

3D optický profilometr pro detekci rozměrových vad

Bc. Jiří Franěk

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací laboratorního prototypu 3D optického profilometru pro detekci rozměrových vad výrobků pomocí bezkontaktní metody snímání laserové linie. Navržený systém využívá principy strojového vidění a 3D rekonstrukce k získání prostorových dat ve formě bodového mračka, které slouží k následné analýze geometrie měřeného objektu. Teoretická část práce popisuje základní principy optiky, projekce, kalibrace kamerového systému a metody rekonstrukce trojrozměrných struktur. Praktická část se zaměřuje na konstrukci zařízení, výběr vhodného hardwaru, návrh algoritmu pro zpracování obrazu a vývoj řídicí aplikace. Systém byl testován na sadě referenčních objektů a výsledky měření byly porovnány s komerčním scannerem. Výsledky ukazují, že i s využitím cenově dostupných komponent a open-source softwaru lze dosáhnout vysoké přesnosti a opakovatelnosti měření.

Klíčová slova: strojové vidění, 3D rekonstrukce, profilometr, bodové mračno, rozměrové vady

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design and implementation of a laboratory prototype of a 3D optical profilometer for detecting dimensional defects in products using a non-contact laser line scanning method. The proposed system utilizes principles of machine vision and 3D reconstruction to obtain spatial data in the form of a point cloud, which is then used for subsequent analysis of the geometry of the measured object. The theoretical part of the thesis describes the fundamental principles of optics, projection, camera system calibration, and methods of three-dimensional structure reconstruction. The practical part focuses on the construction of the device, selection of suitable hardware, development of the image processing algorithm, and creation of the control application. The system was tested on a set of reference objects, and the measurement results were compared with a commercial scanner. The results show that high accuracy and repeatability of measurements can be achieved even using cost-effective components and open-source software.

Keywords: machine vision, 3D reconstruction, profilometer, point cloud, dimensional defects

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Novákovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a podnětné konzultace, které významně přispěly k realizaci této práce. Poděkování rovněž patří centru CEBIA-Tech za umožnění spolupráce, díky které bylo možné provést porovnání naměřených výsledků s komerčním systémem.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST.....	14
1 STROJOVÉ VIDĚNÍ.....	15
1.1 VÝZNAM A VÝVOJ STROJOVÉHO VIDĚNÍ	15
1.2 STRUKTURA ÚLOHY STROJOVÉHO VIDĚNÍ.....	16
1.2.1 Překážky a výzvy systému strojového vidění	17
1.3 OBRAZOVÁ INFORMACE	18
1.3.1 Diskrétní obraz	18
1.3.2 Jasová a barevná složka	19
1.3.3 Rozlišení a bitová hloubka	21
1.3.4 Histogram obrazu	22
1.3.5 Shrnutí	22
1.4 OPTIKA A SVĚTLO.....	23
1.4.1 Světlo.....	23
1.4.2 Odraz a absorpce světla.....	25
1.5 MODEL KAMERY A PROJEKCE OBRAZU	27
1.5.1 Souřadné systémy soustavy.....	27
1.5.2 Model kamery	28
Projekční matice	30
1.5.3 Perspektivní projekce	31
1.6 KOMPONENTY SYSTÉMU STROJOVÉHO VIDĚNÍ.....	32
1.6.1 Optické senzory.....	32
1.6.2 Objektivy a čočky	33
1.6.3 Osvětlení	38
1.6.4 Řídící jednotky a rozhraní.....	38
1.6.5 Software pro vyhodnocení	38
1.7 METODY KALIBRACE KAMEROVÝCH SYSTÉMŮ.....	39
1.7.1 DLT – přímá lineární transformace.....	39
1.7.2 Zhangova metoda	39
1.8 PŘÍKLADY VYUŽITÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ V PRAXI	40
2 METODY REKONSTRUKCE	42
2.1 3D REKONSTRUKCE A MĚŘENÍ	42
2.1.1 Bodové mračno	42
2.1.2 Metody extrakce bodového mračna	43
2.2 PŘEVOD BODOVÉHO MRAČNA NA CAD MODEL.....	44
2.3 FILTRACE A KOREKCE CHYB.....	44
2.4 PRÁCE S BODOVÝMI MRAČNY	45
3 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ ROZMĚROVÝCH VAD.....	47

3.1	ÚVOD A VÝZNAM MĚŘENÍ ROZMĚROVÝCH VAD	47
3.2	KLASIFIKACE ROZMĚROVÝCH VAD	47
3.2.1	Tvar, kontura a rozměr	47
3.2.2	Drsnost povrchu (Ra, Rz)	48
3.3	METODY MĚŘENÍ ROZMĚROVÝCH VAD	48
3.3.1	Kontaktní metody (dotykové snímače, souřadnicové měřicí stroje – CMM)	48
3.3.2	Optické (bezkontaktní) metody	49
3.3.3	Srovnání kontaktních a optických metod (výhody, nevýhody, přesnost)	49
3.4	SOUČASNÉ TECHNOLOGIE A JEJICH VYUŽITÍ	49
3.4.1	Profilometry (optické, laserové)	50
3.4.2	3D skenery a kamerové systémy	51
II	PRAKTICKÁ ČÁST	52
4	NÁVRH SYSTÉMU	53
4.1	CÍLE SYSTÉMU	53
4.2	NÁVRH SESTAVY SYSTÉMU STROJOVÉHO VIDĚNÍ	54
4.2.1	Parametry měřených objektů a pracovní prostor	54
4.2.2	Limity navržené soustavy	55
4.3	VOLBA HARDWARU	56
4.3.1	Kamera Basler	56
4.3.2	Objektiv Basler	58
4.3.3	Laserový modul	59
4.3.4	Krokový motor a řadič	59
4.3.5	Výpočetní a ovládací jednotka	61
4.3.6	Rám konstrukce	62
4.3.7	Osvětlení	63
4.3.8	Výsledná sestava	64
4.4	SOFTWARE	65
4.5	KOMUNIKACE A ZAPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT	68
4.5.1	Schéma zapojení soustavy	68
4.5.2	Kamerový systém	68
4.5.3	Ovládání lineárního posuvu	69
4.5.4	Ovládání modulu laseru	70
4.5.5	Grafický výstup na monitor a perifrie	70
5	NÁVRH ALGORITMU	72
5.1	KALIBRACE KAMERY	74
5.2	ROVINA LASERU	75
5.3	POŘÍZENÍ SNÍMKU A POSUN POJEZDU	77
5.4	EXTRAKCE BODŮ	78
5.5	VÝPOČET PROJEKCE A TRANSFORMACE BODŮ	80

5.6	GENEROVÁNÍ A EXPORT BODOVÉHO MRAČNA	80
5.7	SKRIPT PRO KALIBRACI	80
5.8	VÝPOČET VZDÁLENOSTI KROKU POSUNU	81
5.9	RASPBERRY PI – SERVER.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
6	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	82
6.1	MĚŘENÉ OBJEKTY	82
6.2	ZÍSKANÁ DATA	82
6.3	VIZUALIZACE VÝSLEDKŮ	83
6.4	VYHODNOCENÍ DAT.....	86
6.4.1	Import do softwaru	86
6.4.2	Opakovatelnost a přesnost měření	88
6.5	EXTERNÍ SPOLUPRÁCE.....	89
6.5.1	Základní informace	89
6.5.2	Specifikace komerčního systému a postup měření	89
6.6	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S KOMERČNÍM SYSTÉMEM.....	91
6.6.1	Vizuální porovnání bodových mračen	92
6.6.2	Zhodnocení porovnání bodových mračen.....	93
6.6.3	Ekonomické zhodnocení	94
7	NÁVRH ŘÍDÍCÍ APLIKACE.....	95
7.1	POŽADAVKY NA APLIKACI.....	95
7.2	REALIZACE A UKÁZKY PROSTŘEDÍ	95
7.2.1	Struktura adresářů	96
7.2.2	Úvodní okno.....	97
7.2.3	Vlastní měření	98
7.2.4	Kalibrace kamery a laseru	98
7.2.5	Extrakce bodů, výpočty transformací a export bodového mračna.....	99
7.2.6	Vizualizace bodového mračna	100
7.2.7	Aplikace – shrnutí	101
	ZÁVĚR	102
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	105
	SEZNAM OBRÁZKŮ	110
	SEZNAM TABULEK.....	112
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	113
	SEZNAM PŘÍLOH	114

ÚVOD

V moderní průmyslové výrobě hraje kontrola kvality zásadní roli v celkovém řízení výroby a zajištění spolehlivosti finálních produktů. Se zvyšujícími se nároky na přesnost, opakovatelnost a efektivitu měření narůstá potřeba automatizovaných systémů, které dokážou detekovat rozměrové odchylky bez nutnosti zásahu operátora. Jedním z progresivních přístupů k tomuto problému je využití optických bezkontaktních metod založených na principu strojového vidění a 3D rekonstrukce.

Cílem této diplomové práce je návrh a realizace prototypu 3D optického profilometru schopného detekovat rozměrové vady výrobků na základě snímání laserové linie. Systém je navržen tak, aby poskytoval prostorová data ve formě bodového mračka, které lze dále zpracovat pro účely metrologie, analýzy geometrických vlastností objektů či detekce výrobních defektů.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. V teoretické části jsou popsány klíčové principy strojového vidění, fyzikální zákonitosti šíření světla a základní metody rekonstrukce trojrozměrného tvaru. Důraz je kladen na pochopení modelu kamery, kalibraci systému a faktory ovlivňující kvalitu obrazových dat. Dále jsou zde rozebrány metody měření rozměrových vad a srovnání kontaktních a bezkontaktních metod.

V praktické části je představen návrh kompletního měřicího systému, který zahrnuje výběr vhodného hardwaru (kamera, objektiv, laser, pohon), návrh řídicí aplikace a algoritmu pro rekonstrukci 3D profilu objektu. Výsledkem je funkční laboratorní prototyp, který byl testován na sadě referenčních objektů. Výstupní data byla následně porovnána s výsledky měření z komerčního zařízení.

Význam této práce spočívá nejen v návrhu a realizaci konkrétního zařízení, ale také v prokázání možnosti využití open-source nástrojů a cenově dostupných komponent k dosažení vysoké míry přesnosti a opakovatelnosti při měření rozměrových vad.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 STROJOVÉ VIDĚNÍ

Strojové vidění (angl. Machine Vision) představuje interdisciplinární oblast, která integruje principy optiky, elektroniky a výpočetní techniky za účelem získávání, zpracování a analýzy obrazových dat. Mezi primární cíle patří řešení problematiky automatizace úloh, jako je například vizuální inspekce, měření, kontrola kvality, navigace či řízení v reálném čase [1].

Úvodní kapitola se zaměřuje na teoretické základy strojového vidění, nezbytné pro návrh a implementaci automatizovaného systému optického profilometru. Úvodní část se věnuje fyzikálním aspektům šíření světla, jeho interakci s povrchy a vnímání barev. Následně jsou stručně rozebrány principy geometrické optiky a projekčních modelů, které tvoří základ matematického popisu zobrazování. Zvláštní pozornost je věnována problematice kamerové kalibrace a transformaci obrazových souřadnic na reálné prostorové souřadnice, neboť právě tyto kroky jsou klíčové pro zajištění přesnosti měření v navrhovaném systému optického profilometru. Vzhledem k tomu, že profilometr rekonstruuje trojrozměrnou strukturu objektu na základě dvourozměrného zobrazení laserové linie, je nutné přesně znát geometrické vlastnosti zobrazovacího systému. Závěrečná část kapitoly pak představuje typické komponenty systémů strojového vidění, jako jsou snímače obrazu, objektivy a osvětlení, které hrají klíčovou roli v kvalitě získaných dat.

1.1 Význam a vývoj strojového vidění

Vývoj v oblasti strojového vidění je úzce spjat s pokrokem v dostupnosti výkonných obrazových senzorů, nárůstem výpočetního výkonu a rozvojem algoritmů pro zpracování obrazu. Díky tomu se strojové vidění stává nedílnou součástí moderních automatizovaných systémů, zejména v průmyslové výrobě, robotice a měřicích aplikacích [2].

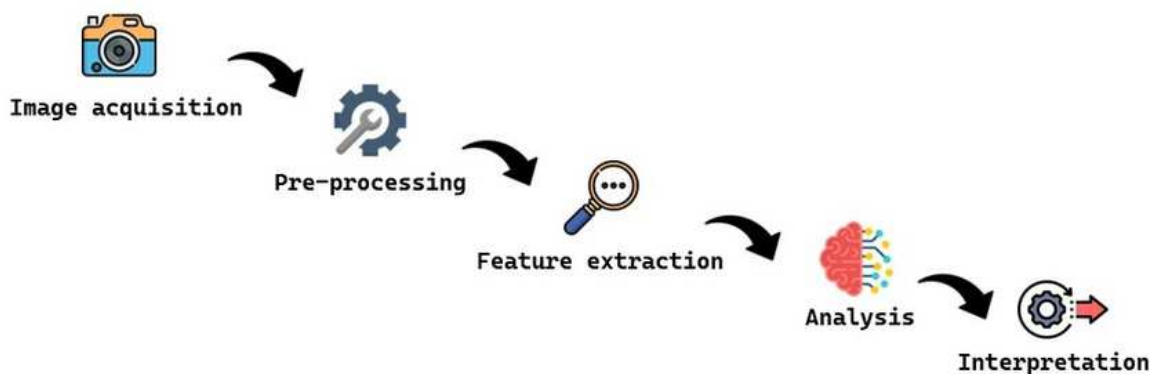
Klíčovým předpokladem pro úspěšnou implementaci systémů strojového vidění je znalost a porozumění fyzikálním principům zobrazování, matematickým modelům reprezentace obrazu a softwarovým nástrojům pro analýzu manipulaci obrazových dat. V rámci této práce slouží teoretický základ jako výchozí bod pro návrh konkrétního řešení optického profilometru, zaměřeného na detekci rozměrových odchylek výrobků.

Schopnost systému analyzovat obrazová data a rozpoznávat objekty významně přispívá ke zvýšení autonomie, přesnosti a spolehlivosti automatizovaných měřicích a kontrolních

procesů. Základní principy strojového vidění se tak opírají nejen o optické a fyzikální zákonitosti, ale také o pokročilé algoritmy pro rekonstrukci a interpretaci reálného světa na základě snímaných obrazů.

1.2 Struktura úlohy strojového vidění

Typická úloha strojového vidění spočívá v zachycení obrazu objektu pomocí kamery, následném zpracování obrazových dat a vyvození rozhodnutí na základě předem definovaných cílů a kritérií [3]. Níže uvedené schéma představuje postup základních kroků typické úlohy.



Obrázek 1 Základní pracovní tok úlohy strojového vidění

(zdroj: [4])

V případě optického profilometru se jedná konkrétně o úlohu rekonstrukce tvaru a rozměrů objektu na základě snímání laserového profilu a následné detekce rozměrových vad, které mohou ovlivnit funkčnost, bezpečnost, životnost či estetiku výrobku. Úloha strojového vidění se obvykle skládá z několika hlavních kroků [4]:

Získání obrazu (image acquisition)

Prvním krokem je snímání objektu kamerovým systémem za definovaných podmínek osvětlení. Výběr vhodného senzoru a optiky má zásadní vliv na kvalitu obrazu a tím i na celkovou úspěšnost analýzy.

Předzpracování obrazu (image preprocessing)

Následujícím krokem je úprava obrazu za účelem zvýraznění relevantních informací – může zahrnovat filtraci šumu, normalizaci intenzity, zvýšení kontrastu nebo převod na vhodný barevný či černobílý formát.

Extrahování charakteristik (feature extraction)

Z předzpracovaného obrazu se získávají konkrétní rysy, jako jsou hrany, kontury, geometrické útvary či právě linie laseru. V optickém profilometru se jedná především o detekci pozice laserové linie, která odpovídá výškovému profilu objektu.

Vyhodnocení a rozhodování

Na základě získaných dat se provede porovnání s referenčními hodnotami nebo geometrickými specifikacemi. Rozměrové odchylky jsou pak následně detekovány, klasifikovány a v případě, že jsou mimo dovolené tolerance, vyhodnoceny jako vady.

1.2.1 Překážky a výzvy systému strojového vidění

Ačkoli systémy strojového vidění mohou být vysoce efektivní a elegantní řešení pro různorodé aplikace, při jejich návrhu a provozu je třeba čelit celé řadě výzev a omezení [5]:

Proměnlivé světelné podmínky

Kvalita obrazu je silně závislá na osvětlení scény. Stíny, odlesky nebo kolísající intenzita světla mohou výrazně ovlivnit přesnost detekce a samotného měření. V systémech jako optický profilometr je nezbytné použít řízené a stabilní osvětlení, často v kombinaci s laserovým zdrojem.

Optické vlastnosti materiálů

Různé materiály mají odlišné vlastnosti v odrazu a absorpci světla. Lesklé nebo průhledné povrchy mohou způsobit optické artefakty, které komplikují interpretaci obrazu.

Přesnost kalibrace

K dosažení přesného měření je nezbytná kvalitní kalibrace kamery, objektivu a celého systému. Seběmenší geometrické zkreslení nebo nesprávně definované prostorové souřadnice mohou vést k chybným výsledkům [6].

Rychlost zpracování

V reálném čase prováděná kontrola často vyžaduje velmi rychlé zpracování obrazových dat. To klade vysoké nároky na výkon hardwaru i optimalizaci použitých algoritmů.

Variabilita objektů

Při kontrole různorodých výrobků je potřeba navrhnout systém dostatečně flexibilní a robustní, aby zvládl variace v tvarech, barvách či velikostech bez nutnosti zásahu operátora.

Interference a šum

Systém musí být robustní vůči vnějším vlivům, jako je elektromagnetický šum, vibrace nebo mechanické nestability, které mohou ovlivnit jak optickou sestavu, tak obrazová data.

Všechny tyto překážky je třeba důkladně analyzovat a zohlednit při návrhu systému strojového vidění. Správná volba komponent, precizní kalibrace a důkladně navržené algoritmy zpracování dat jsou klíčem k dosažení spolehlivého a přesného měření

1.3 Obrazová informace

Z důvodu charakteru práce je nutné si alespoň zjednodušeně představit strukturu digitálního obrazu. Obraz lze matematicky chápat jako funkci, která každému bodu v rovině přiřazuje intenzitu světla [7]. Ve spojitém tvaru je tato funkce reprezentována jako:

$$f(x, y) \rightarrow \mathbb{R} \quad (1)$$

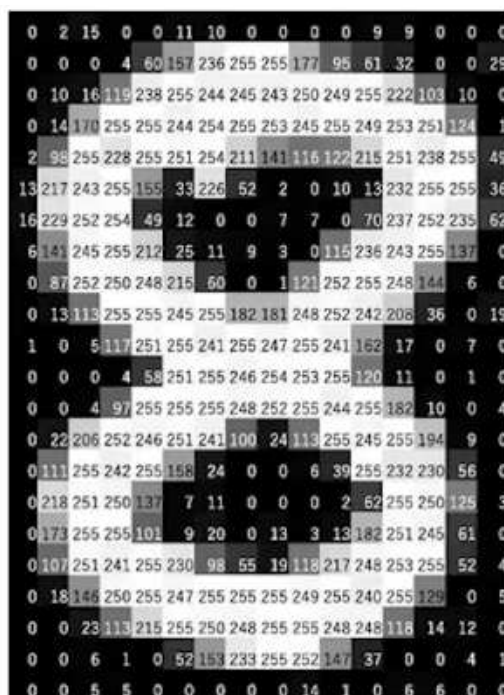
kde x a y jsou reálné prostorové souřadnice v obrazové rovině a $f(x, y)$ udává intenzitu odraženého nebo emitovaného světla v daném bodě. Tato spojitá funkce je však v digitálním systému vzorkována a kvantována, čímž vzniká diskrétní obraz reprezentovaný maticí hodnot.

1.3.1 Diskrétní obraz

V reálných systémech je obraz tvořen konečným počtem vzorků, tzv. pixelů. Každý pixel odpovídá určité oblasti ve scéně a nese informaci o světelné intenzitě (v případě monochromatických obrazů) nebo barevné složce (v případě barevných obrazů). Diskrétní obraz tedy vyjadřujeme jako dvourozměrnou matici:

$$F(u, v) \rightarrow \mathbb{Z}^+ \subset \mathbb{R} \quad (2)$$

kde $u \in \{0, 1, \dots, M-1\}$, $v \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ a $M \times N$ je pak rozlišení obrazu. Hodnota funkce $F(u, v)$ označuje jas (neboli intenzitu) daného pixelu. V typickém 8bitovém systému nabývá $F(u, v)$ hodnot v intervalu $\langle 0, 255 \rangle$, kde 0 představuje černou a 255 bílou barvu.



Obrázek 2 Šedotónový obraz – reprezentace maticí hodnot

(zdroj: [8])

1.3.2 Jasová a barevná složka

Analogicky v případě barevného obrazu je pak každý pixel reprezentován vektorově, např. v systému RGB:

$$F(u, v) = \begin{bmatrix} R(u, v) \\ G(u, v) \\ B(u, v) \end{bmatrix} \quad (3)$$

kde každá složka je samostatná obrazová matice odpovídající příslušné barvě. Existují i alternativní barevné prostory, jako např. HSV, nebo skupiny prostorů jako YCbCr či CIE Lab, které umožňují oddělit jasovou a barevnou informaci. Převody mezi barevnými prostory slouží jako velmi užitečný nástroj například pro segmentaci obrazu nebo detekci hran.

Barevné systémy

Barvy vznikají jako důsledek interakce světla s objekty a jejich vlnové délky. Pro účely strojového vidění je nezbytné rozumět různým barevným modelům, které umožňují efektivní reprezentaci a analýzu barevných informací. Mezi nejběžněji používané modely barev patří, a modely definované Mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE), jako je CIE XYZ nebo CIE Lab. Každý z těchto modelů má specifické výhody a je vhodný pro různé

aplikace, v závislosti na požadavcích na analýzu a zpracování obrazů. Běžně používané barevné modely:

- **RGB model:**

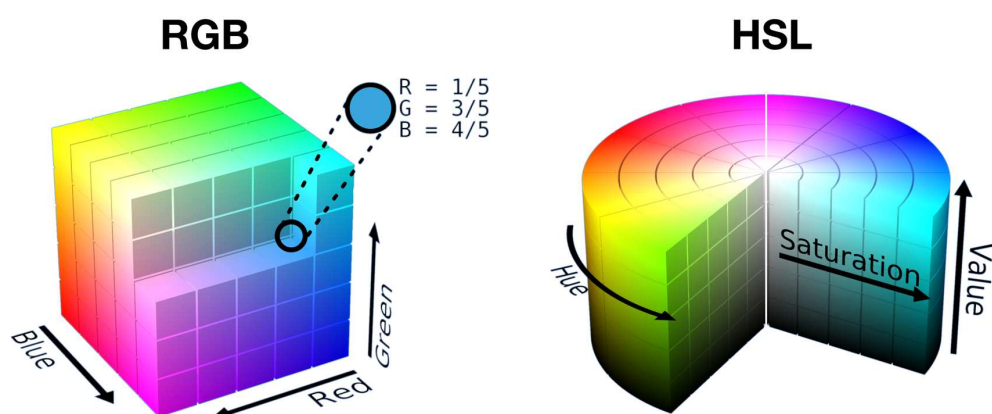
Tento model je založen na trojici základních barev: červené, zelené a modré. Je široce využíván v digitálních kamerách a zobrazovacích zařízeních, protože odpovídá způsobu, jakým jsou barvy zobrazeny na obrazovkách. RGB model je velmi efektivní pro vizuální zobrazení, ale pro analýzu obrazů, kde je důležité vnímat změny ve světelných podmínkách nebo pro rozlišení určitých charakteristik, může být méně vhodný.

- **HSV model:**

Tento model odděluje barvu na odstín (Hue), sytost (Saturation) a jas (Value), což z něj činí vhodný model pro analýzu barev v podmínkách, kde je třeba rozlišovat mezi různými odstíny barev nezávisle na jejich jas. HSV je častěji využíván v aplikacích, kde se analyzují barvy v kontextu segmentace a rozpoznávání objektů.

- **CIE modely:**

CIE XYZ a CIE Lab jsou standardy definované pro přesnou reprezentaci barev v nezávislosti na zobrazovacím zařízení. CIE Lab model, který je v podstatě rozšířením CIE XYZ, je často využíván v aplikacích, kde je potřeba přesně měřit a analyzovat barevné rozdíly mezi objekty, například právě v oblasti kontroly kvality a detekce vad.



Obrázek 3 Vizualizace barevné prostory

(zdroj: [10])

Diskrétní obraz, černobílý obraz a odstíny šedi

Pro detekci geometrických a rozměrových vad v objektech, jako je tomu v případě optického profilometru, se často používá černobílý obraz nebo obraz v odstínech šedi. Tento formát obrazu obsahuje pouze informaci o intenzitě světla (bez barevné složky), což výrazně zjednodušuje jeho následné zpracování. Pro úplnost je vhodné zmínit základní typy diskretních obrazů:

- Binární obraz – obsahuje pouze dvě úrovně jasu (0 a 1, resp. černá a bílá). Používá se zejména po prahování obrazu pro jednoznačné rozlišení objektu a pozadí.
- Monochromatický obraz – může označovat buď binární, nebo obraz v odstínech šedi; v technické praxi často synonymum pro nebarevný obraz pracující s jasnem.
- Barevný obraz – obsahuje informace o jasu i barevných složkách (např. RGB). Používá se tam, kde je barva důležitá pro rozpoznání objektu, ale ve většině profilometrických aplikací není nezbytný.

Převod mezi barevnými systémy

V některých aplikacích může být vhodné převést obraz mezi různými barevnými modely. Například převod z RGB do HSV je běžně používaný při segmentaci barev, protože umožňuje snadno oddělit barvy od jasu. Převody mezi barevnými modely jsou klíčové pro adaptaci strojového vidění na různé světelné podmínky nebo pro efektivní analýzu obrazových dat při rozpoznávání a třídění objektů [7].

1.3.3 Rozlišení a bitová hloubka

Rozlišení obrazu určuje počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru. Bitová hloubka pak definuje počet možných úrovní intenzity. Mezi nejčastěji používané bitové úrovně patří:

- 8bitový obraz: $2^8 = 256$ úrovní
- 16bitový obraz: $2^{16} = 65\,536$ úrovní
- binární obraz: pouze dvě úrovně (0 a 1)

Vyšší bitová hloubka umožňuje přesnější reprezentaci světelných rozdílů, ale zvyšuje požadavky na paměť i výpočetní výkon. Vždy je nutné hodnotu zvolit vhodně dle typu aplikace.

1.3.4 Histogram obrazu

Histogram obrazu představuje distribuci intenzity pixelů v obrazovém prostoru. U barevných obrazů je možné analyzovat histogram pro každou barevnou složku (R, G, B), což umožňuje vyhodnocení kontrastu a rozložení barev v obraze. Při zpracování obrazů optického profilometru může histogram sloužit k analýze jasu a kontrastu mezi laserovou linií a pozadím, což je klíčové pro extrakci bodů potřebných k rekonstrukci trojrozměrného objektu.

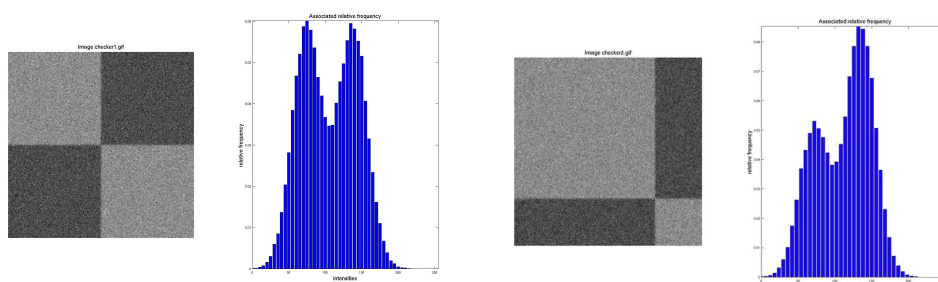
Při detekci vad na povrchu výrobku může být užitečné analyzovat obraz v odstínech šedi, kde je kontrast mezi hladkým povrchem a defektem snadno detekovatelný. V tomto případě se histogram může použít k určení prahové hodnoty pro segmentaci obrazu a následnou analýzu vad.

Jasovou informaci v obrazu lze statisticky vyjádřit pomocí histogramu [7], jako funkci $h(i)$, která udává počet pixelů s intenzitou i . Histogram je důležitý nástroj pro:

- vyhodnocení kontrastu obrazu
- automatickou úpravu jasu (např. ekvalizace histogramu)
- segmentaci nebo prahování obrazu

Pro ukázkový histogram obrazů s šedými úrovněmi je funkce definována následovně:

$$h(i) = \{(u, v) | F(u, v) = i\} \text{ kde } i \in \{0, 255\} \quad (2)$$



Obrázek 4 Porovnání histogramů pro dva šedotónové snímky

(zdroj: [10])

1.3.5 Shrnutí

Digitální obraz je výsledkem vzorkování a kvantování reálného světla na světlocitlivém snímači. Matematicky jej lze chápat jako diskrétní matici, která reprezentuje intenzitu v

jednotlivých bodech obrazové roviny. Tato forma umožňuje numerické zpracování a vyhodnocení obrazu algoritmy strojového vidění, které využívají vlastnosti jasové a barevné složky k detekci a klasifikaci objektů. Jednou z klíčových výhod digitálního obrazu je jeho flexibilita ve zpracování. Obrazy lze filtrovat, transformovat, segmentovat a analyzovat pomocí řady metod od základních technik zpracování obrazu až po pokročilé algoritmy strojového vidění a hlubokého učení. Tyto techniky umožňují automatizovanou detekci a klasifikaci objektů, měření jejich vlastností nebo rozpoznávání vzorů.

1.4 Optika a světlo

Optika představuje fyzikální základnu strojového vidění a hraje klíčovou roli při návrhu a realizaci optických měřicích systémů. jedná se o nesmírně obsáhlou oblast zabývající se studiem vlastností světla, jeho šířením v prostoru, interakcí s různými materiály a jevy, které při těchto procesech vznikají – jako jsou odraz, lom, absorpce či rozptyl [11].

V kontextu optického profilometru je porozumění optickým principům zásadní zejména z důvodu přesného směřování projekčního laserového paprsku a jeho následné spolehlivé detekce kamerovým systémem. Vlastnosti světla ovlivňují nejen kvalitu a kontrast zaznamenaného obrazu, ale také citlivost kamery na určitou vlnovou délku a schopnost správně zachytit odražený paprsek v požadovaném zorném poli a hloubce ostrosti. Charakteristiky světla, včetně jeho vlnové délky, intenzity a koherence, ovlivňují kvalitu získaných obrazových dat, a tím i přesnost celého měření.

Zvláštní pozornost je věnována interakci světla s povrchem měřeného objektu, jelikož odrazivost, textura a materiálové vlastnosti mohou mít výrazný vliv na čitelnost, a následnou schopnost detekovat laserové linie v obraze.

Dále je třeba zohlednit také aspekty geometrické optiky, které umožňují modelovat dráhu světelných paprsků v systému a správně navrhnout umístění kamery i projekčního zdroje. Výběr vhodné optiky – včetně typu objektivu, jeho ohniskové vzdálenosti, clony a hloubky ostrosti – významně ovlivňuje výsledné prostorové rozlišení a přesnost měření.

1.4.1 Světlo

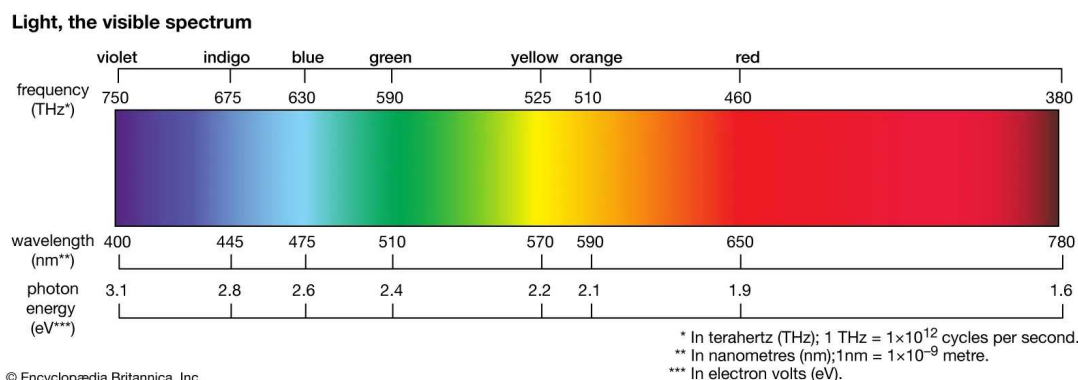
Světlo je formou elektromagnetického záření, které se skládá z kvant energie nazývaných fotony. Z fyzikálního hlediska je jeho chování popsatelné jak pomocí vlnové teorie (interference, difrakce), tak pomocí kvantové teorie (fotoelektrický jev, kvantizace energie).

Ve viditelné části spektra, která zahrnuje vlnové délky přibližně od 400 do 700 nm, má světlo zásadní význam pro optické systémy a kamery využívané ve strojovém vidění.

Porozumění fundamentálních vlastností světla je nezbytné pro úspěšný návrh soustavy osvětlení, výběr vhodného snímače a interpretaci zachycených obrazových dat. Mezi klíčové parametry světla, které ovlivňují kvalitu obrazového záznamu a interakci světla s povrchy, patří:

Vlnová délka (λ)

Určuje barvu světla a hraje klíčovou roli při interakci světla s materiály. Různé vlnové délky jsou různě pohlcovány, odráženy nebo rozptylovány v závislosti na povrchu objektu. Ve většině průmyslových aplikací se se pro profilometry využívají úzce definované zdroje světla – typicky laserové diody – jejichž konkrétní vlnová délka ovlivňuje ostrost a čitelnost detekované laserové linie v obraze. Např. červené (650 nm) a infračervené (850 nm) lasery mají dobrý poměr mezi pronikavostí, bezpečností a schopností jejich detekce v obraze.



Obrázek 5 Vlnové délky pro viditelné spektrum světla

(zdroj: [12])

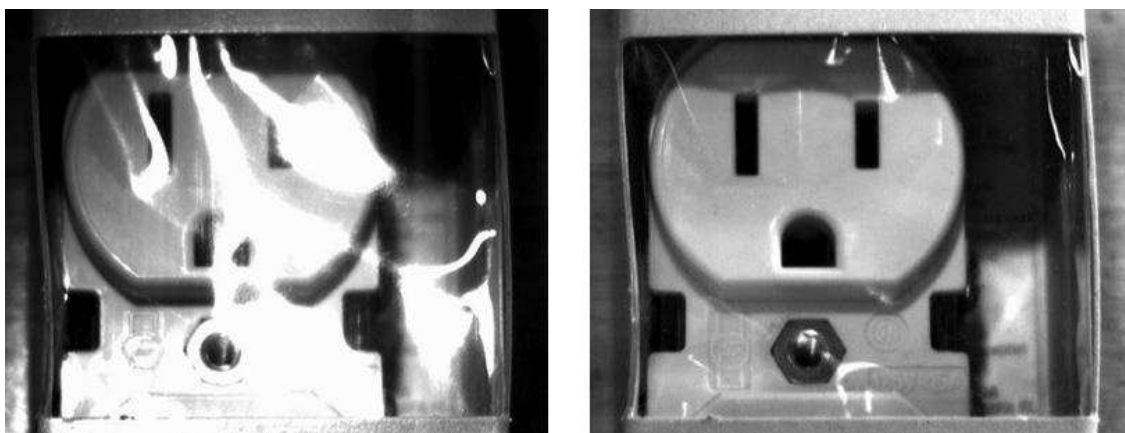
Intenzita (I)

Ovlivňuje množství energie dopadající na snímač, a tedy i jas výsledného obrazu. Při návrhu optického systému je třeba intenzitu optimalizovat tak, aby nedocházelo k přesvětlení (saturaci) ani podexpozici. Kromě absolutní intenzity hraje roli i homogenita osvětlení, zvláště pokud je cílem detekce kontrastních prvků, jako je například laserová čára. Čas expozice kamery musí být ve správné rovnováze s intenzitou projekčního osvětlení.

Polarizace

Směr oscilace elektrické složky elektromagnetické vlny může být využit ke snížení odlesků a ke zvýraznění struktur povrchu. Polarizační filtry umístěné před kamerou a

světelným zdrojem umožňují filtrovat specifické složky odraženého světla, což zlepšuje čitelnost měřených dat, zejména u lesklých nebo transparentních materiálů.



Obrázek 6 Ukázka použití polarizačního filtru pro aplikaci strojového vidění– odstranění odlesků

(zdroj: [13])

Správná volba osvětlovacího zdroje a jeho umístění v měřicím systému výrazně ovlivňuje kvalitu detekce a tím i přesnost výsledného měření.

1.4.2 Odraz a absorpce světla

Odraz a absorpce světla jsou základními fyzikálními jevy, které zásadně ovlivňují, jak objekty vypadají na obrazových datech. Tyto jevy jsou neodmyslitelně spjaté s materiálovými vlastnostmi povrchu objektů a podmínkami osvětlení, což jsou klíčové faktory pro analýzu a interpretaci obrazu v rámci strojového vidění. Pochopení těchto jevů je zásadní pro efektivní detekci a měření vlastností objektů [1].

Odraz světla je jev, při kterém se světelné paprsky vracejí od povrchu materiálu zpět do prostředí, odkud dopadly. Charakter odrazu závisí na úhlu dopadu a struktuře povrchu. U hladkých povrchů dochází k pravidelnému (zrcadlovému) odrazu, zatímco u drsných povrchů převládá rozptýlený odraz, kdy se světlo šíří do více směrů. Tento rozdíl má zásadní vliv na detekci světla kamerou – rozptýlený odraz je výhodnější pro viditelnost laserové linie v obraze.

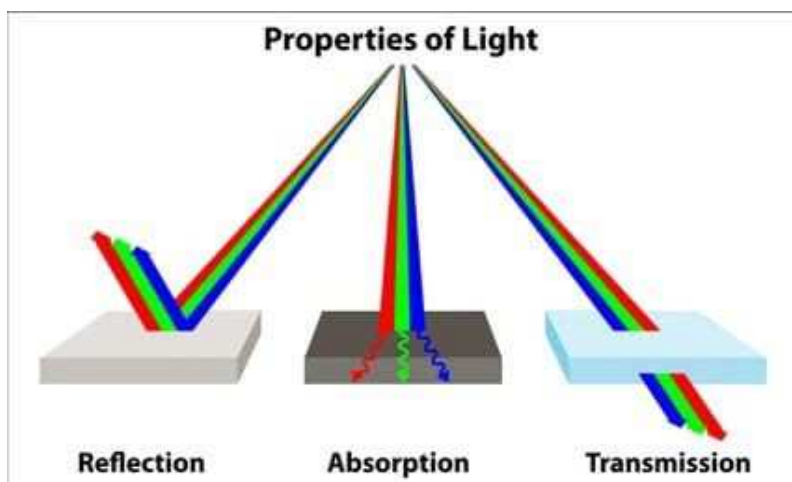
V kontextu optického profilometru je odraz klíčový pro snímání tvaru objektu – intenzita a poloha odražené laserové linie určují přesnost 3D rekonstrukce. Důležité je také eliminovat parazitní odlesky a zajistit konzistentní nasvícení scény.

Absorpce světla označuje proces, při kterém materiál pohltí část dopadající světelné energie, obvykle ji přemění na teplo. Míra absorpce závisí na materiálových vlastnostech – tmavé povrchy pohlcují více světla než světlé. To ovlivňuje jas a kontrast obrazu, a tedy i kvalitu detekce laserové linie.

Využití odrazu a absorpce při analýze obrazu

Znalost procesů odrazu a absorpce světla je nezbytná pro správnou interpretaci obrazových dat, zvláště při analýze povrchových vlastností objektů. Tyto jevy umožňují například detekci a analýzu defektů na povrchu objektů, jako jsou škrábance, trhliny nebo nerovnosti, které by mohly být jinak neviditelné. V případě optického profilometru jsou odraz a absorpce klíčové pro zajištění přesnosti měření, protože jakýkoli rozptyl světla nebo variace v absorpci může ovlivnit kvalitu obrazového signálu a tím i výsledky měření.

Důkladné pochopení těchto jevů umožňuje optimalizaci osvětlení a volbu vhodných materiálů a povrchových úprav pro dosažení požadované kvality obrazu a přesnosti měření. Tato analýza je obzvláště důležitá v aplikacích, které vyžadují vysokou preciznost, jako je například detekce rozměrových vad ve výrobních procesech.



Obrázek 7 Chování světla – odraz, absorpce a propustnost

(zdroj: [14])

1.5 Model kamery a projekce obrazu

Modelování kamery je základním prvkem každého systému strojového vidění, protože umožňuje matematicky popsat proces vzniku obrazu ze 3D světa [1]. Tato kapitola se zabývá základními principy geometrické projekce, používanými souřadnými systémy a matematickým popisem vzniku obrazu na základě vnitřních a vnějších parametrů kamery.

1.5.1 Souřadné systémy soustavy

Pro jednoznačný popis geometrie snímání a výpočtu projekce je nutné definovat několik souřadných systémů:

Světový souřadný systém (WC – z angl. World Coordinates)

Jedná se o referenční souřadnou soustavu, ve které jsou definovány prostorové (3D) souřadnice všech objektů ve scéně nezávisle na poloze a orientaci kamery. Tento systém slouží jako globální rámec pro popis geometrie scény, určování vzdáleností a prostorových vztahů mezi objekty. Objekty v tomto systému jsou reprezentovány body

Souřadný systém kamery (CC – z angl. Camera Coordinates)

Tento souřadný systém je svázán s tělem kamery – jeho počátek leží v projekčním centru (optickém středu) kamery, osa Z_C směřuje ve směru pohledu kamery, osa X_C vodorovně vpravo a osa Y_C svisle dolů (v závislosti na konvenci). Slouží k vyjádření polohy bodů vzhledem ke kameře samotné. Transformace bodu ze světového do kamerového systému je popsána pomocí rotační matice R_w a t translačního vektoru:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = R_w \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + t \quad (4)$$

Rotační matice R_w popisuje orientaci světového souřadného systému vzhledem ke kameře a vektor t určuje jeho polohu v kamerovém souřadném systému. Tento vztah odpovídá tzv. extrinsické (vnější) kalibraci kamery a používá se pro transformaci bodů ze světového souřadného systému do systému kamery.

Obrazový souřadný systém (IC – z angl. Image Coordinates)

Popisuje polohu bodů v obrazové rovině. Projekce bodu z kamery do obrazové roviny se řídí vztahy:

$$x = \frac{X_C}{Z_C} \quad y = \frac{Y_C}{Z_C} \quad (5)$$

a následně převodem pomocí matice vnitřních parametrů kalibrační matice K na obrazové souřadnice v pixelech.

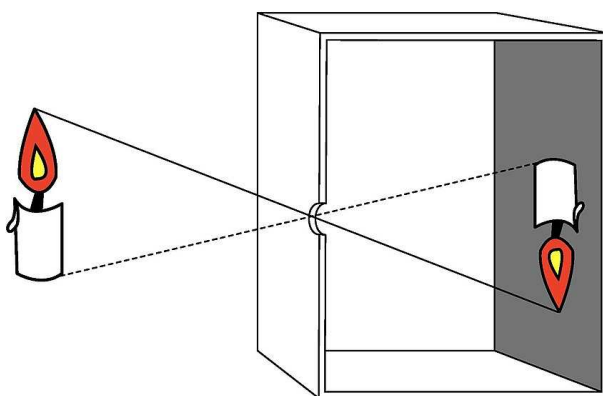
Pixelový souřadný systém

Finální systém, ve kterém jsou body vyjádřeny jako řádkový a sloupcový index v obrazové matici $F(u,v)$. Vzniká škálováním a posunem obrazových souřadnic podle rozlišení senzoru a fyzických parametrů pixelu.

1.5.2 Model kamery

Model kamery popisuje matematickou reprezentaci převodu prostorových trojrozměrných souřadnic reálného světa do rovinného dvourozměrného obrazu, jak jej zaznamená obrazový senzor. Tento model je klíčovým prvkem při kalibraci kamer, rekonstrukci hloubky, měření objektů a obecně při všech úlohách geometrického počítačového vidění.

Nejčastěji používaným modelem v technickém a průmyslovém strojovém vidění je model dírkové komory (z angl. pinhole camera model, latinsky camera obscura) [1], který abstrahuje složité optické prvky a předpokládá ideální podmínky bez zkreslení čočky. Tento model umožňuje jednoduchý, ale účinný popis projekce trojrozměrných souřadnic bodů na dvourozměrnou obrazovou rovinu pomocí lineární algebry.



Obrázek 8 Pinhole camera model

(zdroj: [15])

Historie a původ objevu

Původ modelu dírkové komory sahá až do starověku, kdy byl tento princip poprvé popsán čínským filozofem Mozi (470–391 př. n. l.) a později zdokonalen arabským učencem Alhazenem (Ibn al-Haytham, 965–1040). Princip camera obscura byl v evropské vědě široce používán renesančními umělci, kteří jej využívali k přesnému zachycení perspektivy [16].

Princip

Tento model se zakládá na principu centrální perspektivní projekce, kde světlo prochází jediným bodem (středem projekce) a vytváří inverzní obraz na promítací rovině. Dírková komora využívá malý otvor, kterým prochází světlo a vytváří na zadní stěně inverzní obraz. Tento model lze matematicky popsat centrální perspektivní projekcí. Při této projekci je bod $^c[X, Y, Z]$ v prostoru promítán na bod (x, y) v rovině obrazu podle rovnic:

$$x = f \frac{X}{Z} \quad y = f \frac{Y}{Z} \quad (6)$$

kde f představuje ohniskovou vzdálenost kamery.

Aby se předešlo inverznímu obrazu, umísťuje se často virtuální obrazová rovina před kameru. Pokud jsou body reprezentovány v homogenních souřadnicích, lze projekci zapsat jako součin matic:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{P} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

V rozepsané podobě je projekce trojrozměrného bodu:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{R}_w | \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

kde $\mathbf{K}$ je matice vnitřních parametrů kamery (tzv. kalibrační matice), $\mathbf{R}_w$ a $\mathbf{t}$ reprezentují vnější parametry – rotaci a translaci světového souřadného systému vůči kameře, s je měřítkový faktor (souvisí se vzdáleností bodu od kamery).

Na obrázku níže je uveden model centrální projekce. Obrazová rovina se nachází ve vzdálenosti f před počátkem kamery, kde vzniká neinvertovaný obraz. Souřadný systém kamery je pravotočivý a osa z určuje střed zorného pole. [1]

- Vektor $\mathbf{t}$ (3x1) – reprezentuje translaci kamery ve světovém souřadném systému.

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

Kde t_x, t_y, t_z jsou souřadnice vektoru $\mathbf{t}$, který reprezentuje pozici světového souřadného systému vzhledem ke kameře. Jednotlivé složky jsou vyjádřeny v souřadném systému kamery.

Vnitřní parametry

Matice $\mathbf{K}$ (3x3) obsahuje vnitřní parametry kamery:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Kde: f_x, f_y – efektivní ohniskové vzdálenosti (v pixelech), s – parametr zkosení (obvykle 0 pro ortogonální snímání), c_x, c_y – hlavní bod (principal point), kde optická osa protíná obrazovou rovinu.

1.5.3 Perspektivní projekce

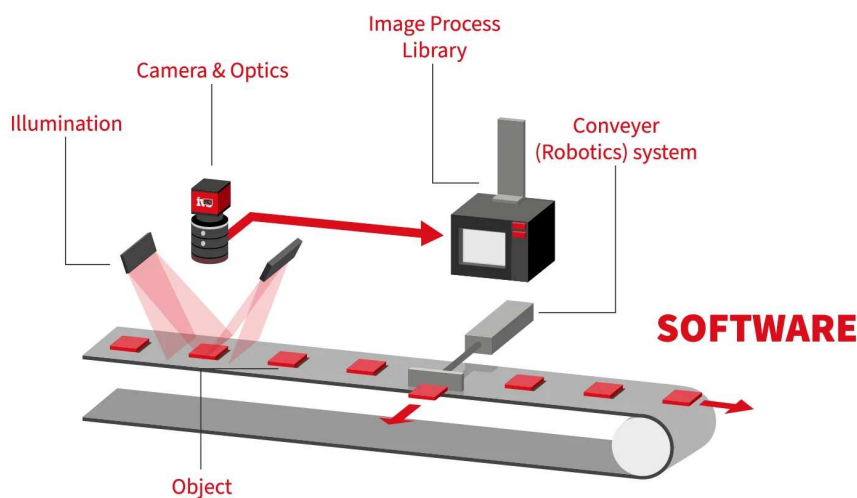
Perspektivní projekce modeluje reálné zobrazování v kamerách a odpovídá centrální projekci, kde velikost objektů klesá s jejich vzdáleností od kamery. Mezi základní vlastnosti perspektivního promítání patří:

- Zachování přímek – přímky v prostoru se promítají jako přímky v obraze.
- Ztráta paralelismu – rovnoběžné přímky se mohou v obraze sbíhat (efekt úběžníku).
- Hloubková nejednoznačnost – bez další informace nelze určit skutečnou vzdálenost bodu.

1.6 Komponenty systému strojového vidění

Systémy strojového vidění se skládají z několika klíčových komponent, které umožňují snímání, zpracování a analýzu obrazu. Tyto komponenty zahrnují optické senzory, objektivy, osvětlení, snímače, ovládací hardware a software pro vyhodnocení. Každá z těchto součástí hraje zásadní roli v přesnosti a efektivitě celého systému.

Struktura typického nasazení systému strojového vidění v provozu:



Obrázek 10 Typická struktura systému strojového vidění

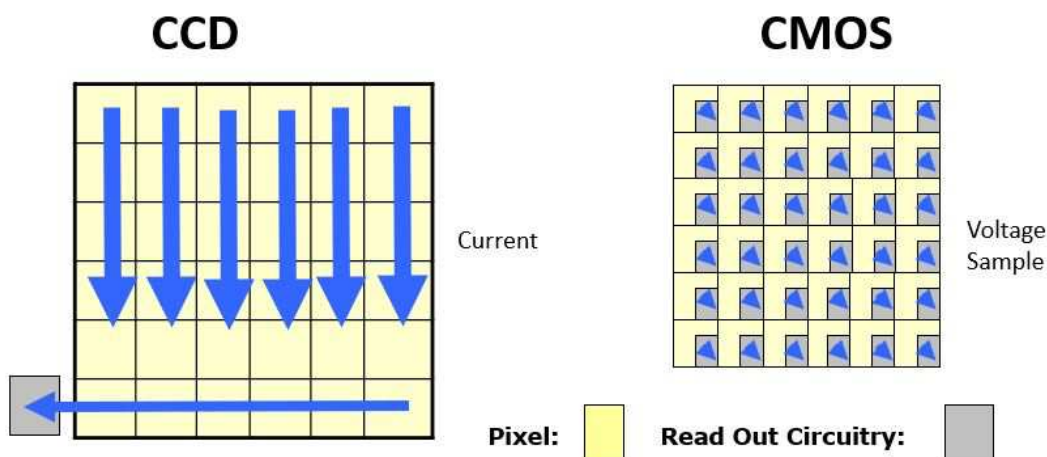
(zdroj: [17])

1.6.1 Optické senzory

Optické senzory jsou základem systémů strojového vidění, protože převádějí světelné informace na elektronické signály. Volba snímače závisí na požadavcích aplikace, jako je rozlišení, citlivost nebo rychlost snímání. Nejběžnější a nejpoužívanější typy zahrnují:

- CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) – senzory s nízkou spotřebou energie, rychlým čtením dat a možností integrace přímo na čip.
- CCD (Charge-Coupled Device) – senzory s vysokou citlivostí a nízkým šumem, ale vyšší spotřebou energie.

CMOS snímače umožňují rychlé a energeticky úsporné paralelní čtení dat přímo z pixelů, zatímco CCD snímače poskytují kvalitnější obraz s nižším šumem díky sekvenčnímu přenosu signálu, ale za cenu vyšší spotřeby energie.



Obrázek 11 Princip CCD a CMOS obrazového snímače

(zdroj: [18])

V praxi se velmi často setkáváme v rámci konstrukce systémů strojového vidění i s různorodými snímači. Snímače jsou zařízení, která převádějí optické signály na digitální data. Hlavní typy zahrnují:

- Liniové snímače – vhodné pro kontrolu kontinuálních výrobních procesů.
- Obrazové snímače (area scan) – zaznamenávají celé 2D snímky najednou.
- Multispektrální a hyperspektrální snímače – umožňují analýzu materiálových vlastností.

1.6.2 Objektivy a čočky

Objektiv představuje klíčovou komponentu každého kamerového systému, která zásadním způsobem ovlivňuje kvalitu snímaného obrazu. Objektivy slouží k projekci světla z okolního prostoru na obrazový senzor a určují prostorové, geometrické i spektrální vlastnosti výsledného obrazu. Jejich správná volba je zásadní nejen z hlediska kvality měření, ale i pro dosažení požadované přesnosti a opakovatelnosti v aplikacích průmyslového vidění [19]. Mezi hlavní optické parametry, které objektiv ovlivňuje, patří:

Ohnisková vzdálenost (focal length, FOV)

Ohnisková vzdálenost určuje velikost zorného pole kamery, tedy oblast scény, která bude promítnuta na obrazový snímač. Objektivy s krátkou ohniskovou vzdáleností (např. 8–12 mm) poskytují široké zorné pole, zatímco delší ohniskové vzdálenosti (např. 50 mm a více) umožňují detailní zobrazení vzdálenějších objektů s menší perspektivní deformací.

Volba ohniskové vzdálenosti by měla být provedena s ohledem na velikost snímaného objektu, vzdálenost od kamery a velikost senzoru [1].

Ohnisková vzdálenost určuje úhel záběru objektivu a tím velikost zorného pole (Field of View, FOV). Čím kratší je ohnisková vzdálenost, tím širší je úhel záběru a tím větší je pokrytí scény. Naopak větší ohnisková vzdálenost vede k užšímu výřezu a většímu zvětšení. Při známé pracovní vzdálenosti D (vzdálenost mezi objektivem a objektem) a požadované šířce zorného pole FOV , lze potřebnou ohniskovou vzdálenost spočítat přibližně jako:

$$f = \frac{s D}{FOV} \quad (13)$$

kde s je velikost senzoru ve stejných jednotkách jako D a FOV (většinou v milimetrech).

Hloubka ostrosti (depth of field, DOF)

Hloubka ostrosti udává rozsah vzdáleností před a za rovinou zaostření, ve kterém zůstává obraz opticky přijatelně ostrý. Tento parametr závisí na clonovém čísle objektivu (f -stop), ohniskové vzdálenosti a velikosti senzoru. V aplikacích přesného měření je často žádoucí co největší hloubka ostrosti, aby byly ostré všechny části měřeného objektu. Toho lze dosáhnout například zvětšením clonového čísla, ale za cenu nižší propustnosti světla a vyšších nároků na osvětlení [2]. Hloubka ostrosti je definována vztahem:

$$DOF = \frac{2Nc(u)^2}{f^2} \quad (14)$$

kde: N je clonové číslo (např. $f/8$), c je průměr tzv. kruhu zmatení (Circle of Confusion), u je vzdálenost zaostření, f je ohnisková vzdálenost objektivu. Proměnná c určuje, jak velké může být rozostření, aniž by bylo vnímáno jako neostré. Je klíčovým parametrem pro výpočet hloubky ostrosti v optických a zobrazovacích systémech. Pokud má parametr menší velikost, nežli je velikost pixelu lze považovat obraz za ostrý.

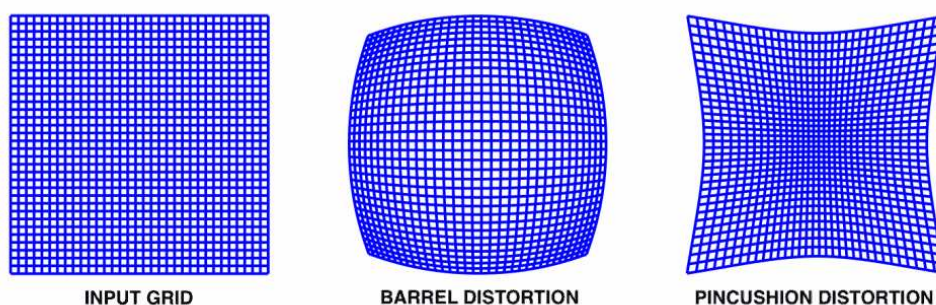
Z této rovnice vyplývá, že hloubka ostrosti roste s vyšším clonovým číslem a klesá s rostoucí ohniskovou vzdáleností. V praxi se často používá zjednodušené pravidlo: čím vyšší clona (např. $f/16$), tím větší DOF, ale zároveň nižší světelnost – což klade vyšší nároky na osvětlení nebo expoziční čas.

Zkreslení a aberace

Optické zkreslení a aberace představují systematické chyby vznikající při zobrazování reálného světa na obrazový senzor kamery. Tyto chyby vedou k odchylkám mezi ideálními (projekčně transformovanými) a skutečně naměřenými obrazovými body, což může výrazně ovlivnit přesnost měření ve strojovém vidění, zvláště v metrologických aplikacích.

Tato chyba způsobuje, že rovinné objekty se v obraze jeví zakřivené, což může zásadně ovlivnit přesnost měření ve strojovém vidění. Mezi nejběžnější typy geometrického zkreslení patří:

- Radiální zkreslení – projevuje se zakřivením přímek, které by měly být rovné. Dělí se na:
 - soudkovité zkreslení (barrel distortion), kdy se přímky prohýbají směrem ven (typické pro širokoúhlé objektivy),
 - poduškovité zkreslení (pincushion distortion), kdy se přímky ohýbají směrem dovnitř (časté u teleobjektivů).
- Tangenciální zkreslení (tangential distortion) – vzniká, pokud není optická osa přesně zarovnána s obrazovým senzorem. To vede k mírnému "naklonění" nebo posunu zobrazení.



Obrázek 12 Ukázky radiálního zkreslení – vliv na deformaci obrazu

(zdroj: [20])

Korekce zkreslení se provádí na základě parametrů z kalibrace kamery, pomocí tzv. přemapování pixelů, kdy se vypočítávají korekční koeficienty a aplikuje se transformační matice na obraz.

Zkreslení podle modelu OpenCV

Vzhledem k tomu, že aplikace veškerých použitých algoritmů strojového vidění včetně korekce byla v rámci praktické části provedena pomocí nástrojů knihovny OpenCV [21] pro programovací jazyk Python, je vhodné si představit strukturu modelu dle této knihovny. OpenCV využívá standardní model kamery, ve kterém je zkreslení parametrizováno pomocí sady koeficientů [20]. Radiální zkreslení se projevuje zakřivením přímek a je funkcí vzdálenosti od optického středu r , kde:

$$\begin{aligned}x_{corr} &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\y_{corr} &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)\end{aligned}\quad (15)$$

Tangenciální zkreslení vzniká, pokud čočka není perfektně centrována vůči obrazovému senzoru:

$$\begin{aligned}x_{corr} &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\x_{corr} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]\end{aligned}\quad (16)$$

Celková korekce souřadnic se tak skládá z obou složek současně. Korekce se běžně provádí pomocí funkce `cv2.undistort()` nebo při použití rektifikovaných kamerových matic v projekčních algoritmech. Při kalibraci kamery pomocí funkce `cv2.calibrateCamera` jsou tyto koeficienty zkreslení uloženy v proměnné *distCoord* – (z angl. Distortion coordinates) [21].

Optické aberace

Kromě geometrického zkreslení se mohou ve výsledném obrazu objevit také optické aberace, které nelze vždy zcela eliminovat matematickým modelem:

- Chromatická aberace – vzniká, když různé vlnové délky světla (barvy) procházejí optickou soustavou s různým lomem. Výsledkem je barevné rozostření okrajů objektů.
- Sférická aberace – způsobená tím, že paprsky procházející krajem čočky se sbíhají v jiném bodě než ty blízko osy. Projevuje se jako ztráta ostrosti.

Minimalizace zkreslení v měřicích systémech

Pro aplikace, kde je vyžadována vysoká geometrická přesnost (např. rozměrová kontrola, profilometrie), se používají telecentrické objektivy. Tyto objektivy zachovávají konstantní zvětšení napříč různými hloubkami scény a eliminují perspektivní zkreslení. To je zásadní při měření rozměrů nezávisle na vzdálenosti od kamery a pro dosažení subpixelové přesnosti. [22]

Výběr objektivu v průmyslové praxi

Výběr objektivu musí být proveden s ohledem na konkrétní aplikaci. Zvažují se zejména tyto faktory:

- **Velikost senzoru** (např. 1/2.5", 2/3", 1") – objektiv musí pokrýt celý snímač bez vignětae.
- **Požadované prostorové rozlišení** – schopnost objektivu přenést dostatek detailů na úroveň jednotlivých pixelů (MTF).
- **Osvětlení** – větší clona snižuje potřebu intenzivního světla.
- **Stabilita** – fixace ostření, odolnost proti vibracím a teplotním změnám.

Výsledná kvalita obrazu je dána nejen optikou, ale také kombinací s typem senzoru a použitým osvětlením. Optimalizace celého systému (kamera–objektiv–osvětlení) je proto zásadním krokem v návrhu kamerového měřicího zařízení.

1.6.3 Osvětlení

Kvalita obrazu je silně ovlivněna osvětlením scény, které musí být přizpůsobeno konkrétní aplikaci. Správná volba světelného zdroje je klíčová pro dosažení stabilních a opakovatelných výsledků. Mezi běžné techniky patří:

- Koaxiální osvětlení – vhodné pro vysoce reflexní povrchy.
- Kruhové a bodové osvětlení – eliminuje stíny a zajišťuje rovnoměrné nasvícení objektu.
- Osvětlení v různých spektrálních pásmech (IR, UV) – umožňuje detekci skrytých znaků nebo defektů.

1.6.4 Řídící jednotky a rozhraní

Ovládací hardware slouží k řízení jednotlivých komponent systému a zahrnuje:

- Průmyslové řídicí jednotky (PLC, IPC) – zajišťují komunikaci mezi snímači a ostatními prvky výrobní linky.
- Grafické procesory (GPU) – urychlují výpočty při zpracování obrazu v reálném čase.
- FPGA (Field-Programmable Gate Array) – specializované čipy pro vysokorychlostní zpracování obrazových dat.

Výběr ovládacího hardwaru závisí na požadovaném výkonu a reálném čase zpracování.

1.6.5 Software pro vyhodnocení

Software je klíčovou komponentou strojového vidění, která umožňuje analýzu a interpretaci obrazu. Software často obsahuje knihovny jako OpenCV, Halcon [23] nebo proprietární řešení dodavatelů kamerových systémů. Používané technologie zahrnují:

- Klasické metody zpracování obrazu – zahrnují filtrace, detekci hran nebo morfologické operace.
- Strojové učení a hluboké neuronové sítě – umožňují automatickou klasifikaci a detekci defektů.
- Kalibrační algoritmy – kompenzují optické zkreslení a zajišťují přesné měření.

1.7 Metody kalibrace kamerových systémů

Kalibrace kamerového systému je zásadním krokem pro dosažení přesných měření a minimalizaci optických zkreslení. Proces kalibrace spočívá ve stanovení vnitřních parametrů kamery, včetně ohniskové vzdálenosti, polohy hlavního bodu a koeficientů zkreslení. Mezi nejpoužívanější metody kalibrace patří DLT (přímá lineární transformace), která vyžaduje 3D objekt známých rozměrů a Zhangova metoda, která pracuje na principu snímků plošného objektu.

1.7.1 DLT – přímá lineární transformace

DLT (Direct Linear Transformation) [24] je klasická metoda kalibrace kamer, která využívá sadu 3D bodů s přesně známými souřadnicemi a jejich odpovídající 2D souřadnice v obraze. Tato metoda je obzvláště vhodná pro kalibraci v případech, kdy je k dispozici přesně definovaný 3D objekt

Postup kalibrace pomocí DLT:

- Příprava kalibračního objektu: Použití objektu s přesně známými 3D souřadnicemi (např. kalibrační krychle).
- Zachycení jediného snímku kalibračního objektu
- Určení 2D souřadnic: Identifikace projekcí 3D bodů v obraze (např. ručně nebo automaticky).
- Výpočet projekční matice: Na základě korespondencí mezi 3D a 2D body je sestavena projekční matice pomocí metody nejmenších čtverců.
- Odhad vnitřních a vnějších parametrů: Z projekční matice jsou extrahovány parametry kamery (včetně ohniskové vzdálenosti a hlavního bodu).

1.7.2 Zhangova metoda

Zhangova metoda [6] je široce používaná technika pro kalibraci kamer, která využívá plochý kalibrační vzor (například šachovnicový vzor) snímáný z různých úhlů. Tato metoda umožňuje výpočet vnitřních parametrů kamery (tzv. **intrinsických parametrů**) a vnějších parametrů (tzv. **extrinsických parametrů**), které určují polohu kamery v prostoru.

Postup kalibrace pomocí Zhangovy metody:

- Zachycení obrazů šachovnicového vzoru – vzor se snímá pod různými úhly a vzdálenostmi.
- Detekce rohů vzoru – algoritmus identifikuje rohy šachovnice v jednotlivých snímcích.
- Výpočet intrinsických a extrinsických parametrů – optimalizační algoritmus vypočítá parametry kamery.
- Refinace parametrů – iterativní proces pro minimalizaci chyb a zlepšení přesnosti modelu.

Metoda kalibrace podle Zhangovy procedury je široce implementována v knihovnách, jako je OpenCV, což ji činí velmi dostupnou a často využívanou v oblasti strojového vidění. Pro kalibraci navrženého profilometrického systému byla zvolena právě tato metoda. Hlavním důvodem byla její schopnost estimovat nejen lineární parametry kamerového modelu, ale také koeficienty zkreslení objektivu (nelineární parametry), které metody založené pouze na přímé lineární transformaci (DLT) nezohledňují.

1.8 Příklady využití strojového vidění v praxi

Strojové vidění je klíčovou technologií, která nachází uplatnění v celé řadě průmyslových a vědeckých oblastí. Díky schopnosti automaticky analyzovat obrazová data a provádět rozhodnutí na základě vizuální informace představuje nezastupitelný nástroj pro rozsáhlé spektrum pole oborů.

Průmyslová automatizace

Strojové vidění je široce využíváno v průmyslové automatizaci pro kontrolu kvality, měření a řízení procesů. Například v automobilovém průmyslu se používá pro detekci defektů, kontrolu svarů či správného umístění součástek a ověřování rozměrů.

Robotika

V robotice umožňuje strojové vidění robotům vnímat a interpretovat okolní prostředí. To zahrnuje autonomní navigaci, detekci a rozpoznávání objektů, rozpoznávání gest a lidských postojů, a rozpoznávání obličejů a emocí.

Medicína

V medicíně se strojové vidění využívá pro analýzu lékařských snímků, detekci onemocnění a podporu diagnostiky. Příkladem může být například detekce nádorů na rentgenových snímcích pomocí systémů jako je InnerEye od Microsoftu [25].

Automobilový průmysl

V automobilovém průmyslu se strojové vidění používá pro autonomní řízení, optimalizaci výrobních procesů a monitorování kvality. Například systémy pro autonomní řízení využívají strojové vidění pro detekci a rozpoznávání objektů na silnici.

Agrikultura

V zemědělství se strojové vidění využívá pro monitorování plodin, sledování zdraví hospodářských zvířat a třídění produktů. Například drony vybavené strojovým viděním mohou poskytovat mapování a analýzu plodin v reálném čase.

2 METODY REKONSTRUKCE

V této kapitole jsou představeny metody a principy, které umožňují převést obrazová nebo sensorová data na trojrozměrný model sledovaného objektu. 3D rekonstrukce je klíčovou technologií v oblasti průmyslové automatizace, reverzního inženýrství a vědecké analýzy.

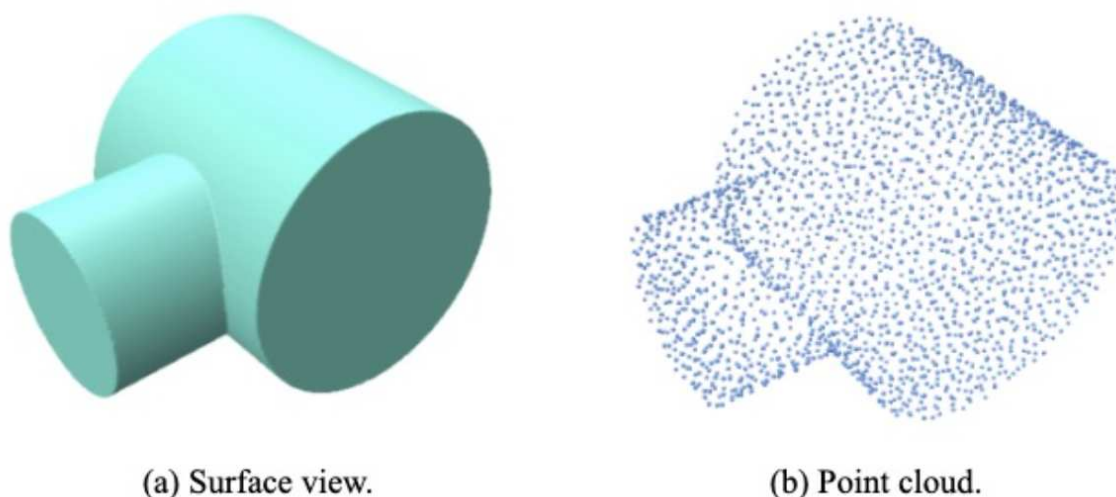
2.1 3D Rekonstrukce a měření

3D rekonstrukce je proces, při kterém je ze získaných obrazových nebo sensorových dat rekonstruována trojrozměrná geometrie sledovaného objektu. Výsledkem je obvykle tzv. mračno bodů (angl. point cloud), které obsahuje sadu prostorových souřadnic reprezentujících tvar a objem objektu. Tento postup je klíčový v oblasti reverzního inženýrství, kontroly kvality, výrobní automatizace i vědecké vizualizace.

Moderní techniky 3D rekonstrukce umožňují nejen detekovat rozměrové a tvarové vady, ale i přímo porovnávat naskenované objekty s referenčními CAD modely. Přesnost celého procesu závisí na volbě vhodné metody, kvalitě kalibrace kamery a následném zpracování dat.

2.1.1 Bodové mračno

Bodové mračno je soubor bodů v trojrozměrném prostoru (x,y,z), které reprezentují povrch objektu.



Obrázek 13 Ukázkové mračno bodů – point cloud

(zdroj [45])

2.1.2 Metody extrakce bodového mračna

Existuje několik metod, jak data pro tvorbu bodového mračna získat z obrazových nebo senzorických vstupů:

Triangulace (strukturované světlo, laserový profilometr)

Triangulace je geometrická metoda, při které je známá poloha kamery a projekčního zdroje (např. laserové čáry). Pokud je známá vzájemná kalibrace mezi nimi, lze pomocí podobnostních trojúhelníků vypočítat prostorové souřadnice bodů na povrchu objektu. Typická rovnice triangulace využívá průsečík dvou paprsků:

$$X = \text{triangulate}(P_1, x_1, P_2, x_2) \quad (17)$$

kde P_1, P_2 jsou projekční matice obou systémů (kamera a laser), a x_1, x_2 odpovídající obrazové body.

Stereovize

Použitím dvou (nebo více) kamer lze rekonstruovat 3D geometrii na základě disparity – rozdílu v pozici odpovídajících bodů v jednotlivých obrazech. Výsledná hloubka Z je dána vztahem:

$$Z = \frac{f B}{d} \quad (18)$$

kde: f je ohnisková vzdálenost kamery, B je bazální vzdálenost mezi kamerami, d je změřená disparita (například rozdíl v poloze bodu v levém a pravém obraze).

Time-of-Flight (ToF) a LIDAR

Senzory typu ToF nebo LIDAR měří čas, za který se světelný signál odrazí od objektu zpět ke zdroji. Na základě rychlosti světla lze pak vypočítat vzdálenost. Tyto technologie se používají především pro větší objekty a v mobilní robotice.

Fotogrammetrie

Metoda založená na zpracování velkého množství běžných 2D snímků z různých úhlů. Pomocí algoritmů, jako je Structure-from-Motion (SfM) nebo Multi-View Stereo (MVS), lze rekonstruovat prostorovou geometrii bez nutnosti speciálního hardwaru. Výhodou je nízká cena, nevýhodou pak vyšší výpočetní náročnost [26].

2.2 Převod bodového mračna na CAD modely

Po získání bodového mračna jako výsledku 3D skenování je často žádoucí tyto prostorově nestrukturované body dále zpracovat a převést je do podoby, která je kompatibilní s CAD (Computer-Aided Design) software. Tento krok je nezbytný zejména tehdy, pokud má být výsledný model dále využíván pro reverzní inženýrství, výrobní dokumentaci, simulace, analýzu tolerancí nebo aditivní výrobu.

Struktura a charakter bodového mračna

Bodové mračno reprezentuje objekt formou množiny diskrétních bodů ve 3D prostoru, typicky definovaných souřadnicemi x, y, z . Tyto body zachycují geometrii povrchu snímaného objektu, avšak neobsahují informace o spojitosti, topologii nebo povrchových plochách. Vzhledem k tomu je nutné aplikovat transformační metody, které z bodového mračna vytvoří plnohodnotný 3D model.

2.3 Filtrace a korekce chyb

Bodová mračna vzniklá 3D skenováním často obsahují různé chyby a odchylky, které mohou negativně ovlivnit kvalitu výsledného modelu. Tyto chyby mohou být způsobeny optickým šumem, nevhodnými světelnými podmínkami, odrazy, nebo nepřesnou detekcí laserové linie. Před převodem na polygonální nebo CAD model je proto nezbytné provést filtraci a korekci dat [27].

Typické chyby v bodovém mračnu:

- **Odlehlé body (tzv. outliers)** – jednotlivé body, které výrazně vybočují z očekávané geometrie.
- **Šum** – drobné odchylky ve všech bodech, které způsobují nerovnosti na jinak hladkém povrchu.
- **Duplicity nebo přebytečné body** – zbytečně vysoká hustota bodů, které nepřinášejí novou informaci.

Metody filtrace:

- **Statistická filtrace** – identifikuje body, jejichž vzdálenost od sousedních bodů výrazně vybočuje od průměru

- **Radius filtrace** – odstraňuje body, které mají v daném okolí (určeném poloměrem) méně sousedů, než je stanovený práh.
- **Voxelizace a decimace** – snižují počet bodů bez ztráty detailu tím, že mračno rozdělí do pravidelné sítě a nahradí skupiny bodů jejich průměrem.

Korekce a vyhlazení:

Po odstranění chybných bodů následuje vyhlazení povrchu – například pomocí metody MLS (Moving Least Squares) nebo Laplace smoothing, které zajišťují plynulejší přechody mezi body. Dále lze aplikovat rekonstrukci normál pro každý bod, což je důležité pro správné generování ploch při tvorbě polygonální sítě.

Shrnutí

Filtrace a korekce představují zásadní fázi v přípravě dat, protože zajišťují kvalitní vstup pro další zpracování, ať už jde o tvorbu 3D modelu, porovnání s CAD daty, nebo metrologické vyhodnocení. Nedostatečně upravené bodové mračno může vést ke zkreslení tvaru, chybným výpočtům rozměrů nebo nestabilní rekonstrukci ploch.

2.4 Práce s bodovými mračky

Práce s bodovými mračky je klíčovým krokem při zpracování výstupů z 3D skenování a optických měřicích systémů. Bodová mračna slouží jako primární reprezentace tvaru objektu a poskytují základ pro další analýzu, modelování nebo kontrolu kvality.

Základní operace s bodovým mračnem:

Vizualizace – prvním krokem po načtení mračna je jeho grafické zobrazení. Pro tento účel se běžně využívají nástroje jako CloudCompare, MeshLab, nebo knihovny typu Open3D, které umožňují otáčet, přibližovat a filtrovat data.

Zarovnání – pokud je objekt skenován z více pohledů, je třeba jednotlivá mračna zarovnat do společného souřadného systému. To se provádí metodami jako ICP (Iterative Closest Point).

Transformace – zahrnuje geometrické operace jako posun, rotaci a změnu měřítka. Umožňuje upravit pozici objektu pro další analýzu nebo porovnání s referenčním modelem.

Měření a analýza – z bodového mračna lze získat informace o rozměrech, zakřivení, objemu nebo odchylkách od CAD modelu. Používá se například pro kontrolu rozměrových tolerancí nebo detekci výrobních vad.

Export/import dat – bodová mračna se běžně ukládají ve formátech jako .ply, .xyz nebo .las. Tyto formáty umožňují interoperabilitu mezi různými softwary a jsou vhodné pro archivaci nebo další zpracování.

Používané nástroje:

- Open-source nástroje: CloudCompare, MeshLab, Open3D,
- Kompatibilní CAD/CAM softwary: Fusion 360, SolidWorks (přes import polygonálních dat),
- Knihovny: Python + PCL, Open3D, nebo VTK pro automatizaci a analýzu.

Shrnutí

Efektivní práce s bodovými mračky vyžaduje nejen technické nástroje, ale také pochopení geometrie objektu, kvality dat a cíle zpracování. V případě profilometrie je klíčové správně identifikovat a extrahovat laserovou linii, která slouží jako základ pro tvorbu 3D profilu. V praktické části této práce byly k analýze, vizualizaci a zpracování bodových mračen využity dostupné open-source programy a knihovny, konkrétně CloudCompare, MeshLab, a Open3D v jazyce Python. Tyto nástroje umožnily efektivní manipulaci s daty, základní filtrace, převody formátů i export do CAD-kompatibilních struktur.

3 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ ROZMĚROVÝCH VAD

Měření rozměrových vad představuje klíčovou oblast v průmyslové kontrole kvality. Při výrobě mechanických součástí a produktů obecně je nezbytné zajistit, aby výsledné díly odpovídaly stanoveným rozměrovým tolerancím, konturám a tvarovým specifikacím. I drobné odchylky mohou mít zásadní vliv na funkčnost celku, jeho montážní způsobilost či životnost.

3.1 Úvod a význam měření rozměrových vad

Ve výrobních procesech se rozměrové vady řadí mezi tzv. geometrické vady, které mohou být způsobeny například opotřebením nástrojů, chybami v seřízení stroje nebo technologickými nedostatky. Detekce těchto vad včasným způsobem umožňuje prevenci vadných výrobků a optimalizaci výroby. Vzhledem ke stále vyšším nárokům na přesnost a opakovatelnost výroby hraje měření rozměrových vad čím dál větší roli i v automatizovaných a bezobslužných kontrolních systémech.

Díky rozvoji metod strojového vidění, 3D skenování a bezkontaktní metrologie je možné rozměrové vady detekovat s vysokou přesností a rychlostí bez přímého kontaktu s výrobkem, což je zásadní pro moderní automatizované inspekční linky.

3.2 Klasifikace rozměrových vad

Rozměrové vady lze klasifikovat do několika hlavních kategorií podle charakteru odchylky. Mezi základní skupiny patří:

3.2.1 Tvar, kontura a rozměr

Tato skupina zahrnuje odchylky od požadovaných geometrických parametrů, jako jsou délky, šířky, výšky, průměry, úhly nebo obecná kontura výrobku. Tyto vady jsou nejčastěji měřeny vůči CAD modelu nebo etalonu pomocí dotykových měřicích systémů (např. souřadnicových měřicích strojů – CMM) nebo bezkontaktně (např. laserovým skenováním nebo kamerovým systémem). Typické rozměrové vady v této kategorii [28]:

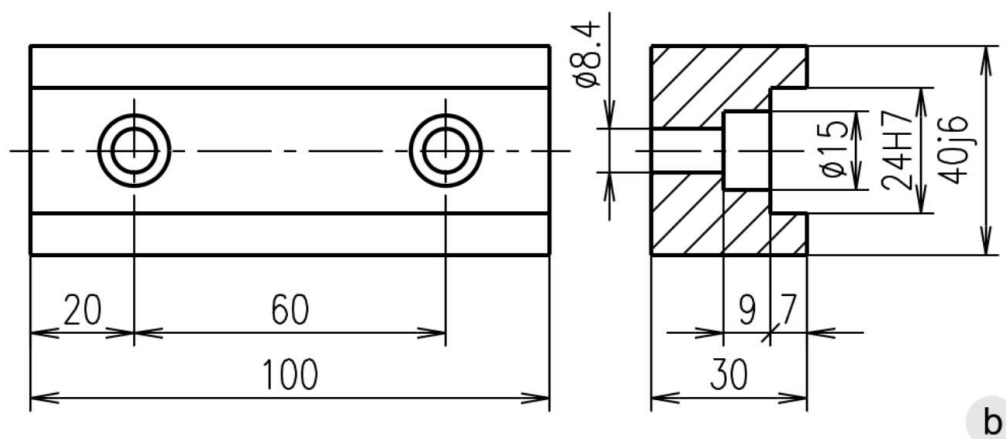
- Nadměrná nebo nedostatečná délka součástí.
- Deformace tvaru (např. oválnost místo kruhového průřezu).
- Nepřesná poloha otvorů, drážek nebo výřezů.

3.2.2 Drsnost povrchu (R_a , R_z)

Povrchová drsnost vyjadřuje jemné nepravidelnosti povrchu, které vznikají jako vedlejší efekt výrobního procesu (např. obrábění, lisování, 3D tisk) [28]. I přestože je povrch rozměrově správný, může vysoká drsnost způsobit problémy s třením, únavovým chováním nebo vzhledem výrobku. Základní parametr pro vyjádření drsnosti:

- R_a (aritmetická střední odchylka) – průměrná absolutní hodnota odchylek profilu od střední linie
- R_z (výškový parametr) – rozdíl mezi nejvyšším vrcholem a nejhlubším údolím ve zvoleném úseku měření

Povrchovou drsnost lze měřit jak dotykově pomocí profilometrů, tak bezkontaktně například metodou interferometrie nebo strojového vidění s využitím speciálního nasvícení.



Obrázek 14 Ukázka z technického výkresu – požadavky na výrobní tolerance a rozměry součásti

(zdroj: [28])

3.3 Metody měření rozměrových vad

Metody pro detekci a měření rozměrových vad lze rozdělit do dvou hlavních kategorií: kontaktní a bezkontaktní.

3.3.1 Kontaktní metody (dotykové snímače, souřadnicové měřicí stroje – CMM)

Kontaktní metody zahrnují použití měřidel, jako jsou mikrometry, posuvná měřítka nebo souřadnicové měřicí stroje (CMM). Tyto metody nabízejí vysokou přesnost, ale jsou časově náročné a méně vhodné pro automatizované procesy.

3.3.2 Optické (bezkontaktní) metody

Bezkontaktní optické metody získávají geometrické informace o objektu prostřednictvím snímání odraženého nebo projektovaného světla. Umožňují rychlé a nedestruktivní měření i složitých tvarů.

Triangulace

Založena na geometrickém principu triangulace, kde známé úhly a vzdálenosti mezi světelným zdrojem (typicky laserem), objektem a kamerou umožňují přesný výpočet pozice bodů v prostoru. Tato metoda se často využívá v laserových profilometrech.

Strukturované světlo

Na povrch objektu se promítá předem definovaný vzor (např. pruhy nebo mřížka), který se deformuje podle topologie povrchu. Kamera snímá tyto deformace a software z nich rekonstruuje 3D tvar. Používá se pro přesná a rychlá plošná měření.

Moaré metoda

Využívá interferenční vzory dvou překrývajících se mřížek (jedna referenční, druhá promítaná). Vzniklé moaré vzory se vyhodnocují pro získání výškových profilů s vysokým rozlišením, zejména u rovinných nebo slabě zakřivených ploch.

3.3.3 Srovnání kontaktních a optických metod (výhody, nevýhody, přesnost)

Volba metody závisí na požadované přesnosti, rychlosti měření, charakteru sledovaných vlastností a integraci do výrobního procesu. V moderních průmyslových aplikacích se s výhodou kombinují různé principy, typicky optické snímání s následným strojovým zpracováním dat.

3.4 Současné technologie a jejich využití

Rozvoj moderních metod strojového vidění, optické metrologie a digitálního zpracování obrazu umožnil vznik vysoce přesných, bezkontaktních metod měření rozměrových a tvarových odchylek. Tyto technologie nacházejí uplatnění napříč průmyslovými odvětvími, od automobilového průmyslu přes výrobu mikrokomponent až po letectví či zdravotnictví. V této podkapitole jsou představeny dvě hlavní skupiny technologií: profilometry a 3D kamerové systémy.

3.4.1 Profilometry (optické, laserové)

Optické profilometry využívají světelné nebo interferenční jevy k mapování výškových rozdílů na povrchu vzorku. Často se používá bílé světlo nebo koherentní laserové zdroje ve spojení s kamerami s vysokým rozlišením. Metoda umožňuje dosahovat submikrometrového rozlišení, a to i u reflexních nebo částečně transparentních materiálů [29].

Optické profilometry

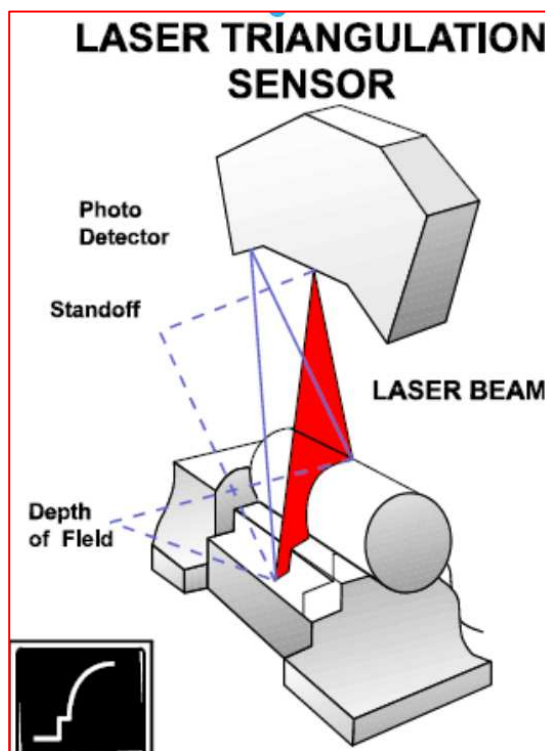
Optické profilometry využívají světelné nebo interferenční jevy k mapování výškových rozdílů na povrchu vzorku. Často se používá bílé světlo nebo koherentní laserové zdroje ve spojení s kamerami s vysokým rozlišením. Metoda umožňuje dosahovat submikrometrového rozlišení, a to i u reflexních nebo částečně transparentních materiálů [29]. Nejčastěji se setkáme s technikami jako jsou:

- Interferenční profilometrie (white light interferometry – WLI)
- Konfokální optická mikroskopie
- Stínová projekce (structured light profilometry)

Laserové profilometry

Laserové profilometry využívají princip triangulace, kdy je na měřený povrch promítána laserová čára a její deformace je snímána kamerou. Ze známé geometrie lze vypočítat výškový profil sledované oblasti. Tyto systémy jsou velmi rychlé, přesné a vhodné pro integraci do výrobních linek. Laserové profilometry umožňují například:

- Měření geometrie rotačních i volně tvarovaných objektů.
- Kontrolu svarů, hran nebo povrchových vad.
- Inspekci v reálném čase (in-line kontrola).



Obrázek 15 Princip optického profilometru – triangulace pomocí promítnutí paprsku laseru (zdroj: [29])

3.4.2 3D skenery a kamerové systémy

3D skenování představuje vysoce flexibilní metodu získávání trojrozměrné informace o objektu. Moderní 3D skenery využívají různé principy: od laserového snímání, přes strukturované světlo až po stereo kamerové systémy. Výsledkem je obdobně jako u předchozích metod mračno bodů, které popisuje prostorovou distribuci povrchu objektu s vysokým rozlišením.

Strukturované světlo

Metoda založená na projekci vzorů (např. čárových mřížek) na povrch objektu a jejich následném snímání kamerou. Deformace těchto vzorů při dopadu na trojrozměrný tvar umožňuje rekonstruovat 3D profil. Výhodou je vysoká přesnost i při měření složitých geometrií a rychlé skenování celých ploch [3].

Stereovize

Stereokamerové systémy napodobují princip lidského zraku – dvě kamery snímají scénu z různých úhlů a na základě disparity (rozdílu v poloze odpovídajících bodů) je možné rekonstruovat 3D strukturu. Tyto systémy jsou vhodné pro dynamické scény a mohou být efektivní i při měření objektů v pohybu [2].

II PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH SYSTÉMU

Tato kapitola se věnuje celkovému návrhu soustavy optického profilometru. Cílem je definovat základní specifikace systému s ohledem na konkrétní aplikační scénář. Každý úkol v oblasti strojového vidění vyžaduje stanovení jasných cílů i limitů navrhované soustavy, a to jak z hlediska technického provedení, tak z hlediska požadavků na přesnost, opakovatelnost a rychlost měření.

4.1 Cíle systému

Hlavním cílem této práce je návrh a realizace funkční soustavy strojového vidění, konkrétně optického profilometru pro detekci rozměrových vad a odchylek na povrchu výrobků. V praxi existuje celá řada komerčních systémů, které nabízejí široké možnosti měření a inspekce, avšak často jde o velmi nákladná řešení. Tato práce si proto klade za cíl navrhnout a sestavit cenově dostupnou alternativu za použití běžně dostupných komponent.

Navržený systém bude sloužit ke snímání povrchu menších objektů pomocí kamery a čárového laseru. Klíčovým principem je využití triangulační metody, kde kamera sleduje projekci laserové čáry pod definovaným úhlem. Objekt je postupně posouván lineárním pojezdem v pracovní rovině a kamera zachycuje sérii snímků, z nichž budou extrahovány souřadnice bodů tvořících výsledné 3D bodové mračno.

Aby bylo možné systém správně kalibrovat, je nutné získat vnitřní a vnější parametry kamery a geometrie celé soustavy. Následně jsou aplikovány algoritmy strojového vidění pro detekci laserové čáry a extrakci měřených bodů. Získaná data je třeba vhodně filtrovat a analyzovat.

Součástí řešení je také řízení pohybu lineárního pojezdu pomocí mikropočítače a jeho synchronizace s kamerou, která pořizuje jednotlivé snímky. Každý snímek je zpracován pro detekci laserové čáry, jejíž tvar je reprezentován množinou bodů. Tyto body jsou následně řazeny do souvislého trojrozměrného bodového mračna, reprezentujícího povrch měřeného objektu.

Kamera bude připojena přímo k mikropočítači, který bude zajišťovat jak napájení, tak řízení akvizice dat. Laserový modul bude mít vlastní napájení a ovládací obvod, nezávislý na mikropočítači.

Výsledkem bude autonomní měřicí systém pro optické skenování povrchu objektů, vizualizaci získaných dat a jejich základní vyhodnocení. Součástí řešení bude také řídicí aplikace umožňující ovládání celé soustavy a provádění manuálních měření.

4.2 Návrh sestavy systému strojového vidění

Pro zajištění mechanické stability a přesnosti měření byl navržen pevný rám složený z hliníkových profilů. Na tuto konstrukci byly následně připevněny jednotlivé komponenty systému: lineární pojezd, laser a kamera.

Jako řídicí jednotka byl zvolen mikropočítač Raspberry Pi 4B, který poskytuje dostatečný výpočetní výkon a připojení pro řízení pohybu, akvizici snímků a případnou komunikaci se senzory. Tato platforma je zároveň cenově dostupná a má širokou podporu v komunitě vývojářů.

Lineární pojezd byl realizován pomocí krokového motoru, který je řízen přes řadič TB6600. Použití tohoto driveru je nezbytné, protože mikropočítač není schopen přímo napájet motor z důvodu nízkého výstupního napětí a omezeného proudu.

V rámci návrhu byly využity zejména komponenty dostupné ve školních laboratořích, což demonstruje dostupnost a opakovatelnost návrhu. V závěru práce je provedena základní ekonomická analýza nákladů na sestavení a nasazení podobného systému v praxi.

4.2.1 Parametry měřených objektů a pracovní prostor

Navržená soustava je určena pro měření objektů s maximálními rozměry přibližně 5 x 10 x 4 cm. Toto omezení vyplývá z mechanického provedení rámu, zorného pole kamery a zvolených optických prvků (objektivu).

Byla provedena řada testů s různými typy materiálů, a to jak matných, tak i reflexních, s cílem ověřit vhodnost systému pro různé optické vlastnosti povrchu. Výsledky ukazují, že profilometr je schopen měřit i na materiálech s vyšší odrazivostí za předpokladu správného nastavení parametrů osvětlení a expozice.

Koncept systému je škálovatelný – změnou geometrie sestavy lze měřit menší i větší objekty. V budoucnu je možné systém rozšířit například výměnou lineárního pojezdu za pásový dopravník, což by umožnilo kontinuální měření výrobků v rámci výrobní linky.

Takto navržený systém může sloužit jako cenově dostupná alternativa k drahým komerčním řešením nebo k ruční kontrole kvality.

4.2.2 Limity navržené soustavy

Navržený systém 3D optického profilometru je optimalizován především pro měření drobnějších objektů s maximálními rozměry přibližně $10 \times 5 \times 5$ cm. Tato velikost byla zvolena s ohledem na použité komponenty, geometrii měřicí soustavy a rozměry pracovní plochy. Při měření větších objektů by mohlo docházet k omezení zorného pole kamery, nedostatečné hloubce ostrosti nebo k deformacím v okrajových oblastech obrazu.

Dále je důležité dodržet stabilní a kontrolované podmínky osvětlení, neboť měřicí systém je citlivý na rušivé vlivy okolního světla. Proměnlivá intenzita, odlesky či stíny mohou výrazně ovlivnit kontrast laserové linie a následně negativně ovlivnit přesnost detekce. Vhodným řešením je provoz systému v opticky odstíněném prostředí nebo využití světelných clon.

Navržená sestava byla koncipována jako modulární, což umožňuje její další rozšíření a modifikaci. Mezi možná vylepšení patří:

- Zvětšení pracovní plochy použitím delší lineární osy a přizpůsobením rozsahu pojezdu
- nasazení kamery s vyšším rozlišením pro detailnější rekonstrukci tvaru (bude potřeba vyšší výpočetní výkon)
- výměna laseru za zdroj s užší linií, čímž lze dosáhnout vyšší prostorové přesnosti
- implementace víceosého pohybu pro měření složitějších objektů z více úhlů.

Navzdory zmíněným limitům je navržený systém plně funkční pro zadaný rozsah úloh a představuje flexibilní základ, který může být dále přizpůsobován dle specifických požadavků aplikace nebo rozšiřován směrem k plnohodnotnému průmyslovému řešení.

4.3 Volba hardwaru

Následující kapitola představuje zvolené komponenty pro realizaci návrhu optického profilometru. Věnuje se jejich specifikaci a implementaci v kontextu sestavy.

4.3.1 Kamera Basler

Pro realizaci systému optického profilometru byla zvolena průmyslová kamera Basler ace U acA4024-29u, která patří mezi kompaktní a výkonné modely určené pro technické a průmyslové aplikace v oblasti strojového vidění.

Tato kamera disponuje barevným CMOS snímačem Sony IMX304 s rozlišením 12,3 megapixelu (4024×3036 px) a maximální snímkovou frekvencí 29 snímků za sekundu při plném rozlišení. Jedná se o snímač s vysokou světelnou citlivostí a nízkým šumem, který je vhodný pro precizní aplikace, kde je požadována vysoká kvalita obrazu. Specifikace dle dostupné online dokumentace:

Tabulka 1 Technická specifikace kamery

Model	Basler ace U acA4024-29uc
Typ snímače	Sony IMX226CQJ-C Progressive scan CMOS
Rozlišení	4024×3036 px (12,3 MP)
Maximální snímková frekvence	29 fps
Barevný / monochromatický	Barevný (Color)
Rozhraní	USB 3.0 (USB 3.1 Gen 1, typ B)
Typ závěrky	Rolling shutter
Velikost pixelu	$3,45 \mu\text{m} \times 3,45 \mu\text{m}$
Rozměry kamery	$29 \text{ mm} \times 29 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$
Hmotnost	90 g
Objektivový závit	C-mount
Napájení	Přes USB rozhraní (5 V DC)

(zdroj: [30])

Využití kamery v systému

Kamera Basler ace U byla zvolena především díky svému vysokému rozlišení, kompaktním rozměrům a spolehlivému USB 3.0 rozhraní, které umožňuje rychlý přenos obrazových dat do mikropočítače. V aplikaci optického profilometru kamera snímá povrch

objektu osvětleného liniovým laserem pod definovaným úhlem. Snímky jsou pořizovány sekvenčně během pohybu objektu po lineárním pojezdu.

Díky vysokému rozlišení a kvalitě snímače je kamera schopna zachytit jemné detaily profilu laserové čáry, což je klíčové pro následné získání přesných 3D souřadnic bodů při rekonstrukci bodového mračka. Barevná varianta kamery byla zvolena s ohledem na možnost budoucího rozšíření systému o inspekční funkce na základě barevných vlastností objektů, ačkoliv pro samotnou triangulaci se využívá pouze červený laserový paprsek.

Další výhodou této kamery je široká podpora ze strany výrobce – k dispozici jsou vývojové balíčky a ovladače pro všechny běžné platformy, což usnadňuje její integraci do systémů s různými typy řídicí elektroniky.



Obrázek 16 Průmyslová kamera Basler

(zdroj: [30])

Software a správa kamery – Basler Pylon Viewer

Pro správu, testování a počáteční konfiguraci kamery Basler ace U byl využit software Basler Pylon Viewer, který je součástí vývojového balíčku Pylon Camera Software Suite. Tento nástroj umožňuje snadné připojení kamery, náhled živého obrazu, ladění expozičních parametrů, volbu oblasti zájmu (ROI – region of interest), nastavení vyvážení bílé barvy nebo ostření obrazu.

Pylon Viewer sloužil jako důležitý nástroj při ověřování správné funkce kamery, kontrole kvality obrazu a určení optimálních parametrů snímání ještě před integrací kamery do samotné měřicí aplikace. Kromě toho umožňuje ukládání snímků a testování odezvy kamery v reálném čase, což bylo užitečné při ladění synchronizace se zbytkem měřicího systému. Díky Pylon Vieweru byla ověřena správná funkčnost snímače, dostupnost všech funkcí v daném prostředí a vhodnost zvoleného rozlišení a snímkové frekvence pro požadovanou aplikaci.

4.3.2 Objektiv Basler

Pro účely snímání obrazu kamerou Basler ace U byla zvolena průmyslový objektiv Basler 25 mm 1:1.4 C1, která je optimalizována pro senzory s vysokým rozlišením až do 12 megapixelů. Jedná se o standardní C-mount objektiv navržený přímo výrobcem Basler, což zajišťuje plnou kompatibilitu a vysokou kvalitu zobrazení při použití s kamerami této značky.

Tento objektiv poskytuje velmi dobrou světelnost a ostrost v celém obrazovém poli, což je zásadní při aplikacích, kde je požadována přesná detekce jemných detailů – například při snímání tenké laserové čáry na povrchu měřeného objektu.

Tabulka 2 Technická specifikace objektivu

Model	Basler Lens 25 mm 1:1.4 C1
Ohnisková vzdálenost	25 mm
Světelnost	f/1.4
Optický závit	C-mount
Maximální rozlišení senzoru	12 MP
Rozměr snímáče	až 1"
Minimální zaostřovací vzdálenost	0,2 m
Průměr filtrového závitu	M35.5 × 0.5
Hmotnost	cca 70 g
Clona	Manuálně nastavitelná
Zaostřování	Manuální

(zdroj: [31])

Využití objektivu v systému

Zvolený objektiv s ohniskovou vzdáleností 25 mm byl vybrán s ohledem na požadované zorné pole, pracovní vzdálenost kamery a velikost snímaného objektu. Kombinace s kamerou s rozlišením 12 MP umožňuje dosažení velmi jemného rozlišení detailů i při relativně kompaktním pracovním prostoru.



Obrázek 17 Objektiv Basler

(zdroj: [31])

Díky vysoké světelnosti objektivu ($f/1.4$) je možné zachytit dostatek světla i v méně příznivých světelných podmínkách, což je výhodné při použití úzkopásmového červeného laseru, který generuje pouze úzkou čáru světla. Objektiv také umožňuje jemné manuální zaostření, což je důležité pro správné zaostření laserové linie v celém rozsahu pohybu objektu. Objektiv byl mechanicky zajištěn vůči nechtěnému pohybu (např. vibracím) po zaostření a nastavení clony, aby byla zajištěna dlouhodobá stabilita zobrazení během měření.

Použití tohoto konkrétního objektivu bylo výhodné i z hlediska dostupnosti a poměru cena/výkon, protože poskytuje velmi dobrou kvalitu obrazu při zachování přijatelné pořizovací ceny, což odpovídá cíli práce navrhnout cenově dostupný systém.

4.3.3 Laserový modul

Pro realizaci osvětlovacího systému byl použit laserový modul Laser 1M s červeným světlem (vlnová délka 650 nm), dostupný od [32], který je určen pro průmyslové použití v systémech strojového vidění. Laser byl napájen prostřednictvím adaptéru a řízen pomocí kontroleru Controller Mini CM-01, dostupný z [33], který umožňuje precizní nastavení intenzity a stabilizaci výkonu.

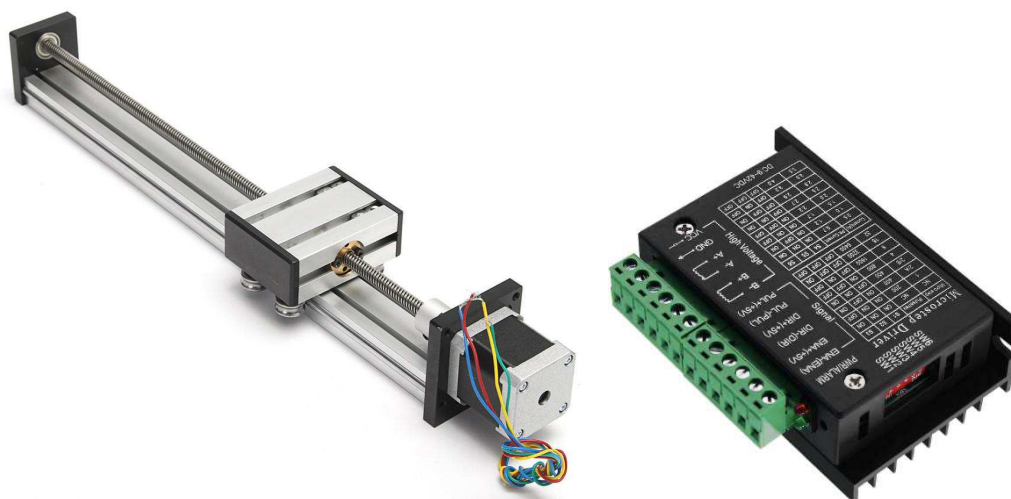
4.3.4 Krokový motor a řadič

Pro pohon lineárního pojezdu v systému byl zvolen kompaktní krokový motor s integrovaným trapézovým šroubem o délce 300 mm. Tento komponent je běžně dostupný na trhu, avšak je obtížné získat technickou dokumentaci přímo od výrobce. Základní charakteristika byla převzata z webu českého distributora:

Tabulka 3 Technická specifikace sestavy lineárního krokového motoru

Typ motoru	Krokový, dvoufázový (bipolární)
Úhel kroku	1,8°
Maximální proud na fázi	1,5 A
Točivý moment	0,42 Nm
Trapézový šroub	T8, stoupání 8 mm, průměr 8 mm
Délka posuvu	300 mm
Unašeč	Přípevněn dvěma imbusovými šrouby
Přesnost posuvu	0,1 mm
Materiál konstrukce	Hliník
Maximální horizontální zatížení	56 kg
Maximální vertikální zatížení	15 kg
Provozní teplota	-10 až 50 °C

(zdroj: [34])



Obrázek 18 Lineární krokový pojezd a řadič motoru

(zdroj: [34])

Výhodou tohoto řešení je integrovaný trapézový šroub, který je souosý s osou motoru, což eliminuje potřebu složitého seřizování a zvyšuje přesnost pohybu. Tento typ motoru je vhodný pro aplikace, kde je požadována přesnost a opakovatelnost pohybu, například v 3D tiskárnách nebo CNC strojích. Technická dokumentace je dostupná online na webu distributora [34].

4.3.5 Výpočetní a ovládací jednotka

Pro řízení systému optického profilometru, sběr snímků a ovládání lineárního pojezdu byl zvolen mikropočítač Raspberry Pi 4 Model B. Tento kompaktní jednodeskový počítač představuje dostupné a výkonné řešení vhodné pro nasazení v technických projektech, které vyžadují flexibilní řízení periferií, sběr dat a základní zpracování obrazu.

Tabulka 4 Specifikace mikropočítače

Model	Raspberry Pi 4 Model B
Procesor	Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72
Frekvence CPU	1.5 GHz
RAM	8 GB LPDDR4 (varianta použitá v systému)
GPU	Broadcom VideoCore VI
Porty	2× micro-HDMI, 2× USB 3.0, 2× USB 2.0, Ethernet
GPIO	40 pinů (3.3V logika)
Úložiště	microSD karta
Síťové rozhraní	Gigabit Ethernet, Wi-Fi 802.11ac, Bluetooth 5.0

(zdroj: [35])

Role mikropočítače v systému

Raspberry Pi 4B slouží jako řídicí jednotka, jejímž úkolem je:

- řídit pohyb lineárního pojezdu prostřednictvím krokového motoru a řadiče TB6600
- synchronizovat pořizování snímků s pohybem měřeného objektu
- komunikovat s kamerou Basler pomocí rozhraní USB 3.0
- ukládat pořízené snímky na lokální úložiště (SD karta)
- zprostředkovat přenos snímků do vyhodnocovací stanice

Zvolený mikropočítač nabízí výborný poměr výkonu, rozšiřitelnosti a dostupnosti. Díky podpoře vývojových nástrojů jako Python, OpenCV a knihoven pro ovládání periferií (např. RPi.GPIO) umožňuje jednoduché sestavení řídicí logiky i integraci potřebných komponent.

Softwarová architektura a způsob zpracování dat

Řídicí aplikace a veškeré skripty běžící na Raspberry Pi byly vyvinuty v jazyce Python. Zajišťuje obsluhu krokového motoru (knihovna RPi.GPIO), komunikaci s kamerou prostřednictvím Pylon API.

Z důvodu výpočetně náročného zpracování obrazových dat (např. detekce laserové čáry, segmentace obrazu, generování bodového mračka) je finální vyhodnocení snímků realizováno mimo mikropočítač, na výkonnější pracovní stanici. Po ukončení skenovací sekvence jsou snímky automaticky přesunuty přes síť nebo externí médium do hlavního počítače, kde probíhá další zpracování. Tímto způsobem je dosaženo:

- odlehčení výpočetní zátěže na Raspberry Pi,
- vyšší rychlosti zpracování a přesnosti analýzy díky využití výkonu stolního PC,
- flexibilního oddělení funkce sběru dat od analýzy výsledků.

Výhody zvoleného řešení

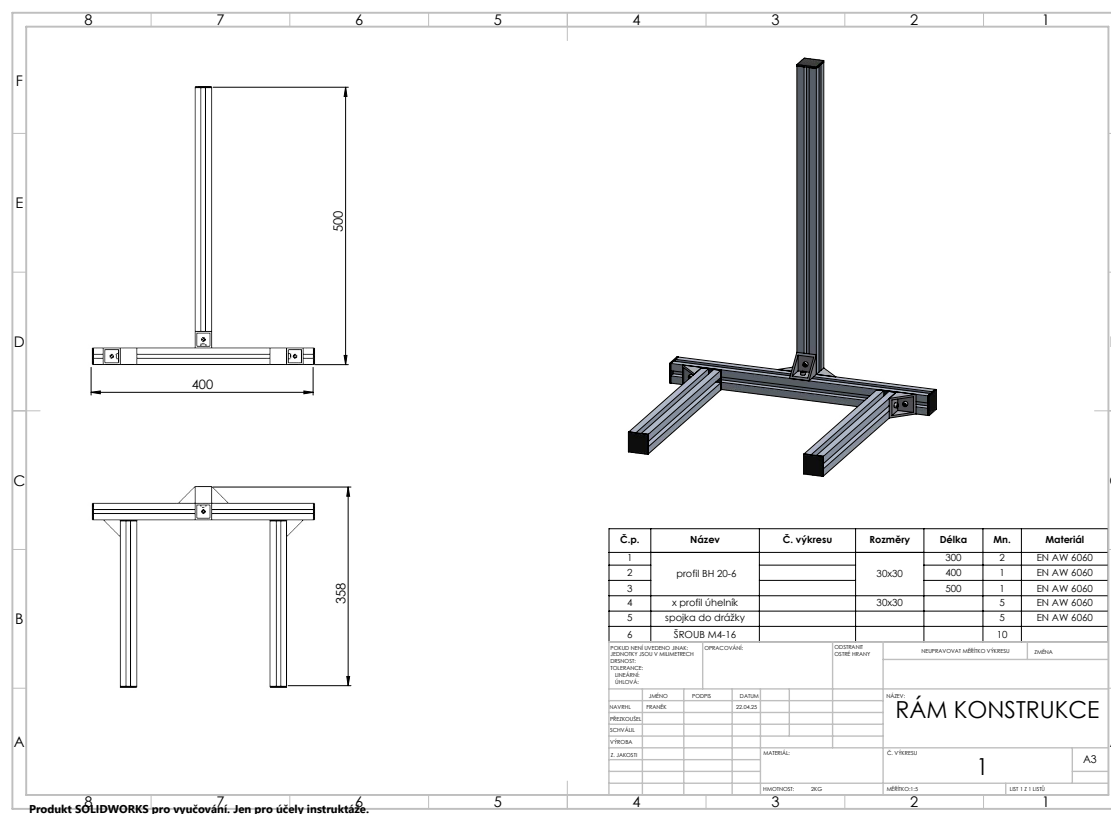
Použití Raspberry Pi přináší do systému následující výhody:

- Nízké pořizovací náklady a široká dostupnost,
- Modulární přístup k návrhu systému – snadné rozšíření o další funkce,
- Nízká spotřeba energie a kompaktní rozměry,
- Snadná integrace s dalšími komponentami skrze GPIO,
- Komunita a dostupná dokumentace, která výrazně usnadňuje vývoj.

Díky těmto vlastnostem je Raspberry Pi ideální volbou pro řízení a koordinaci systému optického profilometru, přičemž náročnější zpracování je delegováno na výkonnější prostředí.

4.3.6 Rám konstrukce

Pro realizaci rámu, který tvoří základní platformu pro všechny další komponenty, byly využity normalizované hliníkové profily a úhelníky. Toto řešení poskytuje vysokou modularitu a rozšiřitelnost pro případné úpravy soustavy. Konstrukce poskytuje stabilní a tuhou podporu pro uchycení pojezdu, který je jediným zdrojem pohybu v sestavě. Pro útlum vznikajících vibrací při posunu byla na kontaktních místech rámu přidána pásová guma.



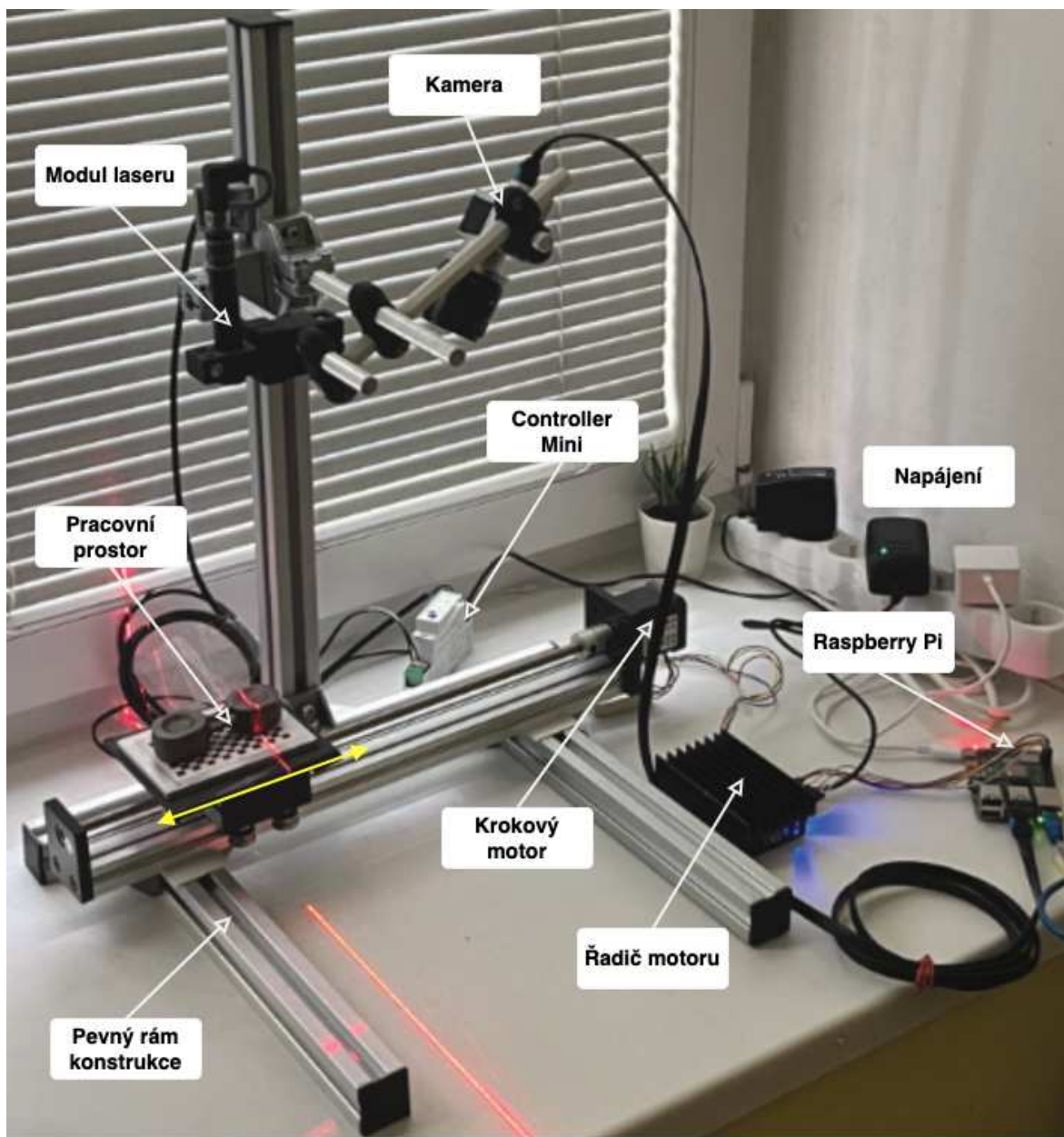
Obrázek 19 Návrh konstrukce rámu sestavy profilometru

(zdroj: vlastní, Solidworks)

4.3.7 Osvětlení

Při návrhu systému nebylo využito žádné speciální umělé osvětlení. Snímání probíhalo za běžných světelných podmínek místnosti, tedy za ambientního denního osvětlení. Tento přístup umožňuje jednoduché a flexibilní nasazení systému bez nutnosti dodatečného světelného vybavení. Zároveň bylo ověřeno, že čárový laser je při těchto podmínkách dostatečně kontrastní pro následné zpracování obrazu.

4.3.8 Výsledná sestava



Obrázek 20 Výsledná konfigurace sestavy profilometru

(zdroj: vlastní foto)

4.4 Software

Pro návrh, realizaci a řízení systému optického profilometru byly využity softwarové nástroje kombinující samostatný operační systém s řídicími a výpočetními programy a širokou škálou knihoven pro vývoj aplikací v oblasti zpracování obrazu, řízení periférií a vizualizace dat.

Raspberry Pi OS

Celý systém byl provozován na operačním systému Raspberry Pi OS [36], což je oficiální distribuce založená na Debianu (open source distribuce Linuxu), optimalizovaná pro hardwarovou architekturu Raspberry Pi. Systém poskytuje plnohodnotné grafické prostředí, přístup k repozitářům a je ideální platformou pro vývoj embedded aplikací. Využita byla 64bitová verze systému pro zajištění kompatibility s používaným hardwarem a vyššího výkonu při manipulaci s většími datovými strukturami.

Python 3.13 a instalační nástroj pro knihovny pip

Jako hlavní vývojový jazyk byl použit Python ve verzi 3.13.1, který poskytuje širokou podporu pro technické a vědecké aplikace [37]. Všechny potřebné knihovny byly spravovány pomocí nástroje pip, což je standardní balíčkovací systém umožňující snadnou instalaci a aktualizaci modulů přímo z oficiálního Python Package Indexu (PyPI). Pro každý projektový modul byla využita virtuální prostředí (venv), což umožnilo oddělené a efektivní řízení závislostí jednotlivých knihoven.

Vývojová prostředí MS VS Code a Thonny

Pro vývoj aplikace byly využity primárně dvě integrované vývojové prostředí (IDE): VS Code a Thonny. VS Code byl použit pro větší projekty, kde byla potřeba podpora verzovacích systémů, jako je Git, a rozsáhlejší nástroje pro ladění kódu. Thonny sloužil pro rychlý vývoj a testování menších skriptů a experimentálních částí kódu. Obě prostředí umožnila efektivní práci v Pythonu a usnadnila práci s virtuálními prostředími, která byla pro každý projekt vytvořena.

Pypylon a Basler Pylon Viewer 32-bit

Pro komunikaci s průmyslovou kamerou Basler ace U acA4024-29uc byla použita knihovna Pypylon, což je Python wrapper pro Basler Pylon SDK. Tato knihovna umožňuje programovou správu kamery, nastavení expozičních parametrů, snímání snímků a jejich

ukládání. Dále byl použit Pylon Viewer (32-bit) pro testování kamery, kalibraci snímacího úhlu a ověření správné funkčnosti před implementací do aplikace.

Knihovny pro Python

Pro realizaci softwarového řešení byla využita řada knihoven jazyka Python. Níže jsou stručně představeny jednotlivé klíčové knihovny spolu s jejich hlavní funkcionalitou. Konkrétní funkce, metody a jejich použití jsou podrobněji rozebrány v sekci s pseudokódem, která popisuje logiku algoritmu a implementační detaily.

OpenCV

Základním stavebním kamenem pro zpracování obrazových dat byla knihovna OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [21]. Ta byla využita pro následující úlohy:

- načítání a předzpracování snímků,
- detekce laserové čáry a její segmentace,
- aplikace prahování, filtrací a morfologických operací,
- vizualizace výsledků v reálném čase.

OpenCV umožňuje efektivní práci s maticovými strukturami a poskytuje nástroje optimalizované pro embedded systémy.

Matplotlib

Pro účely vizualizace dat a ladění algoritmů byla využita knihovna Matplotlib, především její modul pyplot. Ten sloužil k vykreslování průběhů, detekovaných bodů, profilů a bodových mračen. Díky integraci s Jupyter Notebookem a Pythonem se jedná o ideální nástroj pro rychlou validaci výstupů během vývoje.

Numpy a Pandas

Knihovna NumPy byla použita primárně pro efektivní práci s vektory a maticemi. Pomocí ní byly implementovány operace spojené s výpočtem bodových souřadnic z obrazu a převody mezi formáty. Pro správu a analýzu větších datových struktur byla nasazena knihovna Pandas, která umožnila ukládání a přehledné strukturování extrahovaných dat, jejich filtraci, export a přípravu pro další statistické zpracování nebo vizualizaci.

RPi.GPIO

Pro řízení periférií, zejména krokového motoru a synchronizačních signálů, byla použita knihovna RPi.GPIO. Tato knihovna umožňuje přímou správu GPIO pinů mikropočítače, jejich nastavení jako výstupní nebo vstupní a definici jejich časování. Byla využita k implementaci řízení směru a kroku motoru, stejně jako k synchronizaci pojezdu s pořizováním snímků.

PyQt5

Pro tvorbu uživatelského rozhraní měřicí aplikace byla využita knihovna PyQt5, která poskytuje nástroje pro návrh interaktivních grafických rozhraní. Pomocí ní byla vytvořena aplikace, která umožňuje:

- intuitivní ovládání měřicího systému,
- zadání parametrů měření,
- zobrazení výsledků měření a bodových mračen.

socket

Pro síťovou komunikaci mezi aplikací běžící na notebooku a mikropočítačem Raspberry Pi byla využita standardní Python knihovna socket. Umožňuje implementaci klient-server komunikace přes TCP/IP, která slouží k:

- přenosu příkazů (např. požadovaný posun, spuštění snímání),
- přenosu stavových hlášení a zpětné vazby ze zařízení.

Paramiko

K přenosu souborů a vzdálené správě systému Raspberry Pi byla využita knihovna Paramiko, která implementuje protokol SSH v Pythonu. Umožnila:

- bezpečný přenos nasnímaných obrazových dat z Raspberry Pi na lokální počítač,
- vzdálené spouštění skriptů a správu systému bez nutnosti fyzického přístupu.

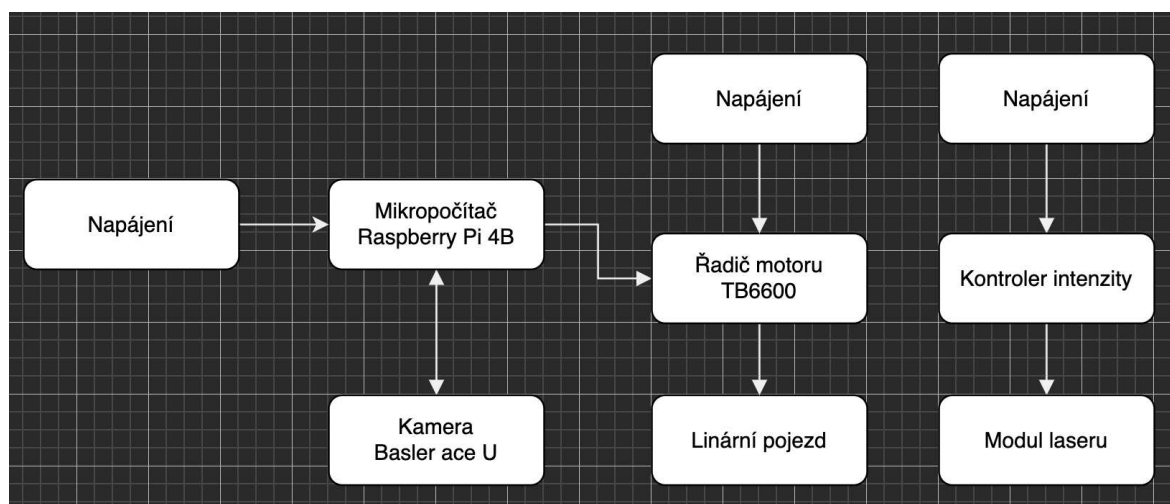
Tato kombinace open-source softwarových nástrojů umožnila sestavit plně funkční a flexibilní měřicí systém bez nutnosti komerčních softwarových licencí, přičemž všechny nástroje byly plně kompatibilní s použitým mikropočítačem a zvoleným hardwarem.

4.5 Komunikace a zapojení jednotlivých komponent

Správná integrace a komunikace jednotlivých komponent systému je klíčová pro zajištění přesného a spolehlivého provozu měřicí soustavy. Propojení těchto prvků musí být navrženo s ohledem na typ signálu (digitální/analogový), požadovanou rychlost přenosu dat a synchronizaci.

4.5.1 Schéma zapojení soustavy

Na zjednodušeném schématu níže jsou zobrazeny vztahy mezi jednotlivými komponenty sestavy.



Obrázek 21 Schéma zapojení komponent soustavy

(zdroj: vlastní, Draw.io)

4.5.2 Kamerový systém

Průmyslová kamera je připojena k mikropočítači Raspberry Pi přes rozhraní USB 3.0, které zajišťuje dostatečnou přenosovou rychlost pro sběr obrazových dat v reálném čase. Velkou výhodou je i to, že USB rozhraní poskytuje i napájení kamery a není tedy potřeba samostatného zdroje. Kamera je řízena softwarově pomocí knihovny pypylon (oficiální Python wrapper pro Basler Pylon SDK). Pro přesné měření je kamera uchycena ve fixní poloze, přičemž snímá promítanou laserovou linii na pohybující se objekt.

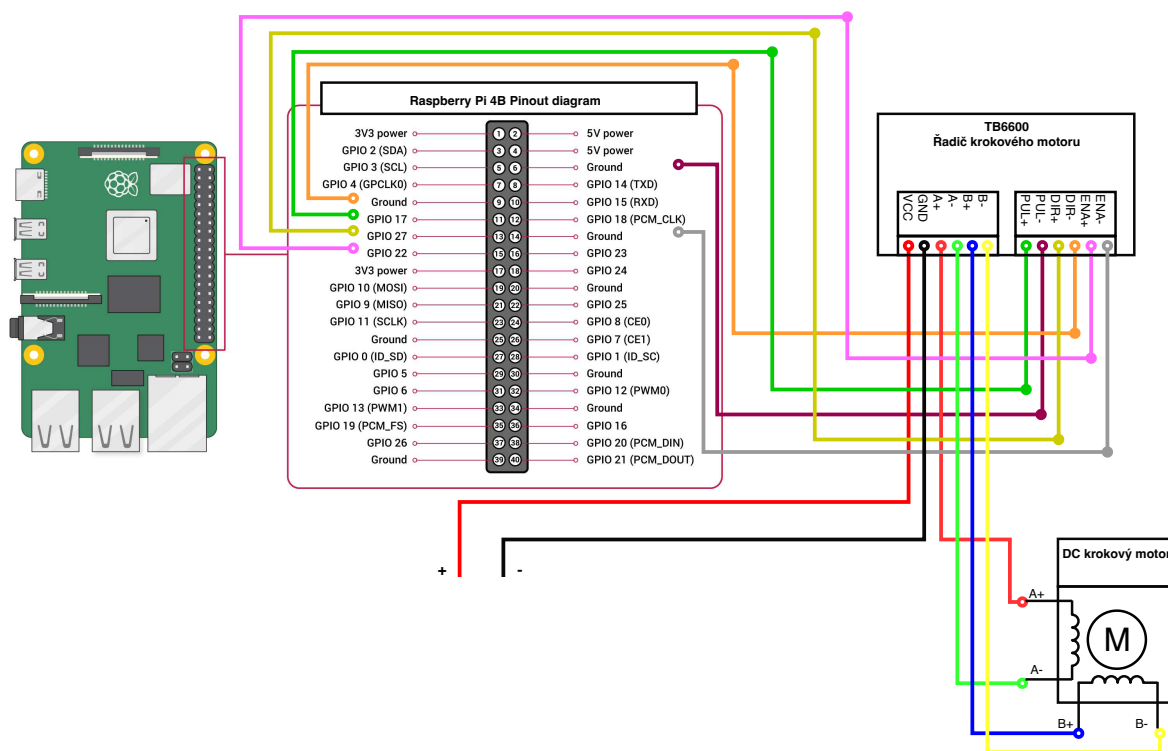
Pro snímání v přesně definovaných okamžicích je možno využít hardware trigger, kde Raspberry Pi generuje TTL impuls (tranzistorově-tranzistorová logika) pomocí GPIO pinu (programově např. přes RPi.GPIO nebo gpiozero). Tento impuls je přiveden na vstupní pin kamery a slouží k synchronizaci snímání s pohybem osy.

4.5.3 Ovládání lineárního posuvu

Lineární pohyb objektu (nebo kalibrační desky) je zajištěn pomocí krokového motoru s 200 kroky na otáčku ($1,8^\circ/\text{krok}$), který je připojen k driveru TB6600. Driver je následně TB6600 je propojen s Raspberry Pi, které zajišťuje jeho ovládání prostřednictvím digitálních výstupů GPIO. Konkrétně jsou použity následující signály:

- DIR (Direction) – určuje směr otáčení motoru.
- PUL (Pulse) – řídí jednotlivé kroky motoru, přičemž frekvence pulzů určuje rychlost pohybu.
- ENA (Enable) – umožňuje nebo zakazuje činnost driveru.

Pomocí aplikace vyvinuté v jazyce Python je možné přesně řídit pohyb motoru zadáním požadované vzdálenosti a směru pohybu. Nastavené parametry umožňují uživateli ovládat lineární posuv s vysokou přesností, což je nezbytné pro přesné měření a kalibraci v rámci systému optického profilometru.



Obrázek 22 Schéma zapojení soustavy ovládání krokového motoru skrze řadič z mikropočítače

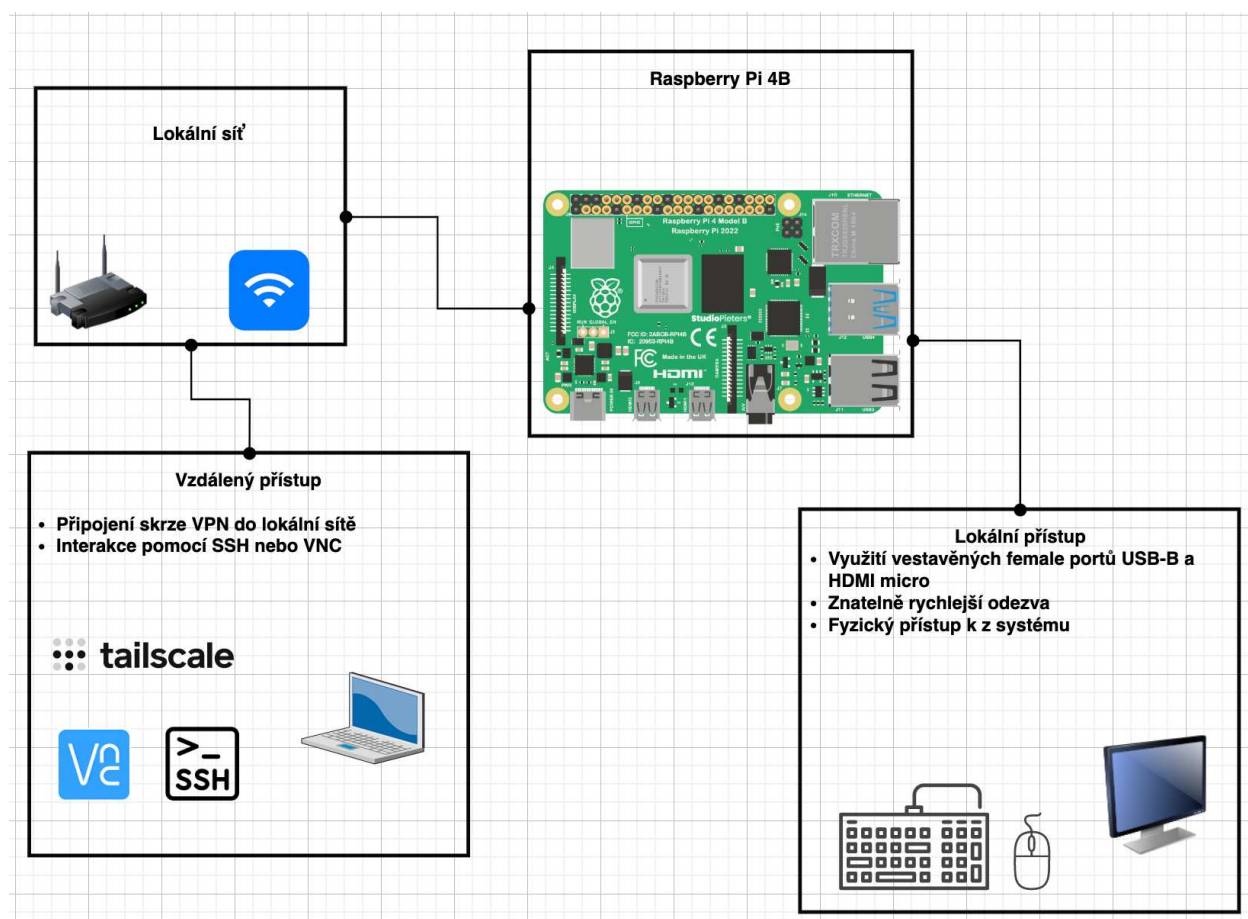
(zdroj: vlastní, Draw.io)

4.5.4 Ovládání modulu laseru

Vzhledem k tomu, že není nutné ovládat zapínání a vypínání laseru z mikropočítače pro samotné měření bylo zvoleno oddělení napájení modulu od zbytku sestavy.

4.5.5 Grafický výstup na monitor a perifrie

Při vývoji a testování aplikace na platformě Raspberry Pi je důležité zvolit vhodný způsob ovládání a přístupu k zařízení. V rámci této práce byly využity dva různé přístupy k zajištění grafického výstupu a ovládání mikropočítače. Pro oba způsoby platí, že Raspberry Pi lze připojit k síti buď pomocí bezdrátového Wi-Fi rozhraní, nebo přímo prostřednictvím ethernetového kabelu.



Obrázek 23 Metody připojení k mikropočítači

(zdroj: vlastní, Draw.io)

1. Lokální připojení periférií

První způsob spočíval v přímém připojení Raspberry Pi k periferním zařízením – konkrétně klávesnici, myši a monitoru. Monitor byl připojen prostřednictvím micro HDMI–

HDMI redukce, kterou Raspberry Pi podporuje na dvou micro HDMI portech. Toto přímé propojení umožňuje spustit grafické rozhraní operačního systému Raspberry Pi OS a ovládat zařízení bez nutnosti vzdáleného přístupu. Tento způsob je výhodný zejména při prvotním nastavení systému, aktualizacích nebo řešení problémů s konektivitou.

2. Vzdálený přístup přes lokální síť a VPN

Druhý způsob vývoje a ovládání Raspberry Pi využívá vzdálené připojení prostřednictvím lokální sítě. Raspberry Pi bylo připojeno k domácí síti a pro zajištění bezpečného vzdáleného přístupu byl nasazen nástroj Tailscale – jednoduchá implementace VPN postavená na WireGuard protokolu [38]. Pomocí Tailscale bylo možné vytvořit virtuální privátní síť, ve které bylo Raspberry Pi dostupné pod stabilní IP adresou.

Pro samotné vzdálené ovládání grafického prostředí byl použit nástroj VNC Viewer [39]. Raspberry Pi obsahuje integrovaný VNC server (například RealVNC), který umožňuje připojit se ke vzdálené ploše zařízení přes síť. Tento způsob je velmi efektivní pro vývoj aplikací s grafickým rozhraním, aniž by bylo nutné připojovat fyzické periférie. Stačí, aby Raspberry Pi běželo, bylo připojeno k síti a na straně vývojáře byl spuštěn VNC klient s přístupem přes Tailscale VPN.

Shrnutí

Oba přístupy mají své výhody. Lokální připojení periférií je spolehlivé a nezávislé na síťové infrastruktuře, zatímco vzdálený přístup přes VPN a VNC poskytuje vyšší flexibilitu a pohodlí při dlouhodobém vývoji nebo ladění. V této práci byly oba způsoby využity podle aktuálních potřeb a fází vývoje systému.

5 NÁVRH ALGORITMU

V této kapitole je popsán návrh algoritmu pro získávání trojrozměrných souřadnic bodů pomocí optického profilometru. Proces je rozdělen do několika navazujících kroků, které jsou detailně popsány v následujícím textu. Detaily realizace algoritmů v rámci programů jsou rozebrány a doplněny o vizualizace níže. Podrobnější popis funkcionality programů v rámci aplikace je předmětem sedmé kapitoly.

Kalibrace kamery

Prvním krokem je kalibrace kamery, jejímž cílem je získat vnitřní a vnější parametry kamery. Vstupem pro kalibraci je sada snímků šachovnicového vzoru pořízených v různých pozicích a informace o rozměrech šachovnice. Výstupem kalibrace jsou vypočtené parametry, které jsou následně uloženy do výstupního souboru pro další výpočty. Proces kalibrace probíhá pomocí Zhangovy metody.

Identifikace roviny laseru

Druhým krokem je identifikace roviny laseru v souřadném systému kamery. Tento krok využívá dva snímky laserové linie vedle šachovnicového vzoru, přičemž každý z nich je pořízen pod různým úhlem. Pro jednoznačnou definici roviny laseru jsou identifikovány dva vektory, které tuto rovinu tvoří. Tyto vektory jsou určeny průsečíky přímků šachovnice a laseru.

Pořízení snímku a extrakce bodů

Po dokončení kalibrace kamery a určení roviny laseru začíná proces pořizování snímků zkoumaného objektu. Ty jsou pořízeny vždy po definovaném kroku lineárního pojezdu a indexovány pro snadnou identifikaci. Uložené snímky slouží jako vstup pro následnou extrakci bodů laserové linie. Vypočtené souřadnice těchto bodů jsou následně filtrovány a interpolovány pomocí vybraných algoritmů. Po zpracování jsou extrahované body uloženy do výstupních souborů pro každý snímek samostatně.

Transformace do souřadného systému kamery

Extrahované body jsou transformovány do roviny laseru v souřadném systému kamery. K této transformaci jsou využity parametry získané z kalibrace kamery a identifikace roviny laseru. Výstupem jsou již trojrozměrné souřadnice bodů v souřadném systému kamery.

Transformace do souřadného systému pojezdu

Protože souřadnice v souřadném systému kamery neodpovídají přímo fyzickému rozložení objektu na lineárním pojezdu, je nutné provést jejich převod. K tomu slouží transformační matice mezi souřadným systémem kamery a pojezdu. Tato matice je vypočítána na základě snímků šachovnicového vzoru umístěného na pracovní ploše pojezdu.

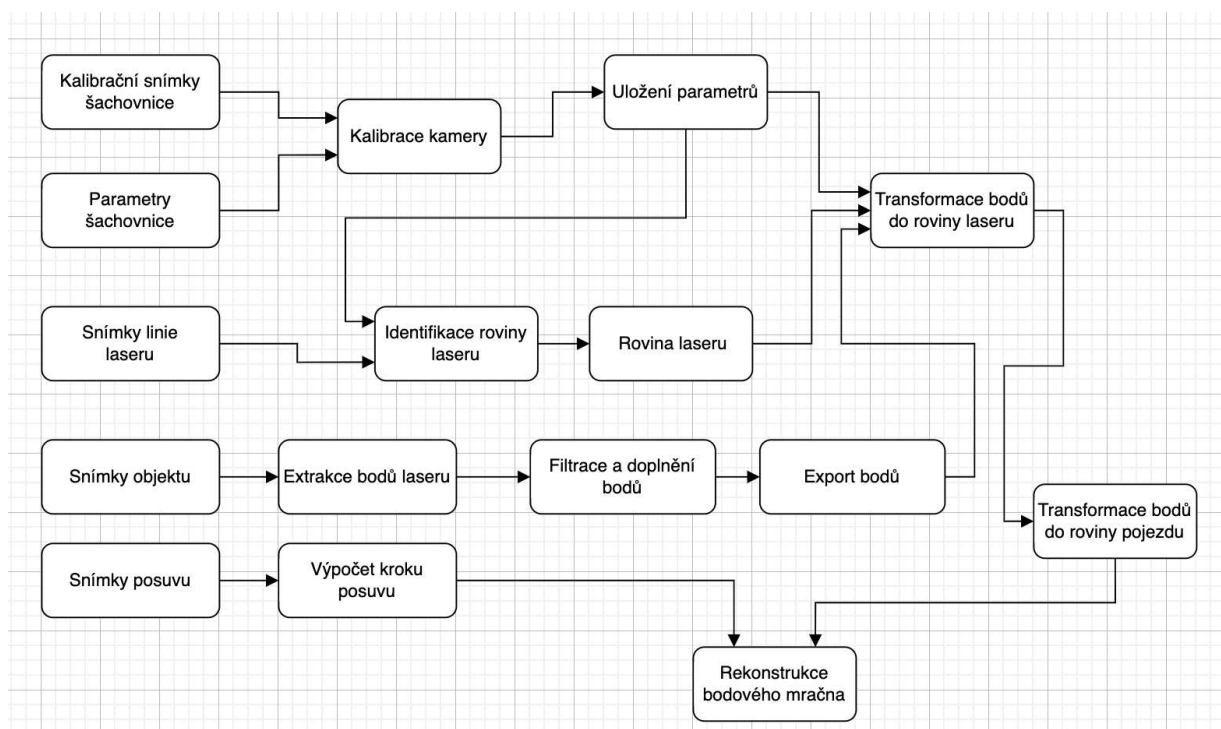
Výpočet velikosti kroku posuvu

Pro zjištění velikosti kroku lineárního pojezdu je pořízena sada snímků šachovnicového vzoru, přičemž vzor je snímán v pravidelných intervalech posuvu. Na základě těchto snímků je vypočítána vzdálenost odpovídající jednomu kroku pojezdu.

Rekonstrukce bodového mračka

V posledním kroku jsou jednotlivé řezy bodů, získané z pořízených snímků, postupně sestaveny za sebe na základě známé vzdálenosti mezi jednotlivými kroky pojezdu. Takto vzniká souvislé bodové mračno, které je následně exportováno do výsledného souboru. Vizualizace bodového mračka a jeho podrobnosti jsou blíže popsány v kapitole, která se věnuje řídicí aplikaci.

Hlavní kroky algoritmu a jejich návaznost jsou zjednodušeně zobrazeny na schématu níže:



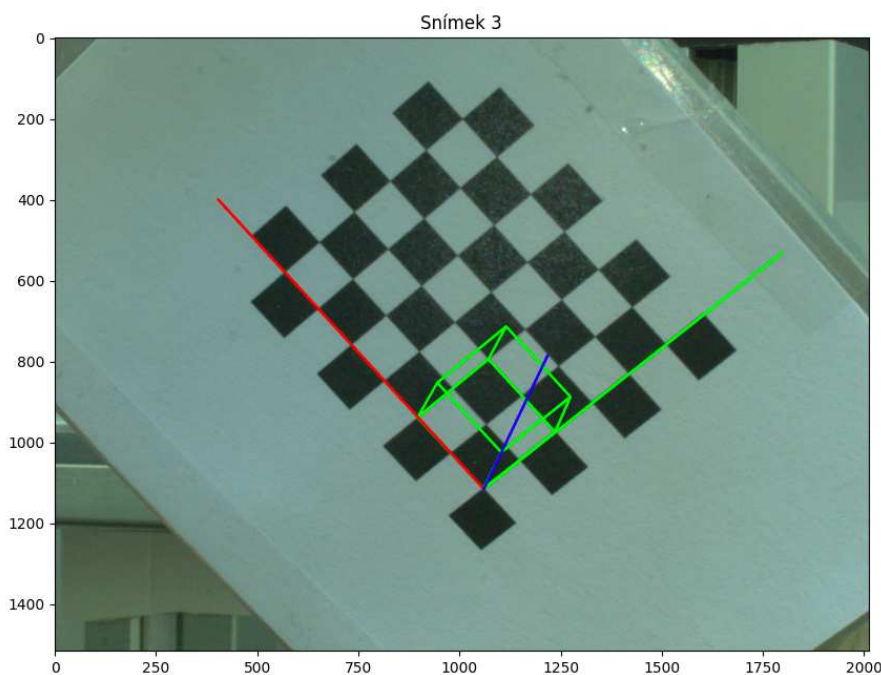
Obrázek 24 Schéma algoritmu

(zdroj: vlastní, Draw.io)

5.1 Kalibrace kamery

Prvním krokem v celém algoritmu je provedení kalibrace kamery. Cílem tohoto kroku je určit vnitřní parametry kamery, které jsou nezbytné pro správnou interpretaci obrazových dat. Kalibrace je realizována pomocí sady snímků šachovnicového vzoru pořízených v různých pozicích a pod různými úhly. Pro zajištění přesné kalibrace je důležité, aby byly snímky dostatečně rozdílné, což zajišťuje správné vybuzení kalibrační funkce. Pro kalibraci byl vytvořen Python skript *kalibrace_kamery.py*, jehož struktura je následující:

- Inicializace a nastavení: Načtou se snímky šachovnicového vzoru a definují se parametry šachovnice (např. počet vnitřních rohů a velikost pole).
- Detekce rohů šachovnice: Pro každý snímek jsou identifikovány rohy šachovnice a jejich pozice jsou zpřesněny pomocí funkce `cornerSubPix`.
- Kalibrace kamery: Pomocí nasbíraných 3D (objektových) a 2D (obrazových) bodů je provedena kalibrace kamery s využitím funkce `cv2.calibrateCamera`. Výsledkem jsou: Matice kamery (Camera Matrix), Koeficienty zkreslení (Distortion Coefficients), Rotační a translační vektory (Rotation and Translation Vectors) pro každý snímek



Obrázek 25 Ukázka kalibračního snímku se správně identifikovaným šachovnicovým vzorem

(zdroj: vlastní)

Následují kroky pro uložení výsledků a ověření kvality kalibrace:

- Ověření kalibrace: Pro každý snímek je vykreslena virtuální 3D kostka a souřadné osy kamery, čímž lze ověřit správnost kalibrace.
- Uložení výsledků: Kalibrační data jsou uložena ve formátu .npz (NumPy soubor), což umožňuje jejich snadné načítání a použití v dalších částech algoritmu.

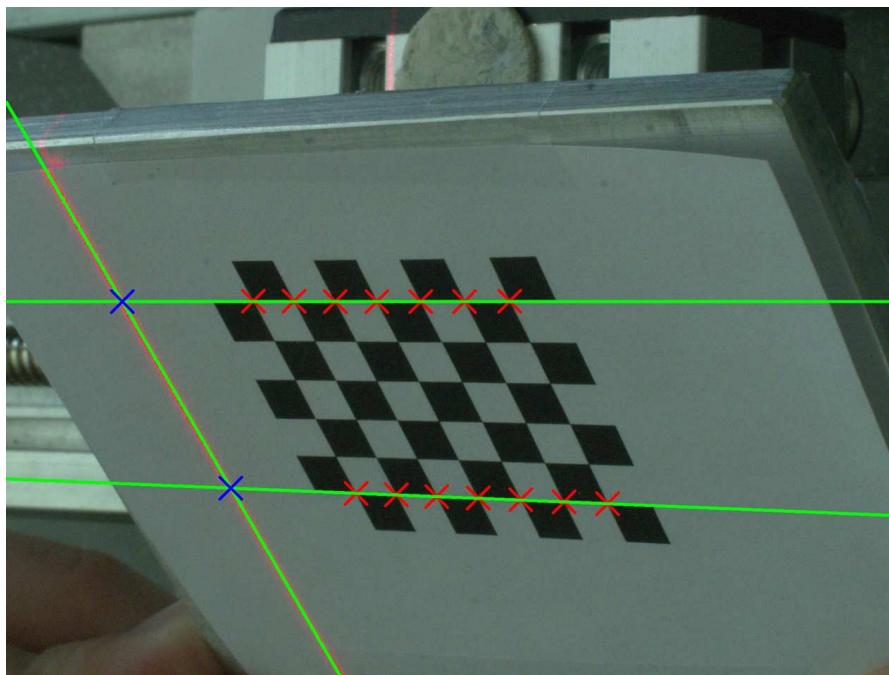
Formát souboru .npz byl zvolen z důvodu jeho efektivity při ukládání a správě datových struktur, jako jsou matice a vektory. Tento formát umožňuje kompaktní a strukturované uložení dat, která lze následně snadno importovat a dále zpracovávat v prostředí Pythonu pomocí knihovny NumPy. Výhodou je také podpora uložení více polí do jednoho souboru, což je ideální pro ukládání výsledků kalibrace kamery, jako je matice kamery, koeficienty zkreslení či rotační a translační vektory.

5.2 Rovina laseru

Dalším krokem v algoritmu je určení roviny laseru v souřadném systému kamery. Pro tento účel je využit Python skript *rovina_laseru.py*, který vypočítává rovinu laseru na základě dvou vstupních snímků obsahujících šachovnicový kalibrační vzor a laserovou čáru. Tyto snímky musí být pořízeny pod různými úhly, což umožňuje jednoznačné určení roviny.

Základem výpočtu je identifikace průsečíků mezi laserovou čarou a hranami šachovnice. Pomocí těchto průsečíků jsou definovány dva nezávislé vektory, které následně tvoří rovinu laseru. Tento princip je znázorněn na obrázku XY.

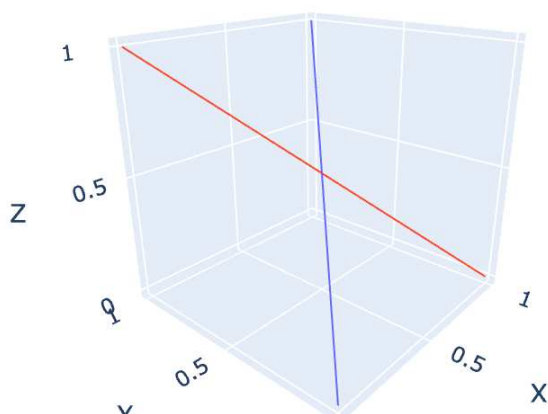
Celý proces probíhá automaticky a nevyžaduje žádný manuální zásah uživatele. Na následujícím snímku jsou zobrazeny 2 průsečíky (modře) přímek šachovnicového vzoru a linie laseru:



Obrázek 26 Vykreslení přímek pro identifikaci průsečíků

(zdroj: vlastní)

Ze dvou průsečíků v každém ze dvou snímků je pak vytvořen vektor. Rovina laseru je následně definována pomocí těchto dvou vektorů v souřadném prostoru kamery.



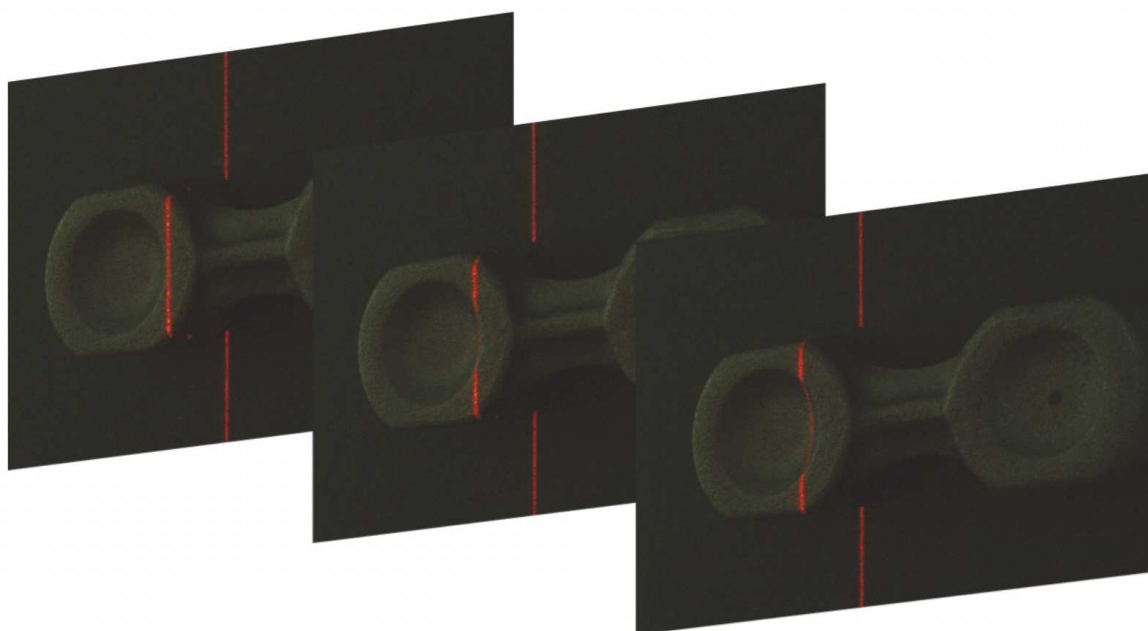
Obrázek 27 Zjednodušené schéma – rovina definována pomocí dvou vektorů

(zdroj: vlastní)

5.3 Pořízení snímku a posun pojezdu – server aplikace

Hlavním řídícím programem na Raspberry Pi je skript, který slouží k synchronizaci lineárního posuvu a pořízení snímků po jednotlivých definovaných krocích pomocí optické soustavy. Skript obsahuje i parametry samotného nastavení kamery jako je např. rozlišení snímku či délku expozice.

V kontextu přidružené aplikace pak tato funkcionality je zakomponována do programu, který běží jako klient a přebírá požadované hodnoty z rozhraní aplikace (velikost a směr posuvu, start měření). Výsledný program tedy zajišťuje řízení krokového motoru, pořizování snímků kamerou Basler a komunikaci s klientem (s nadřazenou aplikací na výpočetním PC).

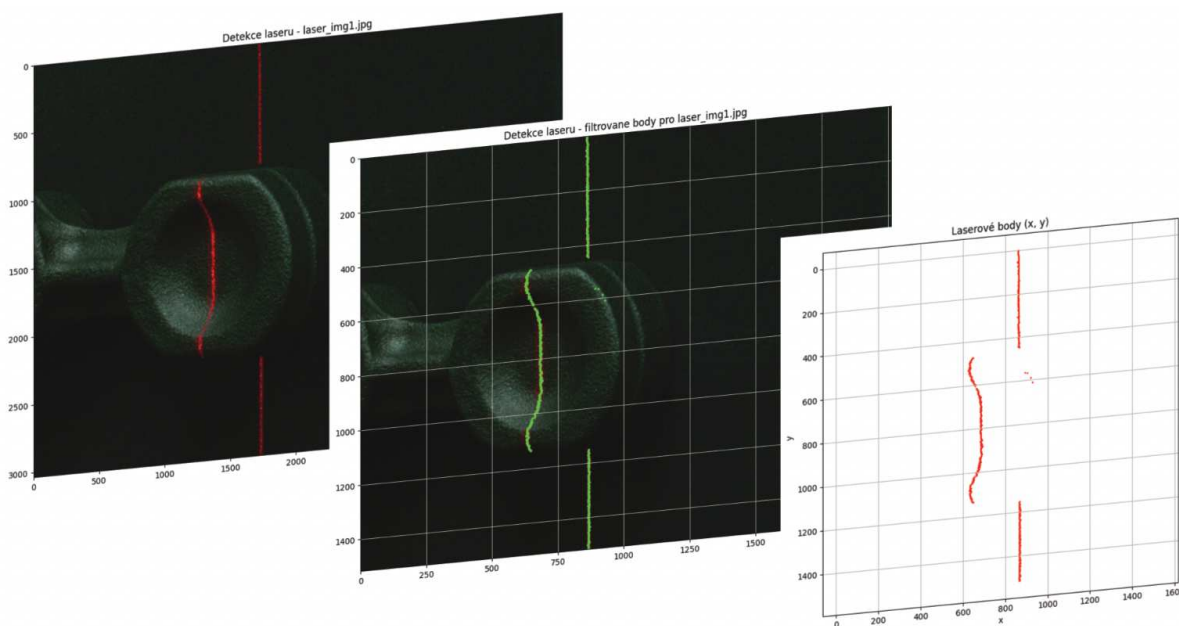


Obrázek 28 Posun objektu pod čárovým laserem – jednotlivé snímky

(zdroj: vlastní)

5.4 Extrakce bodů

Pro účely rekonstrukce 3D profilu bylo nezbytné přesně detekovat laserovou čáru promítnutou na povrch měřeného objektu a následně extrahovat z této čáry souřadnice jednotlivých bodů v obraze. Tento proces probíhal automatizovaně pomocí algoritmu implementovaného v Pythonu s hojným využitím knihovny OpenCV.



Obrázek 29 Extrakce linie laseru ze snímku

(zdroj: vlastní)

Volba metody detekce laserové čáry

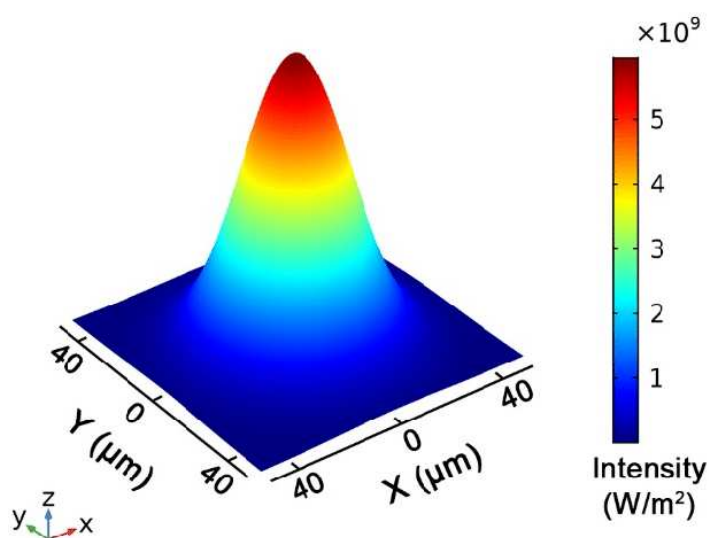
Pro identifikaci laserové linie byla zvolena metoda založená na analýze intenzity v červeném kanálu RGB obrazu, protože použitý laser emituje světlo o vlnové délce odpovídající červenému spektru (~ 650 nm). To znamená, že největší kontrast mezi laserem a pozadím je patrný právě v tomto barevném kanálu. Na rozdíl od složitějších metod, jako je detekce hran nebo segmentace podle barevného prostoru HSV, tato přímá metoda nabízí nízkou výpočetní náročnost a vysokou robustnost vůči změnám v pozadí, pokud má scéna vhodné osvětlení.

Průběh intenzity laserové čáry

Rozložení intenzity laserového paprsku v obraze má typicky Gaussovský profil – tedy nejvyšší intenzita je ve středu čáry a klesá směrem k okrajům. Tento jev vzniká vlivem

difrakce a vlastností optiky, která promítá laser na měřený objekt [40]. V každém řádku snímku se tedy laserová čára projevuje jako lokální maximum intenzity v červeném kanálu.

Z tohoto důvodu byla zvolena metoda detekce maximální hodnoty intenzity v každém řádku obrazu. Tato technika je velmi účinná pro případy, kdy laserová čára není přerušena a obraz není nadměrně zatížen šumem. Pro zajištění větší stability detekce byla před samotným hledáním maxima aplikována Gaussovská filtrace, která rozostří jemné šumové struktury a umožní přesnější lokalizaci středu paprsku.



Obrázek 30 Distribuce intenzity laserové linie

(zdroj: [40])

Omezení a filtrace odlehlých bodů

Jelikož reálné podmínky měření mohou způsobit výskyt artefaktů, odrazů nebo nežádoucích odlesků, byly získané body následně filtrovány na základě jejich horizontální polohy. Byla předpokládána geometrická spojitost laserové čáry – tzn. že její projekce by se měla nacházet přibližně ve stejné horizontální oblasti v každém snímku. Tento předpoklad umožnil odfiltrovat odlehlé body, které by mohly ovlivnit další zpracování.

5.5 Výpočet projekce a transformace bodů

Po extrakci bodů laseru ze snímků následuje proces výpočtu trojrozměrných souřadnic bodů laseru na základě předchozí kalibrace kamery a identifikace roviny laseru. Hlavním cílem tohoto kroku je transformovat dvourozměrné souřadnice bodů laseru z obrazu do trojrozměrného prostoru. Tento proces zahrnuje načtení kalibračních dat, výpočet roviny laseru pomocí průsečíků přímek šachovnice a laseru, a následnou transformaci bodů laseru z obrazového souřadného systému do souřadného systému kamery. Výsledkem je sada trojrozměrných bodů reprezentujících profil laserové čáry ve 3D prostoru.

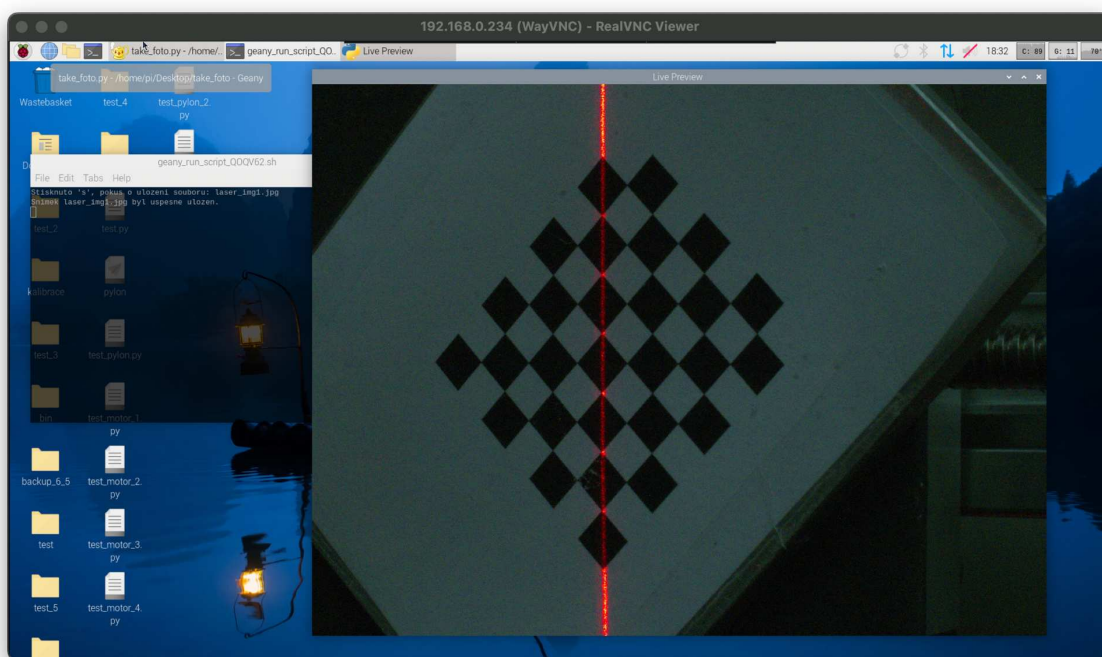
Obdobným způsobem byla provedena i transformace bodů ze souřadného systému kamery do souřadného systému pojezdu. Program, který provádí transformaci je součástí příloh a byl také zakomponován do aplikace (*transformace_pojezd.py*). Výstupem obou transformací je sada trojrozměrných souřadnic bodů v prostoru.

5.6 Generování a export bodového mračna

Posledním krokem je generování a exportu bodového mračna, které reprezentuje 3D profil snímaného objektu. Bodové mračno je vytvořeno na základě transformovaných souřadnic získaných v předchozích krocích. Skript načítá jednotlivé CSV soubory s transformovanými body, které jsou seřazeny podle pořadí, následně jsou body v každém souboru posunuty podél osy X, čímž je vytvořeno kompletní bodové mračno. Nakonec je toto mračno exportováno ve formátu PLY, který je široce používán pro práci s 3D daty.

5.7 Skript pro kalibraci

Dále byl vytvořen samostatný skript sloužící k interaktivnímu pořízení kalibračních snímků z kamery Basler za účelem pozdější kamerové nebo laserové kalibrace. Uživatel má možnost živě sledovat obraz z kamery a manuálně ukládat snímky stiskem klávesy. Skript je navržen pro jednoduché a rychlé zachycení série snímků kalibračního vzoru (např. šachovnice) pod různými úhly a polohami. Uživatel může pomocí klávesy 's' ukládat jednotlivé snímky (např. šachovnice) do souborů a klávesou 'q' ukončit program. Kamera pracuje v manuálním režimu expozice, se stabilním nastavením rozlišení a zisku. Skript umožňuje snadné a přesné zachycení dat potřebných pro následnou kalibraci kamerového systému nebo roviny laseru.



Obrázek 31 Skript běžící na mikropočítači pro pořízení kalibračních snímků

(zdroj: vlastní)

5.8 Výpočet vzdálenosti kroku posunu

Hlavním cílem skriptu *vypocet_vzdalenost_kroku_posuvu.py* je vypočítat reálnou vzdálenost posunu v ose X mezi jednotlivými snímky, které byly pořízeny během lineárního pohybu profilometru, a ověřit tak teoretický výpočet kroku posuvu (např. podle specifikace krokového motoru). Byla k tomuto účelu pořízena sada snímků, vždy posunutá o jeden krok.

Na základě této analýzy bylo možné zpřesnit hodnotu reálného posunu mezi jednotlivými snímky, který činí 0,245 mm. Tento výsledek slouží jako experimentální ověření teoreticky vypočtené hodnoty 0,25 mm, která byla určena na základě parametrů krokového motoru a převodového mechanismu. Díky tomu bylo možné spolehlivě definovat posun pojezdu potřebný pro následnou konstrukci bodového mračka. Přesnější z posuvů byl vybrán jako konstanta pro program, který zodpovídá za tvorbu bodových mraček

6 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Tato kapitola se zaměřuje na praktické ověření funkčnosti navrženého optického systému pro detekci a měření tvarových vlastností objektů. Cílem experimentální části bylo provést měření vybraných testovacích objektů, získat relevantní data a následně je vyhodnotit z hlediska přesnosti, spolehlivosti a opakovatelnosti.

Součástí měření bylo také posouzení vlivu různých faktorů, jako je materiál objektu, jeho povrchová úprava, geometrická složitost nebo osvětlení, na kvalitu získaných dat. Výsledky měření byly dále porovnány s referenčními hodnotami, a následně i s výstupy z komerčních měřicích systémů.

6.1 Měřené objekty

Při výběru měřených objektů byl kladen důraz na materiálovou a tvarovou rozmanitost, aby bylo možné ověřit funkčnost a robustnost navrženého optického systému při detekci různých typů povrchů a geometrických složitostí. Mezi měřenými objekty byla kovová součást, plastové výlisky a gumové gufero.

6.2 Získaná data

Během experimentální části byla provedena série měření na vybraných objektech za účelem ověření přesnosti a funkčnosti optického profilometru. Každý objekt byl snímán po jednotlivých profilech pohybem lineárního pojezdu a z nasnímaných obrazových dat byly extrahovány 3D souřadnice bodů.

Pro každý měřený vzorek byla získána množina bodů reprezentujících průřez objektu v dané pozici pojezdu. Tyto datové body byly následně zpracovány do podoby bodových mračen, ze kterých bylo možné rekonstruovat 3D geometrii objektu.

Výstupní bodová mračna byla uložena ve formátu PLY (Polygon File Format / Stanford Triangle Format), který je běžně využíván pro uchovávání 3D dat. Tento formát podporuje jak binární, tak textovou reprezentaci a umožňuje ukládání nejen souřadnic bodů (x , y , z), ale i dalších atributů, jako jsou barva, intenzita, normály nebo informace o topologii (např. trojúhelníkové sítě). Ve zpracované verzi byly ukládány pouze 3D souřadnice bodů, bez barevných nebo topologických informací. Díky široké podpoře ze strany vizualizačních a analytických nástrojů (např. MeshLab, CloudCompare, nebo knihoven jako Open3D) je formát PLY vhodný pro další zpracování a archivaci naměřených dat.

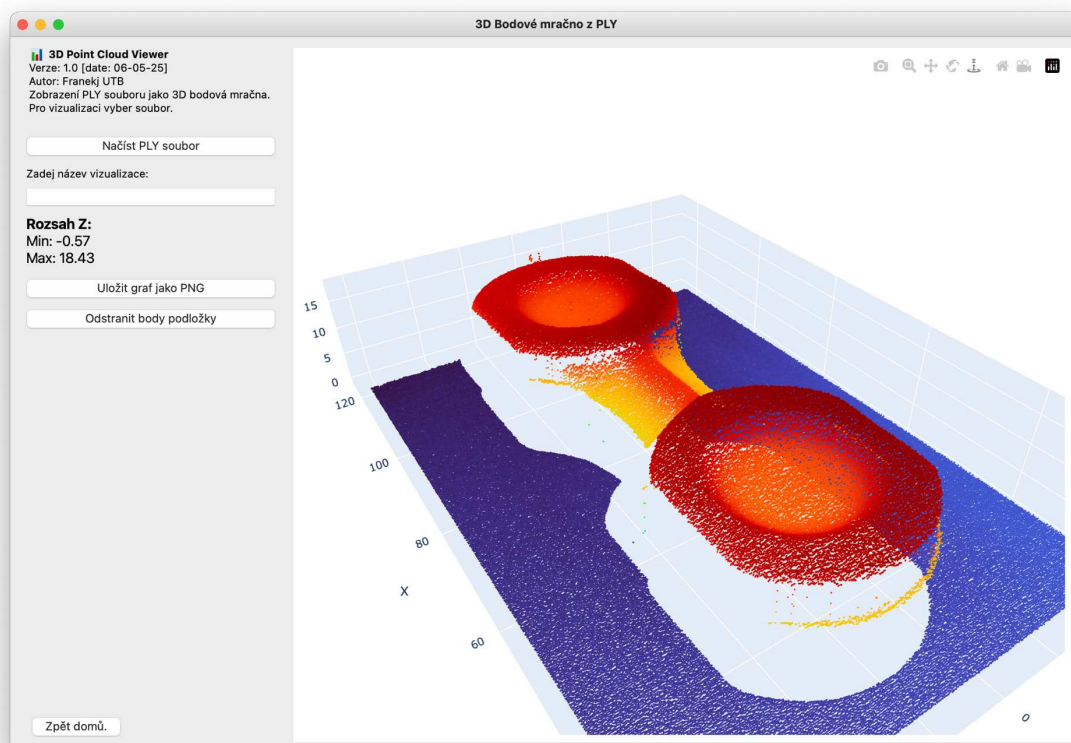
6.3 Vizualizace výsledků

Pro vybraná měření byla vytvořena přehledná vizualizace výsledků, která je uspořádána formou dvojice obrázků. V horní části je vždy uvedena fotografie měřeného objektu, sloužící jako vizuální reference. Pod ní následuje bodové mračno získané z 3D rekonstrukce v prostředí vyvinuté aplikace.



Obrázek 32 Objekt č.1 Kovová součást

(zdroj: vlastní foto)



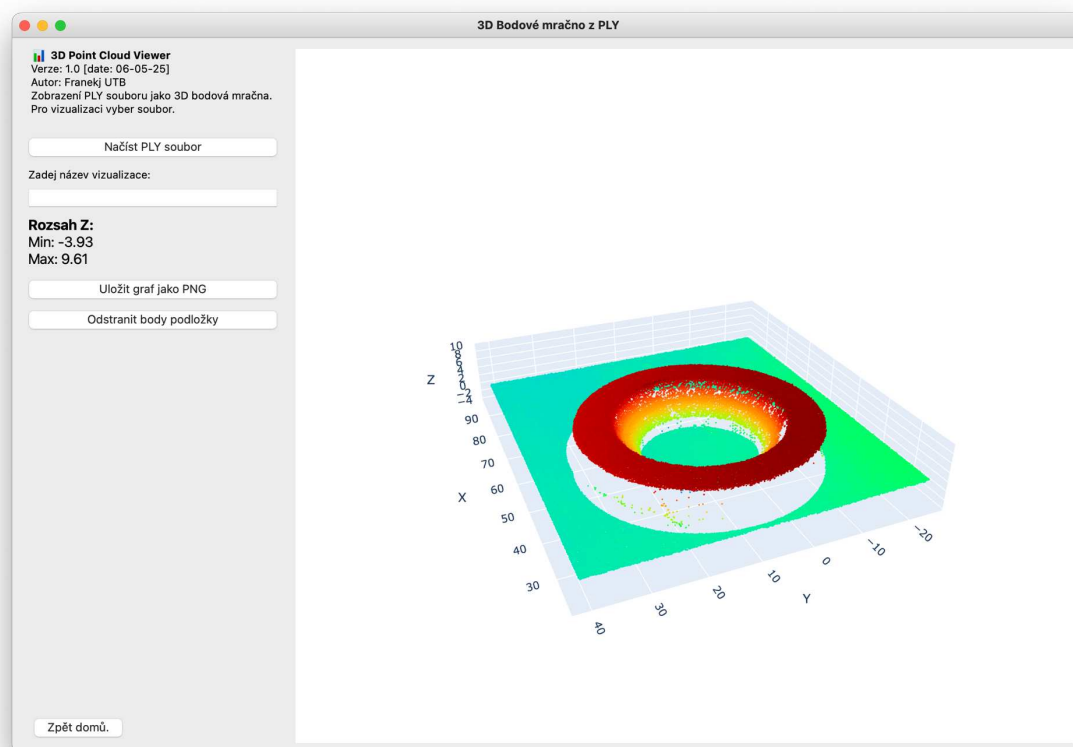
Obrázek 33 Objekt č.1 Kovová součást – bodové mračno

(zdroj: vlastní, aplikace profilometru)



Obrázek 34 Objekt č.2 Gumové Gufero

(zdroj: vlastní foto)

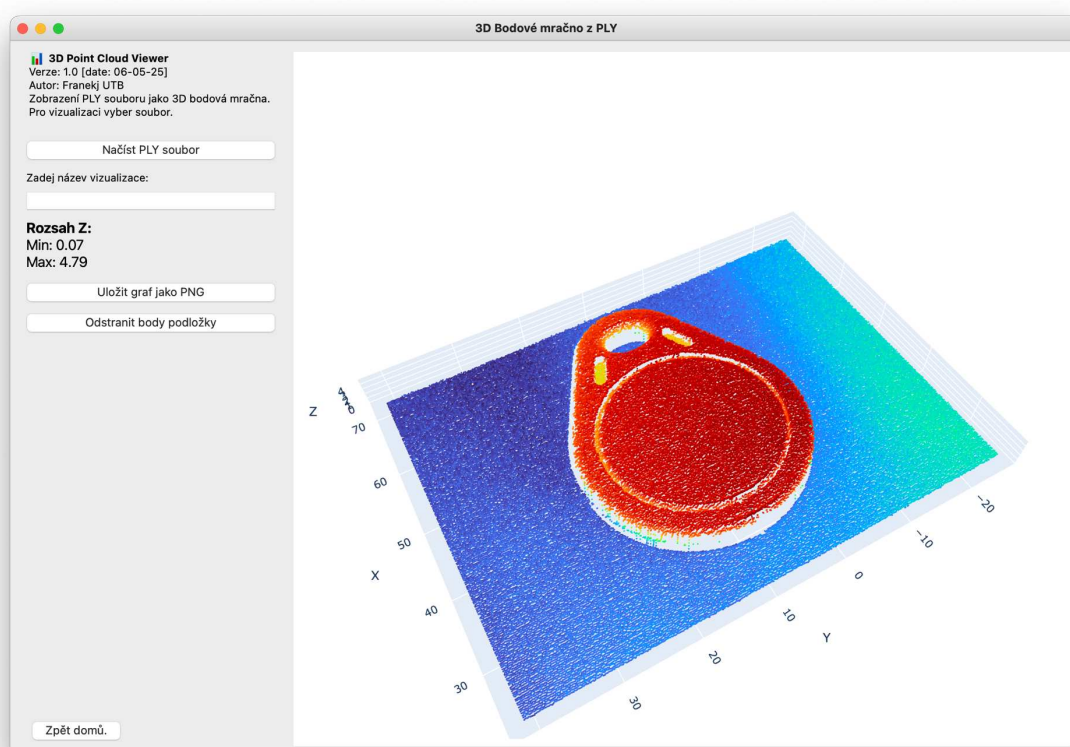


Obrázek 35 Objekt č.2 Gumové Gufero – bodové mračno

(zdroj: vlastní, aplikace profilometru)



Obrázek 36 Objekt č.3 Plastový čip

(zdroj: vlastní foto)

Obrázek 37 Objekt č.3 Plastový čip – bodové mračno

(zdroj: vlastní, aplikace profilometru)

6.4 Vyhodnocení dat

Po získání bodového mračna reprezentujícího 3D strukturu měřeného objektu bylo přistoupeno k následnému zpracování a vyhodnocení těchto dat. Prvním krokem byla vizuální inspekce vygenerovaného modelu, která umožnila ověřit správnost rekonstrukce povrchu a přítomnost případných chyb způsobených šumem, odlesky nebo nepřesnou detekcí laserové linie. Data byla dále analyzována z hlediska přesnosti a úplnosti rekonstrukce. Byly aplikovány základní filtrační metody pro odstranění odlehlých bodů (tzv. outliers), které by mohly negativně ovlivnit výslednou interpretaci tvaru. Pomocí dostupných nástrojů byly také provedeny metrologické analýzy, zahrnující kontrolu rozměrů kritických částí objektu (délka, šířka, výška) a detekci rozměrových odchylek.

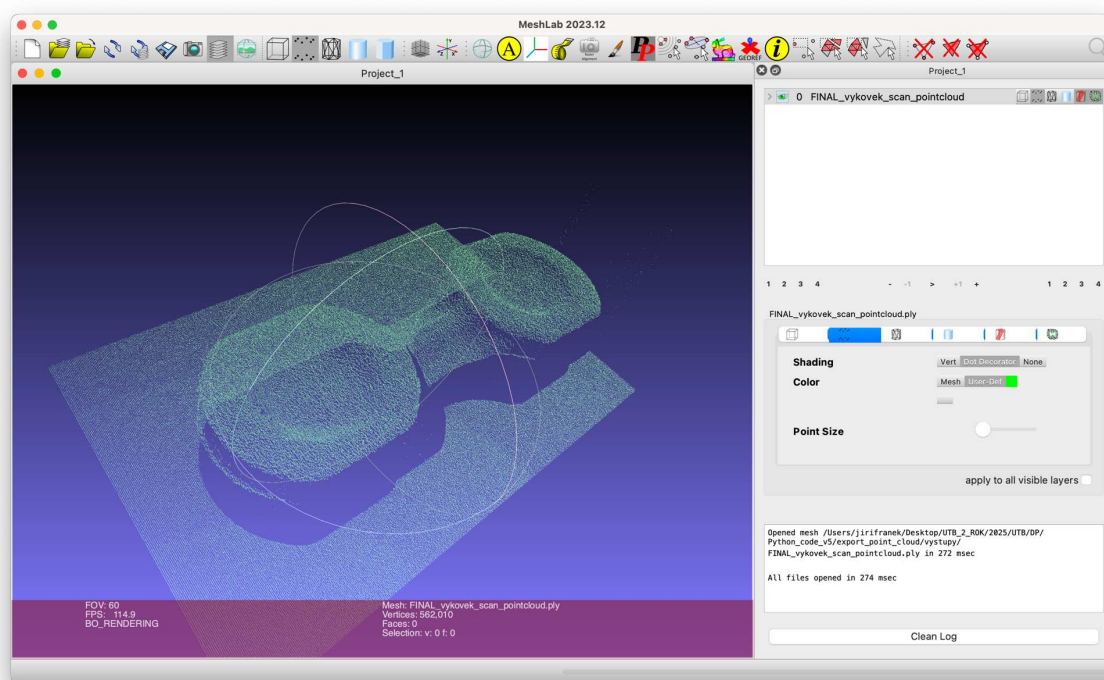
Na základě těchto výsledků bylo možné určit, zda se objekt nachází v předepsaných tolerancích, nebo zda vykazuje výrobní vadu. Získaná data byla následně porovnána s výsledky z komerčního měřicího systému (viz kapitola 6.4), což umožnilo ověřit kvalitu a spolehlivost navrženého řešení.

6.4.1 Import do softwaru

Vygenerované bodové mračno bylo exportováno ve formátu .ply, který představuje běžný standard pro následné zpracování v CAD systémech a nástrojích pro 3D analýzu. Tento formát byl zvolen pro svou širokou softwarovou podporu a jednoduchou datovou strukturu, která usnadňuje další zpracování. Import dat do softwarového prostředí probíhal ve dvou hlavních fázích:

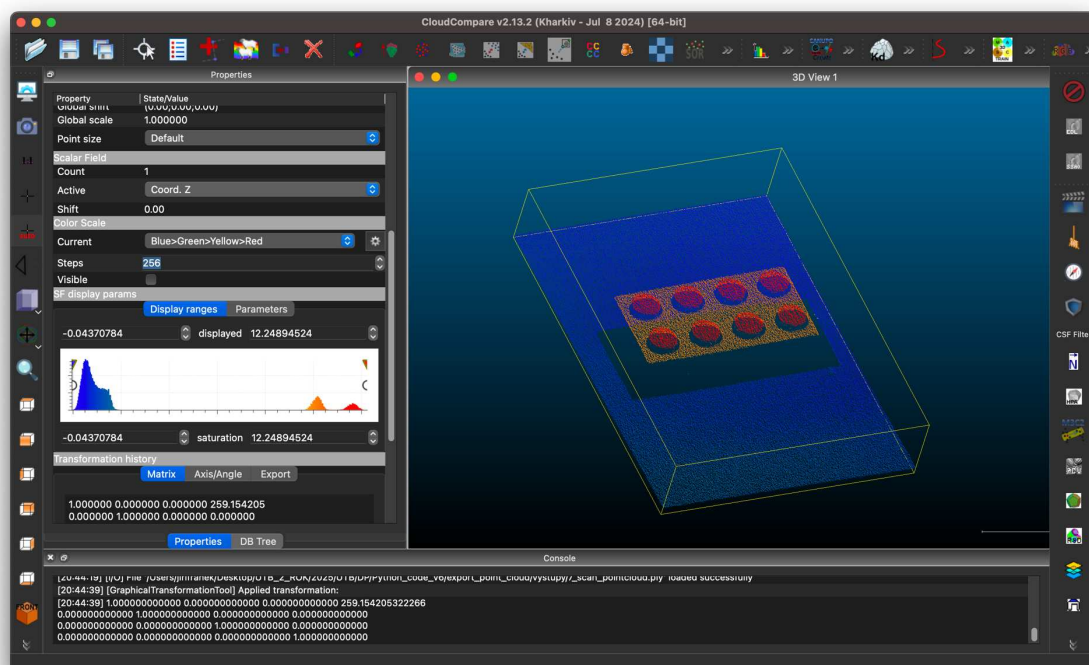
Načtení do vlastní aplikace – pomocí implementované grafické nadstavby bylo možné načíst bodové mračno do prostředí vyvinutého softwaru. Aplikace poskytuje základní nástroje pro vizualizaci (otočení, posun, zoom).

Import do specializovaného softwaru (CloudCompare [41], MeshLab [42]) – pro detailní analýzu byla data následně importována do nástrojů třetích stran, které umožňují pokročilé operace, jako je například porovnání mračen generování povrchové sítě nebo export do CAD kompatibilních formátů. Úspěšný import potvrdil kompatibilitu formátu i správnost postupu.



Obrázek 38 Výsledky importované do Meshlab – objekt č.1

(zdroj: vlastní)



Obrázek 39 Výsledky importované do Cloudcompare– objekt č.4 LEGO kostka

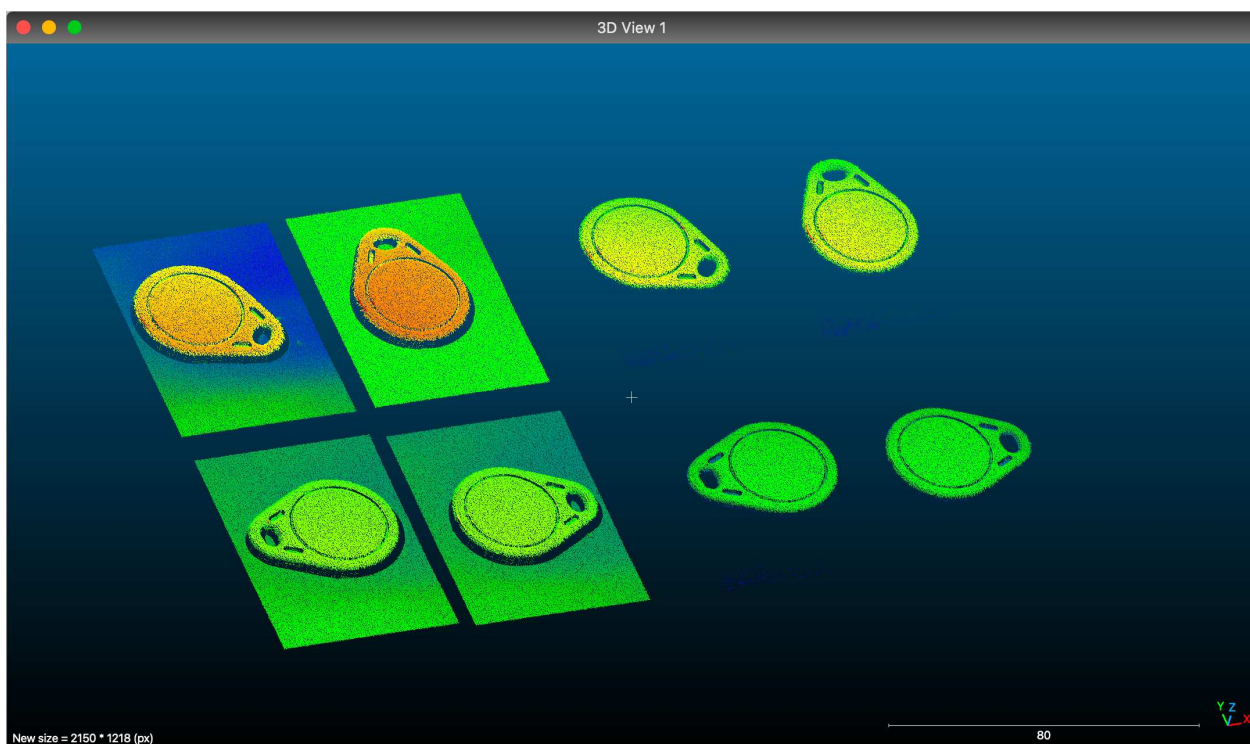
(zdroj: vlastní)

6.4.2 Opakovatelnost a přesnost měření

Pro všechny měřené součásti byla provedena kontrola rozměrů vůči reálným objektům. Výsledky ukazují, že rozdíly mezi získanými daty a referenčními hodnotami se pohybují v řádech desetin milimetru, což lze považovat za velmi dobrý výsledek s ohledem na zvolený princip měření a cenovou dostupnost systému.

Pro ověření opakovatelnosti byla zvolena jedna kontrolní součást – plastový čip – na kterém bylo provedeno několik opakovaných měření při různém natočení objektu. Výsledky byly následně porovnány vizuální inspekci bodových mračen. Na snímku níže je patrná sada opakovaných měření, přičemž lze pozorovat, že i přes změny v orientaci objektu zůstávají geometrické charakteristiky zachovány a jednotlivé výsledky jsou prakticky shodné. To potvrzuje dobrou opakovatelnost měření pomocí navrženého systému.

Přesnost měření byla dále ověřena přímým porovnáním s manuálně změřenými rozměry, v případě LEGO kostky také s oficiální výkresovou dokumentací. Pro kovovou součást byl úspěšně detekována rozměrová vada z výroby. Zjištěné hodnoty odpovídají očekávaným rozměrům s minimální odchylkou, což potvrzuje schopnost systému poskytovat dostatečně přesná data pro základní metrologické účely.



Obrázek 40 Opakovatelnost měření –objekt č. 3 (Plastový čip)

(zdroj: vlastní, Cloudcompare)

6.5 Externí spolupráce

V rámci této diplomové práce byla navázána spolupráce s odborným pracovištěm CEBIATECH, které disponuje pokročilým technickým zázemím v oblasti 3D digitalizace. Díky této spolupráci bylo možné realizovat vysoce přesné 3D skenování vybraných vzorků pomocí profesionálního zařízení, které by jinak nebylo běžně dostupné.

Tato externí podpora významně přispěla k získání kvalitních dat o geometrii testovaných dílů, což umožnilo jejich vyhodnocení v rámci návrhu a ověření optického měřicího systému. V následující části jsou shrnuty podmínky měření, použité vybavení a charakteristiky výstupních dat.

6.5.1 Základní informace

Pro účely této práce byly nasnímány tři referenční objekty – LEGO kostka, kovový odlitek a plastový čip. Měření bylo provedeno na oddělení CEBIATECH (Centrum bezpečnostních, informačních a pokročilých technologií) ve Zlíně, které disponuje profesionálním 3D skenerem ATOS TripleScan II 5M od německé společnosti GOM, jež je nyní součástí koncernu ZEISS.



Obrázek 41 3D skener ATOS TripleScan II 5M

(zdroj: [43])

6.5.2 Specifikace komerčního systému a postup měření

Skener ATOS TripleScan II 5M je optický 3D skener s rozlišením 5 megapixelů, využívající modré strukturované světlo a triangulační princip pro přesné snímání tvarově složitých objektů. V tomto případě byl použit měřicí objem MV170, který umožňuje minimální rozteč mezi jednotlivými skenovacími body až 71 mikrometrů.

Každý ze snímaných objektů byl opatřen alespoň deseti kruhovými referenčními body o průměru 0,8 mm, které slouží k přesnému spojování jednotlivých snímků a korekci prostorové orientace. Tato místa jsou v mračnu bodů patrná jako oblasti bez textury, často „zaplátované“ při následném zpracování.

Pro skenování byl použit automatizovaný rotační stolek, který umožňuje plynulé nasnímání objektu v rozsahu 360° bez nutnosti ruční manipulace s dílem. Po každém kroku se stolek automaticky pootočil o předem definovaný úhel, čímž bylo možné postupně nasnímat celý objekt. Obvykle se takto nasnímalá jedna polovina dílu, který byl následně otočen a znovu osazen na stolek pro sejmutí druhé poloviny. Referenční body umožnily bezproblémové sloučení obou polovin bez nutnosti ručního zásahu při zarovnávání.

Skenování a zpracování jednoho dílu trvalo přibližně 8–10 minut, a to díky zkušené obsluze zařízení. U méně zkušených operátorů se může tento čas pohybovat okolo 25 minut na díl.

Vzhledem k optické metodě snímání, která může být ovlivněna lesklými nebo průhlednými povrchy, byly dva z dílů (LEGO kostka a odlitek) opatřeny tenkou vrstvou antireflexního nástřiku ve formě křídového prášku ve spreji. Tento nástřik výrazně zlepšuje kvalitu a spolehlivost zachycení povrchu objektu.

Výstupy měření

Výstupem měření jsou mračna bodů ve formátu STL, která lze dále konvertovat do jiných formátů podle potřeby (např. OBJ, PLY nebo do formátů CAD systémů). Mračna pro jednotlivé objekty budou k dispozici pro další zpracování a analýzu.

Cena a technické zázemí

Cena použitého zařízení v době pořízení činila 2,85 milionu Kč bez DPH. Jedná se o špičkové zařízení pro přesné 3D skenování, vhodné i pro metrologické aplikace s vysokými nároky na přesnost a opakovatelnost.

Měření probíhalo v kontrolovaném laboratorním prostředí, které zajišťuje stabilní světelné a teplotní podmínky, minimalizující vliv vnějších faktorů na kvalitu skenování. Takové prostředí je klíčové pro dosažení vysoké přesnosti výsledného mračna bodů a spolehlivé reprodukovatelnosti měření.

6.6 Porovnání výsledků s komerčním systémem

Pro ověření funkčnosti a přesnosti navrženého systému byl proveden srovnávací test s komerčním 3D skenerem ATOS Triple Scan II. Porovnání bylo zaměřeno především na geometrii bodových mračen, hustotu bodové sítě a celkovou přesnost měření v ose Z, tedy ve směru hloubky nebo výšky objektu.

Přesnost rozměrů

Při kontrole rozměrů v jednotlivých osách a následném srovnání s ručním měřením bylo zjištěno, že hlavní rozměry obou mračen odpovídají reálným fyzickým rozměrům měřených objektů. Odchyłky se pohybují maximálně v řádu desetin milimetru, což potvrzuje, že i navržený systém dosahuje dostatečné přesnosti pro základní kontrolu tvaru.

Hustota bodové sítě

Zásadní rozdíl byl pozorován v hustotě bodového mračna, tedy v tom, jak podrobně je povrch objektu nasnímán. Pro ukázkové porovnání byl vybrán kovový odlitek. Pro porovnání bylo komerční mračno oříznuto pouze na horní část objektu.

Navržený profilometr:

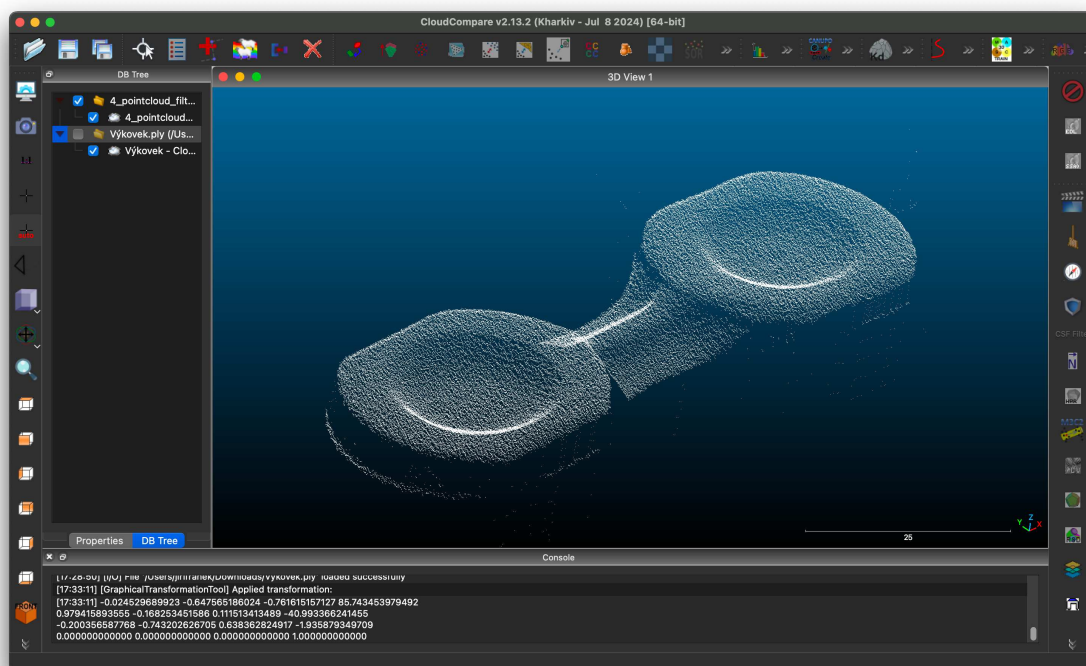
- ~187 000 bodů
- Mračno je tvořeno viditelnými jednotlivými řezy odpovídajícími jednotlivým snímkům.
- Pravidelná struktura řezů je patrná, avšak dostačující pro rekonstrukci tvaru a základní analýzu.

Komerční systém ATOS:

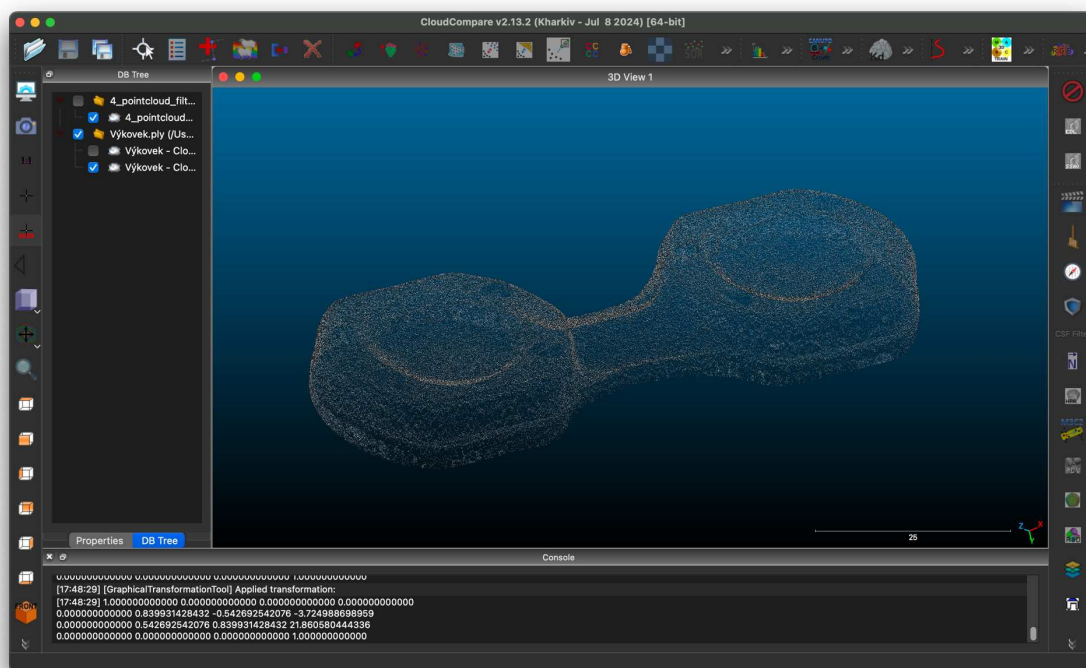
- ~270 000 bodů
- Výrazně hustší a rovnoměrněji pokrývající celý povrch objektu.
- Síť bodů je spojitá a vhodná i pro detailní metrologické vyhodnocení.

Rozlišení sítě bodového mračna vlastního měření je definováno krokem posuvu a rozlišením pořízených snímků. Maximální vertikální rozlišení je tedy dle snímku 1518 bodů (pokud by byly detekovány všechny pixely v ose Y jako body laseru).

6.6.1 Vizuální porovnání bodových mračen



Obrázek 42 Bodové mračo (objekt č. 1) – měřeno pomocí zkonstruovaného profilometru
(zdroj: vlastní, Cloudcompare)



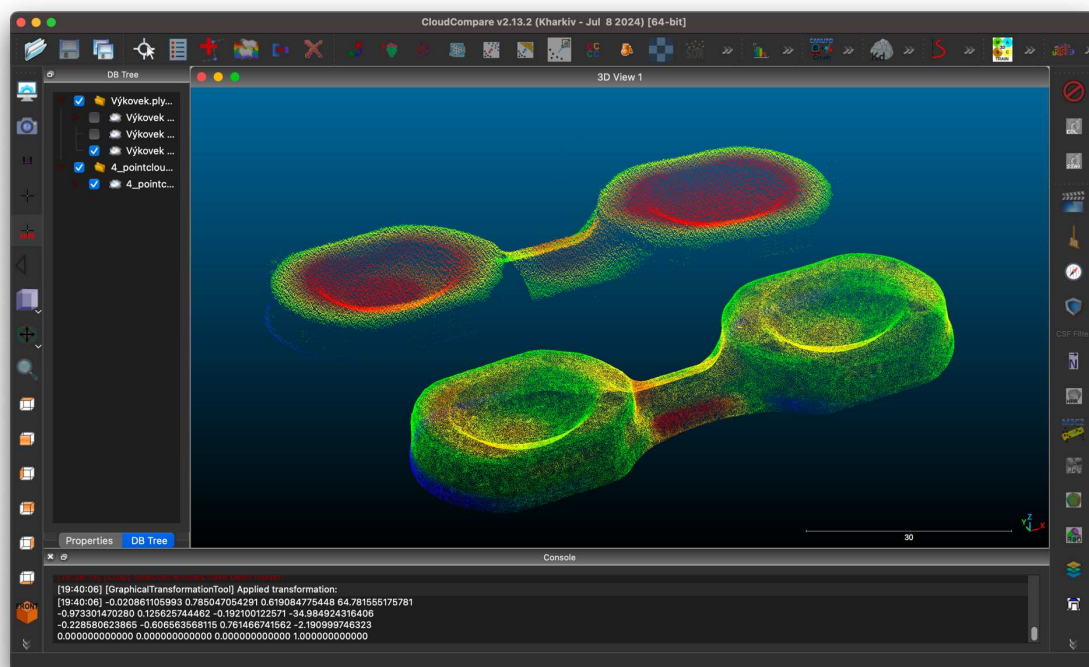
Obrázek 43 Bodové mračo (objekt č. 1) – měřeno profesionálním 3D scannerem
(zdroj: vlastní, Cloudcompare)

6.6.2 Zhodnocení porovnání bodových mračen

Porovnání bodových mračen ukázalo, že navržený systém je schopen spolehlivě snímat povrch objektů a vytvářet jejich prostorové reprezentace s dostatečnou přesností pro základní metrologické účely. Měření lze označit za úspěšné – profilometr správně vystihuje hlavní tvary a rozměrové proporce objektů, a to i při nižší hustotě bodů oproti komerčnímu řešení.

Zásadním rozdílem oproti profesionálnímu systému je však geometrické omezení způsobené jednostranným úhlem snímání. Zatímco komerční 3D skener ATOS Triple Scan umožňuje snímání objektu ze všech směrů (díky automatickému otočnému stolku a více úhlům pohledu), vlastní řešení pořizuje data pouze z jednoho směru. To znamená, že některé detaily a zakryté části objektu nemusí být vůbec zachyceny, což omezuje jeho využití u složitějších tvarů.

Přesto však výsledky naznačují, že při doplňující filtraci a pokročilejším zpracování mračna (např. odstranění šumu, interpolace, zarovnání více pohledů) je možné systém dále zpřesnit a rozšířit jeho využití i na náročnější metrologické aplikace. Přesnost měření dosahuje řádově desetin milimetru, což je pro řadu technických úloh zcela dostačující.



Obrázek 44 Porovnání hustoty bodů bodového mračna – KN počet sousedů

(zdroj: vlastní, Cloudcompare)

Závěrem lze konstatovat, že i přes výše uvedená omezení má navržený profilometr velmi dobrý potenciál jako nástroj pro rozměrové vyhodnocení technických dílů, zejména v případech, kde je důležitá dostupnost, jednoduchost a nízká cena řešení. Významnou výhodou oproti komerčním systémům je také výrazně kratší doba potřebná k provedení jednoho měření – celý proces včetně pořízení dat, návratu do výchozí pozice a stažení snímků probíhá automaticky a trvá přibližně 5 minut (pro měřené objekty). Díky tomu je profilometr vhodný i pro operativní kontrolu menších sérií či kusových výrobků, kde je důležitá rychlost a efektivita bez nutnosti složité obsluhy.

6.6.3 Ekonomické zhodnocení

Cílem návrhu optického profilometru bylo vytvořit funkční a flexibilní systém s využitím běžně dostupných komponent, které je možné snadno pořídit na trhu bez nutnosti specializovaného vybavení. Díky tomu je možné systém nejen jednoduše replikovat, ale také případně upravit dle konkrétních požadavků uživatele.

Díky automatizovanému měřicímu postupu a minimalizaci nároků na obsluhu je zařízení ideální volbou např. pro operativní kontrolu dílů v malých sériích, kontrolu funkčních prototypů či výukové účely, kde komerční řešení nejsou ekonomicky opodstatněná.

Tabulka 5 Orientační vyhodnocení nákladů použitých komponent

Raspberry Pi 4 Model B	2000 czk
Kamera Basler	510 € = 12 600 czk
Objektiv Basler	200 € = 5 000 czk
Krokový motor + posuv	2 700 czk
Řadič mototru	250 czk
Laser	1 800 czk
Controller Mini	500 czk
Rám a spojovací materiál	1 000 czk
Kabely, adaptéry a ostatní	1 200 czk
Suma Celkové náklady	27 050 czk

(zdroj: z webu distributora, dle aktuálních cen a kurzů měn)

Pro srovnání, komerční 3D skenery, jako je například ATOS TripleScan II 5M nebo obdobné systémy určené pro přesné rozměrové měření, mají pořizovací náklady často v řádech milionů korun českých. Tato zařízení sice nabízejí vyšší přesnost a automatizaci, nicméně pro mnoho specifických aplikací – zejména v oblasti vývoje, malosériové výroby nebo laboratorního testování – může být navržený profilometr plně dostačující a výrazně ekonomičtější alternativou.

7 NÁVRH ŘÍDÍCÍ APLIKACE

Následující kapitola se věnuje popisu fungování řídicí aplikace, která byla vyvinuta pro řízení sestavy optického profilometru. Je navržena pro počítač, který slouží jako zařízení pro vyhodnocení snímků. Popisuje jednotlivé možnosti a funkce aplikace a její komunikaci s Raspberry Pi. Kapitola je doplněna o ukázky grafického prostředí aplikace pro jednotlivé možnosti a podrobně popisuje jejich fungování.

7.1 Požadavky na aplikaci

Primární cílem aplikace byla možnost poskytnout koncovému uživateli práci se soustavou skrze přívětivé a funkční grafické rozhraní. Uživatel je schopen v rámci aplikace ovládat vzdáleně celý proces měření a následného vyhodnocení získaných výsledků. To představuje mimo jiné i ovládání pojezdu a kamery při skenování objektu, kalibraci kamery, extrakci laserové linie ze snímků, celý algoritmus včetně všech transformací až po export výsledného bodového mračka. Do aplikace byl u zahrnut samostatný interaktivní prohlížeč těchto výsledných bodových mraček, který umožní uživateli provést prvotní inspekci a vyhodnocení měření.

7.2 Realizace a ukázky prostředí

Aplikace pro řízení optického profilometru byla vyvinuta v programovacím jazyce Python, což zajistilo rychlý vývoj, snadnou rozšiřitelnost a možnost využití široké škály knihoven. Jako základ aplikace byla použita knihovna PyQt5 [44], která umožňuje tvorbu přehledného a uživatelsky přívětivého grafického rozhraní.

Dříve navržené a implementované algoritmy, původně realizované ve formě samostatných skriptů, byly upraveny a integrovány přímo do rozhraní aplikace. Aplikace tyto algoritmy volá externě a výsledky jejich zpracování automaticky ukládá do předem definované struktury adresářů, která je detailně popsána v následující podkapitole.

Díky této integraci všech kroků měřicího procesu do grafického rozhraní není od uživatele vyžadována žádná znalost programování. Celý proces měření je intuitivní a plně ovladatelný prostřednictvím grafického rozhraní aplikace.

Pro komunikaci, která byla realizována s pomocí Python balíčků jako Socket a Piramiko, byl zvolen následující model:

Klient (PC): Aplikace na PC funguje jako klient, který odesílá příkazy (např. vzdálenost posunu, směr posunu) a přijímá odpovědi (stahování snímků, potvrzení o postupu).

Server (Raspberry Pi): Mikropočítač funguje jako server, který přijímá příkazy, provádí zadané operace (pohyb pohonu, pořízení snímků) a odpovídá výsledkem (potvrzení, stav, obrázky).

7.2.1 Struktura adresářů

Protože aplikace velmi často pracuje s adresáři při ukládání a načítání různých typů souborů je dobré uvést strukturu pracovních složek včetně stručného popisu jejich významu.

— app	
— app_graphics	- Složka obsahující grafiku používanou v aplikaci.
— app_main.py	- Hlavní program aplikace.
— export_point_cloud	
— export_pointcloud.py	- Skript pro vytvoření a uložení bodového mračna.
— vystupy	- Složka obsahující soubory bodových mračen.
— extrakce_scan_points	
— extrakce_bodu_objektu.py	- Skript pro extrakci bodů laseru na snímku.
— images	- Složka se vstupními snímky pro zpracování.
— vystupy	- Extrahované body ve formátu CSV.
— vystupy_2	- Filtrované a doplněné body ve formátu CSV.
— kalibrace_kamery	
— images	- Složka se snímky šachovnice pro kalibraci kamery.
— kalibrace_system.py	- Skript pro kalibraci kamery a výpočet parametrů.
— vystupy	- Složka s uloženými parametry kalibrace.
— projekce_pojezd	
— images	- Snímky šachovnice na pojezdu.
— transformace_pojezd.py	- Skript pro transformaci bodů ze SS kamery do SS pojezdu.
— vystupy	- Uložené body po transformaci ve formátu CSV.
— rovina_laseru	
— images	- Snímky laseru pro výpočet roviny laseru.
— rovina_laseru.py	- Skript pro výpočet roviny laseru.
— vystupy	- Parametry roviny laseru a vizualizace průsečíků.
— vypocet_projekce	
— vypocet_projekce.py	- Skript pro výpočet transformace bodů do SS kamery.
— vystupy	- Uložené body po transformaci ve formátu CSV.

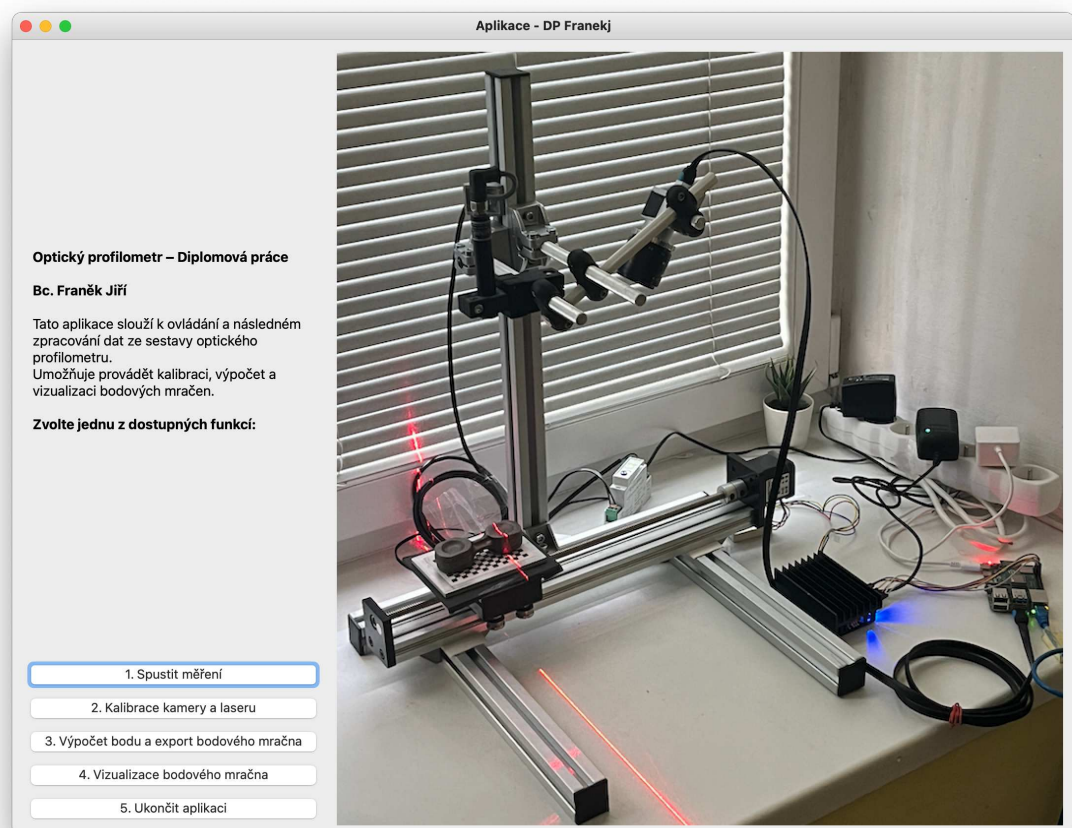
Tato struktura zajišťuje přehlednost a usnadňuje orientaci v aplikaci. Každá složka je věnována konkrétní části procesu měření a zpracování dat, což umožňuje snadné rozšíření či úpravu aplikace. Celý pracovní adresář aplikace je součástí příloh.

7.2.2 Úvodní okno

Při spuštění aplikace se uživateli zobrazí Úvodní okno, které slouží jako hlavní navigační rozhraní aplikace. Toto okno poskytuje základní přehled o aplikaci a obsahuje fotografii sestavy profilometru, která uživateli pomáhá lépe pochopit měřicí systém. Na levé straně se nachází „burger“ menu, které nabízí přístup k následujícím možnostem:

1. Spustit měření
2. Kalibrace kamery a laseru
3. Výpočet a export bodového mračka
4. Vizualizace bodového mračka
5. Ukončit aplikaci

Tato struktura úvodního okna zajišťuje intuitivní a snadné ovládání aplikace i pro uživatele bez předchozích zkušeností s programováním.



Obrázek 45 Základní menu při spuštění aplikace

(zdroj: vlastní, aplikace profilometru)

7.2.3 Vlastní měření

Při výběru první možnosti z nabídky v hlavním menu se otevře nové samostatné okno pro spuštění vlastního měření. Okno obsahuje dvě pole, které přebírá vstup uživatele – konkrétně vzdálenost posuvu měření (dle velikosti objektu) a směr posuvu (CW – clockwise – doprava nebo CCW - counter clockwise - doleva). Po zadání požadovaného vstupu lze tyto data odeslat kliknutím na tlačítko „Odeslat příkaz na Raspberry Pi“ do mikropočítače. Pod vstupními poli a tlačítkem se nachází dialogové okno, které v reálném čase měření zobrazuje terminálové odpovědi serveru.

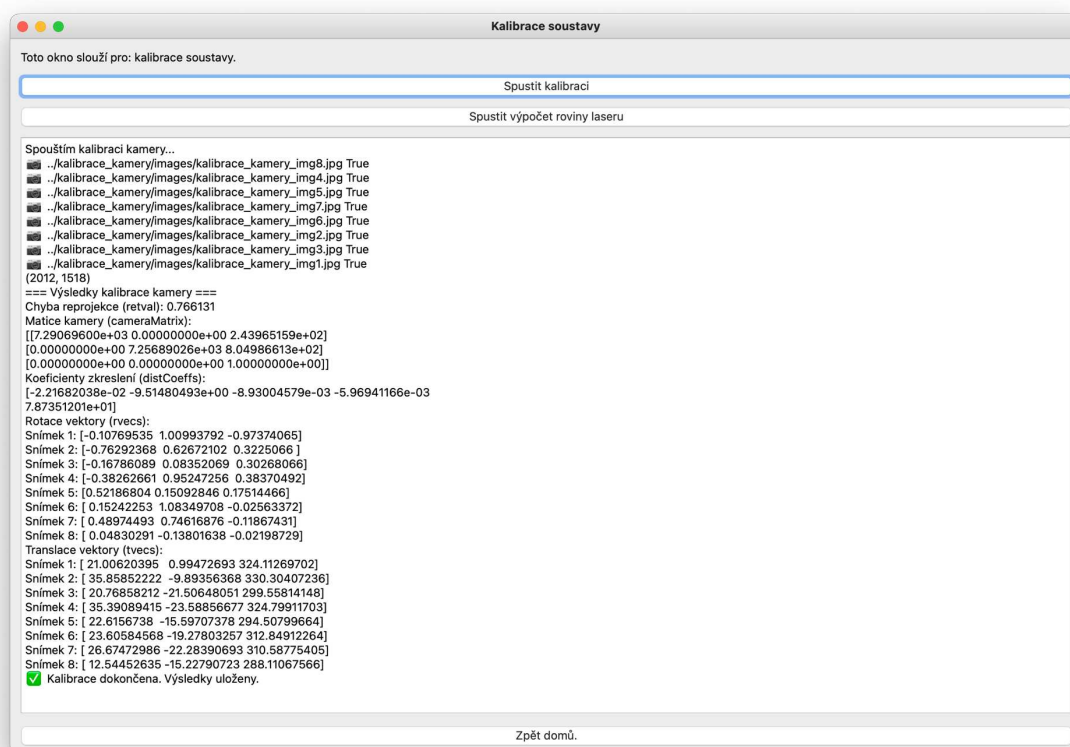
Před samotným měřením systém nejprve rychloposuvem přesune pojezd z výchozí pozice do oblasti pod laser, kde je následně zahájeno měření. Po dokončení posuvu a zahájení skenování probíhá snímání krok po kroku podle nastavené délky a směru. Po ukončení měření se pojezd automaticky vrací zpět na výchozí pozici opět rychloposuvem, čímž je připraven k dalšímu měření bez nutnosti zásahu uživatele.

Po dokončení měření jsou všechny pořízené snímky a automaticky staženy do pracovního adresáře aplikace. Veškerý progres je zobrazován v dialogovém okně a uživatel je o všem informován. Po úspěšném stažení snímků se lze stisknutím tlačítka na spodním okraji okna vrátit do úvodní nabídky pro spuštění dalších funkcí.

7.2.4 Kalibrace kamery a laseru

Spuštěním druhé možnosti z hlavního menu se uživateli zobrazí okno pro kalibraci kamery a výpočtu roviny laseru. Vstupem jsou snímky šachovnicového vzoru a snímky laseru, ze kterých se provádí kalibrace. Pořízení těchto snímků je klíčové pro správné a přesné fungování sestavy a vyžaduje znalost principů kalibrace. Po manuálním nahrání požadovaných snímků do příslušných adresářů lze následně spustit pomocí tlačítek již zautomatizované skripty pro kalibraci. Výstupní hodnoty kalibrace jsou pak uloženy a používány jako vstup do dalších výpočtů.

Vzhledem k tomu, že kalibrace je proces vyžadující odborné znalosti, nebyla tato část aplikace plně automatizována. Pro správnou kalibraci kamery a identifikaci roviny laseru je nutné pořídit vhodné snímky, které dostatečně vybudí potřebné parametry. Je určena především pro odborně vyškolenou obsluhu, která je zodpovědná za prvotní zavedení systému a jeho přesné seřízení. Po provedení kalibrace již není nutné ji znovu provádět (za předpokladu, že nebude se sestavou manipulováno) a lze běžně provádět uživatelská měření.



Obrázek 46 Okno s výsledky kalibrace

(zdroj: vlastní, aplikace profilometru)

7.2.5 Extrakce bodů, výpočty transformací a export bodového mračna

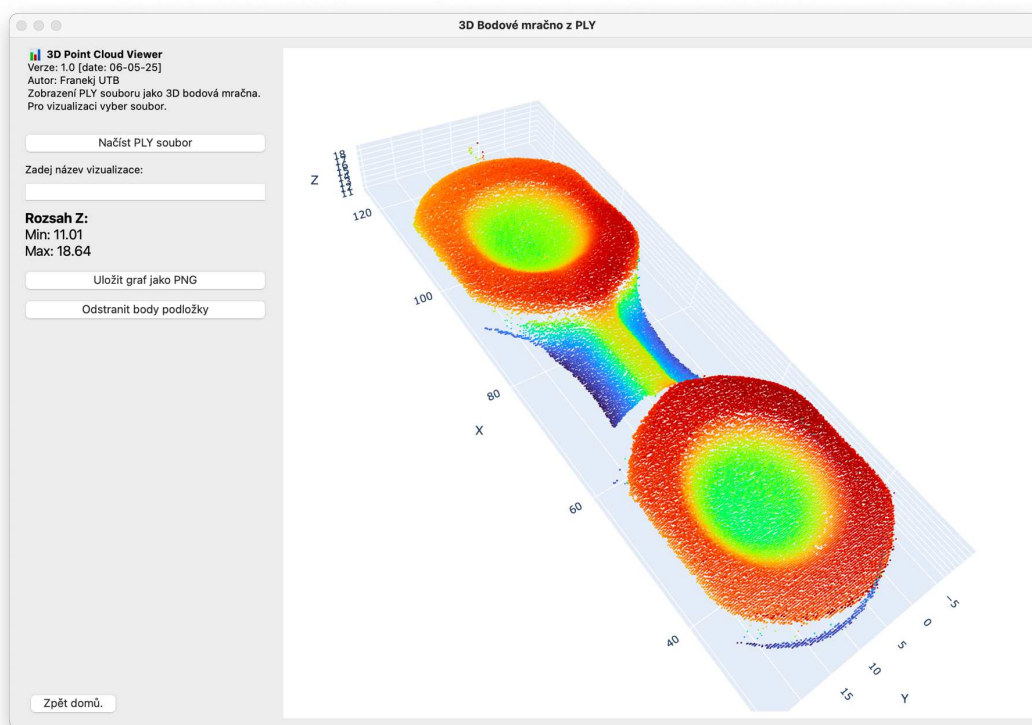
Při výběru třetí možnosti se uživateli spustí okno, které představuje jednotlivé kroky – od extrakce bodů linie laseru až po export výsledného mračna. Celý proces je plně automatizován a při spouštění jednotlivých funkcí pomocí tlačítek je uživatel informován v dialogovém okně. Nabízené možnosti:

- Spustit extrakci bodů ze snímku – spustí program pro extrakci bodů, jejich filtraci a následné doplnění pro všechny snímky v pracovním adresáři (kde byly snímky automaticky po ukončení měření staženy)
- Spustit výpočet transformace bodu do SS kamery – provedení transformace detekovaných bodů do roviny laseru v souřadném systému kamery
- Spustit výpočet transformace bodu do SS pojezdu – provedení transformace bodů ze souřadného systému kamery (předchozí krok) do systému pojezdu
- Spustit export bodového mračna – výsledné poskládání řezů, vytvoření a uložení bodového mračna

7.2.6 Vizualizace bodového mračna

Čtvrtá možnost z hlavního menu aplikace umožňuje uživateli spustit okno pro vizualizaci bodových mračen. Toto okno je navrženo jako samostatný prohlížeč, který poskytuje uživateli interaktivní prostředí pro prohlížení a analýzu nahraných bodových mračen. Toto okno slouží jako samostatný prohlížeč, ve kterém lze opakovaně načítat a zobrazovat různá bodová mračna. Funkce prohlížeče bodových mračen:

- Výběr souboru: Uživatel může kdykoliv zvolit soubor s bodovým mračnem (ve formátu PLY), který se okamžitě načte a zobrazí.
- Interaktivní zobrazení: Načtené bodové mračno je zobrazeno v pracovním podokně na pravé straně okna, kde je možné jej libovolně otáčet, přibližovat a posouvat. Aktuální zobrazení lze také pojmenovat a uložit jako obrázek ve formátu PNG.
- Opakované použití: Prohlížeč je navržen tak, aby bylo možné bez omezení načítat nová bodová mračna bez nutnosti restartu aplikace.
- Možnost odstranit body naskenované body podložky a exportovat pouze bodové mračno povrchu objektu.



Obrázek 47 Okno vizualizace bodového mračna

(zdroj: vlastní, aplikace profilometru)

7.2.7 Aplikace – shrnutí

Tato kapitola představila návrh řídicí aplikace pro optický profilometr, zaměřenou na zajištění efektivního a intuitivního ovládání měřicího procesu. Aplikace byla vyvinuta v programovacím jazyce Python s využitím knihovny PyQt5 pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní. Její architektura umožňuje uživateli realizovat komplexní měřicí operace bez nutnosti programovacích znalostí.

Aplikace je navržena jako klient-server systém, kde klientská část na počítači zajišťuje ovládání a správu měření, zatímco serverová část na Raspberry Pi provádí přímé řízení hardwarových komponent. Tento přístup umožňuje efektivní rozdělení úloh, přičemž klient odesílá příkazy (např. spuštění měření, kalibrace, extrakce bodů) a přijímá výsledky zpracování, zatímco server vykonává pokyny, pořizuje snímky a odesílá data zpět k analýze.

Struktura aplikace je navržena s důrazem na modulárnost a přehlednost. Jednotlivé adresáře jsou jednoznačně zaměřeny na specifické části procesu, což usnadňuje správu souborů a případné rozšíření aplikace. Tento návrh umožňuje efektivní provoz a snadnou správu měřicího systému i pro uživatele s omezenými technickými znalostmi, přičemž zachovává relativně vysokou úroveň přesnosti měření.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout, realizovat a ověřit funkčnost laboratorního prototypu 3D optického profilometru určeného pro detekci rozměrových vad. Na základě rešeršní části byly definovány klíčové požadavky na systém strojového vidění, včetně volby vhodné projekční geometrie, optických komponent a algoritmů pro rekonstrukci 3D tvaru.

V rámci praktické části byl navržen měřicí systém složený z průmyslové kamery, objektivu, projekčního laseru a krokového motoru. Všechny komponenty byly integrovány do jednoho funkčního celku s vlastním řídicím softwarem. Byla provedena kalibrace kamery i laserové roviny a navržen algoritmus pro snímání, extrakci bodů a generování bodového mračna. Data byla exportována ve standardizovaném formátu pro další zpracování a vyhodnocení.

Výsledný systém prokázal schopnost rekonstruovat tvar měřených objektů s dostatečnou přesností pro účely základní rozměrové kontroly. Byly úspěšně identifikovány rozměrové odchylky ve zkušebních objektech, a to i ve srovnání s referenčním komerčním zařízením. Vyvinutý prototyp tedy splnil hlavní technické i funkční cíle práce.

Přínosem práce je rovněž návrh modulárního a rozšiřitelného systému, který využívá nejen dostupné open-source nástroje (primárně knihovnu OpenCV pro programovací jazyk Python), ale i cenově dostupné hardwarové komponenty. Díky tomu představuje realizovaná sestava atraktivní alternativu k výrazně dražším komerčním řešením. Navržený systém je navíc otevřený pro další rozšiřování, ať už z hlediska přesnosti měření, automatizace procesu nebo integrace do širších výrobních celků. Součástí výstupu je také uživatelské rozhraní, které zajišťuje intuitivní ovládání a komfortní vizualizaci měřených dat.

Z hlediska budoucího vývoje lze doporučit rozšíření systému o pokročilejší způsoby filtrace a automatické porovnání s CAD modelem, případně nasazení více kamer pro zvýšení robustnosti při měření složitějších objektů. Systém má potenciál být po dalších úpravách nasazen i v provozním prostředí s vyššími požadavky na přesnost, opakovatelnost a rychlost měření.

V rámci dalšího vývoje systému se nabízí několik praktických vylepšení, která mohou zvýšit jeho spolehlivost, použitelnost a přesnost. Mezi doporučené úpravy patří zavedení koncového mikropsínače a pákového dorazu s kladkou na konec pojezdu, které by zajistily mechanickou ochranu systému proti nežádoucímu dojetí posuvu až na doraz v případě nepovolené manipulace. Dále je vhodné vytvořit přehlednou dokumentaci postupu

správného snímání kalibračního vzoru, která by minimalizovala chyby při kalibraci kamery a laseru. Z hlediska softwarové části je zvažován přenos živého obrazu přímo do aplikace; tento požadavek je však v současnosti omezen výpočetním výkonem platformy Raspberry Pi, která není schopna zajistit plynulý přenos v odpovídající kvalitě a snímkové frekvenci. Mezi další směry rozšíření patří zvětšení pracovní plochy systému a využití užší laserové linie, která by mohla přispět k vyššímu prostorovému rozlišení při snímání detailních struktur povrchu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CORKE, Peter. *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB®. Second, completely revised edition*. Cham: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-54412-0
- [2] SZELISKI, Richard, 2022. *Computer vision: algorithms and applications. Second edition. Cham: Springer. Texts in computer science*. ISBN 978-3-030-34371-2.
- [3] SONKA, Milan, 1993. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. New York, NY: Springer. ISBN 978-1-4899-3216-7.
- [4] AKBAR, Jalal Uddin Md, Syafiq Fauzi KAMARULZAMAN, Abu Jafar Md MUZAHID, Md. Arafatur RAHMAN a Mueen UDDIN, 2024. *A Comprehensive Review on Deep Learning Assisted Computer Vision Techniques for Smart Greenhouse Agriculture*. IEEE Access [online]. 12, 4485–4522. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2024.3349418
- [5] DAVIES, E. Roy, 2012. *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities. 4th ed*. Amsterdam Boston: Elsevier. ISBN 978-0-12-386908-1.
- [6] ZHANG, Z., 2000. *A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 22(11), 1330–1334. ISSN 01628828. Dostupné z: doi:10.1109/34.888718
- [7] GONZALEZ, Rafael C. a Richard E. WOODS, 2017. *Digital image processing. Fourth edition, global edition*. New York: Pearson. ISBN 978-0-13-335672-4.
- [8] SINGH, H. Jak jsou obrázky uloženy v počítači: formáty šedotónového a RGB. Analytics Vidhya [online]. 29. května 2023 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/03/grayscale-and-rgb-format-for-storing-images/>
- [9] GOOGLE DEVELOPERS. High-definition CSS color guide [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://developer.chrome.com/docs/css-ui/high-definition-css-color-guide>
- [10] COSTE, Arthur. Project 1: Histograms. University of Utah, 2012 [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: [https://www.sci.utah.edu/~acoste/uou/Image/project1/Arthur_COSTE_Project_1_report.html:contentReference\[oaicite:5\]{index=5}](https://www.sci.utah.edu/~acoste/uou/Image/project1/Arthur_COSTE_Project_1_report.html:contentReference[oaicite:5]{index=5})

- [11] HECHT, Eugene, 2017. *Optics. 5 edition. Global edition*. Boston: Pearson Education, Inc. ISBN 978-0-13-397722-6.
- [12] LIGHT. In: Encyklopedie Britannica [online]. 2023 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/light>
- [13] COGNEX. Think about optical filters first as you design your vision application [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/blogs/machine-vision/think-about-optical-filters-first-as-you-design-your-vision-application>
- [14] OPTOGRAPHY. Transmission and Absorption [online]. 2021 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://optography.org/transmission-and-absorption/>
- [15] BENINI, Carlo. Camera Oscura [online]. 2013 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Camera_Oscura.jpg
- [16] DAVIES, E. R., 2018. *Computer vision: principles, algorithms, applications, learning. Fifth edition*. London, England: Academic Press. ISBN 978-0-12-809284-2.
- [17] INDUSTRIAL VISION SYSTEMS. The 7 elements of a machine vision system [online]. 18. října 2021 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.industrialvision.co.uk/news/the-7-elements-of-a-machine-vision-system>
- [18] 1stVISION. CCD vs CMOS image sensor [online]. 2019 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.1stvision.com/machine-vision-solutions/wp-content/uploads/2019/07/CCD-vs-CMOS-image-sensor.jpg>
- [19] NAYAR, Shree K. First Principles of Computer Vision [online]. Columbia University, 2022 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://fpcv.cs.columbia.edu/>
- [20] SADEKAR, Kaustubh. Understanding Lens Distortion [online]. LearnOpenCV, 5. října 2020 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://learnopencv.com/understanding-lens-distortion/>
- [21] OPENCV. Camera Calibration [online]. 2025 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html
- [22] HOLST, Gerald C., 2008. *Electro-optical imaging system performance. 5th ed.* Winter Park, FL : Bellingham, Wash: JCD Publishing ; SPIE. ISBN 978-0-8194-7406-3.

- [23] MVTEC Software GmbH. HALCON [online]. 2025 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: https://www.mvtec.com/products/halcon/?pk_campaign=EN-Halcon&pk_medium=cpc&pk_kwd=halcon
- [24] WEI QINGCHAO, ZHOU GUOQING, ZHU QING, a ZHANG QINGHANG, 1996. *On DLT method for CCD camera calibration. In: Third International Conference on Signal Processing (ICSP'96): Proceedings of Third International Conference on Signal Processing (ICSP'96)* [online]. Beijing, China: IEEE, s. 883–885 [vid. 2025-05-25]. ISBN 978-0-7803-2912-6. Dostupné z: doi:10.1109/ICSIGP.1996.566229
- [25] MICROSOFT RESEARCH. Project InnerEye – Democratizing Medical Imaging AI [online]. 2025 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/medical-image-analysis/>
- [26] KIM, JJ. What Is Photogrammetry? [online]. NVIDIA Blog, 7. června 2023 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://blogs.nvidia.com/blog/what-is-photogrammetry/>
- [27] Anon., 2021. 3D point cloud analysis: traditional, deep learning, and explainable machine learning methods. Cham: Springer. ISBN 978-3-030-89180-0.
- [28] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení. 2., opr. vyd.* Brno: Computer Press, 2007. 252 s. ISBN 978-80-251-3837-3.
- [29] LEACH, Richard, ed., 2011. *Optical Measurement of Surface Topography* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg [vid. 2025-05-25]. ISBN 978-3-642-12011-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-12012-1.
- [30] BASLER AG. *aca4024-29uc – Basler ace USB 3.0 Camera*. [online]. 2025 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://docs.baslerweb.com/aca4024-29uc>
- [31] BASLER AG. *Kowa Lens LM25HC F1.4 f25mm 1"*. [online]. 2025 [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/shop/kowa-lens-lm25hc-f1-4-f25mm-1/>
- [32] ČÁROVÉ-LASERY.CZ. *Internetový obchod s lasery*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.carove-lasery.cz/stranka-internetovy-obchod-s-lasery-13>
- [33] ATESYSTEM s.r.o. *CM-01 – kontrolér pro řízení jasu světla, 24 VDC, výstup PWM*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://eshop.atesystem.cz/d/847494/cm-01>

- [34] DRÁTEK.CZ. *CNC lineární pohon s krokovým motorem T8x2 – 300 mm*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/5440-cnc-linearni-pohon-300-mm-s-krokovym-motorem.html>
- [35] RPISHOP.CZ. *Raspberry Pi 4 Model B – 8GB RAM*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-4/2611-raspberry-pi-4-model-b-8gb-ram.html>
- [36] RASPBERRY PI FOUNDATION. *Software pro Raspberry Pi*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/software/>
- [37] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python 3 Documentation*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/>
- [38] TAILSCALE INC. *Tailscale – VPN pro moderní síťovou infrastrukturu*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://tailscale.com/>
- [39] REALVNC LIMITED. *VNC Viewer – RealVNC*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.realvnc.com/en/connect/download/viewer/>
- [40] WEI, Yuan, Xu LIU, Simon S. PARK, Robert TOMKOWSKI a Andreas ARCHENTI, 2021. *A Study of Micro-Dimpled Groove Texture in Friction Reduction* [online]. 12. března 2021. [vid. 2025-05-25]. Dostupné z: doi:10.21203/rs.3.rs-319410/v1
- [41] GUILLEMAUD, Daniel. *CloudCompare – Open Source projekt*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.danielgm.net/cc/>
- [42] CIGNONI, Paolo; MUNTONI, Alessandro. *MeshLab – Open Source systém pro zpracování a editaci 3D trojúhelníkových mřížek*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://www.meshlab.net/>
- [43] MCAE s.r.o. *GOM ATOS TripleScan – Profesionální 3D optický skener*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_Brochure_ATOS_TripleScan_CZ_nahled.pdf
- [44] RIVERBANK COMPUTING LIMITED. *PyQt5 – Python bindings pro Qt v5*. [online]. [cit. 2025-05-25]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/PyQt5/>
- [45] OBERMEIER, Liza. *Deep CSG: Extraction of Geometric Objects from 3D Point Clouds Using Deep Learning* [online]. inovex GmbH, 10. listopadu 2021 [cit. 2025-05-26].

Dostupné z: <https://www.inovex.de/de/blog/deep-csg-extraction-of-geometric-objects-from-3d-point-clouds-using-deep-learning/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Základní pracovní tok úlohy strojového vidění.....	16
Obrázek 2 Šedotónový obraz – reprezentace maticí hodnot.....	19
Obrázek 3 Vizualizace barevné prostory	20
Obrázek 4 Porovnání histogramů pro dva šedotónové snímky.....	22
Obrázek 5 Vlnové délky pro viditelné spektrum světla.....	24
Obrázek 6 Ukázka použití polarizačního filtru pro aplikaci strojového vidění– odstranění odlesků	25
Obrázek 7 Chování světla - odraz absorpce.....	26
Obrázek 8 Pinhole camera model	28
Obrázek 9 Model centrální projekce.....	30
Obrázek 10 Typická struktura systému strojového vidění.....	32
Obrázek 11 Princip CCD a CMOS obrazového snímače	33
Obrázek 12 Ukázky radiálního zkreslení - vliv na deformaci obrazu.....	35
Obrázek 13 Ukázkové mračno bodů – point cloud.....	42
Obrázek 14 Ukázka z technického výkresu – požadavky na výrobní tolerance a rozměry součástí.....	48
Obrázek 15 Princip optického profilometru – triangulace pomocí promítnutí paprsku laseru	51
Obrázek 16 Průmyslová kamera Basler	57
Obrázek 17 Objektiv Basler.....	59
Obrázek 19 Lineární krokový pojezd a řadič motoru	60
Obrázek 20 Návrh konstrukce rámu sestavy profilometru	63
Obrázek 20 Výsledná konfigurace sestavy profilometru.....	64
Obrázek 21 Schéma zapojení komponent soustavy.....	68
Obrázek 22 Schéma zapojení soustavy ovládání krokového motoru skrze řadič z mikropočítače.....	69
Obrázek 23 Metody připojení k mikropočítači	70
Obrázek 24 Schéma algoritmu.....	73
Obrázek 25 Ukázka kalibračního snímku se správně identifikovaným šachovnicovým vzorem.....	74
Obrázek 26 Vykreslení přímek pro identifikaci průsečíků	76
Obrázek 27 Zjednodušené schéma -rovina definována pomocí dvou vektorů	76
Obrázek 28 Posun objektu pod čárovým laserem – jednotlivé snímky	77
Obrázek 29 Extrakce linie laseru ze snímku.....	78
Obrázek 30 test.....	79

Obrázek 31 Skript běžící na mikropočítači pro pořízení kalibračních snímků.....	81
Obrázek 32 Objekt č.1 Kovová součást.....	83
Obrázek 33 Objekt č.1 Kovová součást – bodové mračno	83
Obrázek 34 Objekt č.2 Gumové Gufero	84
Obrázek 35 Objekt č.2 Gumové Gufero – bodové mračno	84
Obrázek 36 Objekt č.3 Plastový čip.....	85
Obrázek 37 Objekt č.3 Plastový čip – bodové mračno.....	85
Obrázek 38 Výsledky importované do Meshlab – objekt č.1	87
Obrázek 39 Výsledky importované do Cloudcompare– objekt č.4 LEGO kostka.....	87
Obrázek 40 Opakovatelnost měření –objekt č. 3 (Plastový čip).....	88
Obrázek 41 3D skener ATOS TripleScan II 5M	89
Obrázek 42 Bodové mračno (objekt č. 1) – měřeno pomocí zkonstruovaného profilometru	92
Obrázek 43 Bodové mračno (objekt č. 1) – měřeno profesionálním 3D scannerem.....	92
Obrázek 44 Porovnání hustota bodového mračna – KN počet sousedů.....	93
Obrázek 45 Základní menu při spuštění aplikace	97
Obrázek 46 Okno s výsledky kalibrace	99
Obrázek 47 Okno vizualizace bodového mračna	100

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Technická specifikace kamery	56
Tabulka 2 Technická specifikace objektivu.....	58
Tabulka 3 Technická specifikace sestavy lineárního krokového motoru	60
Tabulka 4 Specifikace mikropočítače	61
Tabulka 4 Orientační vyhodnocení nákladů použitých komponent.....	94

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SEZNAM PŘÍLOH

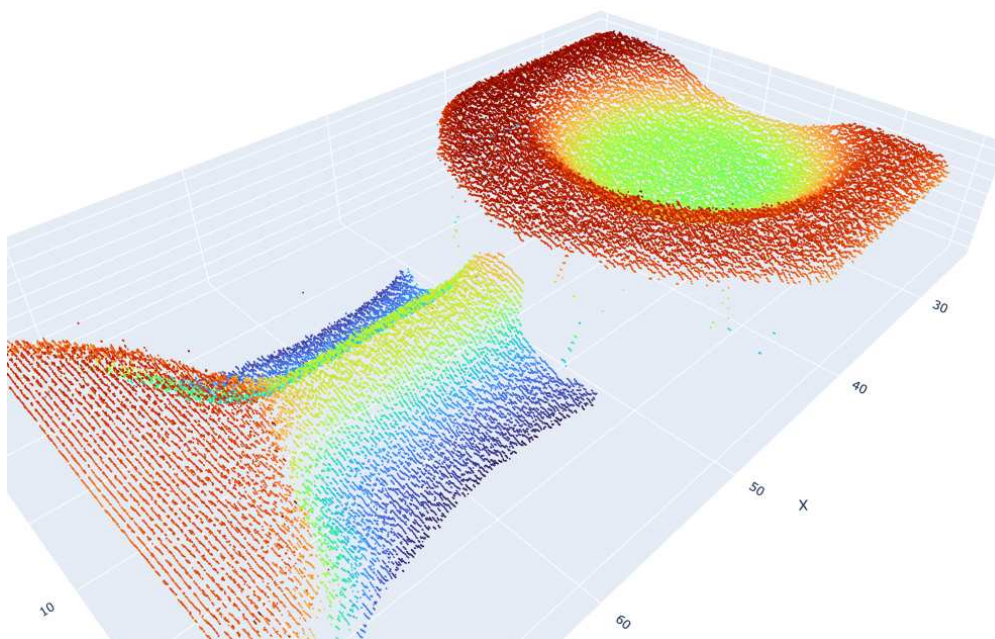
Příloha P I: Snímky bodových mračen

Příloha P II: Adresáře aplikace – zip se všemi soubory a programy

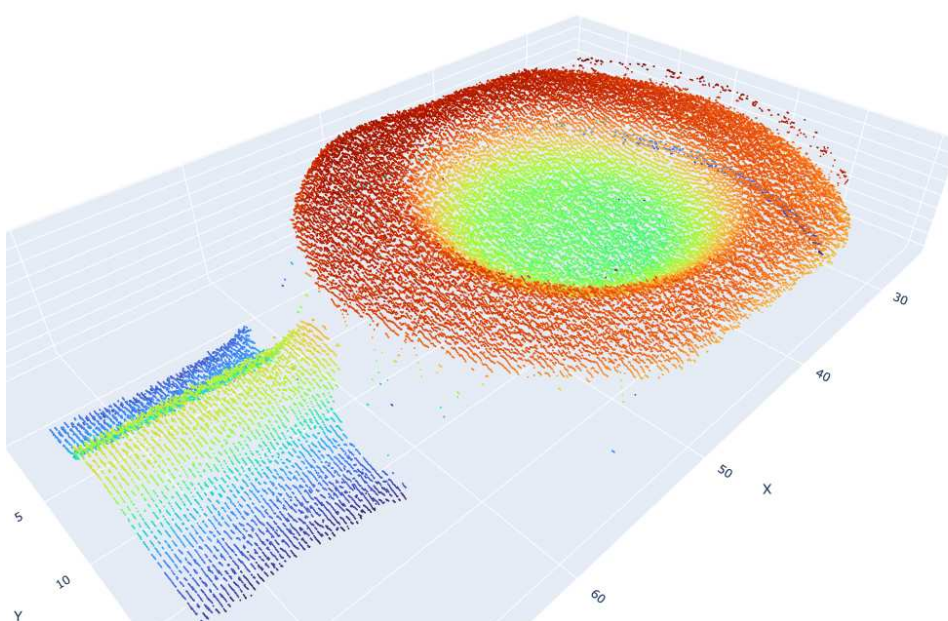
PŘÍLOHA P I: SNÍMKY BODOVÝCH MRAČEN

Doplňující snímky bodových mračen, vytvořeno pomocí vlastní aplikace.

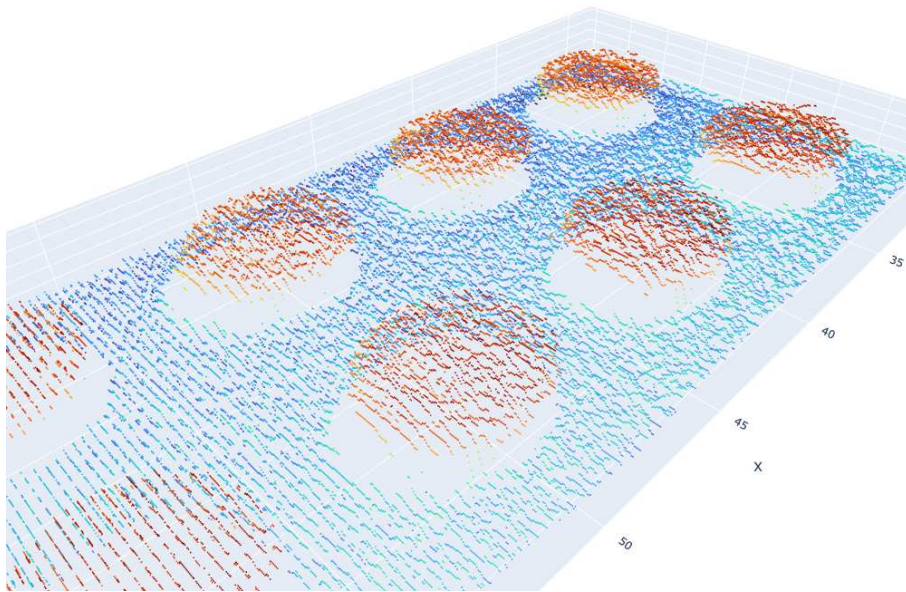
Kovová součást - detail



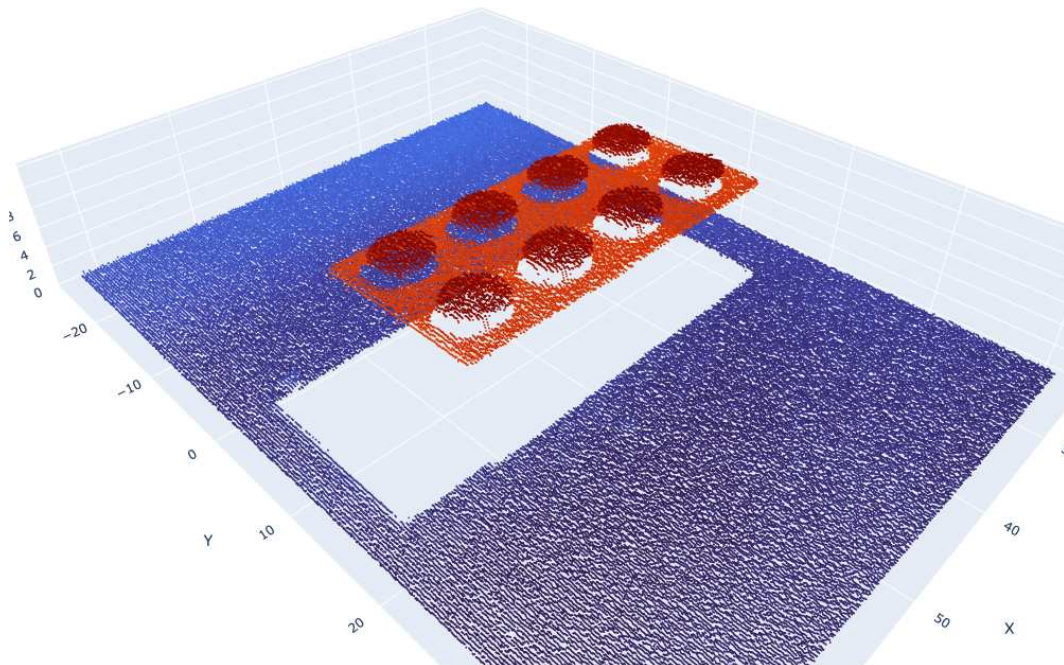
Kovová součást - detail 2



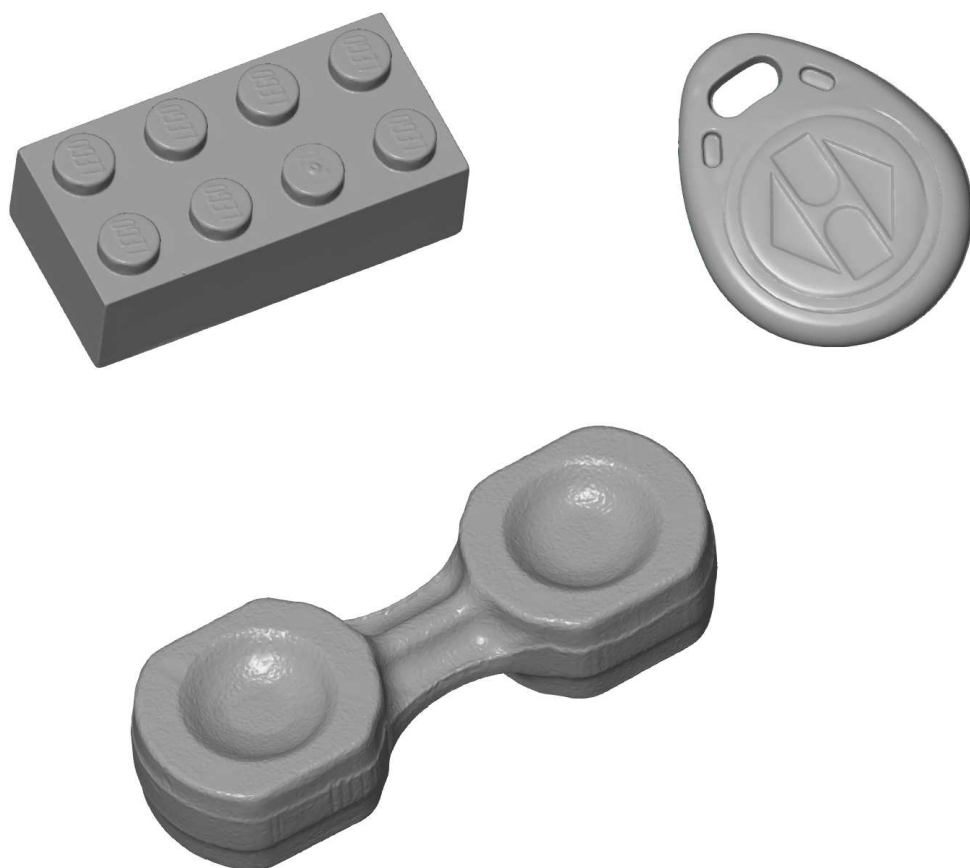
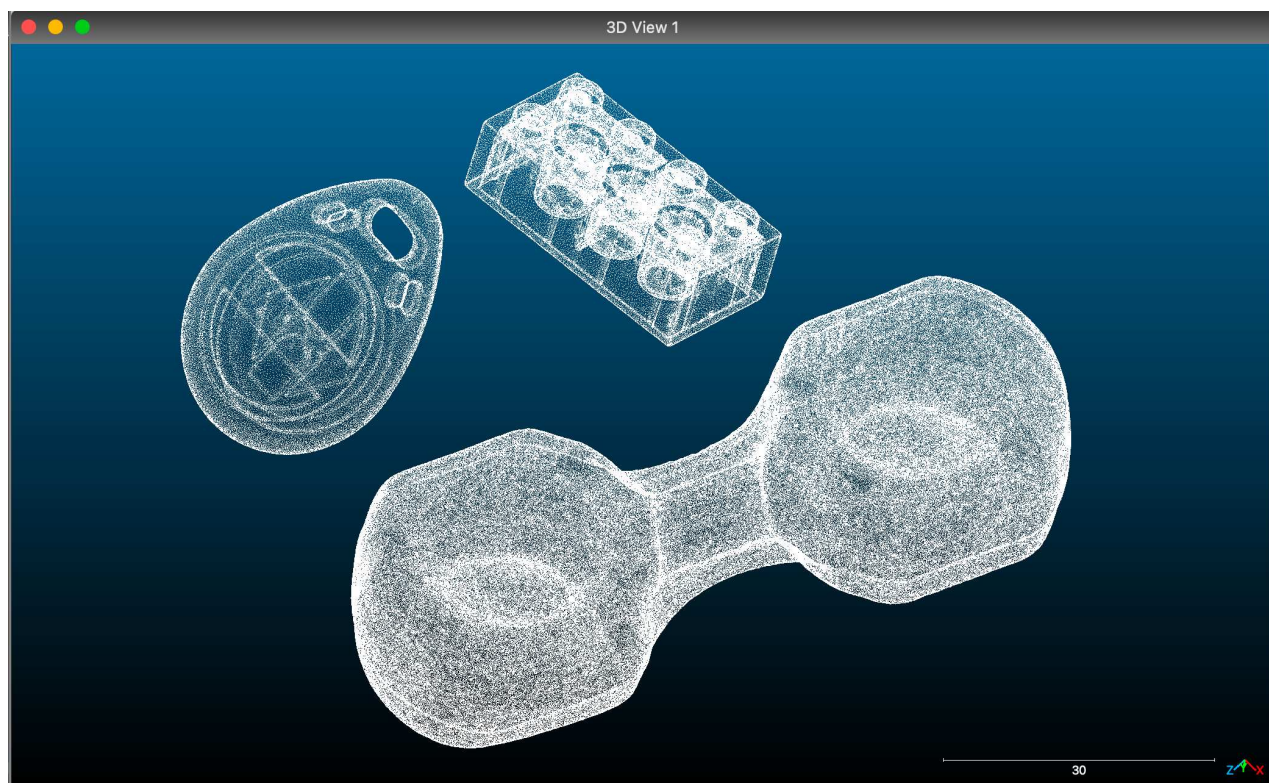
LEGO kostka - detail



LEGO kostka - detail 2



Objekty skenované pomocí ATOS TripleScan II 5M:



PŘÍLOHA P II: PROGRAMY V PYTHONU

Součástí adresářů jsou i výsledná bodová mračna a kalibrační soubory.

Přehled:

app_main.py

- hlavní program aplikace, spuštění UI, volání výpočetních programů

rpi_server.py

- server program pro ovládání posuvu a kamery, síť. komunikace s aplikací

take_foto.py

- pořízení snímků pro kalibraci a identifikaci roviny laseru

extrakce_bodu_objektu.py

- extrakce bodů linie laseru ze snímků, filtrace a doplnění bodů

kalibrace_system.py

- kalibrace kamery pomocí Zhangovy metody

rovina_laseru.py

- výpočet rovnice roviny laseru v SS kamery

vypocet_projekce.py

- transformace extrahovaných bodů ze snímků do roviny laseru

transformace_pojezd.py

- transformace bodů ze SS kamery do SS pojezdu

vypocet_vzdalenosti_kroku_posuvu.py

- výpočet vzdálenosti jednoho kroku posuvu ze sady snímků

export_pointcloud.py

- sestavení a uložení výsledného bodového mračna