus vyhodnocení experimentů 2 – 4

Pro vyhodnocení experimentů 2 – 4 byl použit stejný postup. Předzpracování snímků je provedeno pomocí ořezu a případné rotace *profilů*. Poté byl aproximován model koule a spočítána chyba měření.

Předzpracování snímků a výpočet chyby měření byl proveden v jazyce Py-

thon v Jupyter notebookech za použití knihoven Open3D⁵, Numpy⁶ a Pandas⁷. Aproximace modelu koule byla naprogramována v jazyce C++ s využitím knihovny Point Cloud Library⁸.

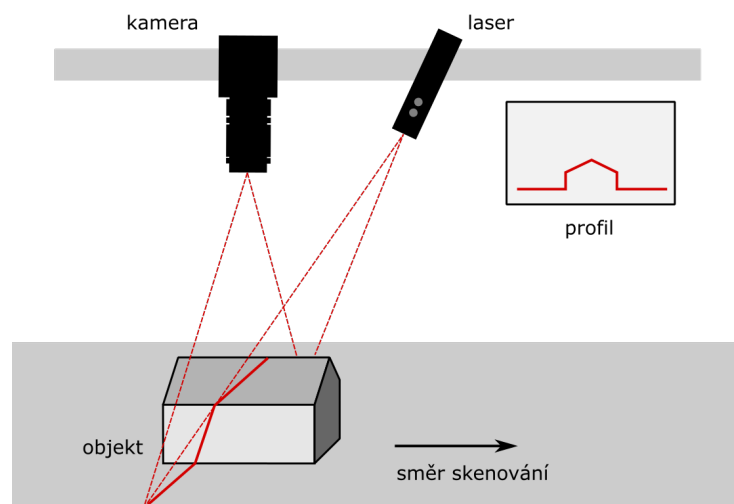
4.4.1 Ořez

Nejprve byl point cloud rozdělen na dva snímky, kdy jeden snímek obsahoval pouze snímanou kouli, a druhý obsahoval všechny ostatní body. Jedná se o body zachycující podložku. Rozdělení point cloudu bylo docíleno pomocí ořezu, kde práh byl zvolen v ose z díky znalosti rozměrů snímané soustavy. Podložka se nachází přibližně ve výšce $z \approx -20$ mm, poloměr koule je přibližně $r \approx 30$ mm, proto byl práh nastaven na $z = 0$ mm.

4.4.2 Rotace profilů

Druhým krokem předzpracování je rotace jednotlivých *profilů* snímku koule. Tento krok je proveden pouze pro *geometrie 2 – 4*.

Při snímání pomocí *geometrií 2 – 4* jsou objekty na pořízených snímcích zdeformované, viz obrázek 4.9a. Tato deformace vzniká při skládání snímků z jednotlivých *profilů*. *Profily* jsou skládány vždy svisle, ale při použití *geometrií 2 – 4* je laser nakloněn. Vznik *profilu* při nakloněném laseru je vyobrazen na obrázku 4.8. Detail zdeformovaného snímku, kde je patrné svislé skládání *profilů*, je na obrázku 4.9b.



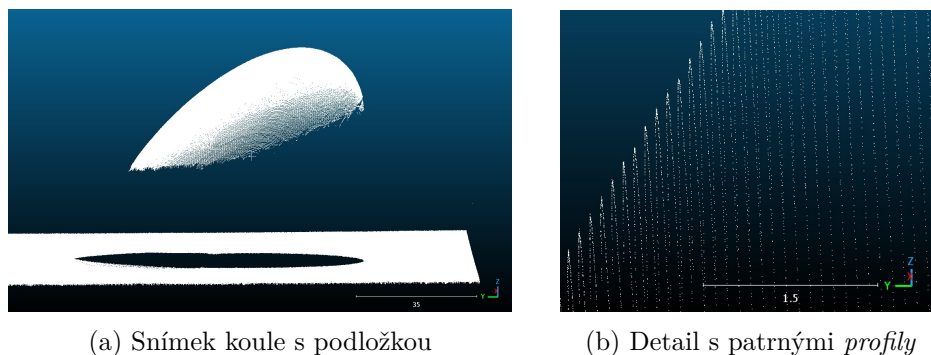
Obrázek 4.8: Vznik *profilu* při nakloněném laseru

⁵<http://www.open3d.org/>

⁶<https://numpy.org/>

⁷<https://pandas.pydata.org/>

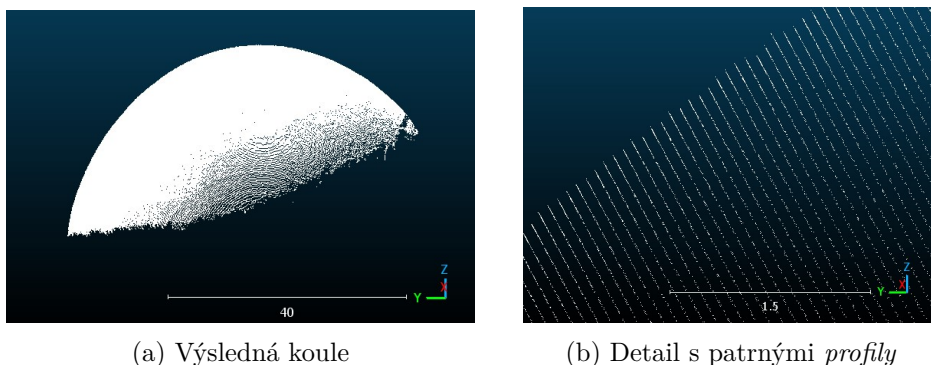
⁸<https://pointclouds.org/>



Obrázek 4.9: Snímek koule pořízený *geometrií 2* s úhlem laseru $\alpha = 30^\circ$

K odstranění deformace je nutné jednotlivé *profily* orotovat, aby jejich úhel naklonění odpovídal úhlu laseru. U každého bodu se souřadnicemi (x_1, y_1, z_1) je zanechána souřadnice x_1 beze změny. Souřadnice y_1 a z_1 jsou rotovány jako v 2D prostoru kolem bodu $(x_1, z_{podložka})$. Body podložky jsou v ose z zašuměné, proto $z_{podložka}$ je aproximována průměrem hodnot z všech bodů podložky.

Snímek koule po korekci je na obrázku 4.10a, detail s patrnými *profily* je na obrázku 4.10b.

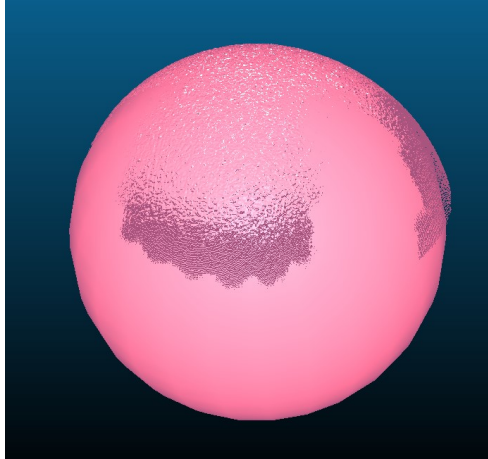


Obrázek 4.10: Snímek koule pořízený *geometrií 2* s úhlem laseru $\alpha = 30^\circ$ s orotovanými *profily*

4.4.3 Výpočet chyby měření

V předzpracovaném point cloudu se nachází body, které by ideálně měly ležet na povrchu koule. V praxi jsou ale body zatíženy šumem, proto pro získání parametrů $r, s = (a, b, c)$ snímané koule byl použit algoritmus RANSAC. Snímaná koule má poloměr $r \approx 30$ mm, proto je hledána aproximovaná koule, jejíž poloměr má rozměr $25 \text{ mm} < r < 35 \text{ mm}$. Parametr algoritmu *distance threshold* je nastaven na 0,3 mm

Point cloud s modelem koule aproximovaným pomocí algoritmu RANSAC je na obrázku 4.11.



Obrázek 4.11: Model koule s parametry $r = 30,8$ mm, $s = (4,4$ mm, $75,2$ mm, $12,8$ mm)

Pro výpočet chyby snímání oproti aproximovanému modelu byla použita metrika RMSE, stejně jako v [33].

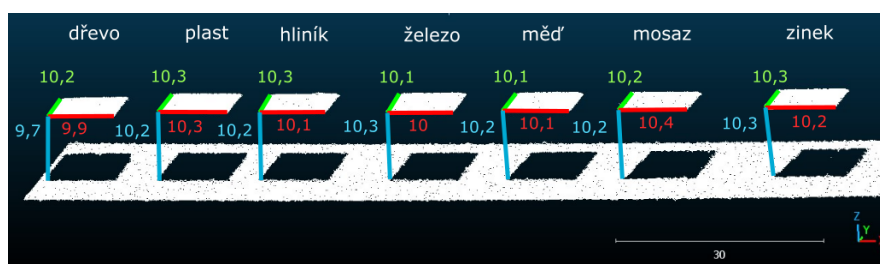
Výsledky

Získané snímky byly zpracovány pomocí navržených algoritmů. Výsledky byly porovnány a byla získána nejlepší kombinace parametrů snímací soustavy a analyzována vhodnost jednotlivých materiálů na přesné měření pomocí této 3D technologie.

5.1 Vliv materiálu

Vliv materiálu byl zkoumán na jednom snímku, který obsahoval kostky ze všech měřených materiálů. Kostky měly matnou povrchovou úpravu, proto byly vhodné ke snímání laserovým profilerem.

Snímek byl ořezán na jednotlivé kostky a zpracován postupem navrženým v sekci 4.4. Originální snímek s doplněnými rozměry získanými pomocí algoritmu je na obrázku 5.1, porovnání se skutečnými rozměry je v tabulce 5.1. Nejvyšší zaznamenaná chyba měření v *geometrii 1* s úhlem $\alpha = 30^\circ$ a červeným laserem je 0,5 mm. Rozměry byly naměřeny nejpřesněji u měděné kostky, následně u dřevěné.



Obrázek 5.1: Naměřené rozměry kostek

Výsledky rozptylu v ose z jsou v tabulce 5.2. Nejmenší šum byl naměřen u plastu a mědi. Následuje s velmi podobnými hodnotami železo, hliník, zinek a dřevo. Nejhůře v tomto výpočtu skončila mosazná kostka.

5. VÝSLEDKY

materiál	skutečné rozměry (v × š × h)	naměřené rozměry (v × š × h)	chyba v ose x	chyba v ose y	chyba v ose z	součet
dřevo	9,7 × 9,7 × 9,8	9,7 × 9,9 × 10,2	0	+0,2	+0,4	0,6
plast	10 × 10,1 × 9,9	10,2 × 10,3 × 10,3	+0,2	+0,2	+0,4	0,8
hliník	10 × 9,9 × 9,9	10,2 × 10,1 × 10,3	+0,2	+0,2	+0,4	0,8
železo	10 × 9,9 × 9,9	10,3 × 10,0 × 10,1	+0,3	+0,1	+0,2	0,8
měď	10 × 10 × 10	10,2 × 10,1 × 10,1	+0,2	+0,1	+0,1	0,4
mosaz	10 × 9,9 × 10	10,2 × 10,4 × 10,2	+0,2	+0,5	+0,2	0,9
zinek	10 × 10 × 10	10,3 × 10,2 × 10,3	+0,3	+0,2	+0,3	0,8

Tabulka 5.1: Experiment 1: výsledky měření rozměrů

materiál	dřevo	plast	hliník	železo	měď	mosaz	zinek
rozptyl	0,0034	0,0023	0,0032	0,0030	0,0027	0,0068	0,0033

Tabulka 5.2: Experiment 1: rozptyl v ose z

geometrie	poloměr	RMSE	počet bodů v point cloudu
1	30,5	0,3458	311 347
2	33,3	0,4654	342 156
3	31,3	0,9807	251 498
4	31,2	0,4576	339 632

Tabulka 5.3: Výsledky experimentu 2

Nejlépeším měřeným materiálem pro přesné snímání vychází měď. Výsledků bylo dosaženo kvalitní matnou úpravou a vysokou odrazivostí laseru, čemuž přispívá i načervenalá barva mědi.

Dalším vhodným materiálem pro přesné snímání je dřevo, které má sice vyšší rozptyl v ose z , ale je matnější.

5.2 Vliv geometrie

V experimentu 2 byl zkoumán vliv *geometrie* na přesnost snímání. Každou *geometrií* byl vytvořen jeden snímek dřevěné koule s poloměrem $r = 29,5$ mm. Dřevo bylo vybráno díky dobrým výsledkům v experimentu 1 a vyšší matnosti oproti mědi. Právě matnost povrchu je u snímání zaoblených povrchů důležitější, než u snímání rovných ploch. U lesklých zaoblených povrchů dochází k nehomogennímu odrazu laserové linky do snímače, protože u nakloněných povrchů je většina světla odražena mimo snímač kamery.

Jednotlivé snímky byly zpracovány pomocí algoritmu navrženého v 4.4. Byl sledován naměřený poloměr koule, metrika RMSE a počet bodů v point cloudu, který poukazuje na velikost nasnímané plochy koule. Výsledky jsou zapsané v tabulce 5.3.

Jednoznačně nejmenší pokrytí povrchu koule je zaznamenáno v *geometrii 3*, protože v této geometrii je nejvyšší úhel mezi kamerou a laserem. S větším úhlem dochází ve více místech k tomu, že povrch koule je nasvícen laserem, ale je v zákrytu kamery, nebo je viditelný kamerou, ale není nasvícen laserem.

Poloměr nejbližší skutečnosti byl naměřen u *geometrie 1*, stejně tak byla v této *geometrii* zjištěna nejmenší hodnota RMSE. Proto byla *geometrie 1* vyhodnocena jako nejvhodnější pro přesné měření.

Je možné, že přesnost u *geometrií 2 – 4* byla zhoršena nutností rotovat *profily* o úhel laseru, který byl nastaven s omezenou přesností (na desetiny stupně).

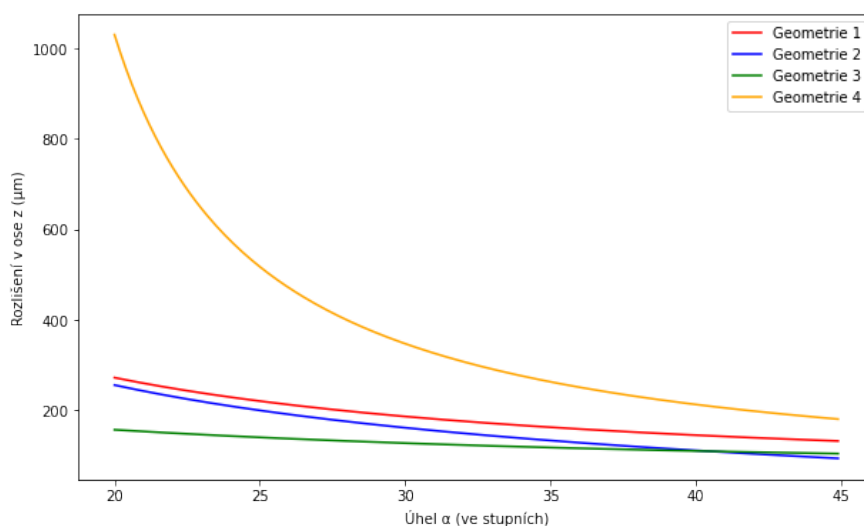
5.3 Vliv úhlu kamery a laseru

V experimentu 3 bylo analyzováno pět velikostí úhlu α v *geometrii 1*, která byla zvolena na základě výsledků experimentu 2. Snímaným objektem byla stejná dřevěná koule, jako v předchozím experimentu (obrázek 3.2).

Výsledky experimentu jsou v tabulce 5.4. Počet bodů v point cloudu se vzrůstajícím úhlem α klesá, s výjimkou úhlu 45° , důvod je stejný jako v experimentu 2.

Naměřený poloměr nejbližší skutečnému byl zjištěn u úhlu $37,5^\circ$, následovaný úhlem 30° . Úhel 30° má také nejmenší RMSE.

Při porovnání s teoretickým vlivem velikosti úhlu α u *geometrie 1* na rozlišení v ose z (obrázek 5.2) byla zjištěna shoda u klesající chyby s úhly 15° , $22,5^\circ$ a 30° , naopak překvapivá je rostoucí tendence od $37,5^\circ$.



Obrázek 5.2: Závislost rozlišení v ose z na úhlu α a zvolené geometrii

úhel	poloměr	RMSE	počet bodů v point cloudu
15,0°	33,0	2,4839	318 142
22,5°	33,5	1,1367	302 935
30,0°	30,3	0,4783	292 394
37,5°	29,4	1,0547	271 189
45,0°	33,0	2,7890	318 142

Tabulka 5.4: Výsledky experimentu 3

barva	poloměr	RMSE	počet bodů v point cloudu
červená	31,7877	0,2293	330 004
modrá	31,8144	0,3276	335 248

Tabulka 5.5: Výsledky experimentu 4

5.4 Vliv barvy laseru

V experimentu 4 byly analyzovány dva snímky dřevěné koule, jeden byl pořízen za pomoci červeného laseru a červeného barevného filtru, druhý pomocí modrého laseru s modrým barevným filtrem. Na základě výsledků předchozích experimentů byla použita *geometrie 1* s úhlem $\alpha = 30^\circ$.

Výsledky experimentu jsou v tabulce 5.5. Počet bodů v point cloudu je vyšší pro modrý laser, ale jak změřený poloměr koule, tak i RMSE mluví pro použití červeného laseru. Výsledky mohou být ovlivněny propustností širší části spektra modrého filtru, nebo rozdílnou šířkou laserové linky.

Diskuze

V experimentu 1 byl analyzován vliv materiálu na přesnost snímání kostek. Bylo vybráno 7 materiálů, které mohou být využívány v průmyslu (dřevo, plast, hliník, železo, měď, mosaz, zinek). Výčet průmyslově využívaných materiálů není kompletní, v dalších měřeních by bylo vhodné porovnat například i gumu nebo papír (karton). Všechny snímané kostky měly matnou povrchovou úpravu. Naměřené výsledky nemusí být shodné s měřením stejných materiálů v lesklé úpravě.

Experiment 2 zkoumal vliv *geometrie* kamery a laseru. Zde není možné u *geometrií 2 – 4* vyloučit ovlivnění výsledků nepřesnostmi při rotaci *profilů* o úhel laseru.

V experimentu 3 byl naměřen výrazný vliv úhlu mezi kamerou a laserem na přesnost snímání, který plně neodpovídá teoretickému rozlišení. Možným vysvětlením je problematičtější kalibrace kamery, u větších úhlů byla kalibrace úspěšná až na několikátý pokus. Jiným vysvětlením mohou být rozdílné vlastnosti laserové linky (intenzita, tloušťka) při snímání zakřiveného povrchu z různých úhlů.

Možným rozšířením experimentů 2 a 3 by bylo použití více kamer zároveň. Výsledné point cloudy mohou být složeny, čímž je možné dosáhnout vyššího pokrytí povrchu objektu.

Experiment 4 analyzoval vliv barvy laseru na přesnost snímání. Změřené výsledky mohou být ovlivněny nestejnými vlastnostmi laseru, například tloušťkou nebo intenzitou, nebo kvalitnějším červeným filtrem. Pro ověření těchto hypotéz by bylo možné měřit například vliv použití či nepoužití barevného filtru.

Dalším rozšiřujícím experimentem by mohla být analýza vlivu použitého algoritmu na extrakci *profilů* 3D módu kamery na přesnost a jeho volba vzhledem k tloušťce laserové linky.

Lepší kvality snímání je také možné dosáhnout například díky kalibraci optiky nebo použití funkcionality *multiple slope*, která umožňuje lepší snímání nehomogenních povrchů [27].

Závěr

V práci byly popsány způsoby přesného snímání 3D objektů pro průmyslové úlohy. Práce se zaměřuje zejména na snímání laserovým profilometrem.

Byla sestavena snímací konstrukce, která umožňuje střídání všech *geometrií*, úhlů kamery a laseru, upevnění několika laserů či snímání dvěma kamerami zároveň. Byla navržena metodika snímání pro získání kvalitních 2D snímků a point cloudů pro další zpracování.

V práci byly navrženy čtyři experimenty na popsání vlivu snímaného materiálu, použité *geometrie*, úhlu kamery a laseru a barvy laseru na přesnost snímání. Pro vyhodnocení experimentů byly navrženy dva algoritmy, jeden na zpracování snímku kostek, druhý na snímky koule.

Jako vhodný materiál pro snímání rovné plochy byla vyhodnocena měď s matnou povrchovou úpravou a dřevo, kdy chyba naměřených rozměrů byla maximálně 0,4 mm a rozptyl v ose z 0,0027, respektive 0,0034.

Na snímcích dřevěné koule bylo nejpřesnější použití *geometrie 1* s úhlem kamery 30° a červeným laserem, kdy bylo dosaženo chyby naměřeného poloměru koule 1 mm a RMSE 0,3458.

Navržená konstrukce, metodika snímání a algoritmy budou dále využívány pracovníky Laboratoře zpracování obrazu (ImproLab) Fakulty informačních technologií Českého vysokého učení technického v Praze⁹ pro práci s kamerou C2040 od Automation Technology.

⁹<https://fit.cvut.cz/cs/veda-a-vyzkum/zazemi/laboratore/8357-laborator-zpracovani-obrazu-improlab>

Bibliografie

1. SIEBERT, Sebastian; TEIZER, Jochen. Mobile 3D mapping for surveying earthwork using an unmanned aerial vehicle (UAV). In: *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2013, sv. 30, s. 1.
2. CHENG, Ching-Hwa; DUNG, Pham Minh; LIU, Tang-Chieh. Development of a Portable Self-Guidance Rescue Car and a 3D-Screen LIDAR Mapping System. In: *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. 2020, s. 1–1.
3. LI, Zhen; DU, Yuren; ZHU, Miaomiao; ZHOU, Shi; ZHANG, Lifeng. A survey of 3D object detection algorithms for intelligent vehicles development. *Artificial Life and Robotics*. 2021, s. 1–8.
4. HUA, Linxin; LU, Ye; DENG, Jianghua; SHI, Zhoufeng; SHEN, Daiheng. 3D reconstruction of concrete defects using optical laser triangulation and modified spacetime analysis. *Automation in Construction*. 2022, roč. 142, s. 104469.
5. XU, Jing; XI, Ning; ZHANG, Chi; SHI, Quan; GREGORY, John. Real-time 3D shape inspection system of automotive parts based on structured light pattern. *Optics & Laser Technology*. 2011, roč. 43, č. 1, s. 1–8.
6. FROSIO, Iuri; BORGHESE, N Alberto; TIRELLI, Paolo; VENTURINO, Gianfranco; ROTONDO, Giuseppe. Flexible and low cost laser scanner for automatic tyre inspection. In: *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*. 2011, s. 1–5.
7. AMINZADEH, Ahmad; KARGANROUDI, Sasan Sattarpanah; BARKA, Nouredine; EL OUAFI, Abderrazak. A real-time 3D scanning of aluminum 5052-H32 laser welded blanks; geometrical and welding characterization. *Materials Letters*. 2021, roč. 296, s. 129883.

8. GHIM, Young-Sik; YOU, Joonho; KIM, Seung-Woo. Dispersive white light interferometry for 3D inspection of thin film layers of flat panel displays. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V*. 2007, sv. 6616, s. 231–238.
9. *Automation technology: 3D sensors, Smart Infrared Cameras, NDT systems and thermography solutions for monitoring and automation - AT - automation technology*. 2020. Dostupné také z: <https://www.automatontechnology.de/cms/en/>.
10. *Laser Profiler*. Dostupné také z: <https://www.keyence.eu/products/measure/laser-2d/>.
11. *Průmyslové zpracování Obrazu*. Dostupné také z: https://www.sick.com/cz/cs/prumyslove-zpracovani-obrazu/c/g114858?q=%3ADef_Type%3AProductFamily%3Aproductsegmentcode%3Ag114858&page=2&fs=9700.
12. INFO@MICRO-EPSILON.DE, Micro-Epsilon Messtechnik -. *Snímače*. Dostupné také z: <https://www.micro-epsilon.cz/>.
13. *High-end platform for cameras with ultra-fast 3D laser triangulation*. Dostupné také z: <https://www.photonfocus.com/products/standard-cameras/photon3d/>.
14. *Compact laser displacement sensor HL-G1*. Dostupné také z: <https://www3.panasonic.biz/ac/ae/fasys/measurement/measurement/hl-g1/index.jsp>.
15. *AI 3D Industrial Robotic Solution: Mech-mind robotics*. Dostupné také z: <https://www.mech-mind.com/>.
16. SANSONI, Giovanna; TREBESCHI, Marco; DOCCHIO, Franco. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation. *Sensors*. 2009, roč. 9, č. 1, s. 568–601.
17. SIOMA, Andrzej. 3D imaging methods in quality inspection systems. In: *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*. 2019, sv. 11176, s. 111760L.
18. LUHMANN, Thomas; ROBSON, Stuart; KYLE, Stephen; BOEHM, Jan. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Walter de Gruyter, 2013.
19. MCMANAMON, Paul F. Lidar technologies and Systems. In: 2019.
20. HARIHARAN, P. Basics of Interferometry. *Basics of Interferometry*. 2007.
21. *Cameras*. Dostupné také z: <https://www.opto-e.com/en/basics/cameras>.

22. AG, Basler. *Basler ace 2 series – area scan cameras*. 2022. Dostupné také z: https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace2/#st_series_overview.
23. AG, Basler. *Line scan cameras: Basler*. 2022. Dostupné také z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/line-scan-cameras/>.
24. FULTON, Wayne. *Math of Field of View (FOV) for a Camera and Lens*. Dostupné také z: <https://www.scantips.com/lights/fieldofviewmath.html>.
25. *Optics*. Dostupné také z: <https://www.opto-e.com/en/basics/optics>.
26. *Filters - glossary*. Dostupné také z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/filters/>.
27. GMBH, Automation Technology. *C2-2040(HS)-GigE Camera Hardware Reference Manual*. 2015. Version 1.8.
28. M. LINGENFELDER, A. Dietz. *Application Note: Integrating an Automation Technology 3D Camera*. Version 2.3.
29. GMBH, Automation Technology. *CXExplorer Quickstart Guide*. Version 1.4.
30. R&D, EDF. *CloudCompare*. Verze 2.12.1. Dostupné také z: www.cloudcompare.org.
31. VUKAŠINOVIĆ, Nikola; BRAČUN, Drago; MOŽINA, Janez; DUHOVNIK, Jože. The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, roč. 50, č. 1, s. 265–274.
32. FISCHLER, Martin A; BOLLES, Robert C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*. 1981, roč. 24, č. 6, s. 381–395.
33. GERBINO, Salvatore; DEL GIUDICE, Domenico Maria; STAIANO, Gabriele; LANZOTTI, Antonio; MARTORELLI, Massimo. On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, roč. 84, č. 9, s. 1787–1799.
34. WEISSTEIN, Eric W. Rotation matrix. <https://mathworld.wolfram.com/>. 2003.
35. DOMBEK, Daniel; KALVODA, Tomáš; KLEPRLÍK, Luděk; KLOUDA, Karel. *Studijní text k předmětu LIN*. 2019. Dostupné také z: <https://kam.fit.cvut.cz/deploy/bi-lin/lin-text.pdf>.

36. BLAŽEK, Rudolf B.; KOTECKÝ, Roman; VAŠATA, Daniel; HRABÁKOVÁ, Jitka; NOVÁK, Petr. *BI-PST – Pravděpodobnost a statistika*. 2022. Dostupné také z: <https://courses.fit.cvut.cz/BI-PST/media/lectures/BI-PST-Textbook.pdf>.
37. 1. LÉKAŘSKÉ FAKULTY A UNIVERZITY KARLOVY, projekt. *Viditelné Světlo*. 2019. Dostupné také z: https://www.wikiskripta.eu/w/Viditeln%C3%A9_sv%C4%9Btlo.
38. OPTIMED, Kowa. *LM25SC discontinued, build to order*. Dostupné také z: <https://www.kowa-lenses.com/en/lm25sc-6mp-c-mount-lens>.

Seznam použitých zkratk

GigE Gigabit Ethernet

RMSE Root mean square error

2D, 3D two-dimensional, three-dimensional

Práce s kamerou C2040 a snímací konstrukcí

Při psaní práce vznikl český manuál na ovládání kamery C2040 od Automation Technology a snímací konstrukce. Přestože manuál vznikl jako samostatný dokument, pro jeho relevanci byl zahrnut do příloh práce. Manuál čerpá z [27, 28, 29].

Kameru C2040 je možné ovládat dvěma způsoby, pomocí speciálního softwaru, nebo pomocí programovacího jazyka a knihovny dodané výrobcem. Pro zjednodušení práce se snímací konstrukcí byly vytvořeny manuály, které popisují, jak dosáhnout správného nastavení kamery a získat obraz. Jsou přiloženy i soubory s nastavením kamery pro dané úkony, díky nimž je ovládání kamery jednodušší.

B.1 Instalace

Pro ovládání kamery je nutné instalovat specializovaný software. Prerekvizitou je mít počítač vybaven operačním systémem Windows XP.

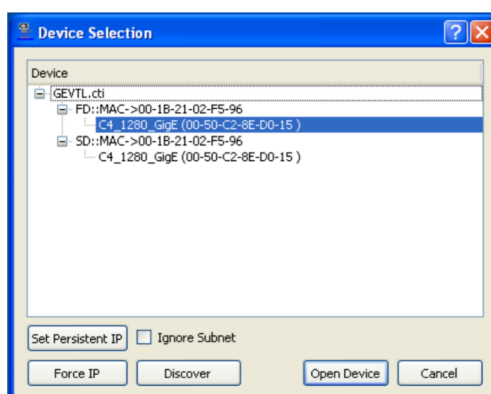
Prvním softwarem k instalaci je cxSupport Package od Automation Technology a následně aplikaci cxExplorer, která je vhodná k manipulaci s kamerou C2040. Nakonec instalujte Common Vision Blox, což je SDK vyvinuté firmou Stemmer Imaging. Obsahuje množství funkcí k řešení průmyslových problémů počítačového vidění a podporuje několik programovacích jazyků.

Potřebné instalační balíčky jsou na přiloženém médiu.

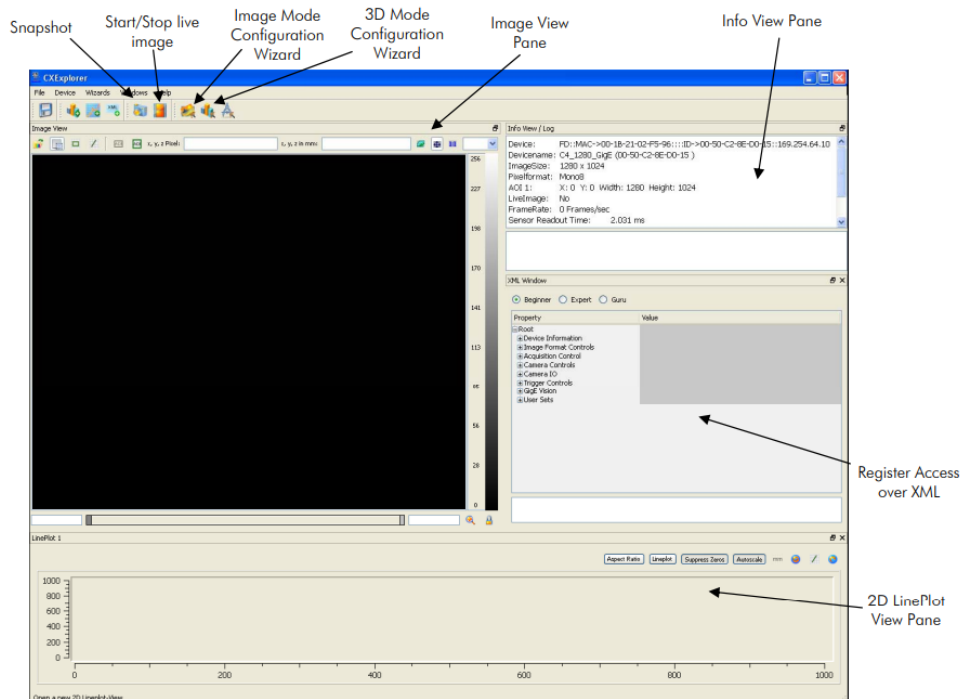
B.2 cxExplorer

CxExplorer je software od výrobce Automation Technology, GmbH k ovládání jejich kamer. Umožňuje provést nastavení parametrů kamery, kalibraci, získání snímků a mnohé další.

B. PRÁCE S KAMEROU C2040 A SNÍMACÍ KONSTRUKCÍ



Obrázek B.1: Výběr kamery v cxExplorru



Obrázek B.2: Hlavní stránka aplikace cxExplorer

Po zapojení kamery a pojezdu otevřete aplikaci cxExplorer. Nejprve je nutné vybrat kameru, která má být ovládána, pomocí vyskakovacího okna (obrázek B.1).

Po výběru kamery se zobrazí hlavní stránka aplikace, popis je na obrázku B.2.

B.3 Python

K ovládání kamery je také možné použít programovacích jazyků díky použití knihoven pro práci s kamerou. Knihovny jsou vytvořené výrobcem kamery a jsou dostupné v několika jazycích, kromě Pythonu například v C++ a C#.

B.3.1 Příprava virtuálního prostředí

Následující návod použijte, pokud potřebujete používat kameru na novém počítači, kde virtuální prostředí s potřebnými balíčky ještě neexistuje.

1. Nainstalujte Python 3.5.
 - Instalační balíček najdete na webových stránkách Pythonu.
2. Nainstalujte balíček CX package do Pythonu.
 - Pokud na počítači nemáte cxSupportPackage, instalujte ho.
 - Ve složce cxSupportPackage najdete soubor *install_cx_python_wrapper_64*
 - Do tohoto skriptu vepište cestu k právě instalovanému Pythonu 3.5.
3. V terminálu vytvořte v tomto Pythonu virtuální prostředí.
 - `python -m venv p35`, kde p35 je název nového virtuálního prostředí
4. Aktivujte prostředí a nainstalujte potřebné knihovny.
 - `.\p35\Scripts\activate`, kde p35 je název virtuálního prostředí
 - Zkopírujte soubor *requirements.txt*.
 - `pip install -r requirements.txt`

B.3.2 Aktivace virtuálního prostředí

Pokud již máte v počítači nainstalované virtuální prostředí se všemi potřebnými balíčky, je potřeba ho nejprve aktivovat. V terminálu se přesuňte do složky s nainstalovaným Pythonem 3.5 (*C:\Program Files\Python35*). Poté spusťte skript k aktivaci prostředí pomocí příkazu `p35\Scripts\activate`.

B.4 Ostření kamery

Zaostření kamery je klíčové pro získání kvalitních snímků. Ostření probíhá za snímání pouze jednoho snímku (frame) na nepohyblivém objektu.

1. Otevřete cxExplorer a připojte kameru.

2. Kameru nastavte do Image módu a vypněte pojezd.
 - *XML Window: Camera Control* → *Mode and Algorithm Control* → *Camera Mode* → *Image Mode (IMG)*
 - *XML Window: Trigger Control* → *Sequencer Mode* → *Free Run*
 - Alternativně lze načíst konfiguraci `C2_2040_GigE_focusing_config.cxc` pomocí záložky *File*.
3. Položte objekt pod laser.
4. Zapněte souvislé snímání.
 - *Continuous shot*
5. Nyní můžete manuálně ostřit objektiv a zároveň na obrazovce sledovat ostrost linky. Pozor, obraz na monitoru má mírnou latenci.
6. Pro ještě přesnější zaostření použijte úsečkový výběr (*line selection*): nakreslete úsečku kolmo na linii laseru, pomocí pravého tlačítka myši zvolte *New 2D LinePlot-View*. Zobrazí se nové okno s histogramem, vpravo klikněte na tlačítko *Automatic Update*. Nyní se histogram bude automaticky aktualizovat při ostření objektivu. Zkontrolujte kontrast laserové linky vůči pozadí.
7. Pokud je linka laseru neostrá i okem, je možné zaostřit laser. Buďte u manipulace s laserem velmi opatrní, snadno se rozbije. V místě uchycení laseru jsou dva malé otvory na imbusy. Pozor, nejprve je nutné odemknout mechanismus pomocí jednoho imbusu, až poté je bezpečné ostřit pomocí druhého. Je důležité laser uchytit v místě těchto otvorů, protože tam je konstrukce laseru nejodolnější vůči poškození.

B.5 Kalibrace kamery

Kalibrace kamery je potřebná pro získání informace o rozměrech snímaného objektu. S nekalibrovanou kamerou je také možné snímat, ale výsledkem bude pouze 2D šedotónový obrázek, kde víme, že světlejší pixely byly blíže kameře, než tmavší.

Kalibrace se provádí pomocí snímání speciálního kalibračního objektu, který byl dodán výrobcem. Objekty mají přesně zadaný tvar a mají speciální povrchovou úpravu pro kvalitní snímání. Spolu s kalibračním objektem byl dodán kalibrační soubor, kde jsou informace o přesných rozměrech objektu.

Existují dva typy kalibrace, statická a dynamická. Pro každou je potřeba jiný typ kalibračního objektu. Statická provádí kalibraci v osách x a z , informace o rychlosti pohybu objektu je nutné zadat ručně. Dynamická kalibrace

provádí kalibraci ve všech třech osách. K dispozici je pouze objekt pro statickou kalibraci.

Pro statickou kalibraci proveďte následující kroky:

1. Zapojte kameru a připravte ji do módu pro 3D snímání, ale vypněte pojezd. To provedete buď načtením konfigurace `C2_2040_GigE_calibration_config.cxc`, nebo:
 - nastavte kameru do 3D módu – *Camera Control* → *Mode and Algorithm Control* → *Camera Mode 3D Center of Gravity (COG) nebo 3D FIR Peak (FIR)*
 - vypněte pojezd – *XML Window: Trigger Control* → *Sequencer Mode* → *Free Run*
2. Umístěte kalibrační objekt pod laserovou linku, souběžně s laserem a kolmo na směr pohybu.
3. Udělejte snímek – *Snapshot*
4. Pomocí úsečkového výběru (*line selection*) spolu se zmáčknutými klávesami *Ctrl+Shift* nakreslete linku vodorovně přes celý obrázek.
5. Pomocí pravého tlačítka myši zvolte *New 2D LinePlot-View*. Zobrazí se nové okno, obrázek by měl být co nejkvalitnější, spojitý.
6. Vlevo nahoře zvolte *Wizards* → *Calibration wizard*, přeskočte kalibraci zkreslení kamery a objektivu.
7. Zadejte cestu ke kalibračnímu souboru pro daný kalibrační objekt.
8. Vyplňte rozlišení v ose *y*, které značí vzdálenost jednotlivých profilů.
9. Klikněte na tlačítko *Calibrate*.
10. Pokud kalibrace byla úspěšná, je možné si kalibraci uložit do souboru, ze kterého lze později znovu načíst. Pokud kalibrace úspěšná nebyla, je třeba získat kvalitnější snímek. Mezi časté chyby snímku patří:
 - objekt není nasnímaný celý
 - je vidět příliš okolí
 - nezaostřený objektiv
 - ve snímku se objevují stíny nebo chybějící profily

Při příštím spuštění kamery je možné místo kalibrace pouze načít již hotovou kalibraci ze souboru, za podmínky, že se neměnilo vnější nastavení kamery (konfigurace, úhly, vzdálenost, objektiv, ...) a zároveň máme v úmyslu použít stejné nastavení oblasti zájmu (parametr kamery AOI - area of interest, který dokáže omezit snímanou oblast).

B.6 Snímání

Pokud neproběhla kalibrace ani nebyl načten kalibrační soubor, výsledný snímek nebude obsahovat žádnou informaci o rozměrech a nepůjde vygenerovat point cloud.

B.6.1 Snímání pomocí cxExploreru

1. Zapojte kameru a lineární pojezd, otevřete cxExplorer a připojte kameru.
2. Načtete předpřipravenou konfiguraci `camera1+Jumbo.cxc`
3. Po zmáčknutí tlačítka *Snapshot* dojde ke snímání.
4. Snímek si můžete uložit ve formátu `.tif` pomocí záložky *File*.
5. Pokud chcete získat point cloud, vyberte oblast okolo snímaného objektu pomocí obdélníkového výběru.
6. Klikněte pravým tlačítkem myši, vyberte *New 3D View*.
7. V novém okně se zobrazí 3D snímek.
8. Pro uložení point cloudu klikněte na *File* → *Export Image*, kde si můžete vybrat z několika dostupných formátů.

B.6.2 Snímání dvěma kamerami

Snímání pomocí dvou kamer zároveň je možné jak v cxExploreru, tak pomocí Pythonu obdobně jako při snímání jednou kamerou. Jedné kameře načtete konfiguraci `camera1+Jumbo.cxc` a druhé `camera2+Jumbo.cxc`.

B.6.3 Snímání pomocí pythonu

1. Aktivujte python prostředí a spusťte jupyter notebook `single_shot_load_configuration-generate-point-cloud.ipynb`.
2. Doplňte cestu ke konfiguraci k načtení.
3. Spusťte jupyter notebook.

B.7 Multiple slope

Zde je návod, jak optimálně nastavit snímání s funkcí Multiple slope.

1. Nastavte Single Slope.

- *Acquisition Control* → *ExposureSlopeKneePointCount=0*
2. Nastavte MAX algoritmus.
 - *Camera Control* → *Mode and Algorithm Control*
 3. Nastavte výstup ve formátu DC0, abyste získávali nejvyšší intenzitu.
 - *Camera Control* → *Data Output*
 4. Nastavte čas snímání na 1 μ s.
 - *Acquisition Control* → *Exposure time*
 5. Nasnímejte obrázek objektu.
 6. Zkontrolujte, jestli jsou na obrázku saturované pixely (s intenzitou 1023). Pokud ano, snižte intenzitu laseru a opakujte snímání.
 7. Nastavte AoiThreshold na 0.
 - *Camera Control* → *AOIs*
 8. Vypněte laser a pořídte snímek. Obrázek bude tvořen šumem pozadí.
 - *Light Control*
 9. Najděte maximální intenzitu pixelu v obrázku pořízeném bez laseru. Nastavte AoiThreshold na hodnotu o 10 vyšší, než je nejvyšší nalezená intenzita šumu.
 - *Camera Control* → *AOIs*
 10. Zapněte laser.
 - *Light Control*
 11. Zvyšte čas snímání. Pořídte snímek. Zvyšujte expoziční čas, dokud na výsledném obrázku nebude minimum pixelů s nulovou intenzitou (kromě oblastí, které jsou zastíněné).
 12. Nastavte Dual Slope.
 - *Acquisition Control* → *ExposureSlopeKneePointCount=1*
 - *Acquisition Control* → *ExposureSlopeKneePointSelector=1*
 13. Nastavte ExposureSlopeDuration na hodnotu $(ExposureTime1)/ExposureTime$.
 14. Nasnímejte DC0 a zkontrolujte hodnoty intenzit pixelů. Pokud jsou saturované, snižte ExposureSlopeThreshold a opakujte.

15. Změňte algoritmus na COG nebo FIR-Peak.
16. Nastavte DC2 a poté deaktivujte DC0.

B.8 FAQ

Časté chyby při práci s kamerou.

B.8.1 Nejede lineární pojezd

- Pokud bliká vpravo nahoře na ovladači motoru PWR/ALM, je nutné připojit pojezd k počítači pomocí kabelu micro-usb a resetovat alarm.
- Zapněte program MEXE02.
- Vlevo klikněte na tlačítko s usb kabelem a šipkami (u nápisu *Products being connected to PC*) a u produktu *ORIENTAL MOTOR* klikněte na druhé tlačítko.
- Vytvoří se nové okno. Vlevo dole klikněte na *(m1) Teaching, remote operation*.
- Nahoře zaškrtněte *(m1) Teaching, remote operation* a poté klikněte na tlačítko *Alarm Reset*.

B.8.2 Při pokusu o získání snímku dostanu timeout

- Zkontrolujte, že máte vypnutý firewall.
- Pokud nepoužíváte předpřipravené konfigurace a používáte lineární pojezd, je možné, že pohyb motoru je příliš krátký a počet profilů na snímek příliš velký.
- Buď zvýšte vzdálenost, na kterou se podložka pohybuje, nebo snižte parametr *Profiles per frame* (*Camera control -> Mode and Algorithm Control -> Profiles per Frame*).

B.8.3 V Pythonu padá funkce `cx_waitForBuffer` s errorem 6

- Jedná se o timeout, možná řešení jsou popsány výše.

Obsah přiloženého CD

	readme.txt	stručný popis obsahu CD
	src	
	impl	zdrojové kódy implementace
	thesis	zdrojová forma práce ve formátu \LaTeX
	text	text práce
	thesis.pdf	text práce ve formátu PDF