

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

SYSTÉM PRO BENCHMARKING 3D VISION SENSORŮ

Bc. Jakub Rolejček

Diplomová práce

2021

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Rolejček**
Osobní číslo: **I18232**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Téma práce: **Systém pro benchmarking 3D vision sensorů**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Postup: Cílem práce je vytvoření postupu hodnocení kvality 3D vision sensorů s ohledem na využití při lokalizaci složitých objektů v prostoru včetně instrumentace. Student stanoví několik přístupů k lokalizaci složitých objektů pomocí 3D vision sensorů (Iterative Closest Point algoritmus, Robust Point Matching algoritmus) a sadu předmětů z různých materiálů k lokalizaci. Následně student za pomoci jmenovaných přístupů a předmětů navrhne metodiku hodnocení sensorů. Funkčnost metodiky student bude demonstrovat na minimálně třech různých 3D vision sensorech.

Teoretická část: Stručná rešerše metod lokalizace předmětů v prostoru. Popis vybraných lokalizačních algoritmů. Stručná rešerše 3D vision sensorů.

Praktická část: Tvorba postupu hodnocení, diskuse a tvorba objektů k lokalizaci, tvorba aplikace, komplexní testování aplikace, dokumentace popisující případovou studii.

Rozsah pracovní zprávy: **60 s**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Intel RealSense, 2019. WWW.intel.com [online]. Santa Clara, CA 95054-1549 USA: Intel [cit. 2019-10-01]. Dostupné z: <https://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/realsense-overview.html>
Photoneo Phoxi 3D scanner, 2019. <https://www.photoneo.com> [online]. Bratislava, SK: Photoneo [cit. 2019-10-01]. Dostupné z: <https://www.photoneo.com/phoxi-3d-scanner/>
CHUI, Haili a Anand RANGARAJAN. A new point matching algorithm for non-rigid registration. Computer Vision and Image Understanding [online]. 2003, 89(2-3), 114-141 [cit. 2018-10-01]. DOI: 10.1016/S1077-3142(03)00009-2. ISSN 10773142. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1077314203000092>
FITZGIBBON, Andrew W. Robust registration of 2D and 3D point sets. Image and Vision Computing [online]. 2003, 21(13-14), 1145-1153 [cit. 2018-10-01]. DOI: 10.1016/j.imavis.2003.09.004. ISSN 02628856. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262885603001835>

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Doležel, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **7. listopadu 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2020**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 7. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 05. 2021

Bc. Jakub Rolejček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Petru Doleželovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a odborné rady při zpracování této práce a otci za pomoc s výrobou objektů pro skenování. Dále bych rád poděkoval rodině a blízkým přátelům za pomoc a podporu během studia.

V Pardubicích dne 20. 05. 2021

Bc. Jakub Rolejček

ANOTACE

Práce je věnována způsobu hodnocení kvality 3D vision sensorů s ohledem na využití při lokalizaci složitých objektů v prostoru. Pro hodnocení 3D vision sensorů byla v programu MATLAB vytvořena aplikace, která obsahuje nástroje řešící danou problematiku. Testovací data byla získána ze tří vybraných typů skenerů, které skenovaly stejný objekt vyrobený ze tří různých materiálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

bodové mračno, 3d skener, registrace množiny bodů, hodnocení skenerů.

TITLE

BENCHMARK OF 3D VISION SENSORS

ANNOTATION

This diploma thesis focuses on the method of evaluating the quality of 3D vision sensors, centering on their use in locating complex objects in space. For the evaluation of 3D vision sensors, an application in a MATLAB program has been created. It contains tools that are able to solve the issue at hand. Test data were acquired from three selected types of scanners that scanned the same object made from three different materials.

KEYWORDS

Point cloud, 3D scanner, Point set registration, Scanner evaluation.

OBSAH

	SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	9
	SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ	10
	SEZNAM ILUSTRACÍ	11
	SEZNAM TABULEK	12
	ÚVOD	13
1	3D SKENER	14
1.1	DRUHY SKENERŮ	14
1.1.1	Kontaktní skenery	14
1.1.2	Nekontaktní aktivní skenery	15
1.1.3	Nekontaktní pasivní skenery	17
1.2	PŘÍKLADY 3D SKENERŮ	17
1.2.1	Photoneo 3D skenery	18
1.2.2	Intel RealSense kamery	21
1.2.3	Basler kamery	23
1.3	VÝSTUPNÍ DATA 3D SKENERŮ	24
1.3.1	Bodové mračno	25
1.3.2	Polygonová síť	25
1.3.3	Obraz intenzity	25
1.3.4	Konfidenční mapa	25
1.3.5	Hloubková mapa	25
1.4	VYUŽITÍ 3D SKENERŮ	26
2	ZPRACOVÁNÍ BODOVÉHO MRAČNA ZE SKENERŮ	27
2.1	FILTRACE DAT	27
2.1.1	Pass Through filtr	27
2.1.2	Statistical Outlier Removal filtr (SOR)	27
2.1.3	Radius Removal filtr (ROR)	28
2.1.4	Voxel Grid filtr (VG)	28
2.1.5	3D Geometric Bilateral filtr (3D GBF)	28
2.2	REGISTRACE BODOVÉHO MRAČNA	29
2.2.1	Iterative Closest Point algoritmus (ICP)	29
2.2.2	Normal Distribution Transform (NDT)	33
2.2.3	Coherent Point Drift (CPD)	35

2.2.4	Robust Point Matching algoritmus (RPM)	37
2.2.5	Super4PCS	40
2.3	HLEDÁNÍ NEJBLIŽŠÍCH SOUSEDŮ	42
2.3.1	K-D strom	42
3	PRINCIP HODNOCENÍ SKENERŮ	44
3.1	PRVNÍ NAVRHOVANÝ ZPŮSOB HODNOCENÍ	44
3.2	DRUHÝ NAVRHOVANÝ ZPŮSOB HODNOCENÍ	45
3.2.1	Tvorba referenčního modelu	46
3.2.2	Princip hodnocení	48
4	TVORBA DATOVÉ SADY K HODNOCENÍ	50
4.1	OBJEKTY PRO SKENOVÁNÍ	50
4.1.1	Návrh objektu	50
4.1.2	Výroba objektů	50
4.2	3D SKENERY K POROVNÁNÍ	54
4.3	SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ	55
4.3.1	Prostředí pro skenování objektů	55
4.3.2	Umístění objektu na pracovní plochu	56
4.3.3	Skenované pozice objektů	57
5	APLIKACE PRO HODNOCENÍ SKENERŮ	58
5.1	POPIS APLIKACE	58
5.1.1	Implementace knihovny PCL a SUPER4PCS	60
5.1.2	Implementované zpracování dat	61
5.2	POUŽITÉ NASTAVENÍ APLIKACE	61
5.3	HODNOCENÍ DATOVÉ SADY	63
5.3.1	Výsledky pro algoritmus ICP	64
5.3.2	Výsledky pro algoritmus NDT	66
5.3.3	Výsledky pro algoritmus RPM	69
5.3.4	Výsledky pro algoritmus CPD	71
5.3.5	Celkové hodnocení skenerů	74
	ZÁVĚR	75
	LITERATURA	77
	PŘÍLOHY	80

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
CAD	computer aided design
CMM	coordinate measuring machine
CPD	coherent point drift
EM	expectation maximization
ICP	iterative closest point
ID	identifikátor
IP	internet protocol
MEMS	micro electro mechanical system
MSE	střední kvadratická chyba
NDT	normal distribution transform
PCL	point cloud library
RGB	aditivní barevný model
RMSE	druhá odmocnina střední kvadratické chyby
RPM	robust point matching
SDK	software development kit
USB	universal seriál bus
VR	virtuální realita

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

t	čas, s
X	osa kartézské soustavy
Y	osa kartézské soustavy
Z	osa kartézské soustavy

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Kontaktní skenování objektu	15
Obr. 1.2 – PhoXi 3D Scanner L	18
Obr. 1.3 – Stavby PhoXi 3D skenerů	19
Obr. 1.4 – Panely v aplikaci PhoXi Control	20
Obr. 1.5 – Intel Realsense LiDAR L515	21
Obr. 1.6 – Intel Realsense Depth Camera D415	22
Obr. 1.7 – Intel Realsense Depth Camera SR305	23
Obr. 1.8 – Basler ToF640_20gm	24
Obr. 2.1 – Příklad K-D stromu	42
Obr. 3.1 – Aplikace krychlové sítě na model objektu	45
Obr. 3.2 – Princip odstranění skrytých bodů modelu z pohledu skeneru	46
Obr. 3.3 – Algoritmus pro vytváření referenčních modelů	47
Obr. 3.4 – Vytvořený referenční model objektu pro zvolenou pozici	47
Obr. 4.1 – Stav kovového objektu před CO2 svářením	51
Obr. 4.2 – Rozměry kovového objektu	51
Obr. 4.3 – Stav dřevěného objektu před spojením	52
Obr. 4.4 – Rozměry dřevěného objektu	52
Obr. 4.5 – Rozměry modelu použitého pro tvorbu plastového objektu	53
Obr. 4.6 – Vzhled vytvořených objektů	53
Obr. 4.7 – Prostředí pro skenování vytvořených objektů	55
Obr. 4.8 – Rozměry prostředí pro skenování objektů	56
Obr. 4.9 – Pozice objektu při skenování z pohledu kamery	57
Obr. 5.1 – Vzhled vytvořené aplikace	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 – Příklad binární matice korespondujících bodů	37
Tab. 2.2 – Příklad spojitě matice korespondujících bodů	38
Tab. 4.1 – Nastavení parametrů skeneru Photoneo	54
Tab. 4.2 – Nastavení parametrů skeneru Realsense	54
Tab. 4.3 – Nastavení parametru skeneru Basler	54
Tab. 5.1 – Použité parametry pro tvorbu referenčních modelů	61
Tab. 5.2 – Použité parametry pro modifikaci vložených skenerů	62
Tab. 5.3 – Použité parametry zvolených registračních algoritmů	62
Tab. 5.4 – Použité parametry pro hodnocení skenerů a Super4PCS	63
Tab. 5.5 – Hodnocení dřevěného objektu ICP algoritmem	64
Tab. 5.6 – Hodnocení plastového objektu ICP algoritmem	65
Tab. 5.7 – Hodnocení kovového objektu ICP algoritmem	65
Tab. 5.8 – Hodnocení dřevěného objektu NDT algoritmem	67
Tab. 5.9 – Hodnocení plastového objektu NDT algoritmem	67
Tab. 5.10 – Hodnocení kovového objektu NDT algoritmem	68
Tab. 5.11 – Hodnocení dřevěného objektu RPM algoritmem	69
Tab. 5.12 – Hodnocení plastového objektu RPM algoritmem	70
Tab. 5.13 – Hodnocení kovového objektu RPM algoritmem	70
Tab. 5.14 – Hodnocení dřevěného objektu CPD algoritmem	71
Tab. 5.15 – Hodnocení plastového objektu CPD algoritmem	72
Tab. 5.16 – Hodnocení kovového objektu CPD algoritmem	73

ÚVOD

3D skenery jsou velmi používanými zařízeními napříč různými obory. Důvodem je, že po jejich integraci do již fungujících procesů může dojít ke zvýšení produktivity procesu, přesnosti procesu, snížení nákladů a rozšíření procesu o nové produkty a služby. Aby implementovaný skener vykazoval požadované vlastnosti, je nutné ze všech nabízených typů skenerů vybrat ten nejvhodnější. Ke zvolení vhodného skeneru mohou sloužit nejen parametry udávané výrobcem, ale také programy porovnávající výsledná data z různých skenerů.

Cílem diplomové práce je navrhnout způsob hodnocení kvality 3D vision sensorů s ohledem na využití při lokalizaci složitých objektů v prostoru. K hodnocení jsou využity algoritmy Iterative Closest Point, Normal Distribution, Coherent Point Drift a Robust Point Matching. Ve výpočetním prostředí MATLAB byla vytvořena aplikace, umožňující uživateli ohodnotit data ze skenerů. Na data lze aplikovat vybrané filtry a hodnocení provést na základě zvolených parametrů. Aplikace a navržený způsob hodnocení kvality skenerů byl otestován prostřednictvím vlastních dat získaných pomocí postupů uvedených v této diplomové práci.

1 3D SKENER

3D skener je zařízení, které se velmi podobá kameře. Shodně využívají kuželovité zorné pole a shromažďují informace o viditelných plochách. Hlavním rozdílem mezi kamerou a 3D skenerem je obsah získaných informací. V případě kamery dochází k získání barevné informace o plochách v zorném poli, naopak 3D skener shromažďuje informace o vzdálenosti povrchů. Pokud je 3D skener využíván za cílem vytvořit model skenovaného objektu, je nutné objekt skenovat z mnoha různých stran a tyto skeny následně převést do společného referenčního systému. Tento proces je nazýván jako zarovnání (alignment) nebo registrace (registration). Získaný sken také umožňuje identifikovat trojrozměrnou polohu každého bodu (Ebrahim, 2015).

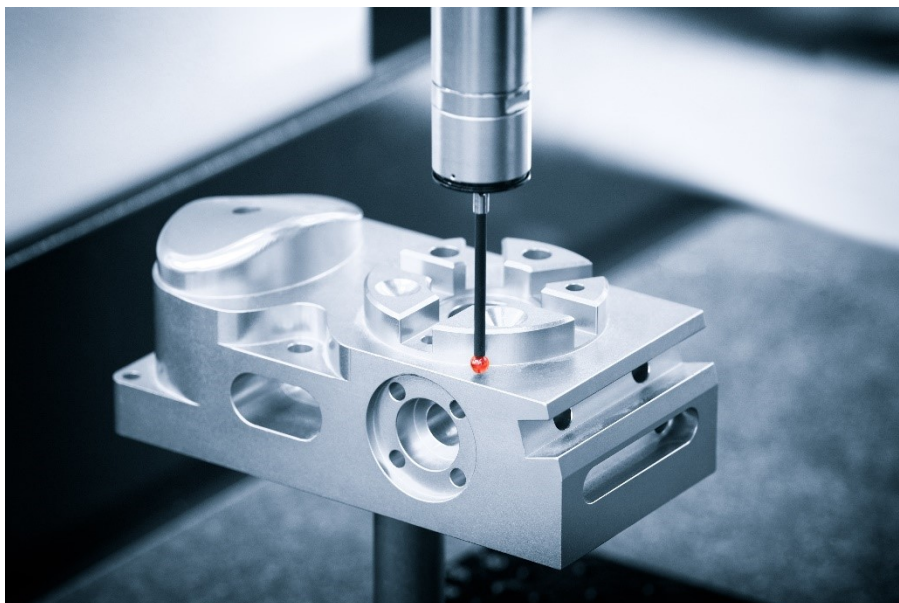
1.1 DRUHY SKENERŮ

Podle způsobu skenování objektů lze skenery rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Bezkontaktní lze dále dělit na aktivní a pasivní skenery (Ebrahim, 2015).

1.1.1 Kontaktní skenery

Princip skenování spočívá v umístění sondy na konec pohyblivého ramene, se kterým dochází k pohybu přes povrch objektu. Místo dotyku sondy s povrchem je zaznamenáno z měřené polohy ramene. Kontaktní způsob skenování je zobrazen na obr. 1.1. Tento druh skenování objektů je velmi pomalý a také nevhodný pro objekty, u kterých by mohlo dojít k trvalému poškození nebo deformaci.

Příkladem kontaktních senzorů je souřadnicový měřicí stroj (CMM), který slouží k měření geometrických charakteristik objektu. CMM se skládá ze tří os a to X, Y, Z, které jsou vzájemně kolmé. Měření je prováděno senzorem umístěným na třetí pohyblivé ose. Senzor může být například mechanického, optického a laserového typu. Nevýhodou CMM je relativně nízká rychlost skenování v porovnání s jinými skenovacími metodami.



Obr. 1.1 – Kontaktní skenování objektu (Creaform, 2019)

Přenosné CMM se liší od tradičních CMM v tom, že využívají místo lineárních os kloubové rameno obsahující šest nebo sedm rotačních os s rotačními enkodéry. Jejich výhodou je možná přenositelnost, používá se například v reverzním inženýrství a rychlém prototypování. Kombinované CMM využívá dotykový senzor a jinou měřicí technologii, např. laser, video nebo senzor bílého světla (Ebrahim, 2015).

1.1.2 Nekontaktní aktivní skenery

Jedná se o skenery, které při skenování nevyužívají kontakt se skenovaným objektem. Při skenování využívají aktivní nebo pasivní techniky. Aktivní skenery vyzařují určitý typ záření nebo světla, například ultrazvuk nebo rentgenový paprsek. Skenery lze rozdělit podle využívané technologie:

Time of Flight

Princip Time of Flight využívá ke zjištění vzdálenosti povrchu skenovaného objektu laserový paprsek. Pomocí dálkoměru je skenováno celé zorné pole po jednom bodu. Směr laserového dálkoměru je možné měnit otáčením, případně lze použít systém rotujících zrcadel. Systém rotujících zrcadel je často využíván z důvodu jednodušší a rychlejší rotace s vysokou přesností. Vzdálenost bodu na povrchu vůči skeneru odpovídá času t , který je vypočítán jako doba mezi vysláním laserového paprsku a jeho přijetím. Jelikož dochází k odrazu paprsku od povrchu, je získaný čas roven dvojnásobné vzdálenosti. Přesnost těchto senzorů odpovídá

přesnosti změřeni času t . Tento druh skenerů umožňuje za každou sekundu změřit vzdálenost 10 000 ~ 100 000 bodů (Ebrahim, 2015). Vzdálenost skeneru od povrchu skenovaného objektu je vypočtena vzorcem

$$s = c \cdot \frac{t}{2}, \quad (1.1)$$

kde c je rychlost světla,

t – doba mezi odesláním a přijetím paprsku.

Fázový posun

Vzdálenost povrchu skenovaného objektu odpovídá fázovému posunu vyslaného a přijatého signálu s určitou vlnovou délkou. Maximální změřitelná vzdálenost je dána polovinou modulační vlnové délky. Při použití vysokofrekvenční modulace lze dosáhnout velmi přesného měření vzdáleností, ale s menším rozsahem. Pokud se provádí skenování nad maximální rozsah, tak dochází k periodickým změnám fáze. V porovnání se skenery využívající metodu Time of Flight je tato metoda rychlejší, ale získaný výsledek obsahuje více šumu. Další nevýhodou může být měřicí rozsah skenerů, který je pro metodu Time of Flight udáván 200 až 300 m a pro metodu fázového posunu 70 až 80 m (Ebrahim, 2015).

Triangulace

Princip metody spočívá v nasvícení skenovaného objektu světelným paprskem, nejčastěji laserem. Světelný paprsek se odráží od objektu ke snímači, na kterém je zobrazen světelný bod. Pozice bodu se mění podle vzdálenosti objektu od skeneru. Metoda byla pojmenována jako triangulace, protože zdroj světelného paprsku, objekt a snímač tvoří trojúhelník. Vzdálenost mezi zdrojem světla a snímačem a úhel zdroje světla jsou známy. Naopak úhel u CCD snímače je dán polohou skenovaného objektu. Pro výpočet souřadnice z je využit triangulační trojúhelník s parametry udávanými výrobcem kamery. Pro zrychlení doby skenování se využívá laserový pruh.

Ve většině případů je pro skenování využita jedna technologie, ale dochází také ke kombinaci těchto technologií. Příkladem bezkontaktních aktivních skenerů jsou laserové skenery, skenery se strukturovaným optickým světlem a skenery s modulovaným světlem. Skenery s modulovaným světlem fungují na principu změny amplitudy sinusového signálu. Podle posunu signálu je definována uražená vzdálenost světla. Mezi výhody modulovaného světla patří ignorování světla z jiných zdrojů. Skenery využívající strukturované světlo

promítají na skenovaný objekt obrazce, čímž může být mřížka nebo pruhový vzor. Následně je sledována deformace promítaného obrazce. Skenování je provedeno kamerou a výpočet vzdálenosti ke každému bodu je proveden algoritmem. Hlavní výhodou je rychlost skenování, protože dochází ke skenování více bodů v jednom okamžiku, bez nutnosti pohybu kamery (Ebrahim, 2015).

1.1.3 Nekontaktní pasivní skenery

Oproti aktivním skenerům neobsahují zdroj záření, ale využívají odražené okolní záření. Většina skenerů využívá k detekci viditelné světlo, protože se jedná o nejdostupnější typ záření. Mezi často využívané skenery patří:

Stereoskopické skenery

Princip spočívá v použití dvou kamer pro sledování stejného prostoru. Analýzou rozdílů mezi výslednými obrazy z kamer je určena vzdálenost v každém bodě obrazu.

Fotometrické skenery

Fotometrické skenery skenují požadovaný objekt za různých světelných podmínek. Invertují model tvorby obrazu za účelem získání orientace bodů na povrchu skenovaného objektu.

Skenery siluet

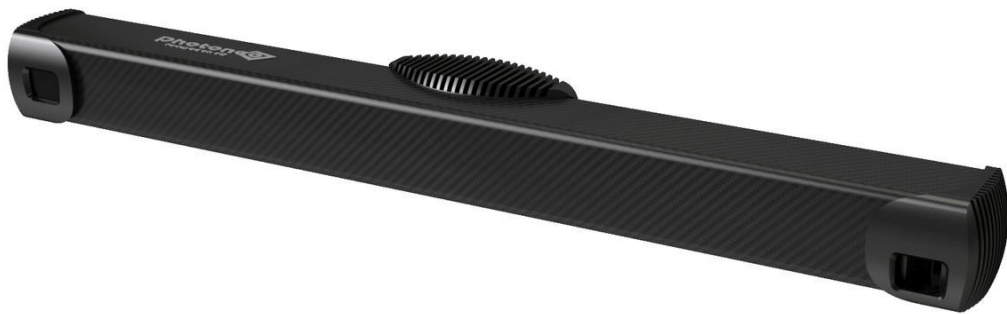
Skenery skenují objekt umístěný na kontrastním pozadí z různých stran. Výsledné siluety se vzájemně umísťují, aby vytvořily vizuální aproximaci objektu (Ebrahim, 2015).

1.2 PŘÍKLADY 3D SKENERŮ

3D skenery jsou vyráběny mnoha výrobci. V této podkapitole se nacházejí nabízené produkty od výrobců skenerů použitých v praktické části diplomové práce.

1.2.1 Photoneo 3D skenery

Photoneo 3D skenery patří do skupiny nekontaktních, reflexních, optických skenerů, využívajících projekci strukturovaného světla. Geometrie povrchu je získána ve formě hloubkové mapy nebo bodového mračka pomocí jednoho nebo více projekcí strukturovaného světla.



Obr. 1.2 – PhoXi 3D Scanner L (Sodavision, 2021)

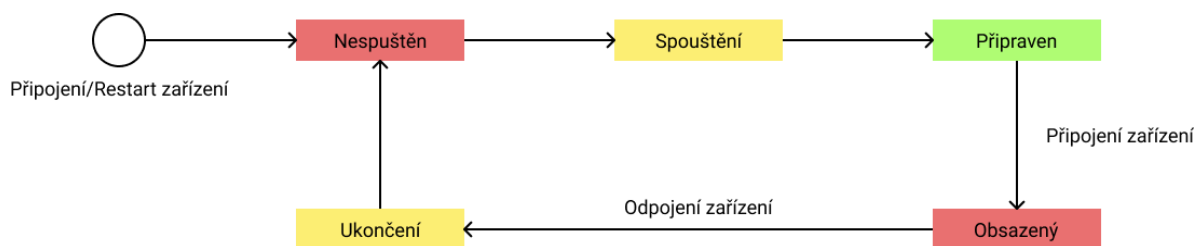
Skenovací proces je rozdělen na zachycení dat, zpracování dat a přenos dat. Po dokončení skenování objektu dochází k výpočtu všech viditelných bodů na povrchu a k následnému odeslání dat přes ethernetové spojení uživateli (Photoneo, 2020b). Firma Photoneo nabízí celkem pět modelů tohoto 3D skeneru (Photoneo, 2020b):

- **PhoXi 3D Scanner XS** – Skener umožňuje skenovat požadovanou oblast v rozsahu 161 až 205 mm s kalibrační přesností 0,035 mm.
- **PhoXi 3D Scanner S** – Skener umožňuje skenovat požadovanou oblast v rozsahu 384 až 520 mm s kalibrační přesností 0,05 mm.
- **PhoXi 3D Scanner M** – Skener umožňuje skenovat požadovanou oblast rozsahu 458 až 1118 mm s kalibrační přesností 0,1 mm.
- **PhoXi 3D Scanner L** – Skener umožňuje skenovat požadovanou oblast v rozsahu skenování 870 až 2150 mm s kalibrační přesností 0,2 mm. Vzhled skeneru je zobrazen na obr. 1.2.
- **PhoXi 3D Scanner XL** – Skener umožňuje skenovat požadovanou oblast v rozsahu 1680 až 3780 mm s kalibrační přesností 0,5 mm.

Aplikace PhoXi Control

Aplikaci PhoXi Control lze nainstalovat na zařízení s operačním systémem Windows 7/10, Ubuntu 14/16. Ovládání Photoneo skenerů je provedeno pomocí uživatelského grafického rozhraní nebo pomocí programu využívající API. Po zapnutí aplikace je otevřeno okno Network Discovery, ve kterém se nachází seznam všech dostupných zařízení v síti. U každého zařízení jsou uvedeny informace o jeho názvu, ID, statusu, IP adrese, portu a jeho verzi. Zařízení se mohou nacházet v jednom z pěti stavů zobrazených na obr. 1.3. Jedná se o stavy:

- **Nespuštěn (Not started)** – Zařízení se nachází v tomto stavu po jeho připojení k napájení nebo restartu. Po určitém čase dojde ke změně statusu na Spouštění.
- **Spouštění (Starting)** – Zařízení spouští jeho provozní aplikaci, po určitém čase dojde ke změně statusu na Připraven.
- **Připraven (Ready)** – Zařízení je připraveno k připojení.
- **Obsazený (Occupied)** – Zařízení je již připojeno k jinému zařízení.
- **Ukončení (Terminating)** – Zařízení ukončuje spojení na základě požadavku o odpojení. Po určitém čase dojde ke změně statusu na Spuštění a Připraven.



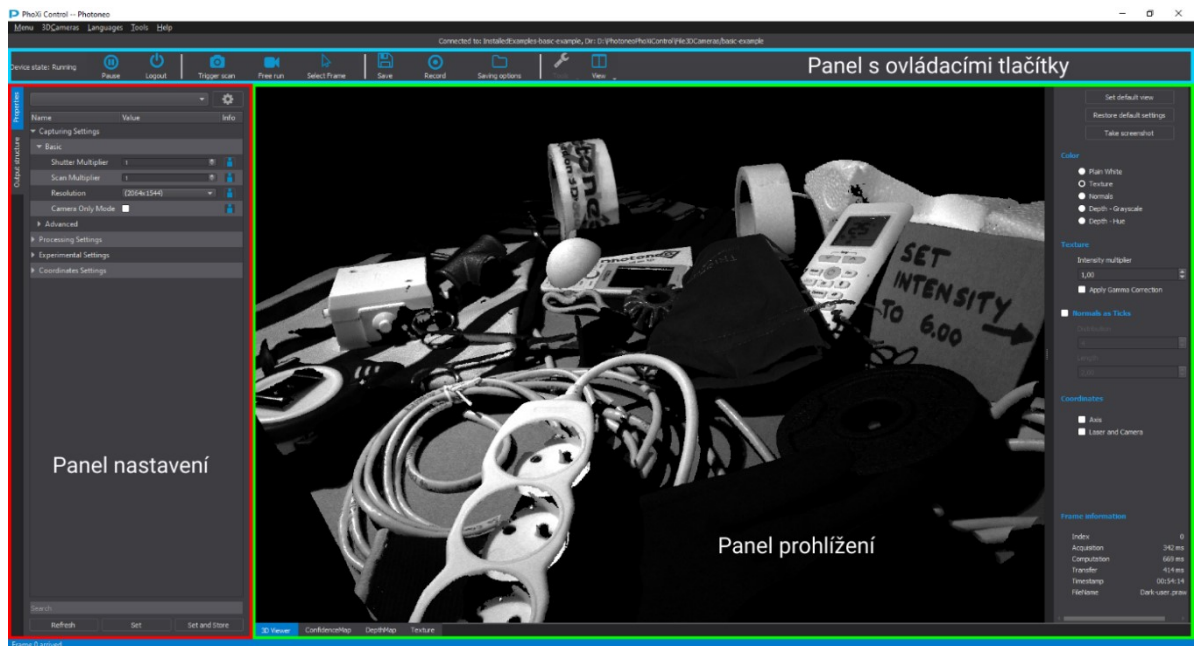
Obr. 1.3 – Stavy PhoXi 3D skenerů (Photoneo, 2020)

Po připojení zvoleného zařízení je otevřeno nové okno zobrazené na obr. 1.4 s názvem Device Window. Okno lze rozdělit na tři panely:

- **Panel s ovládacími tlačítky**

Panel s ovládacími tlačítky obsahuje informaci o stavu zařízení, tlačítko pro pozastavení snímání a tlačítko pro odpojení od zařízení. Dále tlačítko Trigger scan sloužící k aktuálnímu oskenování požadované plochy a režim volného chodu. V režimu volného chodu je prováděno s maximální rychlostí po sobě jdoucí skenování. Tlačítko Save umožňuje uživateli vybrat, zda požaduje získané skeny ukládat automaticky nebo zda je bude ukládat manuálně. Při ukládání skenu je umožněno nastavit typ formátu souboru. Jedná se o formát Photoneo Raw ukládající informaci o skeneru, parametry použité při skenování, bodové mračno, normály bodů, texturu,

hloubkovou mapu a konfidenční data. Mezi další formáty patří ply, ptx a tif, obsahující pouze vybraný druh dat, obvykle se jedná o mračno bodů, normály a texturu (Photoneo, 2020a).



Obr. 1.4 – Panely v aplikaci PhoXi Control (Photoneo, 2020)

- **Panel nastavení**

Panel nastavení obsahuje čtyři záložky, pomocí kterých lze nastavit parametry skenování. První záložkou je Nastavení snímání (Capturing settings), které obsahuje volbu nastavení parametrů skenování, např. změnu doby expozice nebo metodu promítání světelných zdrojů. Druhou záložkou je Nastavení zpracování (Processing settings), obsahující parametry pro zpracování, například filtraci a výpočet bodového mračna. Ve třetí záložce Experimentální nastavení se nachází pokročilá nastavení, která se používají ve speciálních případech. Čtvrtá záložka Nastavení souřadnic (Coordinate settings) umožňuje definovat souřadný systém (Photoneo, 2020a).

- **Panel prohlížení**

Panel prohlížení zobrazuje výstup skenu v různých podobách. Jedná se o 3D bodové mračno, konfidenční mapu, hloubkovou mapu a texturu. Pro každý pohled jsou v pravém sloupci zobrazeny informace o skenu, případně možnosti zobrazení os, normál a barevných rozložení (Photoneo, 2020a).

API

S PhoXi Control je dodána dokumentace a vzorové programy, pomocí kterých lze vytvořit vlastní C++ nebo C# aplikaci komunikující s PhoXi 3D skenerem. Dokumentace a vzorové programy jsou umístěny pro operační systém Windows v adresáři Program Files/PhotoneoPhoXiControl/API a pro operační systém Linux v adresáři /opt/PhotoneoPhoXiControl/API (Photoneo, 2020a).

1.2.2 Intel RealSense kamery

Kamery pojmenované jako Intel RealSense jsou vyrobeny firmou Intel a využívají technologii pojmenovanou jako RealSense. Tato technologie byla vytvořena za účelem přidání strojového vidění do různých oblastí, jako je například robotika, 3D skenování, sledování skeletonu a lidí, drony, měření objektů a identifikace obličeje. Nabízené produkty jsou rozděleny podle způsobu použití, a to na LiDAR, Stereo depth, Tracking a Coded light (Intel Realsense, 2021a).

LiDAR

Označení kamer LiDAR vychází z anglických slov Light Detection and Ranging. Vzdálenost k objektům a cílům je měřena kombinací laserového světla a přijímačů. Kamery s tímto označením vynikají vysokým rozlišením a energetickou úsporností. Ke skenování využívají miniaturní zrcadlo MEMS. Jediným zástupce této kategorie je kamera vyobrazená na obr. 1.5 s označením L515. L515 umožňuje generovat 23 milionů přesných hloubkových bodů za sekundu (Intel Realsense, 2021b)



Obr. 1.5 – Intel Realsense LiDAR L515 (Intel Realsense, 2021b)

Stereo depth

Firma Intel nabízí ve skupině Stereo depth čtyři typy kamer. Kamery lze použít ve vnitřních a venkovních prostorech za různých světelných podmínek. Kamera obsahuje implementovaný procesor Intel RealSense Vision Processor D4 zajišťující výpočty hloubky. Mezi výhody tohoto typu kamer patří jednoduchá nastavitelnost, přesnost a vysoké hloubkové rozlišení. Nabízené kamery mají označení D455, D435i, D435 a D415. Vzhled kamery s označením D415 je na obr. 1.6. Pro aplikace požadující velkou přesnost je doporučováno využít kameru s označením D415 s roletou. Pokud se aplikace pohybuje nebo je umístěna ve venkovním prostředí, je doporučována kamera s označením D435 nebo D435i obsahující systém globální závěrky. Pro aplikace vyžadující dlouhý dosah je doporučována kamera označená D455 vybavená širokým zorným polem a systémem globální závěrky (Intel Realsense, 2021c).



Obr. 1.6 – Intel Realsense Depth Camera D415 (Intel Realsense, 2021c)

Coded light

Coded light kamery jsou navrženy pro aplikace umístěné ve vnitřních prostorech s krátkým dosahem. Princip výpočtu hloubky a povrchové analýzy spočívá v promítání známého vzoru na scénu a následným vyhodnocením deformace vzoru. Pro získání jemnějších detailů jsou promítané vzorce měněny a celkový výsledek je složen z více hloubkových obrazů. Skenery jsou často využívány v aplikacích zahrnujících analýzu nebo sledování obličeje, skenování a mapování objektů, sledování rukou nebo prstů. V nabízené kategorii se nachází kamera s označením SR305 zobrazená na obr. 1.7 a modul SR300 (Intel Realsense, 2021d).



Obr. 1.7 – Intel Realsense Depth Camera SR305 (Intel Realsense, 2021d)

Tracking

Tracking kamery poskytují informaci o absolutní a relativní pozici objektu, která je vyžadována v problematice navigace objektu v prostředí. Kamery jsou velmi často použity pro roboty a drony. V nabídce se nachází kamera s označením T265 a model T261. Kamera T265 je vhodná pro aplikace, ve kterých je kladen důraz na malé rozměry, nízkou spotřebu energie, přesnou lokalizaci a mapování (Intel Realsense, 2021e).

Intel RealSense Software

Pro práci s Intel RealSense kamerami je vytvořeno multiplatformní SDK, který je možné stáhnout z bezplatného webhostingu Github. SDK obsahuje aplikaci Intel RealSense Viewer sloužící k nastavení parametrů kamery, zobrazení a zaznamenání výstupu z kamery. Další aplikací je Depth Quality Tool, sloužící jako test hloubkové kvality. Dále obsahuje nástroje pro ladění kamery, příklady kódů pro tvorbu vlastní aplikace a wrapperů (Intel Realsense, 2020).

1.2.3 Basler kamery

Výrobce Basler nabízí průmyslové a síťové kamery vhodné pro různé druhy aplikací. Kamery lze použít například v průmyslové automatizaci, dopravních systémech, lékařství a biologické vědě. Produkty jsou rozděleny podle způsobu použití. Jedná se o kamery skenující oblast, obrazová data postupně po řádku, IP kamery, 3D kamery, kamery pro lékařství a biologické vědy a mikroskopické kamery. 3D kamery Basler Blaze a Basler ToF pracují na principu Time of Flight. Příkladem kamery Basler ToF je kamera označená jako 640_20gm

zobrazená na obr. 1.8. Výstupem z těchto 3D kamer jsou 2D a 3D data pořízená jedním snímkem. Hlavním rozdílem mezi těmito skenery je použitý senzor. U kamery Basler Blaze je použit senzor vytvořený technologií DepthSense společností Sony a u kamery Basler ToF je použit CCD senzor vytvořený firmou Panasonic. Basler Blaze má oproti kameře Basler ToF o 3 metry menší pracovní rozsah, větší snímkovou frekvenci, větší zorné pole a větší přesnost (Basler, 2021).



Obr. 1.8 – Basler ToF640_20gm (Basler, 2018)

Basler ToF Viewer software

Pro ovládání 3D skenerů od firmy Basler slouží aplikace Basler ToF. Aplikaci je možné nainstalovat na operační systém Linux a Windows. Po spuštění programu ToF viewer je kamera zobrazena v rozbalovacím menu, pokud není zobrazena, jedná se pravděpodobně o problém s IP adresou. Problém s IP adresou lze vyřešit softwarem ToF IP configurator. V aplikaci ToF Viewer lze v levém sloupci změnit parametry připojené kamery, v pravé části aplikace nastavit velikost a formát zobrazených výstupních data. Výstupní data jsou zobrazena ve tvaru bodového mračka, konfidenční mapy, obrazu intenzity a mapy rozsahu (Basler, 2018).

1.3 VÝSTUPNÍ DATA 3D SKENERŮ

3D skenování poskytuje nestrukturovaná trojrozměrná data, která jsou většinou ve tvaru bodového mračka nebo trojúhelníkové sítě. V případě potřeby lze použít skenery, které umožňují získávat barevné informace (3DSCAN, 2020).

1.3.1 Bodové mračno

Bodové mračno anglicky označováno jako Point Cloud, je datová struktura využívána k reprezentaci vícerozměrných dat, nejčastěji trojrozměrných. Body jsou definovány v prostoru souřadnicovým systémem X, Y, Z a mohou dále obsahovat další informace např. RGB barvu a směr normály. Datová struktura bývá uložena s příponou *.dxf, *.igs, *.asc, *.vtx, *.wrl a *.obj. Mračno bodů může být zapsáno jako matice (3DSCAN, 2020)

$$M = \begin{bmatrix} C_{1x} & C_{1y} & C_{1z} \\ C_{2x} & C_{2y} & C_{2z} \\ C_{3x} & C_{3y} & C_{3z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad (1.2)$$

kde C je souřadnice bodu nacházející se v bodovém mračnu.

1.3.2 Polygonová síť

Ze získaných dat jsou nejprve definovány spojením dvou vrcholů hrany. Plochy neboli mnohoúhelníky vznikají spojením tří hran. Polygonová síť se poté skládá z ploch, které na sebe navazují. Pomocí doplňujících dat z povrchů, lze z několika ploch vytvářet relativně kulaté plochy. Pro ukládání polygonové sítě jsou využívány přípony *.stl a *.obj (Hyvärinen, 2012).

1.3.3 Obraz intenzity

Obraz intenzity zobrazuje světelnost odražených světelných pulsů, která slouží pro nalezení podsaturevaných a přesaturevaných pixelů (Basler, 2018).

1.3.4 Konfidenční mapa

Konfidenční mapa zobrazuje, do jaké míry jsou spolehlivá získaná hloubková data v obrazu. Čím je světlejší pixel v konfidenční mapě, tím se jedná o přesnější měření (Basler, 2018).

1.3.5 Hloubková mapa

Pomocí jednotlivých bodů v hloubkové mapě dochází k popisu vzdálenosti mezi senzorem a skenovanými body. Vzdálenost bodů je v mapě zobrazena intenzitou daného pixelu (Photoneo, 2020a).

1.4 VYUŽITÍ 3D SKENERŮ

3D skenery nacházejí uplatnění v mnoha různých oborech. Ve výrobních procesech je 3D kamera implementována například v aplikacích, ve kterých dochází k detekci objektů, detekci chybějících komponentů, přemístění objektů, kontrolování kvality objektu, měření vzdálenosti, balení nebo odebírání výrobků z palet, identifikaci 3D znaků nebo montování dílů. Příkladem je technologie Bin Picking, která využívá 3D kameru k výběru požadovaných dílů ze zásobníku a pro přesný bezkolizní pohyb robota (Photoneo, 2021).

3D skenery se velmi často využívají i pro dokumentaci archeologických památek, tvorbu digitálních replik objektů a rekonstrukci památek. Dále se využívají ve zdravotnickém průmyslu pro vytvoření kompletního skenu těla pacienta, předoperačních a pooperačních skenů a pro výrobu implantátů, ortéz a protéz. 3D skenery byly implementovány i do oboru kriminalistiky, kde se využívají pro zachycení místa trestného činu. Ze získaných dat se vytvářejí simulace a scénáře trestných činů (Kivolya, 2019). V reverzním inženýrství je 3D skener využíván za účelem výroby nového objektu, designu nebo analýzy součásti (SolidVision, 2020).

2 ZPRACOVÁNÍ BODOVÉHO MRAČNA ZE SKENERŮ

Výstupní data ze skenerů jsou modifikována a použita takovým způsobem, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků.

2.1 FILTRACE DAT

Aby byla při práci s daty ze skenerů získána co největší přesnost, je vhodné na data aplikovat filtry. Filtry z dat odstraní šum, odlehlé nebo nepotřebné hodnoty (Ruchay, 2018).

2.1.1 Pass Through filtr

Filtr z bodového mračna odstraňuje neurčité body a body nacházející se mimo zadaný interval pro zvolenou dimenzi. Tímto způsobem lze z bodového mračna odstranit body, nacházející se mimo oblast zájmu (Moreno, 2017).

2.1.2 Statistical Outlier Removal filtr (SOR)

Filtr provádí statistickou analýzu na okolí všech bodů v bodovém mračnu a následně hodnotí, zda daný bod splňuje zadaná kritéria. Princip spočívá ve vypočítání střední hodnoty vzdálenosti od bodu p z bodového mračna \mathbf{P} k jeho k -nejbližším sousedům. Po provedení výpočtu na všechny body v bodovém mračnu \mathbf{P} je z výsledných hodnot vypočtena střední hodnota μ_k a směrodatná odchylka σ_k . Výstupem z tohoto filtru je množina bodů \mathbf{P}_{SOR} obsahující body, které byly zachovány. Množina zachovaných bodů je vypočtena vzorcem

$$\mathbf{P}_{\text{SOR}} = \{p \in \mathbf{P} \mid \mu_k - \alpha \cdot \sigma_k \leq \bar{d}_k \leq \mu_k + \alpha \cdot \sigma_k\}, \quad (2.1)$$

kde μ_k je střední hodnota bodového mračna,

α – parametr určující úroveň filtrace,

σ_k – směrodatná odchylka bodového mračna,

\bar{d}_k – střední vzdálenost z bodu p k jeho k -sousedům.

Pokud střední hodnota vzdálenosti bodu p ke všem sousedům neleží v intervalu spolehlivosti střední hodnoty μ_k , je bod považován za odlehlý a je odstraněn (Minto, 2014).

2.1.3 Radius Removal filtr (ROR)

Radius Removal filtr testuje podle vytvořeného kruhu o zadaném průměru okolí všech bodů v bodovém mračnu. Pokud se pro daný bod ve vytvořeném kruhu nenachází dostatečný počet bodů, je považován za odlehlý a je odstraněn (Minto, 2014).

2.1.4 Voxel Grid filtr (VG)

Voxel Grid filtr rozděluje vstupní bodové mračno pomocí 3D voxelové mřížky, která odpovídá kvádrům nebo krychlím v 3D prostoru. Po rozdělení do voxelů dochází k nahrazení všech bodů nacházejících se uvnitř voxelu jedním bodem. Tento bod odpovídá středu voxelu nebo těžišti bodů uvnitř voxelu. Hlavní nevýhodou filtru je možná ztráta geometrické informace (Ruchay, 2018).

2.1.5 3D Geometric Bilateral filtr (3D GBF)

Princip 3D geometrického bilaterálního filtru spočívá ve vypočítání hodnoty voxelu, odpovídající váženému průměru bodů nacházejících se v daném voxelu. Mezi hlavní výhody této metody patří možnost redukce šumu přímo ze vzorkovaných bodů během rekonstrukce, zachování ostrých rysů a redukce dat vedoucí k rychlejší rekonstrukci.

V prvním kroku rekonstrukčního procesu jsou body v bodovém mračnu zařazeny do voxelů, na které je následně aplikován Geometrický bilaterální filtr. Následně jsou stanoveny body, které popisují povrch a z nich je rekonstruován mesh. Popsaný princip se nazývá Hierarchical Space Decomposition.

Pro každý voxel je vypočítána pozice bodu s odpovídající těžišti všech bodů nacházejících se v daném voxelu. Pro každý bod ve voxelu je vypočítána relativní vzdálenost k těžišti, která se následně využívá pro ohodnocení bodů. Výstup Geometrického bilaterálního filtru pro voxel V je definován jako (Miropolsky, 2004)

$$I_s = \frac{\sum_{p \in V}^n f[d(p, s)] \times g[\delta(N_p, N_s)] \times I_p}{\sum_{p \in V}^n f[d(p, s)] \times g[\delta(N_p, N_s)]}, \quad (2.2)$$

kde p je index oskenovaného bodu nacházející se ve voxelu V ,

s – index těžiště,

n – počet bodů nacházejících se ve voxelu V ,

V – 3D voxel,

I_s – prostorové umístění reprezentativního bodu ve voxelu,

I_p – prostorové umístění vzorkovaného bodu ve voxelu,
 $f()$ – funkce stanovující ohodnocení bodu na základě vzdálenosti k těžišti,
 $g()$ – funkce odkazuje na podobnost mezi normálou bodu p a normálou těžiště s ,
 N_p – povrchová normála v bodě p ,
 N_s – normála těžiště s ,
 $d(p, s)$ – Euklidovská vzdálenost mezi bodem p a těžištěm s ,
 $\delta(N_p, N_s)$ – skalární součin normálových vektorů.

2.2 REGISTRACE BODOVÉHO MRAČNA

Cílem registračních algoritmů je najít shodu a vypočítat transformaci mezi dvěma nebo více bodovými mračny. Pánové Myronenko a Song (Myronenko, 2009) udávají, že registrační algoritmy by měly splňovat následující parametry:

- umět pracovat s vícerozměrnými množinami bodů,
- být robustní vůči šumu, odlehlým a chybějícím bodům,
- s přijatelnou výpočetní složitostí vypočítat přesnou transformaci.

Transformaci lze rozdělit na dva typy, a to na tuhou (rigid) a pružnou (non-rigid). Tuhá transformace je vytvořena posunem, rotací a změnou měřítka. Naopak jednoduchá pružná transformace je afinní, umožňující anizotropní změnu měřítka a zešikmení. Z důvodu velkého počtu parametrů pružné transformace jsou tyto registrační algoritmy většinou citlivé na šum, odlehlé body a mohou konvergovat do lokálního minima. Také u nich lze předpokládat vysokou výpočetní náročnost. Většina vytvořených registračních algoritmů obsahuje nástroje pro práci s 2D a 3D daty. Pro práci s vícerozměrnými daty je třeba registrační algoritmy upravit (Myronenko, 2009).

2.2.1 Iterative Closest Point algoritmus (ICP)

Z důvodu jednoduchosti a nízké výpočetní složitosti je často pro rigidní bodovou registraci využíván Iterative Closest Point algoritmus. Algoritmus představili Paul J. Besl a Neil D. McKay v publikaci (Besl, 1992). Algoritmus lze využít pro 2D a 3D data. Pro správnou funkci algoritmu je požadováno, aby byly obě bodové sady dostatečně blízko (Myronenko, 2009).

Vstupními parametry algoritmu jsou dvě bodová mračna. Jedná se o naměřená data \mathcal{S} s délkou N_S a model \mathcal{M} o délce N_M . Cílem algoritmu je vypočítat takovou matici rotace \mathbf{R}

a translační vektor t , aby po jejich aplikaci na naměřená data \mathcal{S} byla splněna zadaná přesnost mezi bodovými mračny. Algoritmus se skládá z následujících kroků (Procházková, 2018):

1. Inicializace

2. Hledání nejbližších bodů

Pro každý bod modelu M je hledán nejbližší bod z bodového mračna \mathcal{S} . Toto hledání je provedeno výpočtem euklidovské vzdálenosti mezi body

$$d_i = \min \left\{ \sqrt{m_i^2 - s_j^2} \right\}, j = 1, \dots, N_S, \quad (2.3)$$

kde m_i je bod z modelu M ,

s_j – bod z bodového mračna \mathcal{S} ,

N_S – počet bodů v bodovém mračnu \mathcal{S} .

Pokud je dvojice bodů od sebe vzdálena více, než je limitem povoleno, dochází k jejich odstranění.

3. Přidání váhy k nalezené dvojici bodů

Pro nalezené body je nastavena váha $w_{ij} = 1$, pro ostatní $w_{ij} = 0$.

4. Vypočítání rotační matice R a translačního vektoru t

Pro výpočet matice rotace R a translačního vektoru t je využíván singulární rozklad (SVD). Pro využití této metody je nejprve nutné vypočítat těžiště bodového mračna M vzorcem

$$c_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i, \quad (2.4)$$

kde m_i je bod z modelu M ,

N – počet bodů v modelu M

a těžiště bodového mračna \mathcal{S} vzorcem

$$c_S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, \quad (2.5)$$

kde s_i je bod z bodového mračna \mathcal{S} ,

N – počet bodů v bodovém mračnu \mathcal{S} .

V následujícím kroku dochází k zarovnání bodů bodového mračna M dle vypočteného těžiště vzorcem

$$M' = \{m'_i = m_i - c_M\}_{1, \dots, N}, \quad (2.6)$$

kde m_i je bod z modelu M ,
 c_M – těžiště modelu M ,
 N – počet bodů v modelu M ,

a k zarovnání bodů bodového mračna S vzorcem

$$S' = \{s'_i = s_i - c_S\}_{1,\dots,N}, \quad (2.7)$$

kde s_i je bod z modelu S ,
 c_S – těžiště bodového mračna S ,
 N – počet bodů v bodovém mračnu S .

Pro zarovnaná bodová mračna je vypočtena kovarianční matice H dle vzorce

$$H = M' S'^T, \quad (2.8)$$

kde H je matice o rozměrech $m \times n$,
 M' – zarovnané bodové mračno modelu M ,
 S' – zarovnané bodové mračno skenu S .

Singulární rozklad matice H je proveden rovnicí

$$H = U \Lambda V^T, \quad (2.9)$$

kde U je ortogonální matice o rozměrech $m \times m$,
 V – matice o rozměrech $n \times n$,
 Λ – diagonální matice o rozměrech $m \times n$.

Matice rotace R je vypočtena vzorcem

$$R = V U^T, \quad (2.10)$$

kde U je ortogonální matice o rozměrech $m \times m$,
 V – matice o rozměrech $n \times n$.

Translační vektor t je vypočten vzorcem

$$t = c_S - R c_M, \quad (2.11)$$

kde c_S je těžiště bodového mračna S ,
 R – rotační matice,
 c_M – těžiště modelu M .

5. Výpočet transformace bodového mračna \mathcal{S}

Transformace bodového mračna \mathcal{S} je vypočtena z rotační matice \mathbf{R} a translačního vektoru \mathbf{t} dle vzorce

$$s_j = \mathbf{R}s_j + \mathbf{t}, \quad (2.12)$$

kde s_j je bod z bodového mračna \mathcal{S} ,

\mathbf{R} – rotační matice,

\mathbf{t} – translační vektor.

6. Výpočet chyby

V posledním kroku je vypočtena chyba mezi bodovým mračnem modelu \mathcal{M} a bodovým mračnem \mathcal{S} dle vzorce

$$E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^{N_S} \omega_{ij} \|m_i - (\mathbf{R}s_j + \mathbf{t})\|^2, \quad (2.13)$$

kde ω_{ij} je váha bodu,

m_i – bod z modelu \mathcal{M} ,

\mathbf{R} – rotační matice,

s_j – bod z bodového mračna \mathcal{S} ,

\mathbf{t} – translační vektor.

Tyto kroky se opakují do doby, než je dosaženo požadované přesnosti. Nevýhodou základní verze algoritmu je konvergování k lokálnímu minimu a doba výpočtu výsledné transformace. V případě, že pozice vstupních dat budou od sebe znatelně vzdálena, je možné, že dojde k výpočtu nesprávné transformace. Nevýhody tohoto algoritmu jsou řešeny různými úpravami jednotlivých částí algoritmu (Procházková, 2018):

1. Implementace K-D stromu

Použitím K-D stromu dochází ke zrychlení výpočetní doby ICP algoritmu až desetinásobně (Procházková, 2018).

2. Indikace odpovídajících bodů

Snížení výpočetní doby ICP algoritmu je provedeno upravením způsobu výběru odpovídajících bodů. Odpovídající body jsou vybírány rovnoměrným nebo náhodným vzorkováním bodů. Nevýhodou této úpravy je, že pokud data obsahují šum nebo velká zakřivení, nemusí být vybrány vypovídající body. Řešením tohoto problému je detekce odpovídajících bodů podle jejich normál (Procházková, 2018).

3. Způsob hodnocení míry shody

Výpočet vzdálenosti mezi body je zrychlen nahrazením euklidovské vzdálenosti jinou metodou. Tím může být normálová metoda, která vypočítává vzdálenost bodu od roviny. Nevýhodou normálové metody je, že není tak robustní. Místo euklidovské vzdálenosti lze využít i metodu SIFT nebo metodu, která promítá body z jednoho bodového mračka do druhého. Pro výpočet vzdálenosti mezi body je také využívána Hausdorffova vzdálenost (Procházková, 2018).

4. Vážení bodů

Aby algoritmus ICP vrátil lepší výsledky, doporučuje se do výpočtu váhy bodů w_{ij} zavést jejich vzájemnou vzdálenost. Upravená váha bodů je vypočtena vztahem

$$w_{ij} = 1 - \frac{\text{dist}(p_1, p_2)}{\text{dist}_{\max}}, \quad (2.14)$$

kde p_1 je bod z prvního bodového mračka,

p_2 – bod z druhého bodového mračka,

$\text{dist}()$ – funkce počítající vzdálenost mezi body,

dist_{\max} – největší vzdálenost ze všech odpovídajících dvojic bodů.

Váhu bodů lze také vypočítat na základě směru normálových vektorů zkoumaných bodů. V případě, že je směr obou normálových vektorů bodů rovnoběžný, je jejich hodnota skalárního součinu velká. Naopak s rostoucím úhlem mezi normálovými vektory hodnota skalárního součinu klesá. Výpočet váhy je proveden vzorcem (Procházková, 2018)

$$w_{ij} = \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2, \quad (2.15)$$

kde \mathbf{n}_1 je normálový vektor prvního bodu,

\mathbf{n}_2 – normálový vektor druhého bodu.

5. Korespondence mezi body

Aby nedocházelo k nevhodnému zarovnání skenů, je doporučeno z bodových mraček odstranit korespondující body, které jsou od sebe vzdáleny více, než je maximální limit. Další možností je odstranit procento bodů dle zvolené metriky, dvojici bodů, jejichž vzdálenost je větší než zadaný násobek směrodatné odchylky (Procházková, 2018).

2.2.2 Normal Distribution Transform (NDT)

Algoritmus nejprve představili v publikaci (Biber, 2003) autoři Peter Biber a Wolfgang Strasser pro 2D data. Následně byl v publikaci (Magnusson, 2013) Martinem Magnussonem

upraven tak, aby umožňoval práci s 3D daty. Na rozdíl od jiných metod využívá pro registraci lokální Gaussovo rozdělení bodů a k reprezentaci hustotu pravděpodobnosti. Postup se skládá z následujících kroků (Zaganidis, 2017):

1. Vytvoření voxelů

Vstupními parametry algoritmu je bodové mračno M , bodové mračno F a velikost voxelů. Vstupní data jsou rozdělena na voxely a na body uvnitř voxelů, je aplikováno Gaussovo rozdělení. Tímto krokem jsou vytvořeny množiny s Gaussovým rozdělením G_F a G_M .

2. Výpočet těžiště bodů a kovarianční matice

Těžiště bodů ve všech voxelech je vypočteno vzorcem

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i, \quad (2.16)$$

kde n je počet bodů v buňce mřížky,
 u_i – bod nacházející se v buňce mřížky.

Následně je pro každý voxel vypočtena kovarianční matice vzorcem

$$\mathbf{C}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \mu_i)(u_i - \mu_i)^T, \quad (2.17)$$

kde n je počet bodů v buňce mřížky,
 u_i – bod nacházející se v buňce mřížky,
 μ_i – těžiště bodů v buňce mřížky.

3. Výpočet hustoty pravděpodobnosti

Hustota pravděpodobnosti voxelu i je vypočtena vztahem

$$p_i(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 |\mathbf{C}_i|}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_i)^T \mathbf{C}_i^{-1} (x-\mu_i)}{2}\right), \quad (2.18)$$

kde \mathbf{C}_i je kovarianční matice zkoumaného voxelu,
 x – bod nacházející se ve zkoumaném voxelu,
 μ_i – těžiště bodů zkoumaného voxelu.

4. Výpočet vzdálenosti mezi množinami s Gaussovským rozdělením

Vzdálenost mezi voxely je vypočtena rovnicí

$$\text{dist}(i, j) = -d_1 \exp\left(-\frac{d_2}{2} \mu_{ij}^T (\mathbf{R}^T \mathbf{C}_i \mathbf{R} + \mathbf{C}_j)^T \mathbf{R} \mu_i + \mathbf{t} - \mu_j\right), \quad (2.19)$$

kde \mathbf{C}_i je kovarianční matice voxelu i ,
 \mathbf{C}_j – kovarianční matice voxelu j ,

μ_i – těžiště voxelu i ,
 μ_j – těžiště voxelu j ,
 d_1 – regularizační koeficient,
 d_1 – regularizační koeficient,
 d_2 – regularizační koeficient,
 \mathbf{R} – matice rotace,
 \mathbf{t} – translační vektor.

5. Výpočet transformace

Transformace \mathbf{T} je vypočtena minimalizací funkce

$$f(\mathbf{T}) = \sum_{i=1, j=1}^{|\mathbf{G}_M|, |\mathbf{G}_F|} \text{dist}(i, j), \quad (2.20)$$

kde \mathbf{G}_M je množina obsahující Gaussovo rozdělení voxelů bodového mračna \mathbf{M} ,
 \mathbf{G}_F – množina obsahující Gaussovo rozdělení voxelů bodového mračna \mathbf{F} .

K minimalizaci funkce $f(\mathbf{T})$ je použita Newtonova optimalizace (Zaganidis, 2017).

2.2.3 Coherent Point Drift (CPD)

Andriy Myronenko a Xubo Song představili tento algoritmus v publikaci (Myronenko, 2009). Algoritmus slouží k nalezení shody mezi dvěma bodovými množinami a obsahuje variantu pro tuhou a pružnou transformaci (Myronenko, 2009). Do algoritmu vstupuje množina bodů označená jako \mathbf{Y} o velikosti $m \times d$ a množina bodů \mathbf{X} s velikostí $n \times d$. Body nacházející se v množině \mathbf{Y} považujeme za těžiště smíšených Gaussovských modelů (GMM). Cílem algoritmu je nalézt transformaci \mathbf{T} a aplikovat ji na množinu bodů \mathbf{Y} . Pravděpodobnostní funkce hustoty GMM je vypočítána ze vzorce (Peng, 2016)

$$p(x) = \omega \frac{1}{n} + (1 - \omega) \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m p(x|k), \quad (2.21)$$

kde n je počet bodů v množině \mathbf{X} ,
 m je počet bodů v množině \mathbf{Y} ,
 ω – přibližný poměr odlehlých hodnot,
 $p(x|k)$ – Gaussovo rozdělení se středem v bodě $y_k \in \mathbf{Y}$.

Algoritmus se skládá z následujících kroků (Peng, 2016):

1. Inicializace

Nejprve jsou inicializovány parametry ω , θ a σ^2 . Nastavení parametrů je velice obtížné, nevhodná hodnota vede k nepředvídatelným výsledkům registrace.

2. E-krok

V tomto kroku dochází k odhadu předchozích hodnot parametrů a k výpočtu posteriorní hustoty pravděpodobnosti

$$P_{old}(m|x_n) = \frac{\exp\left(-\frac{\|x_n - T(y_m, \theta)\|^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{k=1}^m \exp\left(-\frac{\|x_n - T(y_k, \theta)\|^2}{2\sigma^2}\right) + \frac{\omega m (2\pi\sigma^2)^{\frac{d}{2}}}{(1-\omega)n}}, \quad (2.22)$$

kde n je počet bodů v množině X ,
 m je počet bodů v množině Y ,
 ω – přibližný poměr odlehlých hodnot,
 d – rozměr vstupních bodových množin,
 T – transformace,
 θ – soubor transformačních parametrů,
 σ^2 – izotropní kovariance.

3. M-krok

V tomto kroku jsou minimalizací logaritmické věrohodnostní funkce Q vypočteny nové hodnoty parametrů θ a σ^2 . Logaritmická věrohodnostní funkce je vypočtena vzorcem

$$Q(\theta, \sigma^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m P_{old}(m|x_k) \|x_k - T(y_j, \theta)\|^2 + \frac{dN_p}{2} \log \sigma^2, \quad (2.23)$$

$$N_p = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m P_{old}(m|x_k),$$

kde n je počet bodů v množině X ,
 m – je počet bodů v množině Y ,
 $P_{old}(m|x_n)$ – posteriorní hustota pravděpodobnosti,
 d – rozměr vstupních bodových množin,
 θ – soubor transformačních parametrů,
 T – transformace,
 σ^2 – izotropní kovariance.

4. Algoritmus opakuje E-krok a M-krok dokud logaritmická funkce Q konverguje

5. Výstup

Výstupem je bodové mračno definované jako

$$Y_r = T(Y, \theta), \quad (2.24)$$

kde T je transformace,

Y – vstupní množina bodů,

θ – soubor transformačních parametrů.

2.2.4 Robust Point Matching algoritmus (RPM)

Princip algoritmu RPM je velice podobný algoritmu EM. Do algoritmu vstupují dvě bodová mračna označená jako V a X . Je vypočítávána pružná transformace f , která umístí body z bodového mračna V do nové pozice. Cílem algoritmu je nalézt takovou transformaci bodového mračna V , která jej umístí co nejbližší k bodovému mračnu X . Tohoto je možné docílit velkým počtem různých transformací, proto je nutné zvolit vhodné omezení L , aby byly vybrány pouze ty požadované. Dále je vytvářena matice korespondujících bodů ze vstupních bodových mračen Z . Matice v prvním řádku obsahuje identifikační prvky všech bodů z bodového mračna X a v prvním sloupci identifikační prvky všech bodů z bodového mračna V . V posledním řádku a sloupci matice se nachází buňky pro identifikaci odlehlých bodů. Omezení zaručují, že korespondence může být definována pouze mezi dvěma body z různých bodových mračen. Jakmile je bod označen jako odlehlý, nemůže být tento bod jiným bodem označen jako odpovídající. Matice obsahuje pouze jedničky a nuly, jednička definuje, že body označené v odpovídajícím řádku a sloupci spolu korespondují. Příklad korespondující matice je zobrazen v tab. 2.1.

Tab. 2.1 – Příklad binární matice korespondujících bodů

z_{ai}	x_1	x_2	x_3	x_4	Odlehlý bod
v_1	1	0	0	0	0
v_2	0	1	0	0	0
v_3	0	0	0	0	1
Odlehlý bod	0	0	1	1	

Algoritmus využívá metodu softassign a deterministické žihání. Metoda softassign je využívána k převodu binární matice Z na matici spojitou M , protože řešení korespondencí pouze mezi dvěma body nemá smysl, pokud je transformace znatelně vzdálena od optimálního řešení. Tímto převodem vznikají částečné shody mezi body bodových mračen V a X . Řádková

a sloupcová omezení matice M jsou zajištěna iterativní sloupcovou a řádkovou normalizací. Příklad takto převedené matice Z z tab. 2.1 na matici M je uveden v tab. 2.2.

Tab. 2.2 – Příklad spojitě matice korespondujících bodů

z_{ai}	x_1	x_2	x_3	x_4	Odlehlý bod
v_1	0,90	0,03	0,03	0,03	0,01
v_2	0,03	0,90	0,03	0,03	0,01
v_3	0,03	0,03	0,03	0,03	0,88
Odlehlý bod	0,04	0,04	0,91	0,91	

Deterministické žihání je zajištěno teplotním parametrem T . V inicializaci je parametr T nastaven na hodnotu rovnou největší čtvercové vzdálenosti mezi všemi dvojicemi bodů. V průběhu algoritmu dochází k jeho postupnému lineárnímu snížení dle parametru určující rychlost žihání. Hodnota rychlosti žihání je obvykle nastavena na hodnotu 0,93, ale je možné zvolit hodnotu mezi 0,9 až 0,99. Pro odlehlé skupiny bodů je teplotní parametr ponechán na inicializační hodnotě. Proces žihání je ukončen v okamžiku, kdy teplotní parametr T odpovídá jeho koncové hodnotě. Koncová hodnota teplotního parametru odpovídá průměru čtvercové vzdálenosti mezi nejbližšími sousedy deformovaného bodového mračna. Algoritmus v procesu žihání obsahuje následující kroky (Chui, 2002):

1. Aktualizace korespondence bodů

Korespondence bodů mezi bodovými mračny X a V jsou vypočteny vzorcem

$$m_{ai} = \frac{1}{T} \exp \left(- \frac{(x_i - f(v_a))^T (x_i - f(v_a))}{2T} \right), \quad (2.25)$$

kde $f(v_a)$ je funkce pružné transformace,

x_i – bod z bodového mračna X ,

T – parametr teploty.

Korespondence mezi odlehlou skupinou bodů bodového mračna V a body bodového mračna X jsou vypočtena rovnicí

$$m_{K+1,i} = \frac{1}{T_0} \exp \left(- \frac{(x_i - v_{K+1})^T (x_i - v_{K+1})}{2T_0} \right), \quad (2.26)$$

kde v_{K+1} je odlehlá skupina bodů bodového mračna V ,

x_i – bod z bodového mračna X ,

T_0 – parametr teploty pro odlehlou skupinu bodů.

Korespondence mezi odlehlou skupinou bodů bodového mračna X a body bodového mračna V jsou vypočtena rovnicí

$$m_{a,N+1} = \frac{1}{T_0} \exp\left(-\frac{(x_{N+1}-f(v_a))^T(x_{N+1}-f(v_a))}{2T_0}\right), \quad (2.27)$$

kde x_{N+1} je odlehlá skupina bodů bodového mračna X ,
 $f(v_a)$ – funkce pružné transformace,
 T_0 – parametr teploty odlehlé skupiny bodů.

Na aktualizované korespondence je aplikován Sinkhornův algoritmus. Sloupcová normalizace je provedena vzorcem

$$m_{ai} = \frac{m_{ai}}{\sum_{b=1}^{K+1} m_{bi}}, \quad (2.28)$$

kde m_{ai} je korespondence mezi body bodového mračna X a V ,
 K – počet bodů v bodovém mračnu V ,
 i – číslo od 1 do počtu bodů v bodovém mračnu X .

Řádková normalizace je provedena vzorcem

$$m_{ai} = \frac{m_{ai}}{\sum_{j=1}^{N+1} m_{aj}}, \quad (2.29)$$

kde m_{ai} je korespondence mezi body bodového mračna X a V ,
 N – počet bodů v bodovém mračnu X ,
 a – číslo od 1 do počtu bodů v bodovém mračnu V .

Jelikož nedochází mezi iteracemi k velké změně odpovídajících bodů, je výsledná matice korespondencí z aktuálního kroku zvolena v následujícím kroku jako počáteční hodnota.

2. Aktualizace transformace

Transformace je vypočtena minimalizací energetické funkce

$$\min_f E(f) = \min_f \sum_{a=1}^K \left\| \sum_{i=1}^N m_{ai} x_i - f(v_a) \right\|^2 + \lambda T \|Lf\|^2, \quad (2.30)$$

kde m_{ai} je korespondence mezi body bodového mračna X a V ,
 x_i – bod z bodového mračna X ,
 $f(v_a)$ – funkce pružné transformace,
 λ – regularizační váhový parametr,
 K – počet bodů v bodovém mračnu V ,
 N – počet bodů v bodovém mračnu X ,
 L – parametr míry hladkosti.

RPM-TPS

Algoritmus RMP-TPS vznikne nahrazením transformace f transformací Thin plate splines (TPS). Nahrazení je provedeno modifikací energetické funkce v algoritmu RPM. Cílem TPS je vygenerovat vhodnou prostorovou mapu s ohledem na obě vložená bodová mračna. Hodnotící funkce algoritmu RPM-TPS má tvar

$$E_{\text{TPS}}(\mathbf{D}, \mathbf{W}) = \|\mathbf{X} - \mathbf{VD} - \Phi\mathbf{W}\|^2 + \lambda_1 \text{trace}(\mathbf{W}^T \Phi \mathbf{W}) + \lambda_2 \text{trace}[\mathbf{D} - \mathbf{I}]^T [\mathbf{D} - \mathbf{I}], \quad (2.31)$$

kde \mathbf{X} je bodové mračno,

\mathbf{V} – bodové mračno,

λ_1 – první váhový parametr,

λ_2 – druhý váhový parametr,

Φ – matice obsahující kernel funkce,

\mathbf{D} – matice reprezentující afinní transformaci,

\mathbf{W} – matice deformačních koeficientů,

\mathbf{I} – jednotková matice.

Na oba váhové parametry je aplikován teplotní parametr T . Aby byla zjištěna volnost pro afinní transformaci, autoři (Chui, 2002) doporučují, parametr λ_2^{init} nastavit na znatelně menší hodnotu než parametr λ_1^{init} (Chui, 2002).

2.2.5 Super4PCS

Super4PCS je globální registrační algoritmus představený v publikaci (Mellado, 2014) Nicolasem Melladem, Niloy Mitrou a Dorem Aigerem. Algoritmus je vytvořen z algoritmu 4PCS. Oproti algoritmu 4PCS využívá chytrého indexování, pomocí kterého rychle a přesně vyhledává dvojice bodů a koplanární množinu čtyř bodů. Algoritmus ze vstupního referenčního bodového mračna \mathbf{P} vybírá 4 body, ze kterých vytváří dvě koplanární a nerovnoběžné úsečky ab a cd protínající se v bodě e . Průsečík e je definován poměrem λ_1 , jenž je vypočten vzorcem

$$\lambda_1 = \frac{\|p_1 - e_1\|}{\|p_1 - p_4\|}, \quad (2.32)$$

kde p_1 je první bod na úsečce ab ,

p_4 – druhý bod na úsečce ab ,

e_1 – průsečík úseček ab a cd ,

a poměrem λ_2 , jenž je vypočten vzorcem

$$\lambda_1 = \frac{\|p_2 - e_1\|}{\|p_2 - p_3\|}, \quad (2.33)$$

kde p_2 je první bod na úsečce cd ,
 p_3 – druhý bod na úsečce cd ,
 e_1 – průsečík úseček ab a cd .

Vybrané body tvoří koplanární základnu B_1 , pro kterou je hledána odpovídající koplanární základna B_2 v cílovém bodovém mračně \mathbf{Q} . Na základě těchto dvou koplanárních základen jsou vypočteny parametry tuhé transformace. Odpovídající koplanární základna B_2 je nalezena následujícím postupem (Zhang, 2017):

1. Plnění množiny S_1 dvojicemi bodů z bodového mračna \mathbf{Q}

Do množiny S_1 jsou uloženy dvojice bodů, které mají vzdálenost vypočtenou vzorcem

$$d_1 = \|p_1 - p_4\|, \quad (2.34)$$

kde p_1 je první bod na úsečce ab ,
 p_4 – druhý bod na úsečce ab .

2. Plnění množiny S_2 dvojicemi bodů z bodového mračna \mathbf{Q}

Do množiny S_2 jsou uloženy dvojice bodů, které mají vzdálenost vypočtenou vzorcem

$$d_2 = \|p_2 - p_3\|, \quad (2.35)$$

kde p_2 je první bod na úsečce cd ,
 p_3 – druhý bod na úsečce cd .

3. Je vytvořena 3D mřížka G s buňkami o velikosti ε

4. Pro vektory p_1p_4 , p_4p_1 , p_2p_3 a p_3p_2 jsou prohledávány množiny S_1 a S_2

Pro dvojice bodů uložených v množině S_1 a S_2 jsou vypočteny na základě poměrů λ_1 a λ_2 průsečíky, které se následně ukládají s normalizovanými vektory do 3D mřížky G .

5. Dochází k vyjmutí všech dvojic bodů splňující zadaná kritéria

Dvojice bodů jsou vyjmuty na základě průsečíku v mřížce G a odpovídajících vektorových indexů, jejichž úhel je roven úhlu svírající úsečky ab a cd .

2.3 HLEDÁNÍ NEJBLIŽŠÍCH SOUSEDŮ

V mnoha aplikacích je využívána metoda hledání nejbližšího souseda (NN), která spočívá v hledání nejbližšího bodu vůči zvolenému bodu. Metoda nazvána k nejbližších sousedů (kNN), spočívá v hledání k nejbližších sousedů pro zvolený bod. Vzdálenost mezi dvěma body je často vypočítávána pomocí Euklidovské vzdálenosti (Li, 2019)

$$\|\mathbf{A} - \mathbf{B}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^d (a_i - b_i)^2}, \quad (2.36)$$

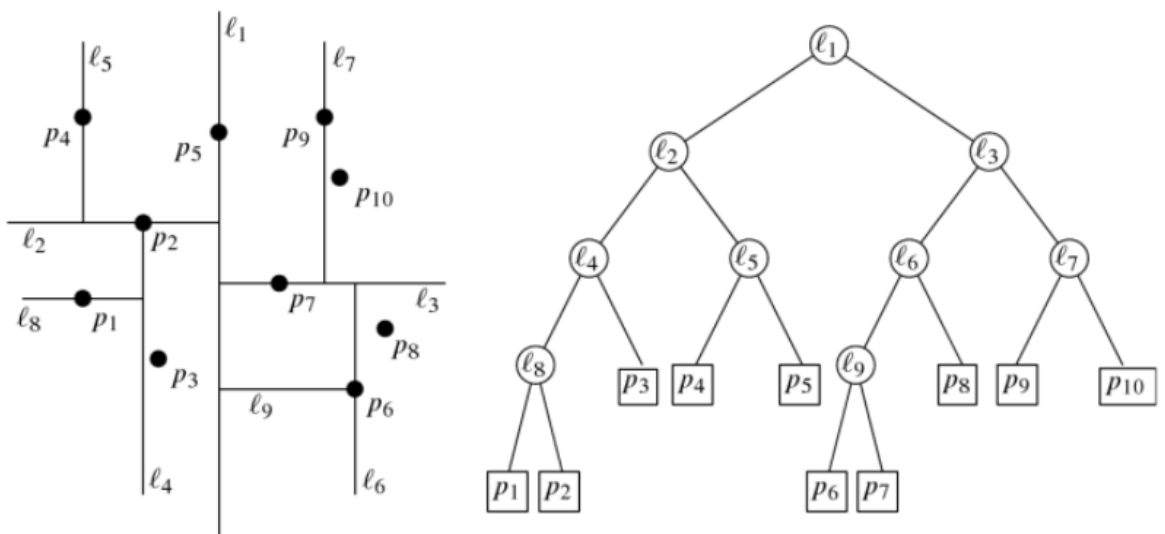
kde d je číslo určující rozměry euklidovského prostoru,

a_i – souřadnice prvního bodu,

b_i – souřadnice druhého bodu.

2.3.1 K-D strom

K-D strom využívá pro hledání nejbližšího bodu binární strom. Princip K-D stromu bude vysvětlen na dvoudimenzionálním prostoru. Pro 2D prostor je K-D strom vytvářen z bodů nacházejících se v množině \mathbf{P} . V prvním kroku dochází k rozdělení množiny \mathbf{P} vertikální přímkou l . Rozdělením je vytvořena podmnožina \mathbf{P}_{left} s body nacházejícími se na přímce nebo vlevo od přímky a podmnožina $\mathbf{P}_{\text{right}}$ obsahující body napravo od přímky. Rozdělující čára l je uložena do kořene stromu a body nacházející se v podmnožině \mathbf{P}_{left} jsou uloženy do levého podstromu. Body nacházející se v podmnožině $\mathbf{P}_{\text{right}}$ jsou uloženy do pravého podstromu.



Obr. 2.1 – Příklad K-D stromu (Berg, 2008)

V dalším kroku je podmnožina P_{left} rozdělena na dvě podmnožiny horizontální přímkou l_1 . Body nacházející se pod nebo na přímce l_1 jsou uloženy do levého podstromu, body nad přímkou l_1 jsou uloženy do pravého podstromu. Podobně je rozdělena horizontální přímkou l_2 podmnožina P_{right} na dvě podmnožiny, které jsou následně uloženy do levého a pravého podstromu. Získané podstromy jsou rozděleny vertikální přímkou. Tento uvedený způsob tvorby K-D stromu je vyobrazen na obr. 2.1. V sudé hloubce dochází k rozdělení podmnožin vertikální přímkou a v liché hloubce horizontální přímkou.

K-D stromy se používají i pro množinu bodů ve vícerozměrném prostoru. Postup je velmi podobný 2D K-D stromu. K rozdělení dochází postupně pomocí nadrovin kolmých k jednotlivým souřadnicím. Nadroviny jsou vytvářeny rekurzivně podle počtu souřadnic. Algoritmus je ukončen v případě, že zbývá jeden bod. Tento bod je následně uložen do stromu jako list. D -dimenzionální K-D strom má tvar binárního stromu s n listy (Berg, 2008).

3 PRINCIP HODNOCENÍ SKENERŮ

Kapitola se zaměřuje na způsob hodnocení 3D skenerů s ohledem na využití při lokalizaci složitých objektů v prostoru. K lokalizaci objektů jsou využívány registrační algoritmy. Hodnocení skenerů odpovídá míře shody výstupního bodového mračka z registračního algoritmu s modelem skenovaného objektu. Čím více se výstupní bodové mračno ze skeneru podobá modelu skenovaného objektu, tím lépe registrační algoritmus lokalizuje objekt. Pro hodnocení míry shody dvou bodových mračen je v registračních algoritmech často využívána střední kvadratická chyba (MSE) a druhá odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE). Například v (Besl, 1992) je střední kvadratická chyba pro algoritmus ICP vypočtena dle vztahu

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \|y_i - p_i\|^2}{N_p} \quad (3.1)$$

kde N_p je počet bodů v bodovém mračnu skenu,

y_i – bod z množiny nejbližších bodů,

p_i – bod z bodového mračka skenu.

Při práci s reálnými daty bylo zjištěno, že střední kvadratická chyba nelze použít jako rozhodující parametr pro hodnocení skenerů. Důvodem je, že nastávají situace, kdy viditelně nevhodně oskenovaný objekt má menší hodnotu středně kvadratické chyby než viditelně lépe oskenovaný objekt. Proto je nutné skenovaný objekt hodnotit na základě více parametrů. Rozhodujícími parametry mohou být hodnoty udávající, jak velkou část modelu zobrazuje sken, kolik bodů skenu je znatelně odlehlých a v jaké blízkosti jsou umístěny body skenu od bodů modelu.

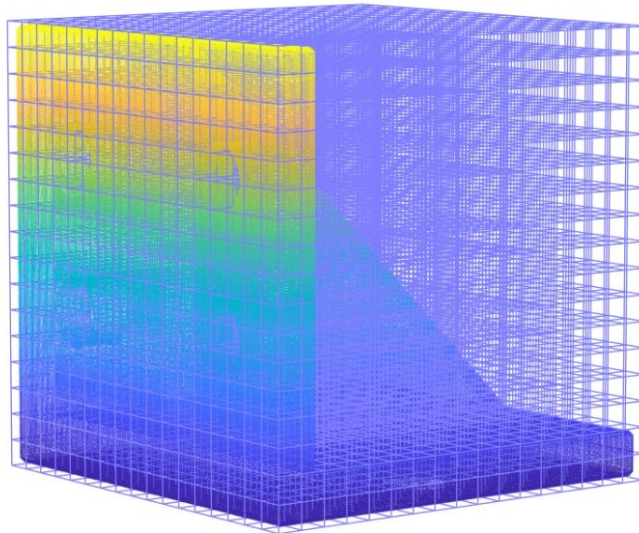
3.1 PRVNÍ NAVRHOVANÝ ZPŮSOB HODNOCENÍ

Pro hodnocení skenů je na bodové mračno modelu vytvořena krychlová síť. Ukázka vytvořené sítě je zobrazena na obr. 3.1. Velikost krychlí v síti volí uživatel dle požadované přesnosti. Větší přesnost hodnocení je způsobena zmenšením velikostí krychlí v síti. Po vytvoření krychlové sítě je proveden registrační algoritmus. Registrační algoritmus umísťuje modifikované bodové mračno skenu vůči modelu tak, aby mezi nimi došlo k co největší shodě. Modifikované bodové mračno je získáno aplikací filtrů na výstupní bodové mračno skenerů tak, aby modifikované bodové mračno obsahovalo pouze body popisující skenovaný objekt. Po

dokončení registračního algoritmu se alespoň část bodů skenu nachází uvnitř vytvořené krychlové sítě okolo modelu. Tímto vzniknou čtyři druhy krychlí:

- krychle obsahuje body modelu a skenu,
- krychle obsahuje pouze body skenu,
- krychle obsahuje pouze body modelu.
- krychle je bez bodů.

Hodnocení skenu je provedeno na základě počtu krychlí obsahujících body modelu a skenu, počtu bodů skenu v těchto krychlích a jejich vzdálenosti k nejbližším bodům modelu. Dále je nutno zohlednit počet bodů skenu nacházejících se v krychlích, které neobsahují body modelu. Nejlepších hodnocení dosahují skeny, které mají body umístěny v co největším počtu krychlí, ve kterých se nacházejí body modelu a jejich vzájemná vzdálenost je minimální.



Obr. 3.1 – Aplikace krychlové sítě na model objektu

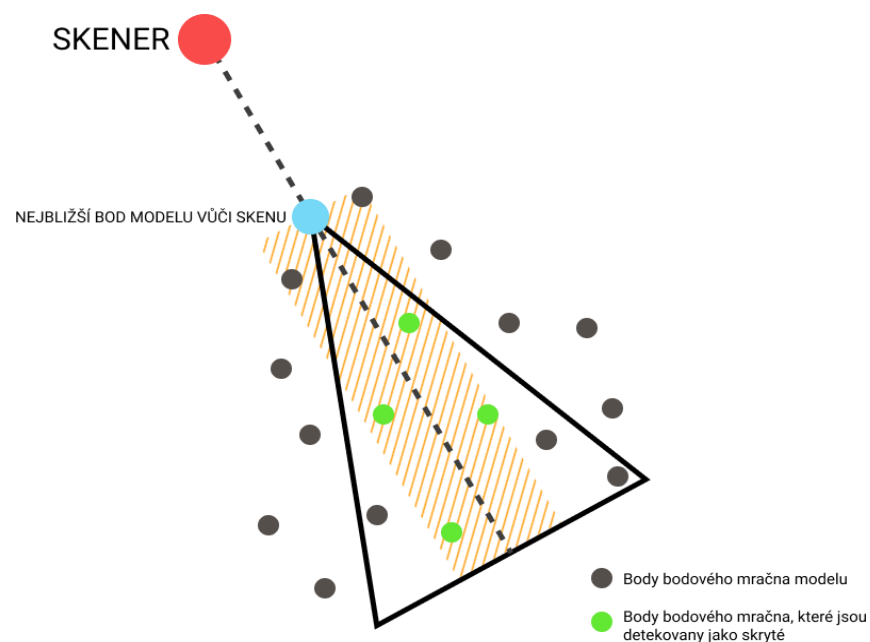
3.2 DRUHÝ NAVRHOVANÝ ZPŮSOB HODNOCENÍ

Hodnocení spočívá v porovnání modifikovaného bodového mračka skenu s odpovídajícím referenčním modelem. Modifikované bodové mračno obsahuje body z výstupního bodového mračka, které odpovídají pouze skenovanému objektu. Míra shody referenčního modelu s bodovým mračnem skenu odpovídá míře hodnocení.

3.2.1 Tvorba referenčního modelu

Referenční model je vytvářen z vytvořeného modelu skenovaného objektu. Cílem je odstranit všechny body modelu, které skener nemůže oskenovat. Odstraněním bodů vznikne bodové mračno, které odpovídá ideálnímu stavu, který by měl nastat při skenování dané pozice.

Nejprve je nutné vytvořit ve vybraném programu repliku způsobu skenování objektu na dané pozici. Poté jsou body v bodovém mračnu modelu seřazeny vzestupně podle vzdálenosti k pozici skeneru. Mezi skenerem a nejbližším bodem modelu je vytvořena přímka. Dále je vytvořen kužel ve směru od kamery s osou odpovídající vytvořené přímce a vrcholem v nejbližším bodu modelu. Z modelu jsou odstraněny všechny body, nacházející se ve vytvořeném kuželu s menší vzdáleností od přímky než zadaný limit. Aktuální nejbližší bod je prokázán jako viditelný, a proto je z dalšího testování vyloučen. Celý postup se opakuje do té doby, než v bodovém mračně zůstanou pouze prokazatelně viditelné body. Na prokazatelně viditelné body je za účelem dočištění bodového mračna aplikován statistický filtr. Princip odstranění skrytých bodů je zobrazen na obr. 3.2 a pseudokód na obr. 3.3.



Obr. 3.2 – Princip odstranění skrytých bodů modelu z pohledu skeneru

Míra přesnosti tvorby referenčního modelu je nastavena odstraňovacím limitem vzdálenosti bodu od osy kuželu a rozměrem kuželu. Kužel byl použit z důvodu ochrany sousedních bodů nejbližšího bodu vůči kameře, které mohou být viditelné kamerou.

Algorithm 1: Algoritmus pro vytváření referenčních modelů.

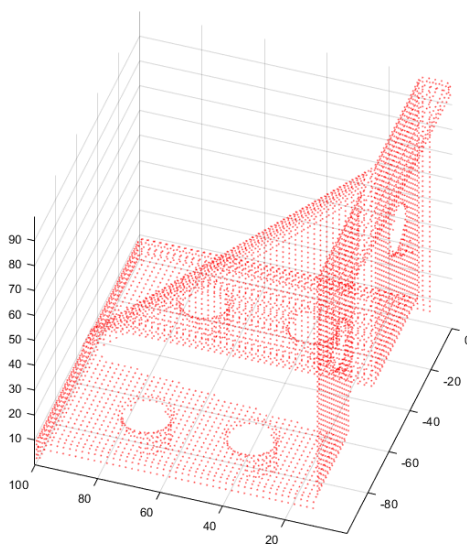
Vstup :
M - Body modelu
N - Normály modelu
S - Pozice skeneru
d - Vzdálenost do které jsou odstraněny body modelu
 α - Sklon kužele

Výstup:
R - Body referenčního modelu
Nr - Normály referenčního modelu

```
1 function referenciModel(M, N, S, d,  $\alpha$ )
2 R  $\leftarrow$  [];
3 poleID  $\leftarrow$  [];
4 for i = 1 to size(M, 1) do
5   | Výpočet vzdálenosti mezi bodem modelu M(i, :) a pozicí skeneru S.
6 end
7 Vzestupné řazení bodů modelu M dle vypočtené vzdálenosti od skeneru.
8 Seřazení normál modelu, aby odpovídaly seřazeným bodům modelu.
9 while size(M, 1) > 0 do
10  | Tvorba přímky p procházející prvním bodem modelu M a pozicí
    | skeneru S.
11  R  $\leftarrow$  [R; M(1, :)];
12  Nr  $\leftarrow$  [Nr; N(1, :)];
13  for i = 2 to size(M, 1) do
14    | Výpočet nejbližšího bodu B ležícího na přímce p vůči bodu
    | modelu M(i, :).
15    | Výpočet vzdálenosti s mezi bodem B a bodem modelu M(i, :).
16    | Výpočet úhlu  $\beta$  svírající úsečky BS a SM(i, :).
17    | if s  $\leq$  d and  $\beta \leq \alpha$  then
18      | poleID  $\leftarrow$  [poleID i];
19    | end
20  end
21  Sestupné řazení ID v poli poleID
22  foreach id  $\in$  poleID do
23    | Odstranění bodu mající indexu id z bodového mračna M.
24    | Odstranění odpovídající normály aktuálně odstraněného bodu z
    | N.
25  end
26 end
27 return R, Nr
```

Obr. 3.3 – Algoritmus pro vytváření referenčních modelů

Ukázka výsledného referenčního bodového mračna je zobrazena na obr. 3.4.



Obr. 3.4 – Vytvořený referenční model objektu pro zvolenou pozici

3.2.2 Princip hodnocení

Výstupní bodové mračno skenu z registračního algoritmu je porovnáváno s referenčním modelem pro odpovídající pozici. Porovnání bodových mračen je prováděno pro zvolenou míru přesnosti. Míra přesnosti je definována limitem vzdálenosti bodů skenu vůči bodům modelu. Bod skenu je považován za správně umístěný, pokud se v jeho okolí nachází alespoň jeden bod modelu, vůči kterému má menší vzdálenost, než je zadaný limit. Hodnocení skenu je vypočteno ze vzorce

$$skoreLokalni = pocetSBS * hodnoceniM * hodnoceniV * hodnoceniS \quad (3.2)$$

kde *pocetSBS* je počet správně umístěných bodů skenu,
hodnoceniM – hodnocení, jak velkou část modelu dokázal sken popsat,
hodnoceniV – hodnocení vzdálenosti mezi body skenu a modelu,
hodnoceniS – hodnocení správně/chybně umístěných bodů.

Proměnná *pocetSBS* udává, kolik bodů skenu se nachází do definované vzdálenosti vůči bodům modelu. Druhá proměnná *hodnoceniM* je vypočtena z rovnice

$$hodnoceniM = \frac{pocetPBM}{pocetBM} \quad (3.3)$$

kde *pocetPBM* je počet popsanych bodů modelu body bodového mračna skenu,
pocetBM – počet bodů v bodovém mračnu modelu.

Proměnná *hodnoceniM* nabývá hodnoty 0 až 1 a udává informaci, jak velkou část referenčního modelu sken popisuje. Hodnota 0 odpovídá stavu, ve kterém sken nepopsal žádnou část referenčního modelu. Naopak hodnota 1 označuje stav, kdy sken popisuje celý referenční model.

Třetí proměnná *hodnoceniV* odpovídá hodnocení vzdálenosti mezi modelem a skenem. Proměnná nabývá hodnoty 0 až 1. Hodnota 1 je vrácena v případě, kdy je medián vzdáleností bodů skenu od modelu roven nule. Hodnota 0 je vrácena v případě, kdy je medián vzdáleností bodů skenu od modelu větší než zadaný limit. Hodnota proměnné *hodnoceniV* je vypočtena ze vztahu

$$hodnoceniV = 1 - \min(1, medianSM/limit) \quad (3.4)$$

kde *medianSM* je medián vzdáleností bodů skenu od modelu,
limit – limit určující, zda je bod správně umístěn pro požadovanou přesnost.

Poslední proměnná označená jako *hodnoceniS* nabývá hodnoty 0 až 1. Hodnota proměnné odpovídá hodnocení počtu správně umístěných bodů skenu vůči referenčnímu modelu. Hodnota 1 je vrácena v případě, když se všechny body skenu nacházejí do požadované vzdálenosti od modelu. Hodnota je vypočtena dle rovnice

$$hodnoceniS = \frac{pocetSBS}{pocetBS} \quad (3.5)$$

kde *pocetSBS* je počet správně umístěných bodů skenu,
pocetBS – počet bodů v bodovém mračnu skenu.

Pro zjištění míry shody bodového mračna skenu a referenčního modelu je porovnávána proměnná *skoreLokalni* s počtem bodů referenčního modelu. Pokud je hodnota proměnné *skoreLokalni* shodná s počtem bodů v referenčním modelu, dochází k úplné shodě mezi bodovými mračny. Aby vypočítaná hodnota hodnocení skenu odpovídala procentuální míře shody s referenčním modelem, převádí se na číslo 0 až 100. Hodnota 0 odpovídá stavu, kdy sken není vůbec podobný referenčnímu modelu. Naopak hodnota 100 odpovídá případu, kdy je sken totožný s referenčním modelem. Pokud je vrácená hodnota větší jak 100, znamená to, že bodové mračno skenu je umístěno na referenčním modelu a obsahuje znatelně více bodů než referenční model. V tomto případě je doporučeno zpřísnit požadavky na hodnocení nebo vytvořit referenční model s více body. Procentuální míra shody je vypočtena vzorcem

$$skoreGlobalni = \frac{100 * skoreLokalni}{pocetBM} \quad (3.6)$$

kde *skoreLokalni* je hodnota hodnocení skenu skládající se z jednotlivých hodnocení,
pocetBM – počet bodů v bodovém mračnu referenčního modelu.

4 TVORBA DATOVÉ SADY K HODNOCENÍ

Pro každý testovaný skener je nutné vytvořit odpovídající datovou sadu, která bude následně ohodnocena. Pro vytvoření datové sady je nejprve nutné vybrat vhodný objekt ke skenování, 3D skenery ke skenování a způsob skenování.

4.1 OBJEKTY PRO SKENOVÁNÍ

Prvním krokem pro hodnocení skenerů je nutné vytvořit nebo nalézt objekt ke skenování. Je vhodné zvolit objekt, který bude možný vyrobit z několika druhů materiálů se stejnými rozměry. Větším počtem objektů z různých materiálů lze získat více vypovídající hodnocení skenerů. Při výběru objektu ke skenování je také nutné věnovat pozornost tvaru objektu. Složitost objektu má vliv na výsledný rozdíl hodnocení lepších a horších skenerů. Čím více je objekt složitější, tím lépe jsou identifikovány skenery skenující s větší přesností.

Po domluvě s vedoucím práce jsem se rozhodl ke skenování použít objekt ze dřeva, kovu a plastu. Nejprve jsem hledal již vyrobený objekt, který má stejné rozměry, ale bohužel se mi takový objekt nepodařilo nalézt. Proto jsem se rozhodl, že si objekt pro navrhnu svépomocí a vytvořím ho v domácích podmínkách.

4.1.1 Návrh objektu

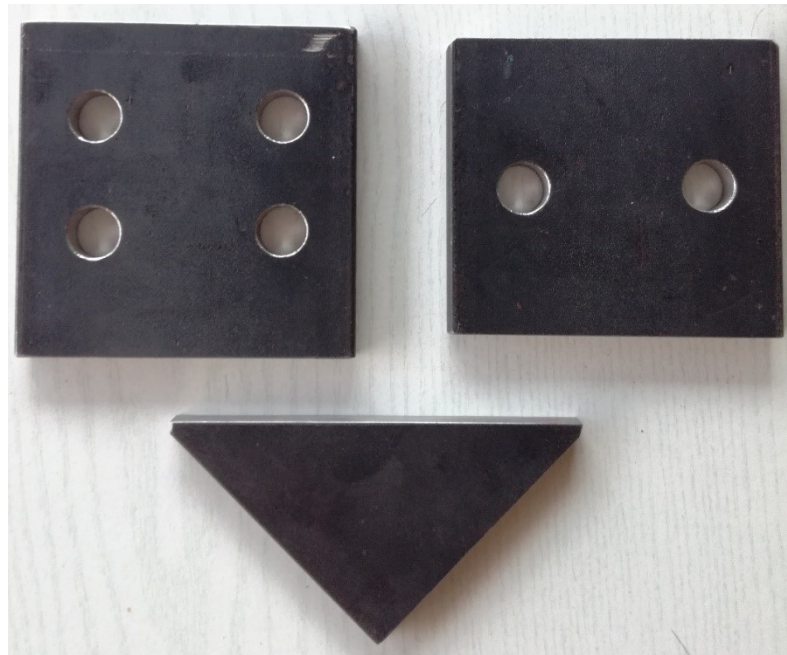
Při návrhu objektu bylo především hleděno na obtížnost výroby objektu z kovu a dřeva v domácích podmínkách a na zachování co největší shody mezi objekty. Při návrhu objektu jsem se držel myšlenky, aby měl objekt reálné využití. Po několika návrzích jsem se rozhodl za pomoci otce vyrobit objekt, který lze například použít pro uchycení libovolného objektu k ploše. Objekt se skládá ze dvou na sebe kolmých ploch, na kterých je uprostřed umístěn trojúhelník. Jedna z ploch obsahuje dva kruhové otvory a druhá plocha čtyři kruhové otvory. Všechny hrany a kruhové otvory jsou zkoseny.

4.1.2 Výroba objektů

Bylo zhodnoceno, že pro dosažení co největší shody mezi objekty bude nutné nejprve vyrobit objekt z kovu, poté ze dřeva a na závěr z plastu.

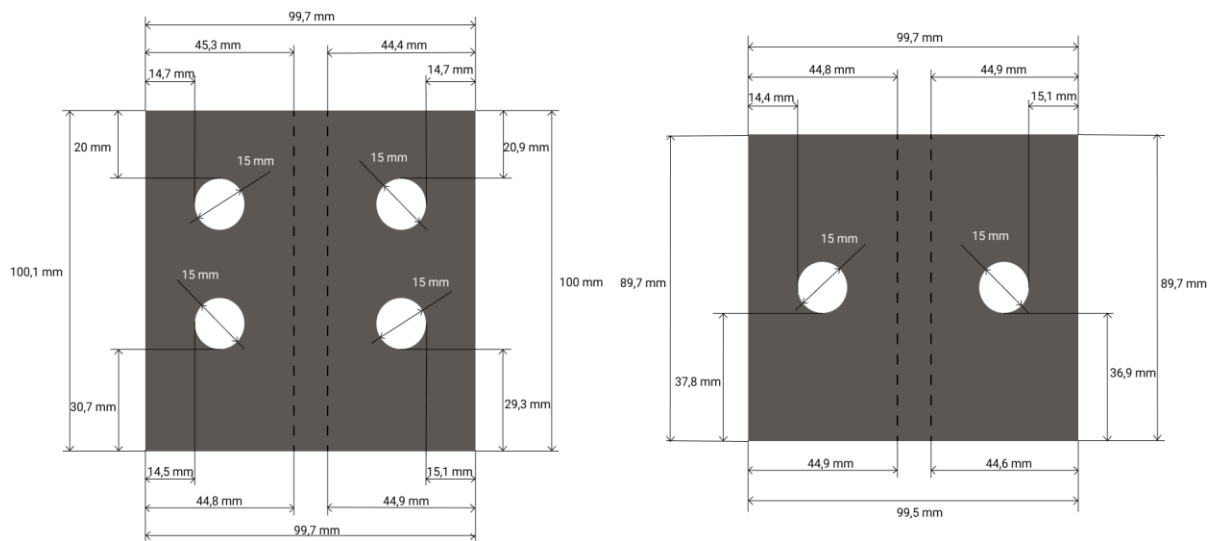
Výroba objektu z kovu

Kovový objekt byl vyroben z ocelové pásoviny, která byla pomocí pásové pily rozřezána na díly. Do odpovídajících destiček byly vyvrtány otvory a byly spojeny CO2 svářením. Stav objektu před svářením dokumentuje obr. 4.1. Po sváření byly nerovnosti a nepřesnosti zahlazeny, zaobleny hrany a okolí otvorů.



Obr. 4.1 – Stav kovového objektu před CO2 svářením

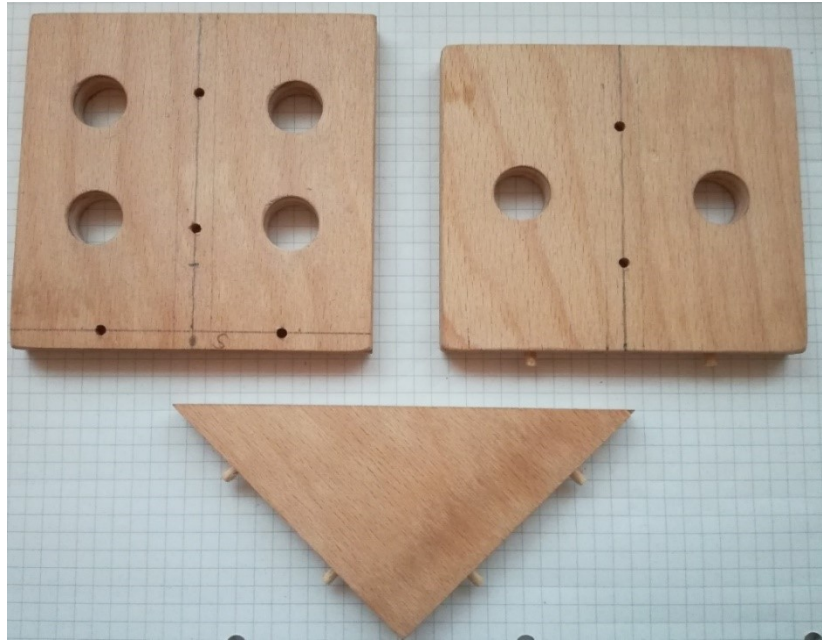
Po finálních úpravách odpovídá kovový objekt rozměrům uvedených na obr. 4.2.



Obr. 4.2 – Rozměry kovového objektu

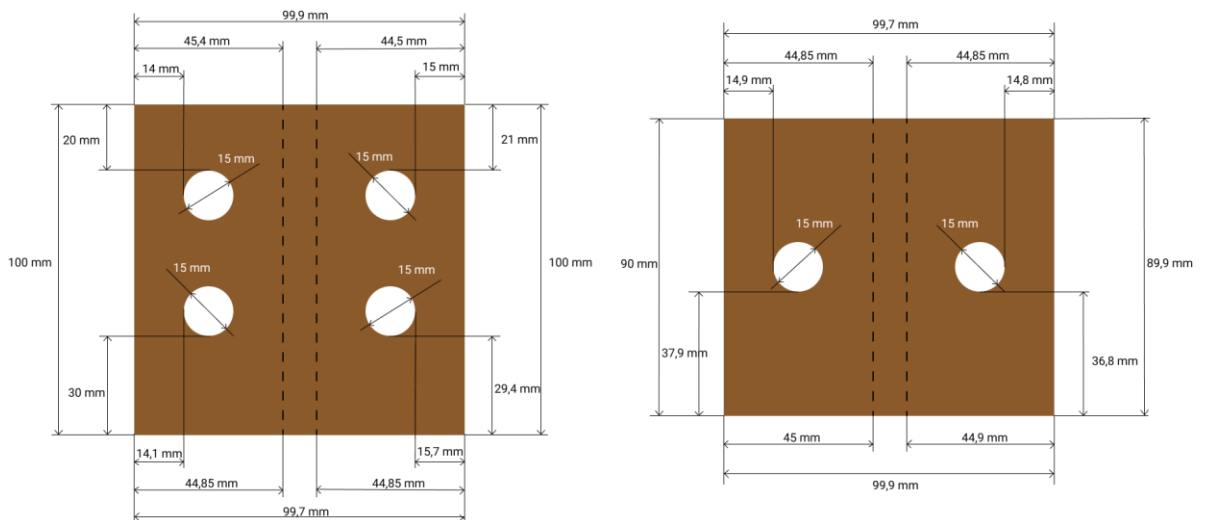
Výroba objektu ze dřeva

Jelikož při výrobě kovového objektu došlo k odchylkám od návrhu, byl dřevěný objekt vyroben podle rozměrů kovového objektu. Díly dřevěného objektu byly nařezány z truhlářské překližky, následně byly vyvrtány otvory do ploch. Pro spojení dílů bylo nutné vyvrtat do všech dílů otvory, do kterých byly následně vloženy spojovací kolíky a lepidlo. Stav dřevěného objektu před lepením je zobrazen na obr. 4.3. Po ztvrdnutí lepidla byly rozměry upraveny, aby více odpovídaly kovovému objektu. Následně došlo k zaoblení hran a okolí otvorů.



Obr. 4.3 – Stav dřevěného objektu před spojením

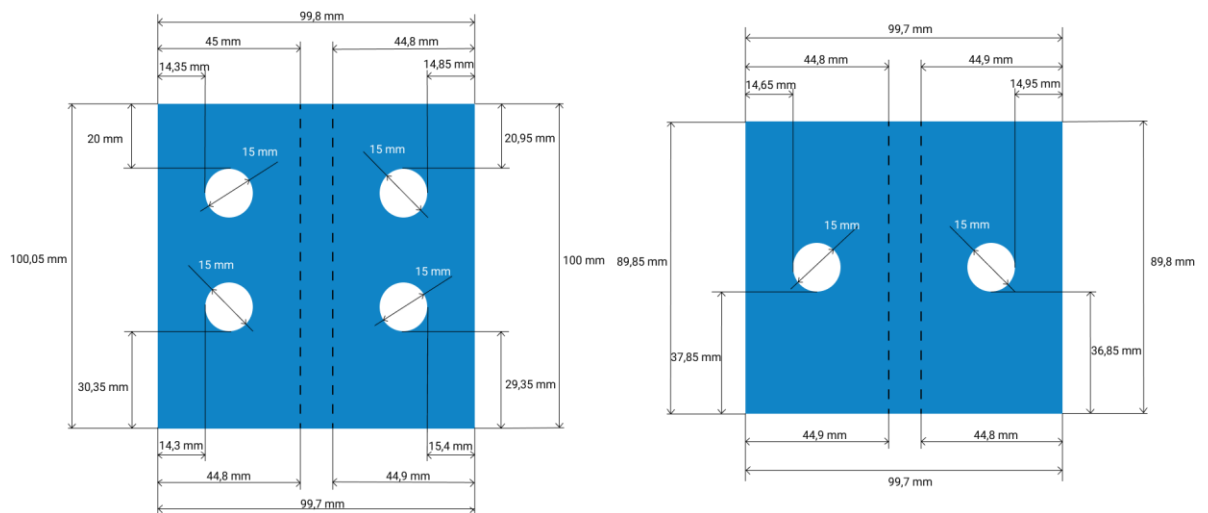
Finální rozměry dřevěného objektu jsou zobrazeny na obr. 4.4.



Obr. 4.4 – Rozměry dřevěného objektu

Výroba objektu z plastu

I přes veškerou snahu vytvořit co nejpodobnější objekt z kovu a dřeva, bylo zjištěno, že mezi objekty došlo k nepatrným odchylkám s maximální chybou 1 mm. Z tohoto důvodu byl vytvořen v programu Blender model s rozměry uvedenými v obr. 4.5. Uvedené rozměry byly vypočteny jako střední hodnota velikostí dřevěného a kovového objektu.



Obr. 4.5 – Rozměry modelu použitého pro tvorbu plastového objektu

Vytvořený model byl následně exportován do souboru s příponou .stl a zaslán k tisku vedoucímu práce. Plastový model byl vytisknut na univerzitní 3D tiskárně Renkforce RF 2000. Výsledný stav všech objektů ukazuje obr. 4.6.



Obr. 4.6 – Vzhled vytvořených objektů

4.2 3D SKENERY K POROVNÁNÍ

Objekty byly skenovány skenery Photoneo PhoXi L, Realsense D415 a Basler ToF640-20gm. Nastavování parametrů a ovládání skeneru Photoneo bylo prováděno přes aplikaci PhoXi Control. Skener byl k počítači připojen přes síťový kabel s konektorem RJ45. Před začátkem skenování bylo nutné nalézt nejvhodnější nastavení skeneru Photoneo. Přes různé nastavení parametrů, jsem se rozhodl pro parametry uložené v tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Nastavení parametrů skeneru Photoneo

Rozlišení	2064×1544
Násobitel závěrky	2
Confidence	5
Multiplikátor skenování	5

Pro nastavení a ovládání kamery Realsense byla nainstalována aplikace Intel RealSense Viewer v2.36.0. Skener byl k počítači připojen přes rozhraní USB. V aplikaci došlo k hledání vhodných parametrů, nakonec byly použity parametry z tab. 4.2.

Tab. 4.2 – Nastavení parametrů skeneru Realsense

Emitor	Laser
Expozice	6429
Zisk	16
Síla laseru	150
Zapnutí automatického vyvážení bílé barvy	Vypnuto
Asic teplota	33
Teplota projektoru	33
Hloubkové jednotky	0,001

Skener Basler byl k počítači připojen přes síťový kabel s konektorem RJ45. Nastavení a ovládání skeneru Basler bylo prováděno přes aplikaci ToF Viewer. Ke skenování byly použity výchozí parametry uložené v tab. 4.3.

Tab. 4.3 – Nastavení parametru skeneru Basler

Režim zpracování	HDR
Minimální hloubka	0 mm
Maximální hloubka	13320 mm
Automatická expozice	Vypnuta
Selektor doby expozice	0
Doba expozice	20000 μ s

4.3 SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ

Pro získání co nejobektivnějších výsledků je nutné zvolit správný postup získání dat a zachovat při skenování objektů shodné podmínky pro všechny hodnocené skenery. Pro všechny porovnávané typy skenerů by měly být zachovány shodné světelné podmínky, umístění objektu by mělo být pro všechny skenery shodné a skenery by měly být umístěny do shodné pozice. Poté je důležité zvolit vhodnou pozici na pracovní ploše, do které má být umístěn skenovaný objekt. Následně je nutné zvolit, jakým způsobem bude probíhat skenování. První možností je umístit objekt do jedné pozice na pracovní ploše, v té provádět různé rotace objektu. Druhou možností je oskenovat objekt na různých pozicích na pracovní ploše. Třetí možností je spojit oba uvedené způsoby.

4.3.1 Prostředí pro skenování objektů

Skenování objektů bylo provedeno v univerzitní místnosti obsahující tzv. klec zobrazenou na obr. 4.7. Tato klec slouží přímo pro práci se senzory. Má tvar krychle o rozměrech 195 na 195 cm. Uprostřed klece se nachází pracovní plocha, sloužící pro umístění objektů ke skenování. Na všechny strany klece je možné do různé výšky namontovat senzory. Pro skenování byly skenery umístěny uprostřed horní konstrukce klece vždy 1 metr nad pracovní plochu.

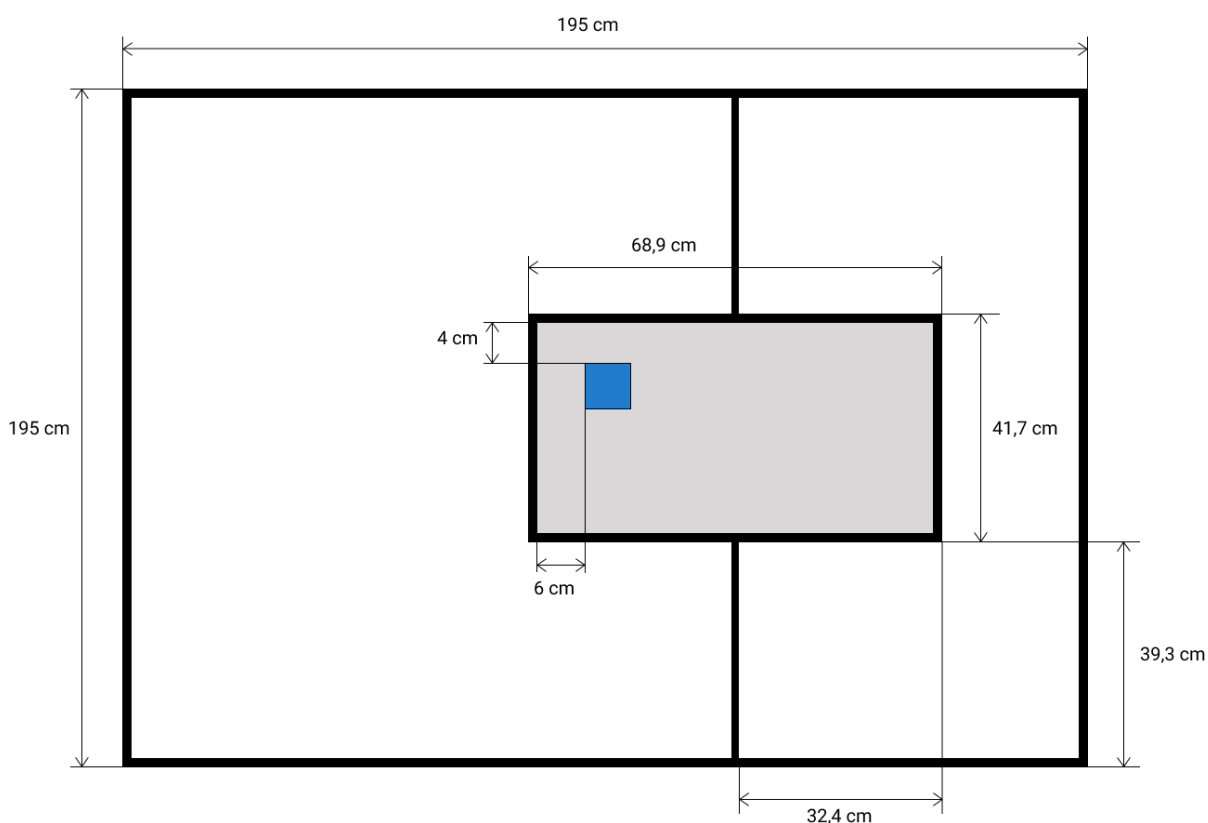


Obr. 4.7 – Prostředí pro skenování vytvořených objektů

4.3.2 Umístění objektu na pracovní plochu

Z výše uvedených způsobů skenování objektu byl vybrán způsob, ve kterém je zvolena jedna pozice objektu na pracovní ploše a v ní dochází k rotaci objektu. V prvním kroku byla nalezena nejvhodnější pozice na pracovní ploše, poté bylo provedeno nastavení skenerů, aby byly získány co nejlepší výsledky. Následně byl skenovaný objekt rotován tak, aby došlo k oskenování všech možných pozic objektu.

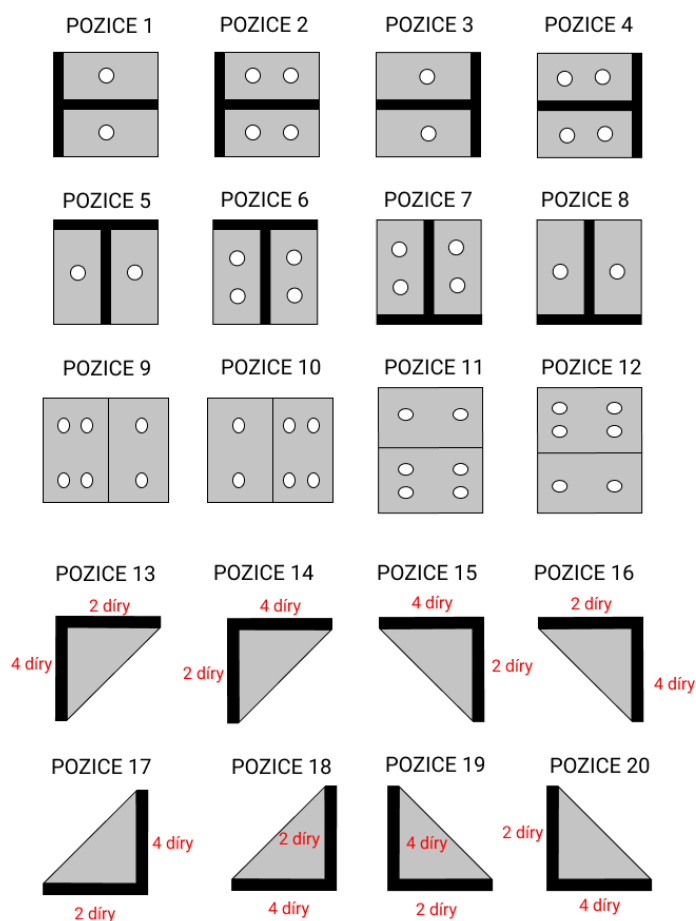
Volba umístění skenovaného objektu na pracovní ploše byla zvolena na základě výsledků získaných z prvního testovaného skeneru Photoneo PhoXi L. Z výsledků bylo zjištěno, že se na pracovní ploše nacházejí oblasti, ve kterých je skenovaný objekt oříznut nebo zesvětlen. Z tohoto důvodu byla zvolena pozice, která podle testování umožnila oskenovat celý objekt z co nejvíce stran a kde nedocházelo k zesvětlení objektu. Na zvolenou pozici byly na pracovní plochu nakresleny obrysy objektu, kterými byla zajištěna podmínka stejného umístění objektů na pracovní plochu pro všechny skenery. Umístění objektu na pracovní ploše zobrazuje obr. 4.8.



Obr. 4.8 – Rozměry prostředí pro skenování objektů

4.3.3 Skenované pozice objektů

Pro získání co nejvíce objektivních výsledků byl každý objekt z různého materiálu umístěn na pracovní plochu tak, aby došlo k oskenování objektu ze všech stran. Pozice skenování zobrazuje soupis pozic na obr. 4.9. Soupis pozic zajistil přehlednost při skenování a následnou práci s výstupními daty. Nakonec bylo pro každý skener oskenováno celkem 60 skenů.



Obr. 4.9 – Pozice objektu při skenování z pohledu kamery

5 APLIKACE PRO HODNOCENÍ SKENERŮ

K hodnocení skenerů a skenů byla ve vývojářském prostředí MATLAB App Designer vytvořena aplikace. Aplikace využívá druhý z výše představených způsobů hodnocení. Tento zvolený způsob hodnocení byl zvolen, protože dosahoval při testování znatelně kvalitnějších výsledků. Hlavní výhodou aplikace je, že obsahuje jednoduché uživatelské prostředí, díky němuž uživatel nastaví požadované parametry bez nutnosti programování. Jelikož se data aplikace ukládají do viditelných adresářů, uživateli je umožněno měnit data i mimo aplikaci.

5.1 POPIS APLIKACE

Uživateli je po spuštění aplikace zobrazeno okno, ve kterém má možnost vytvořit nový projekt v aplikaci, načíst nebo smazat již existující projekt. Po načtení nebo vytvoření projektu je prvotní okno zavřeno a otevřeno okno nové. Nové okno obsahuje menu, pomocí kterého uživatel prochází jednotlivé kroky potřebné k úspěšnému ohodnocení skenerů.

Pro seznámení uživatele s aplikací slouží sekce pojmenovaná jako Important information. Sekce obsahuje základní a důležité informace pro správný chod aplikace, zhodnocení skenů a skenerů. Jedná se například o informaci, jakým způsobem a v jakém formátu má být vytvořen model skenovaného objektu, v jakém formátu mají být ukládány výsledná data ze skenerů a podle čeho mají být označeny skenované pozice objektu. Dále je předána informace, aby si uživatel vytvořil seznam pozic objektu pro skenování a označil je číselným identifikátorem.

V následující sekci aplikace pojmenované jako Project layout uživatel nastavuje základní metriku projektu a vkládá nebo odstraňuje typy skenerů a materiálů v této aplikaci.

Sekce pojmenovaná jako Model modifications slouží k vytvoření referenčních modelů pro všechny skenované pozice. Uživatel za pomoci dostupných nástrojů umísťuje model a skener tak, aby jejich vzájemné umístění odpovídalo skenování. Podle vložených parametrů je vytvořen referenční model a uložen pod identifikátorem, který odpovídá pozici z vytvořeného seznamu pozic. Tento proces se opakuje do doby, než uživatel vytvoří referenční modely pro všechny pozice ze seznamu pozic.

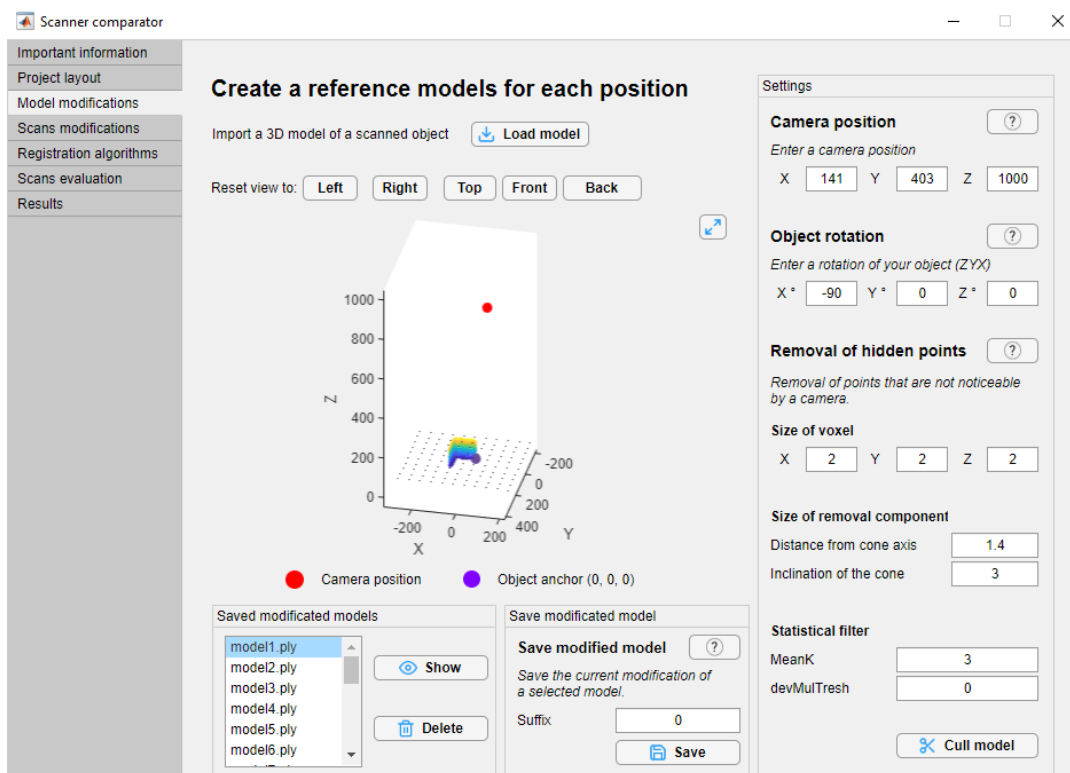
Po vytvoření referenčních modelů uživatel přechází do sekce pojmenované jako Scan modifications. Sekce slouží k vložení získaných výsledků skenování objektů do aplikace a nastavení parametrů pro jejich modifikaci. Vložené skeny lze rotovat, nastavit pro ně metriku a aplikovat na ně různé filtry. Výsledek modifikací lze zobrazit pomocí tlačítka. Rozložení

sekce je viditelné na obr. 5.1. Cílem uživatele je modifikovat výstupní bodová mračna ze skenerů tak, aby obsahovala pouze body popisující skenovaný objekt.

Jakmile uživatel vloží do aplikace všechna naskenovaná data a nastaví pro ně požadované modifikace, přechází do sekce Registration algorithms. V sekci uživatel volí z nabízených registračních algoritmů. Jedná se o registrační algoritmy Iterative Closest Point (ICP), Normal Distributions Transform (NDT), Robust Point Matching (RPM) a Coherent Point Drift (CPD). Pro vybrané registrační algoritmy nastaví jejich parametry.

V posledním kroku nastavování uživatel otevře sekci pojmenovanou jako Scan evaluation, sloužící k nastavení parametrů, které jsou zásadní při výpočtu hodnocení skenů. Jedná se o nastavení parametrů pro hodnocení skenů, nastavení parametrů funkce Super4PCS, možnost odstranit výsledek a možnost ponechat dříve vypočtené výsledky. Funkce Super4PCS je použita pro nalezení takové počáteční pozice modifikovaného bodového mračna skenu vůči referenčnímu modelu, aby registrační algoritmy našly globální minimum. Příkladem je ICP algoritmus, který bez funkce Super4PCS vrací lokální minimum.

Po stisknutí tlačítka Start comparing je zahájeno hodnocení skenerů. Po úspěšném dokončení hodnocení je zobrazena sekce Results, ve které se nacházejí hodnocení všech vložených skenů. Uživatel si může vybrat ze dvou druhů porovnání, a to dle typu materiálu nebo podle typu skeneru.



Obr. 5.1– Vzhled vytvořené aplikace

5.1.1 Implementace knihovny PCL a SUPER4PCS

Point Cloud Library (PCL) je knihovna pro zpracování 2D/3D obrazů a bodových mračen. Důvodem implementace PCL je, že obsahuje více možností pro práci s bodovými mračny než Matlab a je velmi často využívána pro práci s tímto typem dat. Další výhodou je, že knihovnu lze rozšířit o jiné knihovny vytvořené ostatními uživateli. Dalším důvodem je, že mě zaujala její implementace do Matlabu. PCL knihovna je rozdělena do 12 modulárních knihoven, pojmenovaných jako filters, features, keypoints, registration, kdtree, octree, segmentation, sample_consensus, surface, recognition, io a visualization. Například modulární knihovna filters slouží k odstranění šumu a odlehlých bodů z 3D bodového mračka a obsahuje Bilaterální filtr, Statistický filtr, Radius Outlier Removal filtr a další. Knihovna registration obsahuje registrační algoritmy, například Iterative Closest Point a Normal Distributions Transform (Point cloud library, 2021).

Nejprve je nutné stáhnout a nainstalovat knihovnu PCL na disk počítače. Jelikož je PCL napsána v jazyce C++, je nutno pro implementaci do Matlabu využít funkci MEX. Struktura MEX funkce je následující:

```
#include "mex.hpp"
#include "mexAdapter.hpp"

class MexFunction : public matlab::mex::Function {
public:
    void operator()(matlab::mex::ArgumentList outputs, matlab::mex::ArgumentList inputs) {
        // check input arguments
        // implement function
        ...
    }
}
```

V této MEX funkci je následně vytvářen kód, který využívá funkce z knihovny PCL. Aby bylo možné vytvořenou funkci použít v prostředí Matlab, je nejprve nutné vytvořit sestavovací skript. Sestavovací skript obsahuje nastavení kompilátoru a proměnné, ve kterých jsou uloženy cesty k vyžadovaným souborům a složkám knihovny. Po spuštění sestavovacího skriptu je MEX funkce převedena na soubor s příponou .mexa64 pro systém Linux, .maxmaci64 pro systém Apple macOS a .mexw64 pro systém Windows. Od tohoto kroku lze se sestavenou funkcí pracovat stejně jako s Matlab funkcí.

Pro nalezení globálního minima je využívána knihovna SUPER4PCS, kterou lze implementovat do knihovny PCL. Implementace probíhá vložením odpovídajících souborů do složky /pcl/registration/ umístěnou ve složce s PCL knihovnou. Pro SUPER4PCS je podle výše uvedeného způsobu vytvořena odpovídající MEX funkce.

5.1.2 Implementované zpracování dat

Aplikace především využívá funkce obsažené v knihovně PCL. Jedná se o Passthrough filtr, Voxel grid filtr, Radius outlier removal filtr, Statistical outlier removal filtr, skript pro detekci roviny, Iterative closest point algoritmus a Normal distributions transform algoritmus. Do aplikace je také importována knihovna SUPER4PCS. Registrační algoritmy Coherent point drift a Robust point matching byly do aplikace implementovány z Matlab doplňků. Jedná se o doplněk pojmenovaný jako Robust nonrigid point set registration od autora Bing Jiana. Zdrojové soubory byly na některých místech upraveny, aby nevracely chyby.

5.2 POUŽITÉ NASTAVENÍ APLIKACE

K hodnocení skenů a testování vytvořené aplikace bylo nejprve nutné nastavit metriku projektu, vložit požadované typy skenerů a druhy materiálů. V mém případě došlo k nastavení metriky na milimetry, do druhů materiálů byl vložen materiál dřevo, kov a plast. Následně byly v aplikaci vytvořeny typy skenerů Basler, Photoneo a Realsense. Pro tvorbu referenčních modelů byl do aplikace importován vytvořený model skenovaného objektu a nastaveny parametry uvedené v tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Použité parametry pro tvorbu referenčních modelů

Pozice kamery	
X	141
Y	403
Z	1000
Velikost voxelu	
X	2
Y	2
Z	2
Nastavení parametrů pro odstranění bodů	
Vzdálenost od osy kužele	1,4 mm
Sklon kužele	10°
Nastavení statistického filtru	
Počet sousedů použitých pro odhad střední vzdálenosti	3
Multiplikátor směrodatné odchylky	3

Do sekce pro modifikaci vstupních dat byla nahrána data ze skenerů a pro každý typ skeneru byly nastaveny parametry uvedené v tab. 5.2.

Tab. 5.2 – Použité parametry pro modifikaci vložených skenerů

		Basler	Photoneo	Realsense
Rotace skenu	X	0°	9,45°	0°
	Y	0°	180°	0°
	Z	0°	0°	0°
Voxel grid filtr	X	3	3	3
	Y	3	3	3
	Z	3	3	3
Detekce roviny		4	2	16
Radius outlier removal filtr	Minimální počet sousedů	6	6	6
	Rádus hledání	5	5	5
Pass through filtr	X	$\langle -200, 160 \rangle$	$\langle -700, -295 \rangle$	$\langle -235, 160 \rangle$
	Y	$\langle -400, -230 \rangle$	$\langle -400, 295 \rangle$	$\langle -400, 300 \rangle$
	Z	$\langle -1105, 0 \rangle$	$\langle -1030, 0 \rangle$	$\langle -1030, 0 \rangle$
Statistical outlier removal filtr	Počet sousedů použitých pro odhad střední vzdálenosti	100	100	100
	Multiplikátor směrodatné odchylky	1	1	1
Metrika		Milimetr	Milimetr	Metr

Na modifikované výsledky skenování byly aplikovány všechny dostupné registrační algoritmy s parametry uvedenými v tab. 5.3.

Tab. 5.3 – Použité parametry zvolených registračních algoritmů

Iterative closest point	
Maximální počet iterací	800
Transformační epsilon	1×10^{-8}
Maximální vzdálenost mezi odpovídajícími body	5
Euklidovský rozdíl vzdáleností epsilon	0
Normal distributions tranform	
Počet iterací	80
Transformační epsilon	1×10^{-8}
Velikost kroku	1
Rozlišení NDT mřížky	10
Robust point matching	
Sigma	1
Míra žihání	0,97
Robust point matching	
Zahrnout odlehlé body do výpočtu	Ano
Tolerance	1×10^{-15}

Tab. 5.3 – Použité parametry zvolených registračních algoritmů – pokračování

Robust point matching	
Lambda	0,8
Maximální počet iterací	80
Maximální počet EM iterací	8
Cohereint point drift	
Sigma	1
Míra žíhání	0,97
Zahrnout odlehlé body do výpočtu	Ano
Beta	0,8
Lambda	0,8
Tolerance	1×10^{-15}
Maximální počet iterací	80
Maximální počet EM iterací	8

Zvolené parametry pro hodnocení skenerů a pro nalezení globálního minima jsou zobrazeny v tab. 5.4.

Tab. 5.4 – Použité parametry pro hodnocení skenerů a Super4PCS

Parametry hodnocení	
Limit vzdálenosti	3 mm
Nastavení SUPER4PCS	
Přesnost registrace (<i>Delta</i>)	8
Počet vzorků	300
Prahová hodnota k filtrování páru dle jejich konzistence	-1
Prahová hodnota k filtrování párů dle jejich hodnoty RGB	-1
Maximální doba výpočtu	100 s

5.3 HODNOCENÍ DATOVÉ SADY

Pro zhodnocení skenů a skenerů byla využita vytvořená aplikace s parametry uvedenými v oddílu 5.2. Celkové hodnocení skeneru je vypočteno z jednotlivých hodnocení skenerů při skenování objektů umístěných na skenovaných pozicích. Celkové hodnocení skeneru je pro každý druh materiálu vypočteno vzorcem

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n} \quad (5.1)$$

kde n je počet pozic, ve kterých byl objekt daného materiálu skenován,

s – pole obsahující jednotlivé hodnocení skenů podle umístění objektu při skenování.

Následně dochází k porovnání těchto hodnocení napříč všemi skenery.

5.3.1 Výsledky pro algoritmus ICP

Za použití registračního algoritmu ICP byly ohodnoceny vložené výsledky skenování. Hodnocení jednotlivých skenů dřevěného objektu jsou zobrazena v tab. 5.5. Z výsledků je zřejmé, že pro skenování dřevěného objektu registrační algoritmus ICP detekoval skener Photoneo jako jednoznačně nejlepší, jako druhý nejlepší skener Realsense a jako nejhorší skener Basler. Z jednotlivých hodnocení skenů bylo zjištěno, že výsledná bodová mračna skeneru Photoneo odpovídají průměrně z 26,6 % referenčnímu modelu. Znatelně horších výsledků dosahuje skener Realsense, protože výsledná bodová mračna odpovídají průměrně z 3 % referenčním modelům. Úplně nejhorších výsledků dosahují výsledná mračna ze skeneru Basler, které odpovídají průměrně z 0,8 % referenčním modelům. Největší shody 72,2 % mezi skenem a referenčním modelem bylo dosaženo skenerem Photoneo a umístěním skenovaného objektu do pozice 10.

Tab. 5.5 – Hodnocení dřevěného objektu ICP algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0342	27,7419	1,0775
Pozice 2	0,1601	16,9395	1,7719
Pozice 3	0,0425	21,3293	0,6049
Pozice 4	0,0543	21,9299	0,1327
Pozice 5	0,1005	13,5522	0,2890
Pozice 6	0,0846	3,2397	0,3335
Pozice 7	0,0911	18,9094	0,3736
Pozice 8	0,1531	10,2868	0,7925
Pozice 9	1,6680	71,1498	10,9823
Pozice 10	1,1909	72,1927	7,6685
Pozice 11	2,1562	71,0859	12,1833
Pozice 12	1,3382	72,1855	13,8674
Pozice 13	0,6083	11,4151	1,8462
Pozice 14	0,8899	9,9780	2,8172
Pozice 15	0,9442	7,7454	0,7067
Pozice 16	0,8505	10,4557	0,6228
Pozice 17	1,2935	17,1620	0,5562
Pozice 18	1,6780	18,1250	0,8299
Pozice 19	0,4333	19,3810	1,7569
Pozice 20	1,5482	17,5887	1,6929
Hodnocení	0,7660	26,6197	3,0453

Výsledky hodnocení skenů plastového objektu dle registračního algoritmu ICP jsou zobrazeny v tab. 5.6. Z výsledků je zřejmé, že nejlepších výsledků dosahuje skener Photoneo,

poté skener Realsense a nejhorších skener Basler. Výstupní bodová mračna ze skeneru Photoneo odpovídají průměrně z 20,7 % referenčním modelům, naopak ze skeneru Realsense průměrně z 1,34 % a ze skeneru Basler průměrně z 0,58 %. Největší shody 70,97 % mezi výstupním bodovým mračnem skeneru a referenčním modelem je dosaženo skenerem Photoneo a umístěním objektu do pozice 10.

Tab. 5.6 – Hodnocení plastového objektu ICP algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0916	13,1826	0,5313
Pozice 2	1,0838	27,0854	0,7218
Pozice 3	0,0915	11,9765	0,2175
Pozice 4	0,3838	17,0223	0,2401
Pozice 5	0,1637	7,8941	0,5224
Pozice 6	0,1261	3,1037	0,5101
Pozice 7	0,0833	16,1833	0,0764
Pozice 8	0,0555	8,0319	0,1217
Pozice 9	0,7650	70,7371	6,6409
Pozice 10	1,5175	70,9732	1,8026
Pozice 11	1,2408	69,0907	5,0113
Pozice 12	1,1397	58,4013	3,8333
Pozice 13	0,4673	7,2462	1,5059
Pozice 14	0,0525	1,2607	0,4243
Pozice 15	1,3617	0,4657	0,5280
Pozice 16	0,9910	4,7656	0,2690
Pozice 17	0,1577	6,1458	0,1848
Pozice 18	0,2780	4,4866	0,4687
Pozice 19	1,0637	14,4548	1,3555
Pozice 20	0,6369	2,2910	1,8661
Hodnocení	0,5876	20,7399	1,3416

Hodnocení skenů kovového objektu jsou umístěna v tab. 5.7. Z tabulky je zřejmé, že nejlepších výsledků dosahují skeny získané ze skeneru Photoneo. Bodová mračna ze skeneru Photoneo průměrně z 13,5 % popisují referenční modely. Znatelně horších výsledků dosahuje skener Realsense, kterého výstupní bodová mračna průměrně odpovídají z 0,9 % referenčnímu modelu. Ještě horších výsledků s průměrnou 0,14 % úspěšností popisu referenčního modelů dosahují výstupní bodová mračna skeneru Basler. Největší shody 49,5 % mezi skenem a modelem bylo dosaženo skenerem Photoneo a objektu umístěného v pozici 12.

Tab. 5.7 – Hodnocení kovového objektu ICP algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0276	15,3679	1,1434
Pozice 2	0,0114	12,9407	0,6204
Pozice 3	0,0258	9,9996	0,9555

Tab. 5.7 – Hodnocení kovového objektu ICP algoritmem – pokračování

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 4	0,1788	7,5385	0,1732
Pozice 5	0,0427	5,6536	0,1811
Pozice 6	0,1695	1,8183	0,3969
Pozice 7	0,3766	12,1717	0,2223
Pozice 8	0,1322	5,1040	0,0972
Pozice 9	0,1616	41,6163	2,6024
Pozice 10	0,2404	37,7710	1,1620
Pozice 11	0,4329	46,2371	1,8534
Pozice 12	0,0522	49,5251	1,2008
Pozice 13	0,1405	2,1416	1,0335
Pozice 14	0,0952	0,9238	0,6712
Pozice 15	0,1222	0,1508	0,3217
Pozice 16	0,0120	0,4311	0,4718
Pozice 17	0,0163	0,4397	0,2799
Pozice 18	0,0570	7,2284	1,1155
Pozice 19	0,3543	1,9557	1,5249
Pozice 20	0,2113	11,0866	1,9637
Hodnocení	0,1430	13,5051	0,8995

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že registrační algoritmus ICP jednoznačně určil pro skenování objektů ze dřeva, kovu a plastu skener Photoneo jako nejlepší, jako druhý nejlepší skener Realsense a jako nejhorší skener Basler. Skener Photoneo nejlépe oskenuje dřevěný objekt, následně plastový a nejhůř kovový objekt. Pro všechny vybrané typy materiálů je zřejmé, že skener Photoneo dokáže s mnohonásobně větší průměrnou úspěšností oskenovat požadovaný objekt než ostatní vybrané skenery.

5.3.2 Výsledky pro algoritmus NDT

Pro hodnocení skenerů byl následně použit registrační algoritmus NDT. Výsledky hodnocení skenů dřevěného objektu jsou zobrazeny v tab. 5.8. Z tabulky je zřejmé, že znatelně nejlepších výsledků je dosaženo při použití skeneru Photoneo, druhých nejlepších při použití skeneru Realsense a nejhorších při skeneru Basler. Výstupní bodová mračna ze skeneru Photoneo jsou průměrně z 23 % shodné s referenčními modely. Naopak výstupní bodová mračna ze skeneru Realsense průměrně odpovídají pouze z 3 % referenčním modelům. Úplně nejhorší výsledků dosahuje skener Basler, kterého výstupní bodová mračna průměrně odpovídají pouze z 0,7 % referenčním modelům. Nejlepší shody 59 % bylo dosaženo skenerem Photoneo ve skenované pozici 12.

Tab. 5.8 – Hodnocení dřevěného objektu NDT algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0593	25,5776	1,1928
Pozice 2	0,1596	13,3836	1,6017
Pozice 3	0,0261	19,6832	0,6618
Pozice 4	0,0901	20,4579	0,1318
Pozice 5	0,0972	12,3146	0,3257
Pozice 6	0,0945	3,2958	0,2583
Pozice 7	0,0797	16,3286	0,3404
Pozice 8	0,1469	15,8975	0,5261
Pozice 9	1,6635	57,4029	10,2989
Pozice 10	1,2308	56,0811	7,9237
Pozice 11	2,2023	52,9200	13,1483
Pozice 12	1,3404	58,9685	13,3141
Pozice 13	0,5537	14,7740	1,6390
Pozice 14	0,8255	6,3390	2,5844
Pozice 15	0,9004	6,3711	0,7010
Pozice 16	1,0249	11,8026	0,5226
Pozice 17	0,8970	16,3135	0,5707
Pozice 18	1,2747	17,0738	0,8457
Pozice 19	0,5032	17,4379	2,2142
Pozice 20	1,4698	17,3672	1,9619
Hodnocení	0,7320	22,9895	3,0381

Výsledky skenů plastového objektu jsou umístěny do tab. 5.9. Znatelně největší průměrné shody 19,3 % mezi výstupními bodovými mračenami a referenčními modely je dosaženo při použití skeneru Photoneo. Znatelně horších výsledků dosahují výstupní bodová mračna skeneru Realsense, která průměrně odpovídají z 1,3 % referenčním modelům. Výstupní bodová mračna skeneru Basler dosahují pouze průměrné shody 0,6 % vůči referenčním modelům. Nejlepší sken s 66,4 % shodou s referenčním modelem byl získán skenerem Photoneo s objektem umístěným v pozici 10.

Tab. 5.9 – Hodnocení plastového objektu NDT algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0838	13,5756	0,3362
Pozice 2	0,9822	27,1465	0,6255
Pozice 3	0,1679	10,4144	0,1865
Pozice 4	0,4857	17,5250	0,2354
Pozice 5	0,1803	5,6642	0,4642
Pozice 6	0,1090	3,3734	0,4959
Pozice 7	0,1128	19,2676	0,0779
Pozice 8	0,0517	6,6199	0,1132
Pozice 9	0,6245	62,1147	6,0133
Pozice 10	1,4344	66,4184	3,8444
Pozice 11	1,1739	63,1589	4,1349

Tab. 5.9 – Hodnocení plastového objektu NDT algoritmem – pokračování

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 12	0,9994	57,7314	4,1349
Pozice 13	0,4006	6,9717	1,2113
Pozice 14	0,0700	1,1484	0,5968
Pozice 15	1,3681	0,8974	0,4687
Pozice 16	0,8793	2,8484	0,2919
Pozice 17	0,1869	7,1190	0,1798
Pozice 18	0,2617	4,6840	0,3425
Pozice 19	0,9668	6,9496	1,3142
Pozice 20	0,5877	2,3807	1,3768
Hodnocení	0,5563	19,3005	1,3222

Hodnocení skenů kovového objektu je uloženo do tab. 5.10. Z tabulky je zřejmé, že výstupní bodová mračna skeneru Photoneo dosahují průměrně 12,8 % shody s referenčními modely. Druhých nejlepších výsledků dosahují výstupní bodová mračna skeneru Realsense, které mají průměrnou 1 % shodu s referenčními modely. Zcela neuspokojivých výsledků dosahují výstupní bodová mračna skeneru Basler, která mají průměrnou shodu 0,14 % s referenčními modely. Skener Photoneo při skenování objektu umístěného na pozici 11 dosahuje největší shody s referenčním modelem.

Tab. 5.10 – Hodnocení kovového objektu NDT algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0293	13,1304	1,0418
Pozice 2	0,0004	13,1129	0,7861
Pozice 3	0,0281	8,7005	0,8462
Pozice 4	0,1363	8,0371	0,1866
Pozice 5	0,0341	4,5516	0,4409
Pozice 6	0,1519	2,3406	0,3005
Pozice 7	0,3844	11,1628	0,2069
Pozice 8	0,1135	6,5469	0,1169
Pozice 9	0,1707	32,7675	2,5628
Pozice 10	0,2539	36,9267	1,5295
Pozice 11	0,3957	48,8858	3,1987
Pozice 12	0,0341	47,7251	1,2314
Pozice 13	0,1780	2,6225	0,8931
Pozice 14	0,0928	0,9526	0,5612
Pozice 15	0,1564	0,1478	0,2747
Pozice 16	0,0096	0,3833	0,4011
Pozice 17	0,0291	0,4249	0,4078
Pozice 18	0,0669	5,7195	0,8905
Pozice 19	0,2593	1,6133	1,6377
Pozice 20	0,2198	9,3044	1,9051
Hodnocení	0,1372	12,7528	0,9710

Výše uvedené hodnocení označilo skener Photoneo jako zcela nevhodnější pro skenování všech zvolených typů materiálů. Nejlépe oskenuje dřevěný objekt, následně plastový objekt a nejméně kvalitně kovový objekt. Druhých nejlepších výsledků dosahuje skener Realsense, ale průměrná úspěšnost správného oskenování je výrazně nižší než u skeneru Photoneo. Zcela neuspokojivých výsledků dosahují výstupní bodová mračna ze skeneru Basler.

5.3.3 Výsledky pro algoritmus RPM

K hodnocení skenerů byl také využit registrační algoritmus RPM. Výsledné hodnocení bodových mračen dřevěného objektu pro zvolené skenované pozice je umístěno v tab. 5.11. Největší průměrná míra shody 20,7 % mezi výstupními bodovými mračny a referenčními modely byla nalezena u skeneru Photoneo. Druhá největší průměrná míra shody 15,1 % nastala mezi výstupními skeny skeneru Realsense a referenčními modely. Nejnižší průměrnou míru shody 4,9 % s referenčními modely dosahují výstupní bodová mračna ze skeneru Basler. K největší shodě 52,1 % mezi skenem a referenčním modelem nastalo při použití skeneru Photoneo a umístěním objektu do pozice 12.

Tab. 5.11 – Hodnocení dřevěného objektu RPM algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,4652	16,9723	6,2714
Pozice 2	0,8126	15,1225	8,2429
Pozice 3	0,1556	12,9344	2,8073
Pozice 4	0,5139	14,5154	0,9423
Pozice 5	1,4781	9,5083	6,3984
Pozice 6	1,3744	11,2677	4,9405
Pozice 7	0,3049	11,5786	1,9708
Pozice 8	0,2292	13,9210	3,6362
Pozice 9	12,6629	45,9008	32,2976
Pozice 10	10,8809	43,3793	35,5579
Pozice 11	11,5121	49,0157	38,9679
Pozice 12	10,3243	52,0996	37,1328
Pozice 13	6,1221	10,7702	23,9301
Pozice 14	6,8996	11,2689	22,1382
Pozice 15	6,1121	13,2160	11,1108
Pozice 16	4,4176	12,8383	11,9423
Pozice 17	3,2791	19,1664	10,9778
Pozice 18	4,4413	19,2384	9,6357
Pozice 19	8,9917	18,5938	15,4763
Pozice 20	7,7198	13,3423	18,3139
Hodnocení	4,9349	20,7325	15,1346

Hodnocení výsledků skenování plastového objektu jsou zobrazena v tab. 5.12. Výsledky ukazují, že největší průměrná míra shody 15,5 % mezi výstupními bodovými mračny a referenčními modely je dosažena skenerem Photoneo. Druhé největší průměrné míry shody 13,4 % s referenčními modely bylo dosaženo výstupními bodovými mračny skeneru Realsense. Nejnižší průměrné shody s referenčními modely dosahují bodová mračna ze skeneru Basler. Nejvíce odpovídající sken vůči referenčnímu modelu byl získán skenerem Photoneo na pozici 11.

Tab. 5.12 – Hodnocení plastového objektu RPM algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	1,1964	9,2020	10,5337
Pozice 2	3,5028	12,1047	6,7657
Pozice 3	1,4204	4,4043	3,9716
Pozice 4	2,8016	7,4174	2,1564
Pozice 5	0,6350	4,0023	4,8076
Pozice 6	2,1819	7,9897	3,4498
Pozice 7	1,2280	9,1990	1,4841
Pozice 8	0,4276	10,7017	1,4385
Pozice 9	13,4846	48,9144	34,9929
Pozice 10	18,8001	44,5613	26,3279
Pozice 11	19,5149	51,5861	34,4227
Pozice 12	7,9895	46,5628	34,8724
Pozice 13	9,1032	10,8383	21,7388
Pozice 14	3,5509	7,1190	23,3037
Pozice 15	5,6062	3,1391	10,1896
Pozice 16	5,6958	3,5944	11,4364
Pozice 17	5,5444	4,1333	4,3417
Pozice 18	6,4229	6,2603	8,0219
Pozice 19	7,5351	7,0122	8,7225
Pozice 20	11,7309	12,0908	14,3613
Hodnocení	6,4186	15,5417	13,3670

Výsledky skenů kovového objektu jsou umístěny v tab. 5.13. Největší průměrná míra shody 13,4 % s referenčními modely byla nalezena u výstupních bodových mračen ze skeneru Realsense. Velice podobné shody dosahují výstupní bodová mračna skeneru Photoneo. Zcela nejhorších výsledků dosahují skeny ze skeneru Basler. Nejvíce odpovídající sken byl získán při skenování objektu na pozici 11 skenerem Photoneo.

Tab. 5.13 – Hodnocení kovového objektu RPM algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0119	7,7920	10,5337
Pozice 2	0,0496	10,3234	6,7657
Pozice 3	0,0872	4,6255	3,9716
Pozice 4	0,1109	4,1807	2,1564

Tab. 5.13 – Hodnocení kovového objektu RPM algoritmem – pokračování

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 5	0,5194	6,8999	4,8076
Pozice 6	0,4137	10,8277	3,4498
Pozice 7	0,6169	9,4781	1,4841
Pozice 8	0,2213	8,3616	1,4385
Pozice 9	2,0630	34,0895	34,9929
Pozice 10	0,8459	36,3864	26,3279
Pozice 11	0,9254	42,7310	34,4227
Pozice 12	0,0220	41,5711	34,8724
Pozice 13	3,4144	7,0725	21,7388
Pozice 14	1,6036	8,0864	23,3037
Pozice 15	1,0768	2,8806	10,1896
Pozice 16	0,1365	4,0485	11,4364
Pozice 17	0,0617	3,3731	4,3417
Pozice 18	0,0424	4,0689	8,0219
Pozice 19	1,7715	6,1089	8,7225
Pozice 20	2,5724	7,2091	14,3613
Hodnocení	0,8283	13,0057	13,3670

Z hodnocení vyplývá, že výstupní bodová mračna ze skeneru Photoneo jsou nejvíce podobná požadovaným referenčním modelům. Skener Photoneo dosahuje oproti ostatním typům skenerů nejlepších výsledků při skenování dřevěného a plastového objektu. Druhých nejlepších výsledků je dosaženo při použití skeneru Realsense, který dokonce umožňuje nejlépe oskenovat kovový objekt. Nejhorší míry shody s referenčními modely dosahují skeny ze skeneru Basler.

5.3.4 Výsledky pro algoritmus CPD

Poslední hodnocení skenů je provedeno registračním algoritmem CPD. Nejprve byly hodnoceny skeny dřevěného objektu. Výsledky hodnocení jsou umístěny v tab. 5.14. Největší průměrné shody 19,6 % s referenčními modely dosahují skeny skeneru Photoneo. Druhou největší průměrnou shodu 14,6 % mají vůči referenčním modelům výstupní bodová mračna skeneru Realsense. Nejhorších výsledků dosahují skeny skeneru Basler.

Tab. 5.14 – Hodnocení dřevěného objektu CPD algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	1,2215	20,3043	6,1080
Pozice 2	1,3112	17,9423	9,8325
Pozice 3	0,4463	13,0641	5,0553
Pozice 4	0,6672	17,6050	3,2282
Pozice 5	2,2579	4,9490	6,4430
Pozice 6	2,0342	10,0120	5,8703

Tab. 5.14 – Hodnocení dřevěného objektu CPD algoritmem – pokračování

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 7	0,4965	10,4351	2,5426
Pozice 8	0,3344	15,3570	4,4658
Pozice 9	14,2512	42,6099	34,5879
Pozice 10	10,6017	40,9618	34,6862
Pozice 11	14,7505	48,7346	36,8889
Pozice 12	9,9954	50,3555	37,8726
Pozice 13	7,2925	10,2423	16,6708
Pozice 14	8,2783	7,7370	20,2034
Pozice 15	7,9236	9,1799	11,6652
Pozice 16	5,3533	9,8487	8,8996
Pozice 17	3,7783	13,5791	7,4810
Pozice 18	5,2307	14,2774	7,4591
Pozice 19	10,1694	17,6079	14,4048
Pozice 20	7,7186	18,0575	17,4065
Hodnocení	5,7056	19,6430	14,5886

Ohodnocené skeny plastového objektu jsou vloženy do tab. 5.15. Z výsledných hodnocení jednotlivých skenerů je zřejmé, že největší shoda mezi referenčními modely a skeny nastává u skeneru Photoneo. Skeny skeneru Photoneo průměrně odpovídají z 15,9 % referenčním modelům. Druhých nejlepších výsledků dosahuje skener Realsense. Výstupní bodová mračna ze skeneru Realsense odpovídají průměrně z 12,7 % referenčním modelům. Nejhorších výsledků dosahují skeny skeneru Basler. Největší shoda 49,9 % byla získána umístěním objektu do pozice 11 a oskenováním objektu skenerem Photoneo.

Tab. 5.15 – Hodnocení plastového objektu CPD algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	1,8101	8,7393	6,0200
Pozice 2	3,9898	15,3030	6,4136
Pozice 3	2,1069	5,8664	2,0484
Pozice 4	2,5985	9,5720	3,0133
Pozice 5	1,2276	4,7784	7,8562
Pozice 6	2,7555	9,4220	6,0835
Pozice 7	1,8732	8,5194	2,8337
Pozice 8	0,8146	9,3958	1,1326
Pozice 9	15,1147	44,1396	31,8408
Pozice 10	18,9425	42,4948	20,6442
Pozice 11	19,5557	49,8625	41,4338
Pozice 12	9,9124	46,8038	30,8905
Pozice 13	7,4385	9,3055	16,4692
Pozice 14	3,2269	8,8077	18,0503
Pozice 15	7,4956	4,0310	11,4202
Pozice 16	6,0832	3,8915	7,8945

Tab. 5.15 – Hodnocení plastového objektu CPD algoritmem – pokračování

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 17	4,6168	5,7914	5,3249
Pozice 18	4,8130	7,7472	5,9057
Pozice 19	8,6415	10,5160	13,4132
Pozice 20	10,6436	12,4381	15,0353
Hodnocení	6,6830	15,8713	12,6862

Hodnocení skenů kovového objektu je zobrazeno v tab. 5.16. Průměrná míra shody mezi referenčními modely a výstupy ze skenerů je velmi podobná u skenerů Photoneo a Realsense. Mírně většího hodnocení dosahuje skener Photoneo. Znatelně nejhorších výsledků dosahují výstupní bodová mračna skeneru Basler. Při umístění objektu do pozice 11 a následným skenováním skenerem Photoneo byla získána největší míra shody s referenčním modelem.

Tab. 5.16 – Hodnocení kovového objektu CPD algoritmem

	Basler	Photoneo	Realsense
Pozice 1	0,0645	10,3257	10,3807
Pozice 2	0,0859	10,1938	10,6159
Pozice 3	0,1565	5,7384	5,9374
Pozice 4	0,3025	6,4543	3,6636
Pozice 5	0,8052	5,5567	7,3266
Pozice 6	0,7295	11,7675	3,1339
Pozice 7	1,1123	9,2173	1,9134
Pozice 8	0,4548	7,8627	1,9642
Pozice 9	2,8384	37,8452	29,6389
Pozice 10	1,1246	34,4284	26,1716
Pozice 11	4,6298	41,4585	34,6489
Pozice 12	0,0945	41,0231	33,7184
Pozice 13	5,0143	7,9562	19,8410
Pozice 14	2,5634	6,6496	17,2219
Pozice 15	1,4743	3,7950	11,7344
Pozice 16	0,3334	4,0922	8,7344
Pozice 17	0,1563	3,8158	5,8195
Pozice 18	0,1233	4,5825	5,8055
Pozice 19	2,4339	10,3963	11,7068
Pozice 20	3,2978	8,3287	12,1939
Hodnocení	1,3898	13,5744	13,1085

Z výše uvedených výsledků bylo zjištěno, že nejvíce odpovídající bodová mračna pro všechny zkoumané materiály jsou získány skenerem Photoneo. Druhých nejvíce odpovídajících skenů je získáno při použití skeneru Realsense. Skener Realsense u kovového objektu dosahuje velmi podobných výsledků jako skener Photoneo. Nejméně odpovídající bodová mračna generuje skener Basler.

5.3.5 Celkové hodnocení skenerů

Pro každý testovaný typ skeneru lze na základě průměrných hodnocení určit, jaký druh materiálu skener nejlépe nebo nejhůře oskenuje. Výstupy ze všech registračních algoritmů jednoznačně ukazují, že skener Basler vrací nejméně kvalitní skeny při skenování kovového objektu. Tuhé registrační algoritmy pro skener Basler detekovaly dřevěný objekt jako nejlépe oskenovaný, naopak pružné registrační algoritmy detekovaly plastový objekt jako nejlépe oskenovaný. Jelikož tuhé registrační algoritmy nedeformují vstupní bodové mračno, má jejich výsledné hodnocení větší rozhodující váhu než pružné registrační algoritmy. Z tohoto důvodu skener Basler nejlépe oskenoval dřevěný objekt, následně plastový objekt a nejhůře kovový objekt. U skeneru Photoneo došlo ve všech registračních algoritmech k jednomyslné shodě. Skener Photoneo dokáže nejlépe oskenovat dřevěný objekt, následně objekt plastový a nejhůře objekt kovový. Výsledky registračních algoritmů ukazují, že skener Realsense nejlépe oskenovuje dřevěný objekt. Až na výjimku u registračního algoritmu CPD je ostatními registračními algoritmy detekováno, že výstupní skeny plastového objektu ze skeneru Realsense dosahují druhých nejkvalitnějších výsledků. Z těchto výsledků je zřejmé, že všechny testované typy skenerů vrací nejlepší výsledky při skenování dřevěného objektu, druhých nejlepších při skenování plastového objektu a nejhorších výsledků, při skenování kovového objektu.

Na základě průměrných hodnocení skenerů lze porovnat testované skenery. Všechny registrační algoritmy se shodly, že ke skenování dřevěného objektů je nejvhodnější použít skener Photoneo, následně skener Realsense. Pro skenování plastového objektu došlo k jednomyslné shodě hodnocení ze všech registračních algoritmů. Nejvíce odpovídající bodová mračna plastového objektu jsou získána skenerem Photoneo, následně skenerem Realsense a nejméně odpovídající skenerem Basler. Pro skenování kovového objektu byl na základě hodnocení výsledků z registračních algoritmů ICP, NDT a RPM detekován jako nejlepší skener Photoneo, následně skener Realsense a jako nejhorší skener Basler. Jediné hodnocení výstupů z registračního algoritmu CPD indikovalo jako nejlepší skener Realsense, následně skener Photoneo a jako nejhorší skener Basler. Jelikož je u registračního algoritmu CPD rozdíl mezi průměrným hodnocením skenerů Photoneo a Realsense minimální a všechny ostatní registrační algoritmy shodně indikují skener Photoneo jako nejlepší, je zvolen jako nejvhodnější. Je tedy zřejmé, že skener Photoneo dosahuje při skenování všech testovaných materiálů nejlepších výsledků a skener Basler zcela nejhorších výsledků.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit postup hodnocení kvality 3D skenerů s ohledem na využití při lokalizaci složitých objektů. Před vývojem hodnocení jsem se seznamoval s danou problematikou a s vybranými 3D skenery. Jedná se o skener Photoneo PhoXi L, Realsense D415 a Basler ToF640-20gm. Práce s těmito skenery nebyla nijak problematická, protože jsou k nim dodávány podrobné a srozumitelné dokumentace. Jejich nastavení a ovládání bylo provedeno přes dodávaná uživatelská prostředí, která jsou velice intuitivní. K hodnocení vybraných skenerů byl navrhnut a vyroben objekt ze tří různých materiálů. Objekt z kovu a ze dřeva byl vyroben manuálně v domácích podmínkách a plastový objekt na univerzitní 3D tiskárně. Výsledné rozměry objektů jsou v maximální možné míře shodné.

Pro každý skener byla dle výše uvedeného postupu skenování získána datová sada. Při skenování objektů jsem se pokusil zachovat pro každý skener stejné podmínky, aby byly výsledky hodnocení co nejvíce vypovídající. Jelikož nebylo možné umístit všechny skenery do totožné pozice, byly pozice skenerů nepatrně odlišné. Do vybrané pozice na pracovní ploše jsem se pokoušel s velkou přesností umístit skenované objekty. Po konzultaci s vedoucím práce jsem se rozhodl nevyužít zabudovaná světla nad pracovní plochou, proto mohlo docházet v průběhu skenování k různým světelným podmínkám. K rozdílným podmínkám v průběhu skenování také mohlo dojít vlivem samovolného uvolňování pracovní plochy. Pro získání více vypovídajících výsledků by proto bylo nutné vytvořit nástavce pro skenery, které by zajistily shodné umístění skenerů, vytvořit stejné světelné podmínky, upevnit pracovní plochu, aby nedocházelo k jejímu posunu a rotaci.

Na výsledná data ze skenerů byly aplikovány modifikační algoritmy, které odstranily data neodpovídající skenovanému objektu. Modifikovaná data byla následně druhým představeným způsobem hodnocena. Druhý představený způsob hodnocení dle mého názoru zahrnuje všechny důležité parametry určující shodu mezi skenem a modelem. Oproti předchozím vyvíjeným verzím hodnocení umožňuje detekovat případy, ve kterých docházelo ke zkresleným hodnocením. Jedná se například o stav, kdy sken obsahoval nedostatečně oskenovaný objekt a registrační algoritmus jej dokázal s velkou přesností umístit na model. Proto nastávaly situace, kdy viditelně horší skeny byly ohodnoceny lépe než skeny viditelně zdařilejší. Druhý představený princip hodnocení lze výrazně vylepšit jiným způsobem tvorby referenčních modelů.

Získaná hodnocení skenerů indikovaly skener Photoneo jako jednoznačně nejlepší, druhých nejlepších výsledků bylo dosaženo skenerem Realsense a znatelně nejhorších výsledků

skenerem Basler. Výsledky potvrzují mé subjektivní hodnocení skenů dle jejich vizualizace. Z tohoto důvodu považuji princip hodnocení skenerů za vhodný.

LITERATURA

- 3DSCAN, 2020. Výstupní data. *3D Skenování | 3DSCAN* [online]. SolidVision s.r.o. [cit. 29. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/vystupni-data/>
- BASLER, 2018. *Basler ToF Camera: User's manual*. [online]. Basler AG. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/downloads/document-downloads/basler-tof-camera-users-manual/>
- BASLER, 2021. Products – Cameras, Powerpacks, Accessories, Software. *AG – Industrial Camera Manufacturer*. [online]. Basler AG. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/>
- BERG, M.; CHEONG, O.; KREVELD, M.; OVERMARS, M. 2008. *Computational Geommetry: Algorithms and Applications*. Springer Science & Business Media. 386 p. ISBN 3540779744.
- BESL, P. J.; MCKAY, N. D. 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. Vol. 14 (1992), No. 2, pp. 239 – 256. [online]. [cit. 12. 05. 2021]. ISSN 1939-3539. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/121791>
- BIBER, P.; STRASSER, W. 2003. The normal distributions transform: a new approach to laser scan matching. *Proc. IEEE/RJS Int. Conf. Intelligent Robots and Syst.* Vol. 3 (2003), pp. 2743 – 2748. [online]. [cit. 18. 05. 2021]. ISSN 1650-8580. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1249285>
- CREAFORM, 2019. Automate your quality control using in-line and at-line metrology solutions. *Portable & Robot Mounted 3D Scanners and CMM Solutions*. [online]. Creaform blog. [cit. 29. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/blog/automate-your-quality-control-using-in-line-and-at-line-metrology-solutions/#gref>.
- EBRAHIM, M. 2015. 3D Laser Scanners' Techniques Overview. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Vol. 4 (2015), No. 10, pp. 323 – 331. [online]. [cit. 29. 05. 2020]. ISSN 2319-7064. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Mostafa_Ebrahim/publication/282753883_3D_Laser_Scanners'_Techniques_Overview/links/561b66cb08ae044edbb24210/3D-Laser-Scanners'-Techniques-Overview.pdf
- HYVÄRINEN, J. 2012. *Surface reconstruction of point clouds captured with microsoft kinect*. [online]. Bakalářská práce. Oulu: Oulu University of Applied Sciences. 49 s. Vedoucí: P. Alaluukas, J. Vajjus-Anttila. [cit. 29. 05. 2020]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/38057034.pdf>
- CHUI, H.; RANGARAJAN, A. 2002. A new point matching algorithm for non-rigid registration. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol. 89 (2003), pp. 114-141. [online]. [cit. 13. 05. 2021]. ISSN 1077-3142. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1077314203000092>
- INTEL REALSENSE, 2020. *Intel Realsense Product Family D400 Series*. [online]. Intel, Santa Clara. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2020/06/Intel-RealSense-D400-Series-Datasheet-June-2020.pdf?_ga=2.200780713.604484926.1597669029-824483429.1595360499

- INTEL REALSENSE, 2021a. Use Cases. *Coded light short-range cameras – Intel RealSense Technology*. [online]. Intel. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/use-cases/>
- INTEL REALSENSE, 2021b. Lidar. *Coded light short-range cameras – Intel RealSense Technology*. [online]. Intel. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/lidar/>
- INTEL REALSENSE, 2021c. Stereo Depth. *Coded light short-range cameras – Intel RealSense Technology*. [online]. Intel. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/stereo-depth/>
- INTEL REALSENSE, 2021d. Coded light. *Coded light short-range cameras – Intel RealSense Technology*. [online]. Intel. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/coded-light/>
- INTEL REALSENSE, 2021e. Tracking technology. *Coded light short-range cameras – Intel RealSense Technology*. [online]. Intel. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.intelrealsense.com/tracking/>
- KIVOLYA, N. 2019. What are 3D scanners used for?. *Professional 3D Scanners | Artec 3D | Best 3D Scanning Solutions*. [online]. Artec3D, 14. 7. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com/learning-center/what-are-3d-scanners-used-for>
- LI, Y.; LIU, G.; GAO, J.; HE, Z.; BAI, M.; LI, CH. 2019. *Efficient Spatial Nearest Neighbor Queries Based on Multi-layer Voronoi Diagrams*. [online]. [cit. 29. 05. 2020]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1911.02788.pdf>
- MAGNUSSON, M. 2013. *The Three-Dimensional Normal-Distributions Transform – an Efficient Representation for Registration, Surface Analysis, and Loop Detection*. [online]. [cit. 18. 05. 2021]. ISSN 1650-8580. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.411.9341>
- MELLADO, N.; AIGER, D; MITRA, N. J. 2014. Super 4PCS Fast Global Pointcloud Registration via Smart Indexing. *Computer Graphics Forum*. Vol. 33 (2014), No. 5, pp. 205 – 215. [online]. [cit. 18. 05. 2020]. Dostupné z: <http://geometry.cs.ucl.ac.uk/projects/2014/super4PCS/super4pcs.pdf>
- MINTO, L. 2014. *An Integer Programming Approach to Hand Pose Estimation Using Depth Data*. [online]. Bakalářská práce. Padov: Università di Padova, Katedra informačního inženýrství. 52 s. Vedoucí: P. Zanuttigh; G. Marin. [cit. 29. 05. 2020]. Dostupné z: http://tesi.cab.unipd.it/46130/1/ludovico_minto_tesi.pdf
- MIROPOLSKY, A.; FISHER, A. 2004. Reconstruction with 3D Geometric Bilateral Filter. *ACM symposium on Solid modelling and applications*. pp. 225 – 229. [online]. [cit. 29. 05. 2020]. ISSN 1811-7783. Dostupné z: https://diglib.eg.org/bitstream/handle/10.2312/sm20041393/225-229_miropolsky.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- MORENO, C.; Li, M. 2017. Frame Filtering and Skipping for Point Cloud Data Video Transmission. *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*. Vol. 2 (2017), No. 1, pp. 76 – 83. [online]. [cit. 12. 05. 2021]. ISSN 2415-6698. Dostupné z: https://www.astesj.com/publications/ASTESJ_020109.pdf
- MYRONENKO, A.; SONG, X. 2009. Point-Set Registration: Coherent Point Drift. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 32 (2009), No. 12, pp. 2262 – 3275. [online]. [cit. 29. 05. 2020]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/0905.2635.pdf>

- PENG, L.; LI, G.; XIAO, M.; XIE, L. 2016. Robust CPD Algorithm for Non-Rigid Point Set Registration Based on Structure Information. *PLoS ONE*. Vol. 11(2016), No. 2. [online]. [cit 29. 05. 2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148483>
- PHOTONEO, 2020a. *PhoXi Control 1.2 User Manual*. [online]. Photoneo. [cit. 11. 5. 2021]. <https://photoneo.com/files/manuals/PhoXiControl1.2-UserManual.pdf>
- PHOTONEO, 2020b. *PhoXi 3D Scanner: User Manual and Installation Instructions*. [online]. Photoneo. [cit. 11. 5. 2021]. https://photoneo.com/files/manuals/PhoXi-3D-Scanner_User-Manual_01-2020.pdf
- PHOTONEO, 2021. Use Cases. *Machine Vision and Automation Solutions | Photoneo Focused on 3D*. [online]. Photoneo. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.photoneo.com/use-cases/>
- Point cloud library, 2021. [online]. PCL [cit. 13. 5. 2021]. Dostupné z: <https://pointclouds.org/>
- PROCHÁZKOVÁ, J.; MARTIŠEK, D. 2018. Notes on Iterative Closest Point Algorithm. In: *17th Conference on Applied Mathematics APLIMAT 2018*. Bratislava. Slovak Republic. April. p. 876 – 884. [online]. [cit 29. 05. 2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Jana_Prochazkova3/publication/324500004_Notes_on_Iterative_Closest_Point_Algorithm/links/5ad0a5874585154f3f4857d2/Notes-on-Iterative-Closest-Point-Algorithm.pdf
- RUCHAY, A. N.; DOROFEEV, K. A; KALSCHIKOV, V. V. 2018. Accuracy analysis of 3D object reconstruction using point cloud filtering algorithms. *Applications of Digital Image Processing XLI*. pp. 169 – 174. [online]. [cit. 29. 05. 2020]. Dostupné z: <http://ceur-ws.org/Vol-2391/paper23.pdf>.
- SODAVISION, 2021. Phoxi 3D Scanner L. SODA VISION. *Machine Vision. Imaging Technologies*. [online]. SODA VISION. [cit. 11. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.sodavision.com/product/phoxi-3d-scanner-l/>
- SOLIDVISION, 2020. 3D skenování. *SolidVision*. [online]. SolidVision s.r.o. [cit. 29. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/3d-skenovani/>
- ZAGANIDIS, A.; MAGNUSSON, M.; DUCKETT, T.; CIELNIAK, G. 2017. Semantic-assisted 3D Normal Distributions Transform for scan registration in environment with limited structure. *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. pp. 4064 – 4069. [online]. [cit 12. 05. 2021]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/206130008.pdf>
- ZHANG, R.; LI, H.; LIU, L.; WU, M. 2017. A G-Super4PCS Registration Method for Photogrammetric and TLS Data in Geology. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Vol. 6(2017). [online]. [cit 12. 05. 2021]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/0fd3/b1563aae72b704c2e2eff1b99c994a660a8d.pdf>

PŘÍLOHY

A – CD

Příloha k diplomové práci
System pro benchmarking 3D vision systémů
Bc. Jakub Rolejček

CD

Obsah

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF
- 2 Úplný zdrojový kód sestavené aplikace
- 3 Video ukázka aplikace