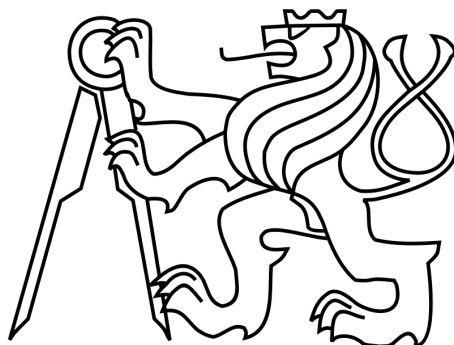


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

OBOR GEOMATIKA



DIPLOMOVÁ PRÁCE

ANALÝZA VYUŽITÍ GEOSLAM V PRAXI

ANALYSIS OF THE USE OF GEOSLAM IN PRACTICE

Vyhotovil: Bc. Jan Šartner

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Katedra geomatiky

Praha 2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Šartner Jméno: Jan Osobní číslo: 458771Zadávající katedra: geomatikyStudijní program: geodézie a kartografieStudijní obor: geomatika

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

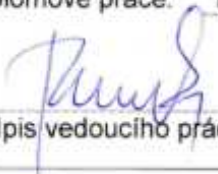
Název diplomové práce: Analýza využití GEOSLAM v praxiNázev diplomové práce anglicky: Analysis of the use of GEOSLAM in practice

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši literatury na téma pořizování mračen bodů (fotogrammetrie, totální motorizované stanice, laserové skenery). Zaměřte se na mobilní laserové skenování (mobilní i letecké) a zejména na zařízení typu indoor laser scanning a GeoSLAM. Proveďte vlastní měření 3 typů vybraných prostor různého charakteru a zhodnoťte efektivitu a časovou náročnost. Proveďte základní porovnání přesnosti tvorby a) mračna bodů b) vektorových výstupů pro ZEB REVO s přesnější metodou a ev. fotogrammetrickou metodou. Zpracujte ukázkou využití ZEB REVO v památkové péči, zhodnoťte výsledky.

Seznam doporučené literatury:

Filip A. et al: 2018. Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site. MDPI journal od remote sensing
Thomson, Ch. 2013. Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling,
DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-289-2013
Technická dokumentace GeoSLAM ZEB REVO

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Dr. Ing. Karel PavelkaDatum zadání diplomové práce: 17.2.2020Termín odevzdání diplomové práce: 17.5.2020*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*
Podpis vedoucího práce
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

24. 2. 2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je testování využitelnosti produktu ZEB-REVO poskytovaného společností GeoSLAM. Práce obsahuje stručný popis metod zaměření stavebního objektu, princip laserového skenování a popis přístroje ZEB-REVO a jeho testování.

ZEB-REVO je ruční mobilní laserový skener s inerciální měřicí jednotkou a technologií SLAM využitelný v oblastech geodézie, architektury, stavebního inženýrství a archeologie. Testování přístroje ZEB-REVO je provedeno jednak formou porovnání výstupů s jinými metodami z hlediska přesnosti, ceny, časové náročnosti a objemu pořízených dat, a jednak popisem relativní složitosti ovládání přístroje a příslušného softwaru.

Vybrané vnitřní prostory Fakulty stavební ČVUT byly zaměřeny pěti různými metodami. Výstupy v podobě mračen bodů a vektorové kresby půdorysu objektu byly porovnány s výstupy vytvořenými z dat měřených statickým laserovým skenerem Surphaser 25 HSX, jehož udávaná přesnost je 0,6 mm na 10 metrů vzdálenosti. Průměrný rozdíl v poloze identických bodů mračen byl 10,12 mm a průměrný rozdíl testovaných rozměrů vektorové kresby byl 13 mm. Přístroj ZEB-REVO tedy není vhodný pro měření s požadavky na přesnost v řádech milimetrů a vyšší. Čas potřebný k měření a zpracování dat byl pouze 2 hodiny a 26 minut, což značí velkou časovou úsporu.

Porovnání s fotogrammetrickou metodou, založenou na technologii IBMR, bylo provedeno na zaměření sochy kardinála Josefa Berana v Dejvicích v Praze. Průměrný rozdíl v poloze identických bodů mračen byl 25,04 mm. Na základě vizuálního hodnocení není přístroj ZEB-REVO vhodný pro dokumentaci drobných a detailních objektů.

KLÍČOVÁ SLOVA

GeoSLAM, ZEB-REVO, technologie SLAM, GeoSLAM Hub, mobilní laserové skenování, inerciální měřicí jednotka

ABSTRACT

The aim of this diploma work is testing of the use of ZEB-REVO which is a product provided by GeoSLAM company. The work contains a short description of methods used for measuring of buildings, principle of laser scanning and description of ZEB-REVO and its testing.

ZEB-REVO is a hand-held mobile laser scanner with inertial measurement unit and SLAM technology which can be used in geodesy, architecture, civil engineering and archeology. Testing of ZEB-REVO is realized both by comparing the outputs with other methods in aspects of accuracy, price, duration of processing and size of acquired data and by describing relative complexity of controlling the device and related software.

Chosen interiors of Faculty of Civil Engineering of Czech Technical University in Prague were measured by five different methods. Outputs in the forms of a point cloud and a floor plan vector drawing of the object were compared to the outputs created from data measured by the static laser scanner Surphaser 25 HSX which has accuracy 0,6 mm on 10 meters of measured distance. The average difference of position of identical points in point clouds was 10,12 mm and the average difference of tested proportions in the vector drawing was 13 mm. That means ZEB-REVO is not suitable for measuring with accuracy requirements in the degree of millimetres and higher. The time needed for measurement and data processing was only 2 hours and 26 minutes, which means significant time saving.

The comparison to photogrammetric method based on IBMR technology was realized on measurement of cardinal Josef Beran statue in Dejvice in Prague. The average difference in position of identical points of point clouds was 25,04 mm. According to visual evaluation ZEB-REVO is not suitable for documentation of small and detailed objects.

KEYWORDS

GeoSLAM, ZEB-REVO, SLAM technology, GeoSLAM Hub, mobile laser scanning, inertial measurement unit

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Analýza využití GEOSLAM v praxi“ jsem vypracoval samostatně. Použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Velice děkuji panu prof. Dr. Ing. Karlu Pavelkovi za vedení této diplomové práce, za pomoc při jejím psaní, za poskytnutí všech měřicích pomůcek, přístrojů, výpočetního softwaru, některých měřených dat a odborných publikací, za předání odborných znalostí týkajících se tématu diplomové práce, za pomoc při zpracování některých dat, za poskytnutí konzultací a také za ochotu, spolupráci a korekturu této práce.

Děkuji panu Ing. Karlu Pavelkovi za zpracování dat v softwaru Leica Cyclone register 360 a za ukázkou práce v tomto sw.

Děkuji svému tátovi Františku Šartnerovi za poskytnutí softwaru Geus, ve kterém byly zpracovány vektorové kresby.

Děkuji své přítelkyni Terezii Köhlerové za pomoc při překladu abstraktu do anglického jazyka.

Děkuji svým rodičům Lence a Františkovi Šartnerovým, všem ostatním členům rodiny, své přítelkyni Terezii Köhlerové a svým kamarádům za veškerou podporu a trpělivost po celou dobu psaní diplomové práce a po celou dobu studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	9
1 Úvod.....	10
2 Rešerše.....	12
2.1 Zaměření stavebního objektu a 3D modelování budov	12
2.2 MLS a GeoSLAM	14
2.3 Dostupné produkty ručního MLS	21
3 Metody zaměření stavebního objektu	25
3.1 Metoda oměrná.....	25
3.2 Metoda kolmicová.....	25
3.3 Metoda polární.....	25
3.4 Fotogrammetrické metody	26
3.4.1 Jednosnímková metoda	26
3.4.2 Průseková metoda	27
3.4.3 Stereofotogrammetrie	27
3.4.4 3D modelování z fotografií.....	28
3.5 Laserové skenování	29
3.5.1 Statické LS	31
3.5.2 Mobilní LS.....	32
3.5.3 3D modelování z lidarových dat.....	32
4 Společnost GeoSLAM a její produkty.....	33
4.1 SLAM technologie.....	33
4.2 ZEB-REVO.....	33
4.2.1 Popis přístroje	33
4.2.2 Proces skenování.....	35
4.2.3 Výstupy.....	37
4.2.4 Využití.....	37
4.3 GeoSLAM Hub a GeoSLAM Draw	37
4.4 Další produkty.....	40
5 Sběr dat.....	43
5.1 Leica Disto A5	45
5.2 Leica TCR 307.....	46
5.3 Surphaser 25 HSX	46

5.4	Leica BLK 360	48
5.5	ZEB-REVO	50
5.6	3D model	52
6	Zpracování dat	53
6.1	Leica Disto A5	53
6.2	Leica TCR 307	54
6.3	Surphaser 25 HSX	54
6.4	Leica BLK 360	57
6.5	ZEB-REVO	60
6.6	3D model	60
7	Porovnání výsledků	65
7.1	Data z laserových skenerů	65
7.2	Rozměry ve vektorových kresbách	68
7.3	ZEB-REVO a IBMR	69
7.4	Celkové porovnání metod	72
8	Závěr	73
	Použitá literatura	75
	Seznam obrázků	80
	Seznam tabulek	82
	Seznam příloh	83

Seznam použitých zkratek

ALS	<i>Airborne laser scanning</i> (letecké laserové skenování)
BIM	<i>Building information modeling</i> (informační model budovy)
DMT	Digitální model terénu
GNSS	<i>Global navigation satellite system</i>
IBMR	<i>Image-based modelling and rendering</i>
IMU	<i>Inertial measurement unit</i> (inerciální měřicí jednotka)
INS	<i>Inertial navigation system</i> (inerciální navigační systém)
ISPRS	<i>International society for photogrammetry and remote sensing</i>
LIDAR	<i>Light detection and ranging</i>
MLS	<i>Mobile laser scanning</i> (mobilní laserové skenování)
MMS	<i>Mobile mapping system</i> (mobilní mapovací systém)
SLAM	<i>Simultaneous localization and mapping</i>
TIN	Triangulated irregular network (nepravidelná trojúhelníková síť)
TLS	<i>Terrestrial laser scanning</i> (pozemní laserové skenování)
WMLS	<i>Wearable mobile laser system</i> (přenosný mobilní laserový systém)

1 Úvod

Zaměření stavebního objektu, tachymetrická měření, určování svislosti objektů a další obdobné činnosti, jejichž výsledkem mohou být například podklady pro zhotovení stavební dokumentace, informace pro vlastníka měřeného objektu nebo model terénu pro architekty navrhující novou budovu, jsou dnes nedílnou součástí stavebního odvětví. Existuje řada metod, jak tyto práce provádět od klasického měření metrem či příručním elektronickým dálkoměrem až po statické měření laserovým skenerem. Výběr metody je ovlivněn především složitostí objektu, časovou náročností a finančními možnostmi.

Zpracovaná data získaná laserovými skenery poskytují detailní 3D informace využitelné například v BIM (*Building information modeling* – Informační model budovy). Tento způsob získávání dat vyžaduje značné množství času jak pro samotné měření, tak i pro zpracování naměřených dat. Proto výrobci moderních zařízení konstruují produkty tak, aby jejich použití bylo pro uživatele velmi jednoduché a intuitivní a aby čas potřebný k provedení práce byl krátký. Společnost *GeoSLAM* podle tohoto principu vyvinula ruční mobilní laserové scannery *ZEB-REVO* a *ZEB-HORIZON* a zdatelně tak rozšířila možnosti pořizování mračen bodů i možnosti vypracování podkladů pro účely stavebního inženýrství.

Tématem této diplomové práce je popis a zhodnocení mobilního laserového skenování a výstupů této metody. Testovaným přístrojem je *ZEB-REVO*, a přestože je využitelný v mnoha prostředích pro různé účely, tato práce se týká převážně měření uvnitř objektu. Práce se zaměřuje na principy laserového skenování a popis a testování skeneru *ZEB-REVO* s příslušným softwarem *GeoSLAM Hub*.

Rozvržení práce:

Obsahem práce je část teoretická, část praktická, porovnání metod a zhodnocení výsledků. Teoretická část zahrnuje rešerši, shrnutí metod zaměření stavu stavebního objektu, principy laserového skenování a popis *ZEB-REVO*. Praktická část je věnována měření s přístrojem *ZEB-REVO* a zpracování výstupů. Tato část je provázána s porovnáním metod a hodnocením výsledků.

Obsah kapitol:

- 1) *Úvod* – kapitola shrnující problematiku a náplň práce
- 2) *Rešerše* – kapitola s nalezenou literaturou týkající se MLS
- 3) *Metody zaměření stavebního objektu* – kapitola popisující dostupné metody používané k zaměřování stavu stavebního objektu
- 4) *Společnost GeoSLAM a její produkty* – kapitola s popisem vybraných mobilních laserových zařízení a softwarů společnosti GeoSLAM
- 5) *Sběr dat* – kapitola pojednávající o zaměření vybraných prostorů a objektu
- 6) *Zpracování dat* – kapitola s popisem zpracování dat a popisem použitých softwarů
- 7) *Porovnání výsledků* – kapitola, ve které jsou porovnána mračna bodů a další výstupy
- 8) *Závěr* – kapitola shrnující výsledky a zjištěné informace

2 Rešerše

Téma pozemního mobilního laserového skenování (MLS) se podle nalezené literatury týká posledních patnácti let. Letecké metody (ALS – *airborne laser scanning*), které lze logicky zařadit mezi mobilní též, jsou starší.

S vývojem laserové techniky a možností jejího využití pro měřické účely se postupně začala, kromě již známé statické metody, rozvíjet metoda mobilní. Ruční MLS je otázkou spíše posledních osmi let, jelikož se dříve jako nosič pro aparaturu se skenerem používala zejména vozidla. Rešerše je zaměřena na výčty metod zaměření stavebních objektů, princip laserového skenování a na literaturu, kde bylo MLS nebo konkrétně *ZEB-REVO* využito, popsáno či jinak zmíněno. Zdroje použité k popisu metod zaměření stavebního objektu jsou převážně výukové materiály. Informace o MLS a *ZEB-REVO* byly většinou čerpány z elektronických časopisů a článků. Zdroje, které se zabývají touto tematikou, jsou například *International society for photogrammetry and remote sensing*, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, *Remote sensing* a *GEOmedia*.

2.1 Zaměření stavebního objektu a 3D modelování budov

Geodetické a fotogrammetrické metody zaměření stavebního objektu jsou shrnuty například v metodické publikaci *Měřická dokumentace historických staveb pro průzkum v památkové péči* [1] z roku 2014, která se zabývá způsoby zaměření a náležitostmi měřické dokumentace v oblasti historických staveb. Další publikace, ve kterých jsou uvedené metody zmíněny jsou *Metodika pro elektronický pasport zpřístupněné památky* [2] z roku 2011 a *Poruchy a rekonstrukce staveb* [3] z roku 2006, kde je měřická dokumentace zmíněna jako podklad pro projektovou dokumentaci.

Více informací bylo zjišťováno konkrétně o metodě laserového skenování v odborných publikacích *Lidary a letecké laserové skenování* [4], *Fotogrammetrie 20* [5] a *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví* [6].

Mračno bodů, jež je výsledkem laserového skenování, je třeba zpracovat pro potřeby měřické a stavební dokumentace do podoby například 3D modelu nebo řezů, ze kterých lze vektorizací vytvořit příslušné výkresy. Elektronický článek *Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data* publikovaný v roce 2013 popisuje algoritmus, který automaticky převádí surová data z laserového skenování do celistvého modelu využitelného v BIM. „V rámci BIM technologie se digitálně tvoří jeden nebo více přesných virtuálních modelů budovy...Po dokončení obsahují tyto počítačem vygenerované modely přesnou geometrii a data, která jsou potřeba pro podporu stavebních, výrobních

a pořizovacích aktivit, skrze které je budova realizována.“ [7] (překlad vlastní)¹ Navržený algoritmus identifikuje rovinné plochy. Nejprve se určí tréninkové plochy, na jejichž základě se vyhodnotí potřebné parametry, a následně je již algoritmus schopen automaticky klasifikovat nalezenou plochu do jedné z několika navržených tříd. Takto lze identifikovat podlahy, stropy, zdi a otvory oken a dveří. Nepřesnosti v datech, které provází každé měření laserovým skenem, jsou rovněž identifikovány na základě průsečnic stěn a odstraněny. Testování se uskutečnilo v budově se čtyřiceti místnostmi, kde bylo zaměřeno přes 3 miliardy 3D bodů z 225 stanovisek. Prvky 23 místností 1. patra byly použity jako tréninkové plochy a v třinácti místnostech 2. patra bylo provedeno samotné testování automatického procesu. Výsledkem sady experimentů byl model s rozlišením 2 cm / voxel, kde bylo detekováno přes 90 % otvorů s přesností přibližně 5–10 cm. [8]

V článku *Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds* z roku 2015 je navržen automatický způsob konstrukce 3D modelu operující s pravděpodobností a umožňující klasifikaci s malým nebo žádným vyrovnáním parametrů. 3D model z mračna bodů pořízených uvnitř budovy poskytuje informace o návaznostech zdí, jejich tloušťkách a dalších parametrech v rámci celého objektu. Díky tomu je tento přístup dobře využitelný v architektuře, jelikož umožňuje odebrání zdi nebo úpravu tvaru místnosti. Jednoduché zjištění parametrů zdí je využitelné v geodézii či ve stavebním inženýrství. Metoda byla testována na 14 podlažích 5 různých budov. Šum v datech pořízených laserovým skenerem byl odstraněn účinnou filtrovací metodou. Podobně jako v předchozím zmíněném článku (viz. [8]) byly plochy identifikovány shlukováním průsečíků stěn a roztříděny řízenou klasifikací. Bylo vybráno přes 550 otvorů a přes 500 dalších shluků bodů jako trénovací plochy. Průměr správně klasifikovaných trénovacích ploch byl 90,34 % a průměrná přesnost klasifikace byla 85,02 %. [9]

¹ Originální znění: „*With BIM technology, one or more accurate virtual models of a building are constructed digitally. When completed, these computer-generated models contain precise geometry and data needed to support the construction, fabrication, and procurement activities through which the building is realized.*“

2.2 MLS a GeoSLAM

Kromě odborných článků byla zdrojem informací a orientace v problematice MLS kniha *Mobilní laserové skenování* vydaná v roce 2014 jako výstup výzkumné činnosti Laboratoře fotogrammetrie, Katedry geomatiky, Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Kniha uvádí jako nejstarší typ MLS metodu leteckého laserového skenování. [10]

Starší elektronické publikace zmiňující MLS popisují využití vozidla jako nosič pro skenovací aparaturu. V roce 2009 byl ve Francii publikován článek *Automatic extraction of vertical walls from mobile and airborne laser scanning data*, kde autoři využívají možnosti MLS a leteckého laserového skenování (ALS) ke zpřesnění obvodových zdí budov v katastrální mapě. Z dat MLS a ALS byly nejprve identifikovány rovinné plochy (obvodové zdi) metodou *Region growing*. Metoda je založena na přidávání sousedních pixelů/voxelů do jednoho celku na základě zadaných parametrů. Z rovinných ploch byly nalezeny odpovídající si obvodové zdi z dat MLS a ALS, jejichž polohové rozdíly nepřesáhly stanovené odchylky. Letecká data byla pořízena z přeletů helikoptéry vybavené skenovacím systémem zachycujícím tři směry: vpřed, kolmo dolů a vzad. Zdrojem MLS dat zde byly 2 rotující laserové skenery připevněné na vozidle. Testovací oblastí byla silnice ve městě Enschede v Nizozemí dlouhá 425 metrů, kolem které se nacházelo 45 obytných budov včetně přilehlých zahrad a různých typů vegetace. Z pozemních dat bylo identifikováno 135 částí zdí o délce 840 metrů, z nichž 470 metrů segmentů odpovídá katastrální mapě a zbylé segmenty představují jednak části zdí, které v katastrální mapě chybí, a jednak chybně určené části, jako jsou například zahradní zídky nebo ploty. Z leteckých dat bylo identifikováno 262 segmentů zdí o délce 1720 metrů, z nichž 570 metrů odpovídá katastrální mapě. Z výsledků je patrné, že z leteckého skenování bylo zjištěno více informací, nicméně pořízená data závisí na směru letu a na pozici helikoptéry vzhledem k objektu. Výhodou pozemních dat byly detailnější konstrukce tvarů budov. Článek poukazuje na možnost kombinace těchto dvou metod, která by zvýšila kvalitu výsledků. [11]

V disertační práci *Mobilní laserové skenování v dopravě* z roku 2017 bylo využito MLS ke skenování úseku dálnice za účelem návrhu algoritmu pro klasifikaci mračna bodů, podobně jako v článcích [8] a [9]. Měření 1,8 km dlouhého úseku dálnice D11, ze kterého byla použita data pro testování algoritmu, bylo provedeno v roce 2009 aparaturou *LYNX Mobile Mapper*, jehož součástí byly IMU, přijímač GNSS a dva lidarové senzory. Aparatura byla připevněna na automobilu, které v rámci více měření jelo rychlostí 60–100 km/h. Cílem bylo navržení algoritmu, který umožňuje rozdělení bodů do obecných tříd využitelných k analýze mnoha aspektů dopravy a snížení míry složitosti této úlohy. Navržená metoda úspěšně klasifikovala 94,5 % objektů. [12]



Obrázek 2.1: Automobil jako nosič MLS; zdroj: [12]

S rozvojem MLS byly konstruovány systémy s dalšími typy nosičů, které významně rozšířily jejich využití. Autoři článku *Compact Multipurpose Mobile Laser Scanning System — Initial Tests and Results* z roku 2013 navrhli MLS systém, kterým lze skenovat z batohu či bezpilotního prostředku. Systém se skládá z laserového skeneru, aparatury GNSS a IMU a je relativně malý a levný. Senzor skeneru a inerciální jednotka, které byly použity při testování, vážil dohromady přibližně 4,2 kilogramů. Testování systému proběhlo jednak jeho usazením do batohu, a jednak připevněním na balón naplněný heliem v oblasti zlomu San Andreas a delty řeky Sacramento. V těchto oblastech bylo také rozmístěno několik GNSS stanic, aby délka měřeného polohového vektoru nebyla delší než 5 km. Výsledky testování byly porovnány s mračnem bodů pořízeným pozemním laserovým skenerem, které bylo georeferencováno na stejný referenční elipsoid jako měřená data z balónu. Standardní směrodatná odchylka ve vertikálním směru byla v případě balónu 4-5 cm a v případě batohu 3 cm. V horizontálním směru vykazuje test pomocí balónu odchylku výrazně horší, a to 17 cm. [13]



Obrázek 2.2: Batoh s MLS aparaturou; zdroj: [13]



Obrázek 2.3: Héliový balón jako nosič MLS; zdroj: [13]

V roce 2013 se objevil na trhu ruční mobilní skener *ZEB1* od společnosti *CSIRO*, která byla jednou ze subjektů, z nichž vznikla později společnost *GeoSLAM*. [14] Laserové skenování je často spojováno s BIM (viz. [7]) jako jeden z hlavních zdrojů dat. Publikace *Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling* z archivů *ISPRS (International society for photogrammetry and remote sensing)* uvádí, že statické skenery, zdroje dat BIM, které jsou kombinovány například se zaměřením totální stanicí, jsou časově náročnou variantou, jíž by bylo možné nahradit MLS. Toto tvrzení bylo otestováno na mobilním skenovacím systému *Viametris i-MSS* připevněným na pohyblivém vozíku a na ručním mobilním zařízení *ZEB1*. Oba přístroje využívaly k určení polohy algoritmy založené na SLAM technologii. Měřen byl průchod *South Cloisters* na univerzitě *University College London*. Data byla porovnána s referenčním skenem pořízeným statickým skenerem *Faro Focus3D*. Prvním srovnáním bylo porovnání mračen bodů. V případě *Viametris i-MMS* byla směrodatná odchylka rozdílu poloh bodů 4–5 cm a v případě *ZEB1* 10–19 cm.

Druhým srovnáním bylo porovnání geometrie BIM vytvořených z mračen bodů, k čemuž byl použit i model z dat naměřených totální stanicí *Viva TS15* od společnosti *Leica*. Porovnány byly rozměry oken a dveří, kde ve srovnání s modely *Faro Focus3D* a *Viva TS15* dosahovaly rozdíly modelu *Viametris i-MMS* až 26 cm a rozdíly modelu *ZEB1* až 42 cm. Na základě výsledků lze soudit, že skenování mobilními mapovacími systémy vyžaduje velmi málo času. Nevýhodou této metody je její nepřilíživá přesnost. [15]



Obrázek 2.4: Viametris i-MMS; zdroj: [15]



Obrázek 2.5: ZEB1; zdroj: [15]

Článek *The Use of a Mobile Laser Scanning System for Mapping Large Forest Plots* z roku 2014 je zaměřen na využití MLS pro mapování rozsáhlých lesních ploch. Skenována byla část lesa o rozloze přibližně 0,4 ha v oblasti vesnice Evo v jižní části Finska. Nosičem laserového skeneru *FARO Photon 120*, GNSS přijímače a IMU bylo šestikolové dálkově řízené vozidlo. Referenční data (polohy stromů a průměry jejich kmenů ve výšce 1,3 metru) byla zjištěna pomocí GNSS přijímače, kompasu, dálkoměru a posuvného měřidla. Oproti MLS bylo pořizování referenčních dat pracnější a časově náročnější. Z celkového počtu 80 stromů bylo 70 dobře klasifikováno, což činí 87,5 %. Vynechána byla skupina několika stromů s mnoha větvemi a několik samotných stromů, které byly zřídka zachycené v mračnu bodů pravděpodobně z důvodu rychlého pohybu vozidla a prudkého zatáčení. [16]



Obrázek 2.6: Šestikolové dálkově řízené vozidlo; zdroj: [16]

V roce 2016 byl publikován elektronický článek *Extreme flood-driven fluvial bank erosion and sediment loads: direct process measurements using integrated Mobile Laser Scanning (MLS) and hydro-acoustic techniques*, ve kterém je za pomoci MLS monitorována řeka Mekong. Cílem práce bylo sledování koryta řeky během povodní vyvolaných tropickými cyklony. Ke sběru dat byly použity sonar *Reson SeaBat 7125SV* a skener *Leica P20* spolu s GNSS přijímačem a IMU umístěné na lodi a referenční GNSS stanice na pevnině. Ze získaných dat byly zjištěny údaje o objemu erodované půdy, rychlosti toku a přesunu sedimentů. Ve srovnání s údaji konvenčně vyhodnocenými z leteckých a družicových snímků byla výhodou nového přístupu vyšší přesnost díky lepšímu rozlišení použitých přístrojů a přesnější určení tvaru částí břehu, které jsou ponořeny pod vodou. Výsledek studie zároveň ukázal markantní vliv tropických cyklonů na erozi břehů řeky a přesunu sedimentů. [17]

V tomtéž roce byl zveřejněn článek *Mobile laser scanning based 3D technology for mineral environment modeling and positioning*, kde je použitím MLS mapováno prostředí experimentálního uhelného dolu univerzity *Shandong University of Science and Technology*. Uhelný důl byl mapován systémem *NAVIS-3D* využívajícím SLAM technologii a IMU, který byl připevněn na plochý důlní vozík. Je zde uvedeno porovnání výsledků s referenčními měřeními provedenými metrem, ve kterém se rozdíly pohybují okolo 4–7 cm, a pojednáno o možném využití MLS v důlních prostorem, které je však limitováno možným vznícením některých elektronických součástí za přítomnosti plynů jako CO a CH₄. [18]

V roce 2016 byl na trh uveden ruční mobilní laserový skener ZEB-REVO [14], který byl použit v následujících člancích. Studie na podobné téma jako [18] je součástí článku *3D modeling of underground objects with the use of SLAM technology on the example of historical mine in Ciechanowice (Ołowiane Range, The Sudetes)* z roku 2018, kde byl ručním mobilním skenerem ZEB-REVO naskenován vápencový důl poblíž města Jelenia Góra v západním Polsku. Měření bylo několikrát provedeno v 90 metrů dlouhé štole a důlní komoře. Výsledná data obsahovala přes 78 milionů bodů, ze kterých byl vytvořen 3D model v softwaru *MeshLab*. Rozdíly výsledků jednotlivých měření, která se lišila trajektoriemi i rychlostí pohybu měřiče, se pohybovaly kolem 4-5 cm. Autoři zde poukazují na to, že MLS a SLAM technologie je oproti měření volných polygonů a statickému skenování časově úspornější a ve výsledném 3D modelu nejsou mezery vzniklé špatnou volbou stanovisek. [19]

Principiálně podobná studie jako [16] je obsahem článku *Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level* z roku 2018, kde byly skenovány části borovicového lesa a park v centrálním Španělsku. V této studii je ovšem se statickým laserovým skenerem *FARO Focus3D* porovnáváno zařízení *ZEB-REVO*, které je zde částečně popsáno. Referenčním systémem, pomocí kterého byly transformovány jednotlivé skeny statického skeneru do celkového mračka bodů a následně transformovány mračka z obou zařízení do jednoho souřadnicového systému, byly kulové terče umístěné na stativech. Střední kvadratická chyba transformace se pohybovala u dat statického skeneru okolo 3 mm a u *ZEB-REVO* 30 mm. Výsledky studie ukazují, že na odhad průměru kmene a odhad výšky stromů v oblasti se stromy vysokými 10–15 m jsou oba přístroje stejně účinné. V oblasti se stromy vysokými 20–30 m je *ZEB-REVO* nedostačující kvůli jeho omezené skenovací vzdálenosti. Zmíněná výhoda *ZEB-REVO* je úspora času, jelikož automatické zpracování dat pomocí *GeoSLAM* softwaru a skenování zahrnující 15minutové trasy bylo provedeno v rámci necelých 2 hodin, zatímco v případě zpracování a měření *FARO Focus3D* zahrnujícího skenování ze 14 stanovisek byl výsledný čas přes 4 hodiny. [20]

Space Subdivision in Indoor Mobile Laser Scanning Point Clouds Based on Scanline Analysis je elektronický článek z roku 2018, jehož náplní je studie zabývající se analýzou a rozdělením vnitřních prostor budovy využitelné k navigaci ve vnitřních prostorech nebo plánování evakuačních tras. Cílem studie, stejně jako v článcích [8], [9] či [12], je navržení algoritmu automaticky identifikujícího určité komponenty měřeného prostředí. Přístroj, kterým bylo pořízeno mračno bodů, byl ruční skener *ZEB-REVO*. Navržená metoda byla testována ve dvou patrech jedné z budov univerzity *Technical University of Braunschweig* v Německu. Většina otvorů (dveří a oken) byla správně identifikována. Několik otvorů nebylo identifikováno vůbec nebo nesprávně z důvodu zakrytí dveřního prostoru jiným objektem nebo neošetření případů skleněných dveří a jiných netradičních ploch v algoritmu. Na základě geometrie je algoritmus schopen nalézt i zavřené dveře, které nejsou souběžné s okolní zdí. [21]

Článek *Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site* uvádí další z mnoha využití WMLS, a to dokumentaci historické památky, kde může mimo jiné nastat problém týkající se složitosti stavby nebo velkého množství objektů zakrývajících podstatné části objektu. Použitým přístrojem bylo *ZEB-REVO*, rovněž popsané v tomto článku, a referenční data byla pořízena skenerem *FARO Focus3D*. Skenování bylo provedeno v prostorech paláce z 15. století ve španělském městě Segovia, jehož stav struktury není vlivem dlouhodobých exogenních jevů příliš dobrý. I z tohoto důvodu nebylo příliš vhodné použít metody jako pozemní fotogrammetrie nebo statické skenování. Přesnost *ZEB-REVO* byla ve srovnání s daty statického skeneru do centimetru. Hlavní zmíněné výhody jsou jednoduchost, časová úspora, malá hmotnost a adekvátní množství zachycených bodů pro spolehlivé vyhodnocení geometrie objektu. Projití čtyř naplánovaných tras trvalo 63 minut a zpracování výsledků 83, což je obrovská výhoda oproti *FARO Focus3D*, se kterým bylo potřeba provést skenování ze 70 stanovisek. Váha *ZEB-REVO* je přibližně 4 kg, což je třetina ostatních MLS produktů zmíněných ve studii, a u některých je navíc potřeba vozík kvůli podpoře senzorů. Zachyceno bylo 43000 bodů za sekundu oproti 600–700 tisícům bodů z jiných přístrojů, takže byla snížena náročnost na zpracování a uchování dat. [22]

Informace o *ZEB-REVO* a dalších produktech firmy *GeoSLAM*, zdroje kapitoly 4, byly čerpány z manuálů poskytnutých společností *GeoSLAM* [14] a z článků *Simultaneous localization and mapping* [23, 24] z roku 2006, ve kterém je popsána SLAM technologie, a *Welcome to the ZEB REVOLUTION* [25] z časopisu *GEOMedia* od inženýra *GeoSLAM*.

2.3 Dostupné produkty ručního MLS

V dubnu roku 2020 byl proveden průzkum trhu s ručními zařízeními MLS. Kromě produktů společnosti *GeoSLAM* byla nalezena řada dalších obdobných přístrojů. Od jedné společnosti je uveden vždy pouze jeden zastupující produkt.

Leica BLK2GO je ruční laserový skener od společnosti *Leica*, který váží přibližně 0,7 kg. BLK2GO naskenuje 420 000 bodů za sekundu s přesností do 2 cm. Dosah skeneru je do 25 m. Baterie vydrží až 50 minut a komunikace s přístrojem je bezdrátová. [26]



Obrázek 2.7: Leica BLK2GO; zdroj: [26]

HERON LITE je další možností v oblasti ručního skenování, vyvinutou společností *Gexcel*. Přístroj váží okolo 3 kg a lze s ním skenovat až 8 hodin v kuse. Skenuje 300 000 bodů za sekundu s přesností do 5 cm. Dosah skeneru je do 100 m. [27]



Obrázek 2.8: HERON LITE; zdroj: [27]

STONEX F6 je ruční laserový skener od společnosti *Stonex*. Váží 1 kg a skenuje 640 000 bodů za sekundu s přesností 0,2–0,1 % měřené vzdálenosti. [28]



Obrázek 2.9: STONEX F6; zdroj: [28]

PX-80 od společnosti *Paracosm* je ruční skener vážící 2,8 kg, který skenuje 300 000 bodů za sekundu s dosahem do 100 m a s přesností do 3 cm. Interní a externí baterie vydrží necelé 2 hodiny. [29]



Obrázek 2.10: PX-80; zdroj: [29]

DPI-8S je ruční skener společnosti *DotProduct*. Jeho zaměřením je pravděpodobně skenování drobných objektů, jelikož dosah skeneru je pouze 4 m. Komunikace s přístrojem probíhá prostřednictvím USB nebo WIFI. [30]



Obrázek 2.11: DPI-S8; zdroj: [30]

FARO ScanPlan je dalším produktem v oblasti ručního MLS vyvinutý společností *FARO*, jejíž statické skenery byly použité v [15], [20] a [22]. Skenuje 28 800 bodů za sekundu s dosahem skeneru až 20 m a přesností 3 cm do 3 metrů skenované vzdálenosti a 1,5 % ze skenované vzdálenosti nad 3 m. Výstupem jsou 2D data vhodná pro tvorbu půdorysu budovy. Přístroj váží 1,5 kg a výdrž baterie je 2 hodiny. [31]



Obrázek 2.12: FARO ScanPlan; zdroj: [31]

HANDYSCAN 3D je ruční laserový skener od české firmy *SolidVision*. Váží 0,94 kg a provede 800 000 měření za sekundu s přesností od 0,035 mm. Komunikace s přístrojem probíhá přes USB. [32]



Obrázek 2.13: HANDYSCAN 3D; zdroj: [32]

Artec Eva je jedním ze skenovacích ručních zařízení společnosti *Artec 3D* určený pro skenování drobných objektů. Skenuje 2 000 000 bodů za sekundu s přesností 0,1 mm a s dosahem skeneru až 1 m. [33]



Obrázek 2.14: Artec Eva; zdroj: [33]

3 Metody zaměření stavebního objektu

K zaměření stavebního objektu se používají metody z oblasti geodézie, fotogrammetrie a architektury. Obecně se dělí na selektivní a neselektivní. V případě selektivních metod jsou měřeny pouze data zvolená operátorem. Příkladem jsou metoda oměrná, polární a většina fotogrammetrických metod. Neselektivními metodami je pořízen soubor s daty z oblasti měření, například v podobě mračna bodů, ze kterého jsou nežádoucí data odfiltrována až při zpracování. Mezi tyto metody se řadí laserové skenování a modelování pomocí technologie IBMR.

3.1 Metoda oměrná

Metodou oměrnou je přímé měření délek mezi charakteristickými body budovy. Měřeny jsou zpravidla všechny délky mezi rohy, kouty, hranami a otvory, které jsou doplněny tzv. *křížovými mírami* (diagonály), aby byla vytvořena polohově jednoznačně daná trojúhelníková síť. Pomocí této sítě, jež tvoří pevnou strukturu díky hranám společným více trojúhelníkům, lze vykreslit jakkoliv složitý tvar. Měření dnes běžně probíhá pomocí ručního elektronického dálkoměru nebo svinovacího kovového pásma prováženého olovnicí a nivelační latě. Přesnost se pohybuje od 0 do 5 cm a je závislá na vodorovné poloze pásma nebo dálkoměru, které se docílí olovnicí či libelou. Metoda je vhodná k měření samostatných pravidelných místností, ale ve větším komplexu nepravidelných místností je časově náročná kvůli velkému množství měřených délek. Používá se spíše v kombinaci s moderními elektronickými přístroji. [1, 3]

3.2 Metoda kolmicová

V rámci této metody jsou vytyčené měřické přímky, z nichž jsou spouštěny kolmice do měřených bodů. Měřena je délka kolmice a vzdálenost její paty od počátku měřické přímky. Měření probíhá pomocí pentagonálního hranolu. [1] S nástupem moderních přístrojů a zvyšujících se požadavcích na přesnost se tato metoda již téměř nepoužívá.

3.3 Metoda polární

Polární metoda je nejpoužívanější způsob zjišťování souřadnic bodů v oboru geodézie. Je založena na měření horizontálních a vertikálních úhlů a šikmých délek ze stanoviska o známých souřadnicích. Základní výpočet 2D souřadnic měřeného bodu probíhá nejprve převedením měřené šikmé délky d_s pomocí zenitového úhlu z (měřeného od zenitu) na vodorovnou délku d_v (viz. vzorec (3.1)). Vzorce (3.2, 3.3) obsahují výpočet souřadnic pomocí vodorovné délky mezi stanoviskem a měřeným bodem d_{vAB} a směrníku α , což je levostranný úhel mezi osou x daného souřadnicového systému a měřeným bodem. [1, 3]

$$d_v = d_s \cdot \sin(z) \quad (3.1)$$

$$X_B = X_A + d_{vAB} \cdot \cos(\alpha) \quad (3.2)$$

$$Y_B = Y_A + d_{vAB} \cdot \sin(\alpha) \quad (3.3)$$

Vzorce (3.1, 3.2, 3.3) byly odvozeny ze vztahů z [6].

Dříve se používaly mechanické teodolity ke zjišťování vodorovných a zenitových úhlů a kovová pásma ke zjišťování délek. Dnes se měření provádí totálními stanicemi, což jsou elektronické teodolity umožňující okamžitou registraci měřených dat, které disponují laserovými dálkoměry pro měření délek. Odraznou plochou pro laser může být odrazný hranol nebo samotný měřený povrch. Díky tomu je tato metoda časově nenáročná, jelikož je z jednoho stanoviska možné měřit více než sto bodů za hodinu, a velmi efektivní z hlediska přesnosti, která se při pečlivé centraci a horizontaci přístroje uvádí v řádech milimetrů. Doplňující metodou je metoda oměrná, která může ušetřit čas v menších prostorech s malým počtem měřených bodů. Polární metoda se dále využívá v kombinaci s laserovým 3D skenováním a fotogrammetrickými metodami (například měření vlíčovacích bodů pro fotoplány nebo 3D modely). [1, 3]

Na trhu je dostupná celá řada totálních stanic a starší modely jsou dostupné za výrazně nižší ceny než přesné laserové skenery. Jedním z nejnovějších pokroků v této technologii je robotizovaná totální stanice, kterou je možné ovládat na dálku a která umožňuje kontinuální měření či automatické neustálé cílení na zvolený odrazný hranol účinné při vytyčování bodů. Pro její obsluhu je zapotřebí pouze jeden měřič.

3.4 Fotogrammetrické metody

Tyto metody jsou založeny na principu zjišťování prostorových souřadnic bodů ze 2D snímkových souřadnic na pořízených fotografiích objektu. Dělí se na metody letecké a pozemní. O pozemních metodách bude tato kapitola dále pojednávat, protože se využívají i při tvorbě měřické dokumentace. Často se kombinují s metodami geodetickými, například při zaměření vlíčovacích bodů. Zároveň představují relativně levný a časově úsporný způsob dokumentace oblastí, které mohou být rozlehlé či nepřístupné. [2]

3.4.1 Jednosnímková metoda

Metoda spočívá ve zpracování jednotlivých snímků rovinných objektů do podoby fotoplánu. Protože není možné fotografovat přesně kolmo k rovině objektu, výsledný fotoplán je vytvořen kolineární transformací pomocí minimálně čtyř vlíčovacích bodů, které je potřeba geodeticky zaměřit. V rámci zaměření stavebního objektu je využívána při zaměřování rovinných fasád, které nejsou příliš hloubkově členité (neobsahují například balkóny), protože je možné zachytit

libovolně složitou kresbu či ozdobu. Na výslednou přesnost má vliv distorze objektivu a měřítko snímku a hloubková členitost objektu. Vzhledem k dnešním možnostem automatické tvorby ortofota se jedná o již málo používanou metodu. [2]

3.4.2 Průseková metoda

Principem průsekové metody je zjišťování souřadnic ze dvou a více snímků, jejichž osy záběru jsou konvergentní. Obecně se jedná se o modifikaci metody protínání vpřed. Historická metoda spočívá ve výpočtu souřadnic prostorových bodů pomocí vypočtených úhlů ze snímkových souřadnic a směrník. Dnes se tento případ řeší, díky výpočetní technice, analyticky základními fotogrammetrickými vztahy vyjádřenými vzorcem (3.4). Na měřeném objektu se zaměřuje 6–10 (minimálně 3) vlíčovacích bodů totální stanicí nebo oměrnou metodou. Snímky je třeba pořizovat s dostatečným překryvem a jejich vyšší počet dává možnost kontroly a zpřesnění určovaných bodů. V případě drobných staveb může jít přibližně o 10–20 fotografií. [2]

$$\begin{pmatrix} x' - x'_0 + \Delta x' \\ z' - z'_0 + \Delta y' \\ -f \end{pmatrix} = m \cdot R^T \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Vzorec (3.4) byl přejat z [2].

Proměnné x' , z' jsou snímkové souřadnice analyzovaného bodu, f je konstanta komory, x'_0 , z'_0 jsou snímkové souřadnice hlavního snímkového bodu, $\Delta x'$, $\Delta y'$ jsou parametry distorze kamery, m je měřítko, R je matice rotace, X_0 , Y_0 , Z_0 jsou geodetické souřadnice vstupní pupily komory a X , Y , Z jsou geodetické souřadnice analyzovaného bodu. Proměnné x' , z' a f jsou prvky vnitřní orientace komory a X_0 , Y_0 , Z_0 jsou společně s R prvky vnější orientace komory. [2]

3.4.3 Stereofotogrammetrie

Stereofotogrammetrická metoda využívá binokulárního měření snímkových souřadnic ve dvou snímcích a umělého stereoskopického vjemu. Určení 3D souřadnic ze snímků, které mají rovnoběžné osy záběru, spočívá v podobném principu jako u lidských očí. Aby byly snímky kvalitně vyhodnoceny, je třeba určit vhodnou délku základny, což je vzdálenost mezi vstupními pupilami komor obou stanovisek, a dodržet alespoň přibližně rovnoběžné osy záběru a výšky stanovisek. Moderní digitální technologie již umožňuje vyhodnotit i snímky, kde nejsou tyto podmínky zcela splněny, a vychází ze základních rovnic fotogrammetrie (viz. vzorec (3.4)). Měření vlíčovacích bodů je nutné ke transformaci souřadnic do geodetických systémů nebo mohou sloužit pro kontrolu. [2]

3.4.4 3D modelování z fotografií

Programy určené pro automatickou tvorbu 3D modelů z fotografií používají k tomuto účelu technologii IBMR (*Image Based Modeling and Rendering*). K jejímu využití je třeba pořídit soubor snímků s velkým překryvem kvůli dostatečnému množství spojovacích bodů. V závislosti na velikosti dokumentovaného objektu může jít v případě menší sochy o 50 a více snímků a v případě dokumentace většího objektu o stovky až tisíce snímků. Tato technologie vyžaduje výkonný počítač a vhodný software.

Na fotografiích jsou vyhledány dobře identifikovatelné tzv. *klíčové body*, které jsou ztotožněny na více snímcích. Identické body jsou vyhledávány na základě unikátních rozdílů hodnot analyzovaného pixelu a jeho blízkého okolí. Tato metoda se nazývá metoda obrazové korelace. Díky porovnávání rozdílů hodnot (nikoliv absolutních hodnot samotných) je možné identické body nalézt i na fotografiích s různým osvětlením. To je výhodné ve většině případů, protože nemusí být všechny fotografie modelovaného objektu pořízeny ve stejný čas za stejných světelných podmínek. Množina nalezených identických bodů se nazývá řídké mračno bodů a slouží pro výpočet vnitřní a vnější orientace všech snímků. U některých nástrojů lze nastavit způsob, jakým jsou fotografie porovnávány a řazeny. Proces funguje automaticky nebo lze na jednotlivých fotografiích označit zpracovatelem určené identické body o známých či neznámých souřadnicích pro zpracování oblastí, kde automatické zpracování nedává dobré výsledky. Tyto body mohou sloužit k definici měřítka nebo georeferencování modelu. Z řídkého mračna lze odstranit odlehlá měření a zpřesnit parametry kamery, čímž se zpřesní výsledný model.

Z určených pozic kamery je vypočteno tzv. husté mračno bodů, které je mnohonásobně větší než mračno řídké a které již může připomínat kompletní 3D model. Z bodů hustého mračna je následně vytvořena nepravidelná trojúhelníková síť (TIN – *Triangulated irregular network*), která může mít informaci o barvě uloženou ve vrcholech. K tvorbě sítě se nejčastěji užívá Delaunayova triangulace. Pokud je nutné odstranění chybných částí modelu přímo ze sítě, musí být prováděno s ohledem na celistvost modelu, protože neadekvátní odstranění stěn by mohlo způsobit trhliny v modelu. Tyto trhliny mohou být určitými softwary opraveny a proloženy plochou, která však již pravděpodobně neodpovídá skutečnému tvaru modelovaného objektu.

Trojúhelníková síť je výsledným modelem, který lze prezentovat v různých formách. Jednou z takových forem je průhledný model, kde jsou zvýrazněny hrany sítě. Dalšími variantami mohou být jednobarevný model stínovaný nebo klasický model s texturou či bez ní. Některé programy dovolují tvorbu textury z informace o barvě uložené v jejích uzlech nebo odvozují barvu z použitých fotografií. Z fotografií lze texturu tvořit metodami, jako jsou například výpočet průměrné

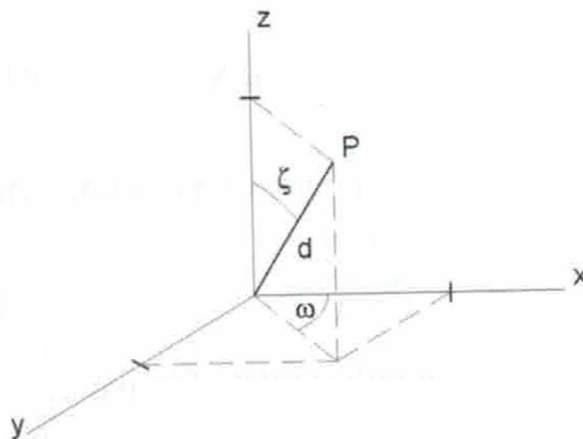
hodnoty pixelu nebo tvorba mozaiky. Fotografie, které se použijí na výpočet textury, může uživatel volit, aby mohl efektivně zamezit neostrosti jejích částí.

Softwary využívající tuto technologii jsou například *Agisoft Metashape*, *RealityCapture* nebo *Zephyr 3D*. Z jednotlivých forem dat tohoto procesu lze vytvářet 2D výstupy. Z trojúhelníkové sítě lze udělat řez či ortofoto s použitou texturou přímo v modelovacím softwaru a z hustého mračka bodů lze rovněž udělat řez, který je následně nutné zvektorizovat, čehož lze jednoduše dosáhnout open source softwaru *CloudCompare* v kombinaci s dalším geodetickým programem.

Podkapitola 3.4.4 byla napsána podle [34], manuálu *Agisoft Metashape* [35] a manuálu *CloudCompare* [36].

3.5 Laserové skenování

V posledních 25 letech se rozvinula bezkontaktní metoda získávání 3D souřadnic bodů založená na využití laseru. Některé zdroje (viz. [37]) nazývají laserovou technologii pojmem LIDAR, který se využívá zejména u ALS. 3D souřadnice měřeného bodu jsou vypočteny prostorovou polární metodou, ke které je nutné znát horizontální úhel, zenitový úhel a délku záměry. Ta je měřena, stejně jako u totálních stanic, pomocí laserového svazku. Vztahy prostorové polární metody jsou vyjádřeny obrázkem 3.1 a vzorci (3.5, 3.6, 3.7), kde ω je vodorovný úhel, ζ je zenitový úhel a d je délka záměry.



Obrázek 3.1: Schématické znázornění prostorové polární metody; zdroj: [6]

$$x = d \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\zeta) \quad (3.5)$$

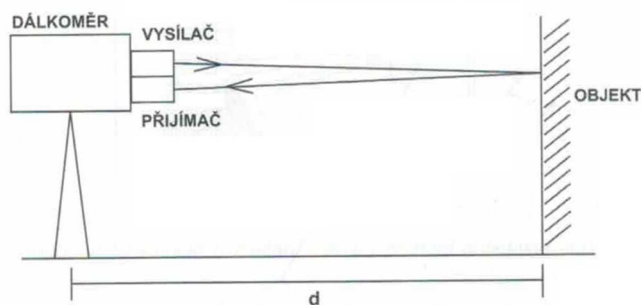
$$y = d \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(\zeta) \quad (3.6)$$

$$z = d \cdot \cos(\zeta) \quad (3.7)$$

Vzorce (3.5, 3.6, 3.7) jsou přejaty z [6].

„Laser je z fyzikálního hlediska kvantově elektronický zesilovač elektromagnetického záření nejčastěji v oblasti viditelného světelného spektra a přílehlých vlnových délek. Laser je zdrojem velmi intenzivního monochromatického a časově i prostorově koherentního záření.“ [6]

Obecně se laserové skenery dělí podle typu dálkoměru měřícího vzdálenosti. Dálkoměry ToF (Time of Flight) měří tranzitní čas od momentu vyslání paprsku po zachycení jeho složky odražené od povrchu a fázové dálkoměry měří přesně rozdíl fáze vyslané a přijaté vlny paprsku. Fázové dálkoměry jsou výrazně přesnější, ale mají menší dosah. Úhly jsou zjištěny z polohy zrcadel, které rozmítají laserový svazek ve 2D rovině. Třetí dimenze je získána otáčením části zařízení, jež rozmítá laserový svazek, kolem zbývající osy.



Obrázek 3.2: Obecné schéma principu elektronického měření délky; zdroj: [6]

Na přesnost laserového skenování má vliv geometrie prostředí. Měření při dopadu laserového svazku na rozhraní dvou ploch je zprůměrováno a v případě rozhraní ve formě ostrých hran může docházet k chybnému určení hrany. Dalším problémem je úhel mezi normálou plochy a laserovým svazkem blíží se 90°, což je běžný problém i při měření totální stanicí. Laserový svazek může v daném okamžiku dopadat až na několik centimetrů měřené plochy a výsledná délka nemusí být změřena nebo může být určena chybně. Důležitým faktorem skenování je také typ povrchu, od kterého se laserový svazek odráží. Jelikož je odražená složka laserového svazku nejdůležitější pro určení délky, je třeba, aby její intenzita byla co nejvyšší. Odrazivost povrchu závisí na jeho drsnosti a barvě. Povrchy, které nejlépe reflektují světelný svazek, mohou být například bílý papír, bílé zdivo či stavební dřevo a ty se špatnou odrazivostí jsou asphalt nebo černý neoprén. Přesnost měření je ovlivněna také atmosférickými vlivy.

Výsledkem skenování je mračno bodů, které se dále zpracovává v závislosti na použité metodě a požadavkům na výstupy. Vzhledem k tomu, že většinou nebývají určeny polohy přístroje v geodetickém systému, jsou výsledná mračna měřena v místních systémech. K tomuto účelu je vhodné zaměření vlíčovacích bodů a následné georeferencování mračen.

Laserové skenování je velmi účinnou metodou sběru dat a je využíváno jak v pozemních, tak i v leteckých aplikacích. Používá se například k tvorbě DMT, 3D modelů měst, měření výšky lesního porostu, mapování pobřežních oblastí, zaměření stavu objektu atd.

Úvod kapitoly 3.5 napsán podle [5, 6]

3.5.1 Statické LS

Statické nebo také stacionární laserové skenery musí být při procesu skenování stále ve stejné pozici. Součástí některých skenerů je kompenzátor, jehož účinnost je stanovená do určitého úhlu nevodornosti přístroje, a navíc mohou být data jednotlivých stanovisek transformována podle identických bodů do jednoho mračna, kde je možné určit vodorovný směr. Díky tomu odpadá na stanoviscích nutnost horizontace a přístroj lze uvést do vodorovného směru jen přibližně. Pro potřeby spojování a transformace jednotlivých skenů je vhodné umístit do prostoru terče či jiné předměty, na kterých lze jasně identifikovat identické body, které po zaměření mohou sloužit i jako body vlíčovací. Některé systémy je umí v mračnu bodů automaticky nalézt a skeny spojovat bez zásahu operátora, což je výrazné ulehčení práce.



Obrázek 3.3: FARO Focus 3D; zdroj: [31]

Výhodou statické metody je vysoká přesnost a množství naskenovaných bodů (miliony). Nevýhodou je objem dat a časová náročnost, jelikož velké množství času je třeba k manipulaci s přístrojem, měření i zpracování dat. [5, 6]

3.5.2 Mobilní LS

Mobilní laserové skenování je metoda, kde je měřicí aparatura při skenování v pohybu. Nestarším typem MLS je letecké laserové skenování rozvíjené již v devadesátých letech minulého století. Jako nosiče MLS systémů se používají automobily, lodě, vozíky na kolejích, bezpilotní letouny a nejmodernější přístroje mohou být přenášeny uživatelem v ruce. [10]

Klasickou součástí aparatury je INS (Inerciální navigační systém), tedy IMU a GNSS přijímač, který určuje polohu přístroje, pokud to podmínky dovolují. Ve vnitřních či podzemních prostorech je zapotřebí využít přístroj s technologií SLAM. Náklony a zrychlení, zavedené do výpočtu měřených souřadnic bodů, určuje IMU, jež se obecně skládá ze 3 akcelerometrů a 3 gyroskopů (pro všechny 3 osy v prostoru). IMU poskytuje parametry k určení celé trajektorie letu či obecně pohybu po nějaké trajektorii, nicméně se praktickým zkoušením ukázalo, že s rostoucím časem observace roste i chyba určené polohy, a proto INS obsahuje kromě IMU také GNSS nebo SLAM. [10]

Kromě zaměření vlčovacíh bodů se tato metoda kombinuje i s fotogrammetrickou metodou korelace mračna bodů ze snímků a celkově se těmto systémům říká mobilní mapovací systémy – MMS. Pomocí snímků je dodávána bodům mračna informace o barvě. [10, 22]

Oproti statickým skenerům nabízí tato metoda velkou časovou výhodu a manipulace s přístroji bývá velmi jednoduchá. Nevýhodou metody je nižší přesnost souřadnic skenovaných bodů o 1 až 2 řády. [13, 19, 21, 22]

3.5.3 3D modelování z lidarových dat

Výsledkem měření lidarem je mračno bodů. Postup při zpracování bývá stejný jako postup popsáný v podkapitole 3.4.4 s tím rozdílem, že se jedná již o husté mračno bodů. Z mračna bodů lze udělat trojúhelníkovou síť a následně ji zpracovat do podoby řezů a ortofot nebo lze vytvořit řez mračnem. Řez mračnem je ve skutečnosti pás bodů mezi určitými výškami, protože není pravděpodobné, že by se potřebné body nacházely v jedné konkrétní rovině. Ten je třeba následně zvektorizovat. Dalšími možnostmi, jak s mračnem bodů nakládat jsou segmentace a klasifikace, popsáné v [8, 9, 17, 20]. Příklady softwarů pro práci s lidarovými daty jsou *Bentley Pointools V8i*, *Leica Cyclone*, *TerraScan*, *TerraModeler*, *Geomagic Wrap* a open source *CloudCompare*. [10, 34, 36]

4 Společnost GeoSLAM a její produkty

Společnost *GeoSLAM* s hlavním sídlem v Nottinghamu byla založena v roce 2012 jako společný podnik australské společnosti *CSIRO* a britské společnosti *3D Laser Mapping* (poskytovatel 3D lidarových technologií). Jejím zaměřením jsou mobilní mapovací technologie, které nepodléhají omezením určitých prostředí. Jejich produkty jsou vybaveny technologií SLAM, která umožňuje sběr dat i v místech, kde nelze použít technologii GNSS. Prvním produktem této společnosti byl ruční laserový skener *ZEB1*, vyvinutý v roce 2013, jenž byl použit v [15]. *ZEB1* je dnes již překonán výkonnějšími a přesnějšími skenery, jako jsou *ZEB-REVO* nebo *ZEB-HORIZON* kombinovatelné s GNSS zařízením pro georeferencování dat a kamerou sloužící k obarvení mračen bodů. *GeoSLAM* působí v 53 zemích a disponuje 8 kancelářemi a více než 70 distributory na celém světě. [22, 25]

4.1 SLAM technologie

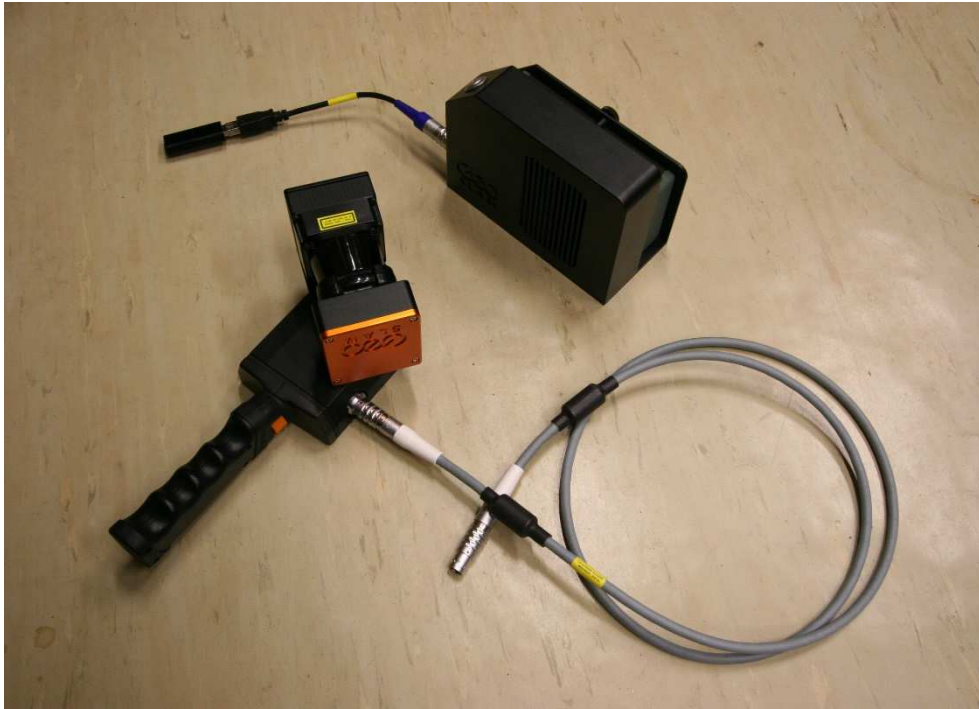
SLAM (Simultaneous localization and mapping) je řešením pro mobilní měření uvnitř objektů či v podzemí, kde není možné kontinuálně určovat polohu přístroje. Spočívá ve vytváření mapy prostředí v reálném čase, ze které je zároveň odvozována poloha přístroje. Z dat, která jsou měřena, je neustále pozorován určitý počet orientačních bodů, ze kterých je zároveň třeba vypočítat polohu přístroje. [23] Tento problém aktualizování více proměnných současně byl určitými způsoby vyřešen algoritmy, jejichž podstatou je kombinace geometrie, teorie grafů, optimalizace a pravděpodobnosti. Na základě naměřených dat se odhaduje poloha s největší pravděpodobností. Sensory, které je možné využít k určení polohy přístroje, jsou vizuální, lidarové, radarové nebo sonary. SLAM nachází využití nebo je potenciálně využitelný v systémech laserových skenerů, automobilů schopných provést určité pohybové úkony bez vlivu řidiče a v dalších systémech, jejichž úkolem je pohyb v prostoru a orientace z naměřených dat. [22, 24]

4.2 ZEB-REVO

4.2.1 Popis přístroje

Přístroj *ZEB-REVO* je ruční mobilní laserový skener, který je vyroben a distribuován společností *GeoSLAM* od roku 2016. Přístroj je složen ze skenovací hlavy a rukojeti. Součástí rotující skenovací hlavy je 2D laserový skener *Hokuyo UTM-30LX-F* spojený s IMU, která se nachází v rukojeti a je připevněna na motoru. Otáčením skenovací hlavy s 2D skenerem o 360 stupňů a měřením náklonů přístroje pomocí IMU je pořízeno výsledné mračno 3D bodů. Ovládání přístroje je jednoduché a intuitivní. Jako i u ostatních MLS, výhoda *ZEB-REVO* spočívá v rychlosti skenování, protože odpadá měření na stanoviskách, které jsou nutné u statických laserových skenerů, a v jeho váze, jelikož samotná skenovací hlava váží pouze 1 kg. Dalšími součástmi, potřebnými k pořizování a zpracování dat, jsou

přístroj na ukládání dat *ZEB-DL2600* s batohem na jeho přenos, kabely na registraci a stažení dat, zařízení USB a externí baterie. Technické specifikace jsou uvedeny v tabulce 4.1.



Obrázek 4.1: ZEB-REVO a jeho příslušenství

Výpočet pozice přístroje není proveden za pomoci technologie GNSS, ale technologií SLAM, která ji určuje každou sekundu, což umožňuje skenování uvnitř budov či v podzemí. Integrovaný SLAM algoritmus je založen na rozdělení skenovaného prostoru do několika částí a z každé z nich je vybrán určitý počet orientačních bodů. Části, ve kterých nebyly nalezeny žádné orientační body, nejsou zahrnuty do výpočtu pozice. Díky tomuto způsobu je výsledné mračno bodů plnější a kompletnější, což je uvedeno v [25], kde jsou porovnány výsledky *ZEB-REVO* s výsledky staršího obdobného přístroje *ZEB1*, který byl použit v [15].

Tabulka 4.1: Technické specifikace ZEB-REVO

Parametr	Hodnota
Maximální dosah skeneru	Do 30 m v ideálních podmínkách 15–20 m v běžných podmínkách
Počet bodů v jedné skenované rovině	432
Míra skenování	100 skenovaných rovin / s 43200 bodů / s
Zorné pole	270° × 360°
Přesnost skeneru	±30 mm
Vlnová délka laseru	905 nm
Rozměry	80 × 113 × 140 mm – skenovací hlava 287 mm – délka včetně rukojeti 470 × 220 × 180 – všechny součásti
Váha	1,0 kg – skenovací hlava 4,1 kg – dohromady se všemi součástmi
Provozní podmínky	Teplota od 0 °C do +50 °C Vlhkost vzduchu menší než 85 %
Výdrž baterie	Přibližně 4 hodiny

Data v tabulce 4.1 byla přejata z [14]. Podkapitola 4.2.1 byla napsána podle [20], [14] a [25].

4.2.2 Proces skenování

Před samotným skenováním je třeba provést rekognoskaci prostředí a odhadnout potenciálně nevhodná místa, jejichž geometrie by mohla negativně ovlivnit určování pozice přístroje SLAM algoritmem. Dlouhé tunely nebo chodby, se stejným profilem a hladkými stěnami po celé jejich délce, mohou způsobit, že algoritmus nedokáže správně identifikovat orientační body, a tudíž by pohyb přístroje nebyl zaznamenán. To by mohlo vyústit ve fatální chyby ve výsledném mračnu bodů a způsobit například špatně umístění nebo překrývání některých částí měřeného objektu. Z tohoto důvodu se do těchto prostorů uměle umísťují předměty, které by měly být větší než desetina vzdálenosti předmětu od skeneru, díky nimž jsou pozice a směr pohybu jasně určeny. Při rekognoskaci je také vhodné si přibližně naplánovat trasu skenování z hlediska dalších kritérií zvyšujících přesnost a relevanci dat.

K přístroji na ukládání dat *ZEB-DL2600* se kabelem připojí skenovací hlava a externí baterie. *ZEB-REVO* se položí na rovný povrch a stiskne se tlačítko *on/off* na *ZEB-DL2600* a tlačítko *start/stop* na skenovací hlavici. Jakmile *ZEB* kontrolka začne blikat červeně, uživatel otočí skenovací hlavou alespoň o 90°, čímž se spustí inicializační mód. V inicializačním módu se nesmí s přístrojem nijak manipulovat. Po 15 sekundách začne *ZEB* kontrolka svítit zeleně, což značí, že je přístroj připraven ke skenování. Uživatel uchopí přístroj, velmi pomalu ho otočí do vertikální skenovací polohy a začne skenovat prostředí.

Aby bylo výsledné mračno bodů správně vypočteno, je třeba dodržovat určitá doporučení uvedená v *GeoSLAM* manuálu [14]. Pohyb se skenerem by měl být velmi pomalý, neměly by se dělat prudké pohyby ani náklony a přístroj by měl být udržován ve vertikální poloze. Při průchodu již zmíněnými rizikovými prostředími by měl mít skener možnost co nejvíce zachycovat uměle umístěné předměty. Zvláštní pozornost by měla být věnována situacím, kdy se přechází mezi různými prostředími s různým počtem prvků. Například při procházení mezi dvěma místnostmi by mělo být zajištěno, aby alespoň na chvíli měl skener možnost pozorovat části obou prostředí najednou. Pro uživatele to znamená, že by měl dveřmi procházet bokem a mít přístroj namířený proti zárubni dveří. Dalším případem může být přechod z vnitřní části budovy mimo budovu. Okolo budovy nemusí být dostatečný počet objektů pro určení polohy, a tak se doporučuje mít přístroj co nejdéle namířený na budovu při jejím opouštění. Uživatel by se měl snažit vyhnout pohyblivým předmětům. Chyby určení polohy mohou vzniknout naskenováním jedoucích automobilů, pohybujících se kolegů měřiče nebo otevíráním dveří. Při otevírání dveří by měl být přístroj nasměrován jiným směrem a pokračovat by se mělo, až když jsou dveře otevřené a nepohybují se. Pro správnou funkci SLAM algoritmu se musí začít a skončit skenování na stejném místě, což znamená, že trasa skenování by měla tvořit smyčku. Opakovaným naskenováním již známých ploch je měření vyrovnáno a výsledky jsou zpřesněny. Je doporučeno dělat více smyček v rámci jednoho měření. Pro získání vyšší přesnosti by se měl uživatel několikrát vracet na již známá místa, pokud možno jinými cestami. Takto je vytvořeno více menších smyček, které jsou vyrovnávány.

Na konci skenování, kdy se uživatel nachází v místě, kde skenování začalo, se přístroj opět položí na rovnou plochu přibližně na to samé místo, kde byl v inicializačním módu. Po stisku tlačítka *start/stop* je opět třeba nechat přístroj 15 sekund ve stejné pozici, dokud *ZEB* kontrolka nezačne blikat červeně. V tento okamžik začne kontrolka *AUX* svítit oranžově, což značí zpracování naměřených dat, a přístroj nesmí být odpojen od *ZEB-DL2600*, jinak hrozí poškození dat. Přístroj lze vypnout stiskem a přidržením tlačítka *on/off* nebo lze opakovat skenování otočením skenovací hlavy alespoň o 90°.

Stažení naměřených dat je automatické a velmi jednoduché. Ke stažení dat je třeba mít zapnutý přístroj *ZEB-DL2600* a připojit kabel s USB flash diskem. Kontrolka *AUX* se rozsvítí zeleně, což značí, že jsou data stahována na USB flash

disk. V průběhu stahování se nesmí USB flash disk odpojovat, protože hrozí ztráta nebo poškození dat. Po ukončení stahování dat kontrolka AUX zhasne a je možné USB flash disk odpojit.

Podkapitola 4.2.2 byla napsána podle [14].

4.2.3 Výstupy

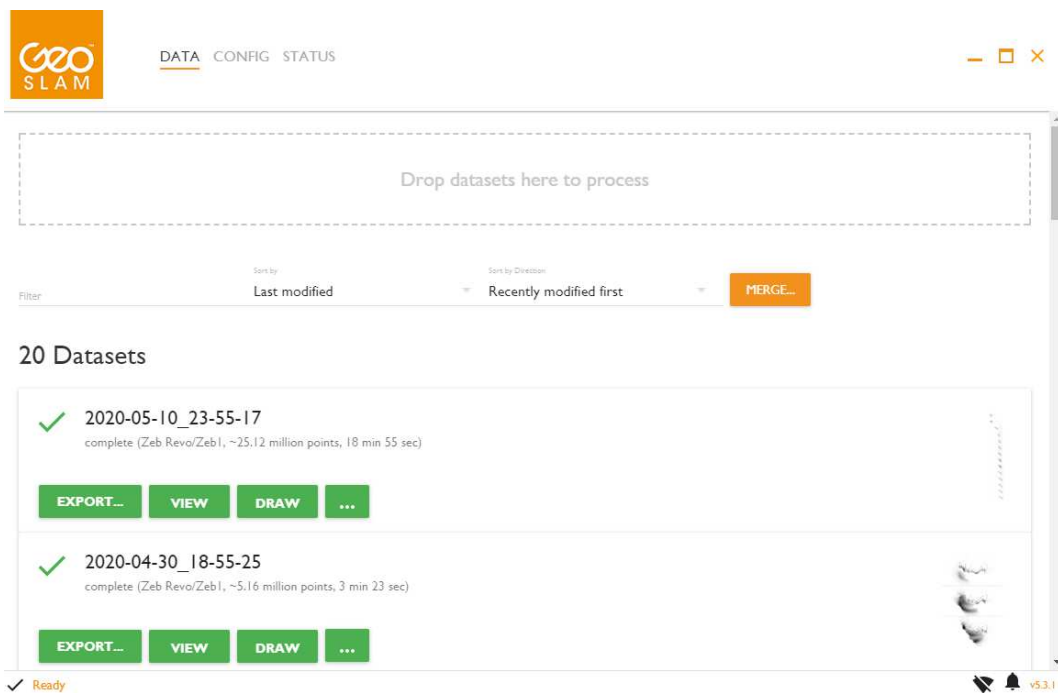
Prvotní data pořízená přístrojem *ZEB-REVO* jsou ve formátech s příponami *bag* a *params* komprimovaná v ZIP archivu a k jejich zpracování je nutné vlastnit i software *GeoSLAM Hub*. Mračno bodů, trajektorii měření nebo orientační body lze vyexportovat ve formátech *e57*, *las*, *laz*, *ply* a *txt*. Výsledkem je i náhled mračna bodů ve formátu *png*. Za předpokladu zpracování mračna bodů i v softwaru *GeoSLAM Draw* je zpracována vektorová kresba půdorysu místností ve formátech *dwg* a *dgn* nebo snímky mračna bodů z různých směrů. Pokud byl při skenování použit i přídavek *ZEB-CAM*, který pořizuje snímky prostředí, obsahují body výsledného mračna i informaci o barvě. [14]

4.2.4 Využití

Dle literatury existuje mnoho prostředí, ve kterých je *ZEB-REVO* využitelné a může být výhodnější než jiné metody. Díky algoritmu SLAM mohou být tímto přístrojem naskenovány prostory, kde nelze využít určení polohy metodou GNSS, jako jsou například vnitřní prostory budovy [13, 20, 21] nebo doly bez výskytu nebezpečných látek. [19] V prostorech historických památek, kde může geometrie stavby nebo velké množství objektů vyžadovat skenování či zaměření z mnoha stanovisek, je ruční skener optimální volbou. [22] Dalším takovým prostředím může být zalesněná plocha, kde je možné zmapovat její část a určit polohu stromů, popřípadě průměr kmene (tzv. DBH – *Diameter at breast height*), který slouží pro určení kubatury dle lesnických tabulek. Zde je technologie omezená dosahem skeneru a není tak možné vyhovět požadavku na měření výšky stromů vyšších než 20 m. [20] Pomocí tohoto přístroje, který je možné umístit na tyč, pokud je skenovaný objekt vyšší než uživatel, lze pořídit data pro zjištění objemu nahromaděného materiálu. Zajímavým případem využití je policejní práce, kdy například policista naskenuje místo nehody, aby mohla být doprava v co nejkratším čase uvolněna. *ZEB-REVO* lze umístit na dálkově řízené vozidlo a umožnit tak sken prostorů, kde existuje riziko ohrožení života. [25]

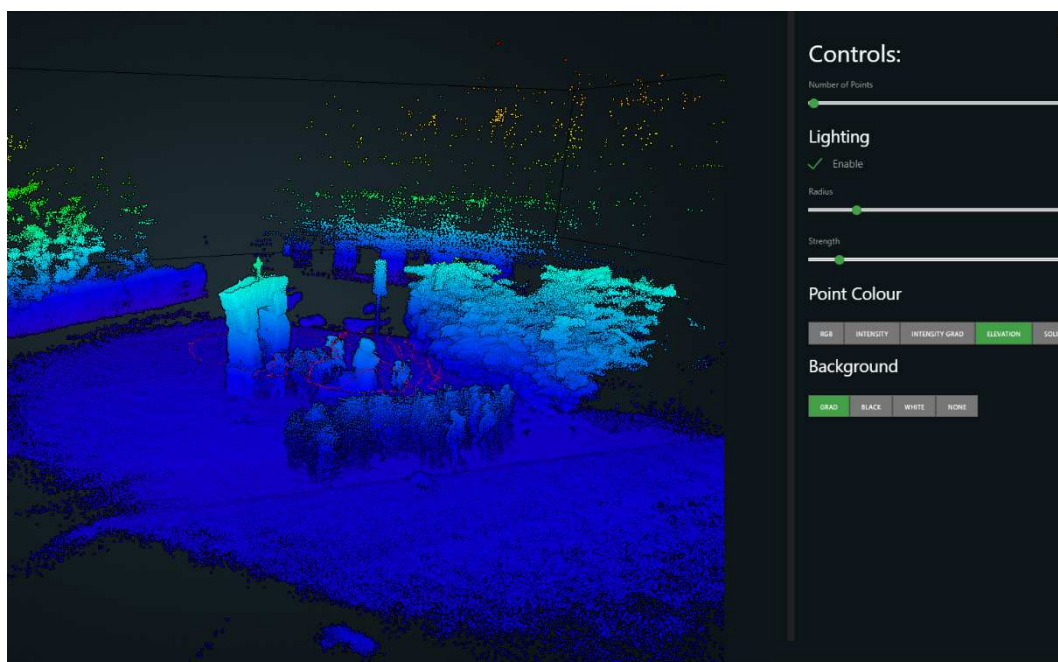
4.3 GeoSLAM Hub a GeoSLAM Draw

GeoSLAM Hub je software určený ke zpracování původních dat pořízených přístrojem *ZEB-REVO*. Zpracování naměřených dat probíhá automaticky po přetažení komprimovaného souboru do příslušného widgetu. Je doporučeno nahrávat soubory do softwaru z pevného disku počítače.



Obrázek 4.2: Ukázka softwaru GeoSLAM Hub

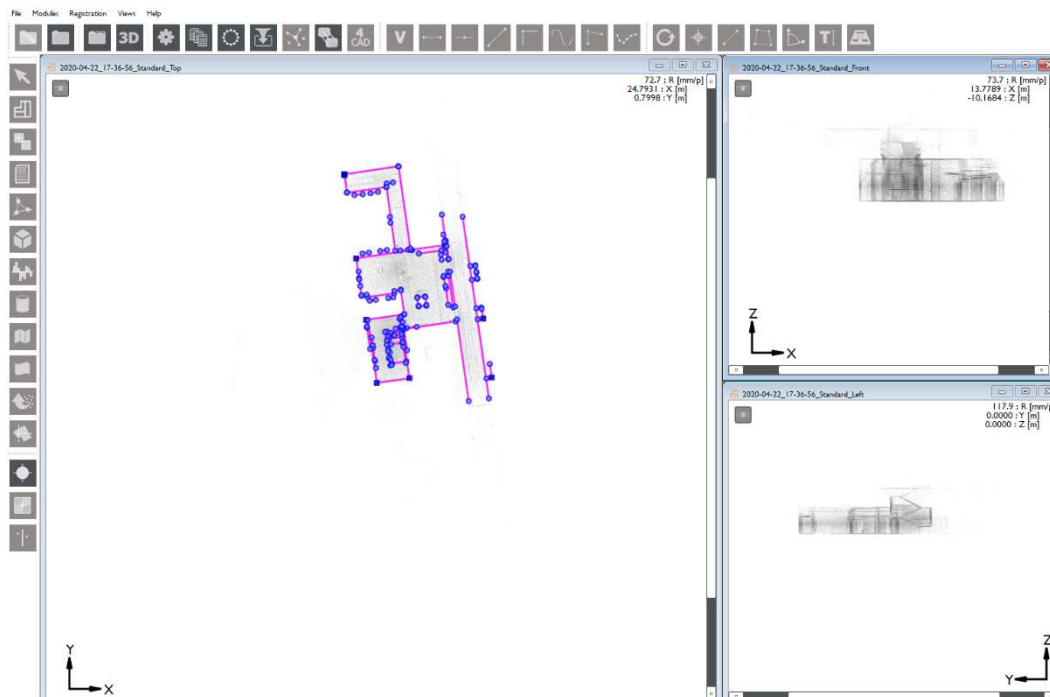
Po zpracování je příslušný soubor zeleně odškrtnut. Pod položkou *View* si lze mračno bodů prohlédnout ve speciálním prostředí (viz. obrázek 4.3).



Obrázek 4.3: Ukázka prostředí GeoSLAM Viewer

V případě chybného výpočtu SLAM algoritmu je možné data přepracovat s nastavením různých parametrů, jako například zvýšení počtu iterací nebo zvětšení vzorku dat pro každý výpočetní krok, změna hustoty voxelů, předčasné ukončení výpočtu z důvodu chybného posunu určité části mračna bodů a další.

Software *GeoSLAM Draw* slouží k automatickému zpracování vektorové kresby půdorysu objektu. Body jsou promítnuty do vodorovné roviny a je zprůměrována jejich poloha. Na základě hustoty bodů a průměrů polohy je výsledkem proložená úsečka.



Obrázek 4.4: GeoSLAM Draw

Software nabízí obarvení mračna bodů podle času skenování daných bodů, výšky bodů (hypsometrie) a kvality SLAM výpočtu. Mračna lze také stínovat nebo obarvit dle výstupů ze *ZEB-CAM*. Dalšími možnostmi jsou například spojování mračen bodů a zobrazení trajektorie měření.

Podkapitola 4.3 byla napsána podle [14].

4.4 Další produkty

ZEB-HORIZON je ruční mobilní skener vyvinutý v roce 2018. Jeho skenovací dosah je až 100 m, a proto je dobře využitelný i ve venkovních a zalesněných prostorech, kde mohou být předměty, z nichž přístroj určí svoji polohu, dále od sebe. Množství naskenovaných bodů je 300 000 za sekundu. Jeho přesnost je uváděna od 1 do 3 cm a jeho váha je 3.7 kg. Kvůli přenosu přístroje na ukládání dat je k dispozici batoh či ramenní popruh. Je také kompatibilní s bezpilotním vzdušným zařízením *UAV SLAM* společnosti *GeoSLAM*.



Obrázek 4.5: ZEB-HORIZON; zdroj: [14]

ZEB-DISCOVERY je zařízení, vyvinuté v roce 2019, které posouvá možnosti přístroje *ZEB-HORIZON* dále. Jeho provedení je formou batohu, na který lze *ZEB-HORIZON* jednoduše připevnit. Součástí *ZEB-DISCOVERY* je také kamera *NCTech iStar Pulsar*, díky níž je možné získávat informaci o barvách prostředí, a GNSS systém, který umožňuje lokální systém, vypočtený metodou SLAM, transformovat do globálních souřadnicových systémů. Váha zařízení je 9,25 kg.



Obrázek 4.6: ZEB-DISCOVERY; zdroj: [14]

ZEB-LOCATE představuje rozšíření pro *ZEB-HORIZON*, které obsahuje GNSS technologii pro transformaci mračen bodů do globálních souřadnicových systémů. Jeho váha je 5,35 kg.



Obrázek 4.7: ZEB-LOCATE; zdroj: [14]

ZEB-PANO je doplněk pro skenery *ZEB-REVO*, *ZEB-REVO RT* a *ZEB-HORIZON* představující kameru *RICOH THETA V 360 Degree*, která poskytne výslednému mračnu informaci o barvě.



Obrázek 4.8: ZEB-PANO; zdroj [14]

ZEB-REVO RT je ruční mobilní laserový skener se stejnými vlastnostmi jako klasický *ZEB-REVO*, jehož součástí je navíc obrazovka pro vizualizaci dat a schopnost zpracovávat data v reálném čase přímo při skenování. Součástí vybavení přístroje je ramenní popruh sloužící k přenosu přístroje pro ukládání dat.



Obrázek 4.9: ZEB-REVO RT; zdroj: [14]

Podkapitola 4.4 byla napsána podle [14].

5 Sběr dat

K testování přístroje *ZEB-REVO* byly vybrány prostory budovy Fakulty stavební ČVUT (z hlediska zaměření stavebního objektu) a pomník kardinála Josefa Berana v Dejvicích v Praze (z hlediska detailu objektu). Zaměření pomníku kardinála Josefa Berana bylo provedeno metodou mobilního skenování a porovnáno s přesnějším a podrobnějším zaměřením s využitím technologie IBMR. V budově fakulty bylo měření přístrojem *ZEB-REVO* porovnáno s oměrnou metodou, polární metodou a měřením ze dvou statických laserových skenerů.

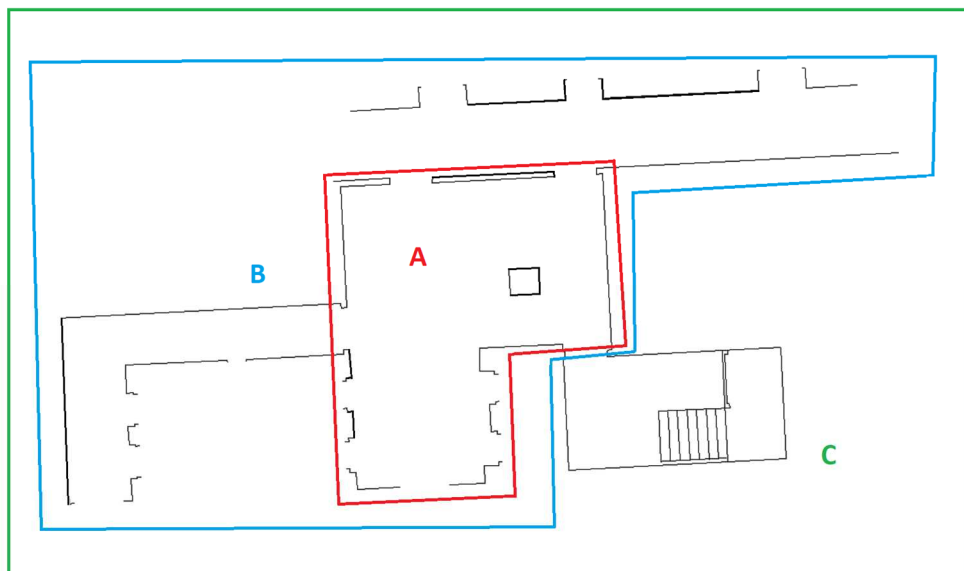


Obrázek 5.1: Měřené prostory Fakulty stavební ČVUT



Obrázek 5.2: Pomník kardinála Josefa Berana

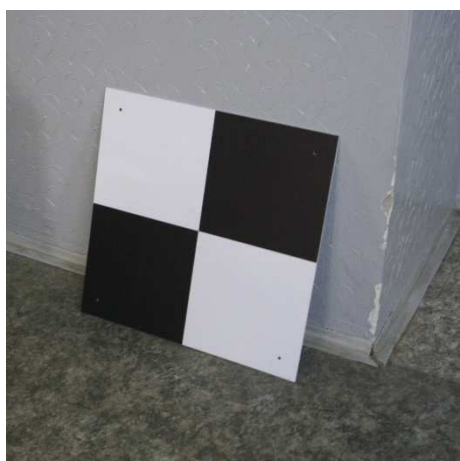
Prostory byly rozděleny do tří oblastí tak, aby obsahovaly různě složité prvky, a pro každou oblast byl čas prací měřen zvlášť. Jednotlivé oblasti jsou znázorněny na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Rozdělení měřených prostorů

Oblast A je samostatná místnost, jejíž rozloha je 30 m². Oblast B zahrnuje tuto místnost a k ní přilehlé chodby v rámci jednoho patra budovy. Součástí oblasti C je navíc schodiště. Oblasti se liší složitostí prvků a časem potřebným pro jejich zaměření.

V prostorech bylo rozmístěno 15 terčů, které sloužily ke spojení mračen bodů při zpracování.



Obrázek 5.4: Terč

Ceny přístrojů uvedené v této kapitole jsou pouze orientační.

5.1 Leica Disto A5

V prostorech byly změřeny oměrné míry ručním elektronickým dálkoměrem *Leica Disto A5*. Měření ručními elektronickými dálkoměry jsou zatíženy chybou z nevdorovné záměry, která byla v tomto případě částečně kompenzována libelou, jež je součástí přístroje. Velmi krátké záměry v řádech desítek centimetrů, které nelze tímto přístrojem určit, byly doměřeny svinovacím metrem. K měření delších vzdáleností, kde není možné odrazit laserový svazek od předmětu nebo udržet měřidlo ve vodorovné poloze, jsou zapotřebí dva měřiči. Údaje o zaměření jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1: Údaje o měření – Leica Disto A5

Parametr	Hodnota
Doba měření oblasti A	40 min
Doba měření oblasti B	1 h 35 min
Doba měření oblasti C	1 h 50 min
Cena – Leica Disto A5	10 000 Kč
Přesnost – Leica Disto A5	1,5 mm
Počet měřičů	2



Obrázek 5.5: Leica Disto A5

5.2 Leica TCR 307

Přístrojem použitým pro testování polární metody byla totální stanice *Leica TCR 307*. Vzhledem k tomu, že tato totální stanice není robotizovaná, musí měření provádět dva měřiči, aby byly podrobné body zaměřené s dostatečnou přesností. Bylo zaměřeno 121 podrobných bodů z 5 stanovisek. Údaje z testování polární metody a některé parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2: Údaje o měření – Leica TCR 307

Parametr	Hodnota
Doba měření oblasti A	28 min
Doba měření oblasti B	1 h
Doba měření oblasti C	1 h 30 min
Cena – Leica TCR 307	50 000 Kč
Přesnost – Leica TCR 307	2 mm + $2/10^6$ vzdálenosti
Počet měřičů	2

5.3 Surphaser 25 HSX

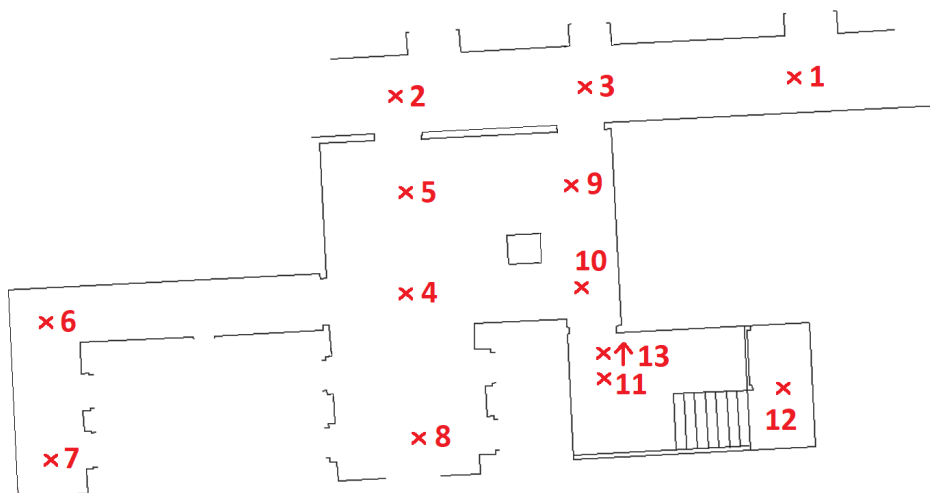
Surphaser 25 HSX je nejpřesnější statický laserový skener, který byl pro testování použit. Samotný přístroj váží 11 kg a spolu se stativem je pro jednoho měřiče těžké s ním manipulovat. K přístroji musí být zároveň připojena externí baterie a počítač se softwarem *Surphexpress standard*, který představuje hardwarový klíč. Skener není vybaven kamerou.

Před procesem skenování lze nejprve využít volby *Preview*, kdy skener provede rychlý sken okolí a operátor může vybrat pouze určitou část záběru. Tato možnost snižuje čas potřebný ke skenování a objem výsledných dat, nicméně při testování nebyla použita.



Obrázek 5.6: Surphaser 25 HSX

Skenování prostorů bylo provedeno z 13 stanovišek. Doba skenování na jednom stanovišku je přibližně 7 minut. Údaje o testování skeneru *Surphaser 25 HSX* jsou uvedeny v tabulce 5.3.



Obrázek 5.7: Náčrt s vyznačenými stanovišky – Surphaser 25 HSX

Tabulka 5.3: Údaje o měření – Surphaser 25 HSX

Parametr	Hodnota
Doba měření oblasti A	47 min
Doba měření oblasti B	1 h 33 min
Doba měření oblasti C	2 h 10 min
Cena – Surphaser 25 HSX	1 800 000 Kč
Přesnost – Surphaser 25 HSX	0,6 mm / 10 m vzdálenosti
Nastavení skeneru	High Quality
Hustota skenování	5 mm per inch / 10 m
Počet měřičů	1–2

5.4 Leica BLK 360

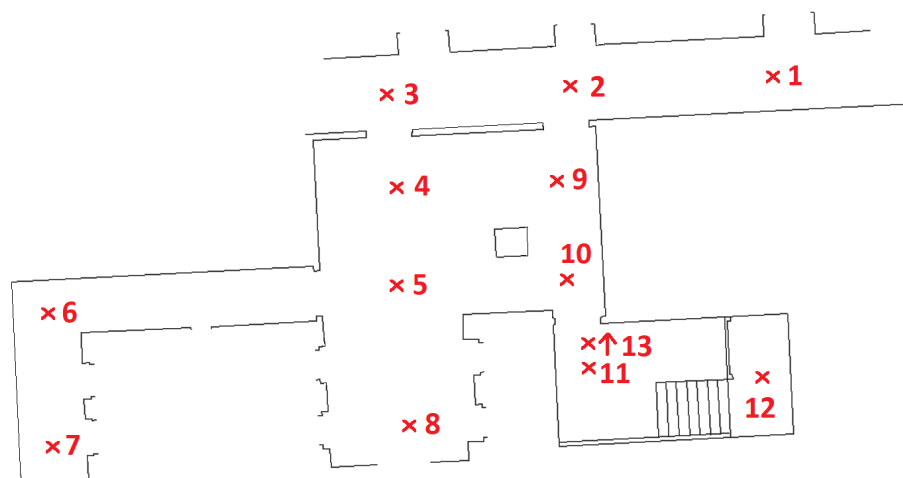
Dalším statickým skenerem je *Leica BLK 360*. Na rozdíl od skeneru *Surphaser 25 HSX* váží tento přístroj pouze 1 kg, a proto může měření provádět jen jeden operátor. Veškerá komunikace s přístrojem probíhá bezdrátově, což je nevýhodou při stahování dat s velkým objemem. Parametry skenování se nastavují pomocí softwaru *BLK 360 Data manager*.



Obrázek 5.8: Leica BLK 360

Ovládání přístroje je velmi jednoduché. Po umístění přístroje do prostoru a hrubé horizontaci je stiskem jediného tlačítka na skeneru zahájeno skenování. Oranžové podsvícení tlačítka značí proces skenování a zelené podsvícení znamená, že byl proces ukončen a je možné přemístění skeneru na další stanoviště. Horizontace nemusí být provedena přesně díky zabudovanému kompenzátoru.

Prostory byly skenovány ze 13 stanovišek, které byly zvoleny ve stejných místech jako u *Surphaseru 25 HSX*. Skenování na jednom stanovišti zabere 7 minut, z čehož 3 minuty jsou pořizovány snímky okolí sloužící k obarvení mračna bodů. Údaje o testování *Leica BLK 360* jsou uvedeny v tabulce 5.4.



Obrázek 5.9: Náčrt s vyznačenými stanovišky

Tabulka 5.4: Údaje o měření – Leica BLK 360

Parametr	Hodnota
Doba měření oblasti A	42 min
Doba měření oblasti B	1 h 23 min
Doba měření oblasti C	1 h 48 min
Cena – Leica BLK 360	800 000 Kč ²
Přesnost – Leica BLK 360	4 mm / 10 m vzdálenosti 7 mm / 20 m vzdálenosti
Nastavení skeneru	High resolution
Počet měřičů	1

² Univerzitní cena, ve které je zahrnuta sleva přibližně 20 %.

5.5 ZEB-REVO

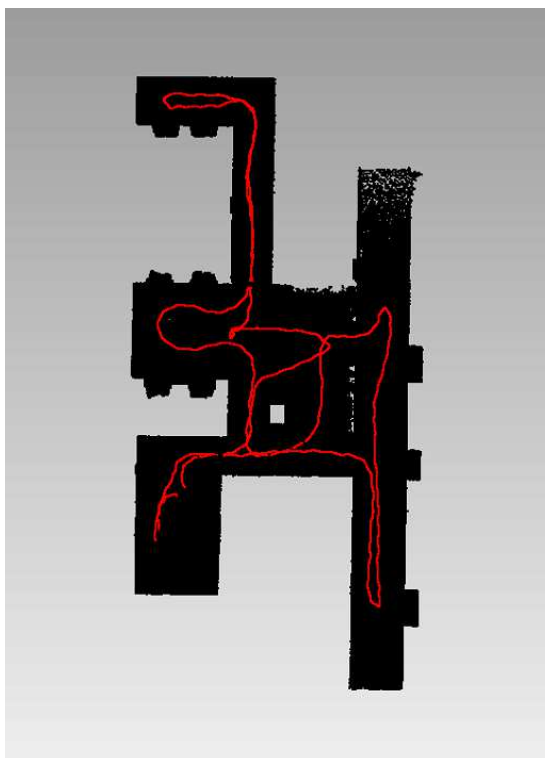
Mobilní skener *ZEB-REVO* byl obsluhován pouze jedním měřičem. Chodby, které jsou součástí měřených prostorů, jsou dlouhé a jejich profily jsou na různých místech stejné. To mohlo zapříčinit chybný výpočet SLAM algoritmu, čemuž bylo předejito rozmístěním několika předmětů podle doporučení manuálu *GeoSLAM* [14].



Obrázek 5.10: Příklad předmětu pro algoritmus SLAM č. 1



Obrázek 5.11: Příklad předmětu pro algoritmus SLAM č. 2



Obrázek 5.12: Trajektorie měření vnitřních prostor – ZEB-REVO

Popis přístroje a jeho parametry jsou uvedeny v kapitole 4. Údaje o testování této metody jsou k nalezení v tabulce 5.5.

Tabulka 5.5: Údaje o měření – ZEB-REVO

Parametr	Hodnota
Doba měření oblasti A	4 min
Doba měření oblasti B	9 min
Doba měření oblasti C	11 min
Cena – ZEB-REVO	950 000 Kč ³
Přesnost – ZEB-REVO	30 mm
Počet měřičů	1

³ Univerzitní cena, ve které je zahrnuta sleva přibližně 25 %.

5.6 3D model

V rámci porovnání ručního mobilního laserového skeneru s technologií IBMR bylo provedeno snímkování a sken sochy kardinála Josefa Berana.

Snímky byly pořízeny fotoaparátem *Canon EOS 20D* a dronem *DJI Mavic Pro*. Dron byl použit z důvodu pokrytí vrchní části sochy, kde nebylo možné fotoaparátem pořídit kvalitní snímky. Snímkování z dronu bylo provedeno z různých úhlů tak, aby navazovalo na fotografie z pozemního snímkování. Kdyby mezi fotografiemi nebyla návaznost, software by mohl vytvořit dva různé objekty, které by se následně musely spojit a mohla by být snížena výsledná přesnost. Snímkování bylo provedeno v roce 2019 v rámci výuky, obrazová data byla nově zpracována v rámci diplomové práce. Pro tvorbu 3D modelu bylo použito 604 snímků. Údaje o metodě jsou uvedeny v tabulce 5.6.

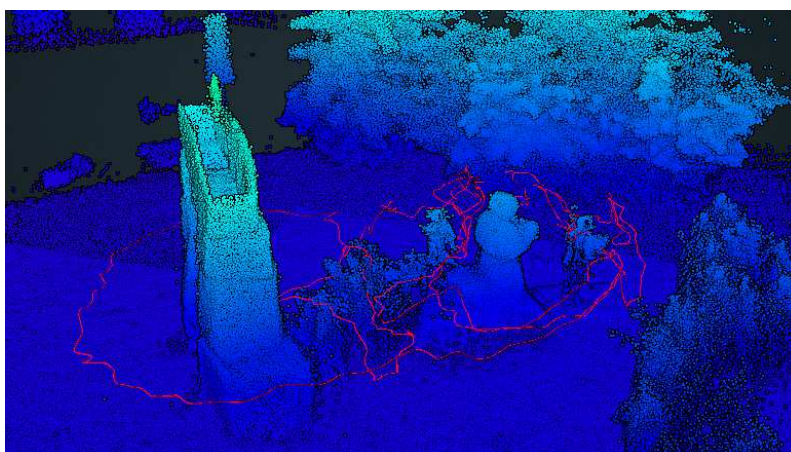
Tabulka 5.6: Údaje ze snímkování sochy – fotoaparát, dron

Parametr	Hodnota
Doba snímkování	1 h
Cena – Canon EOS 20D	4 000 Kč
Cena – DJI Mavic Pro	30 000 Kč

Údaje o skenování přístrojem *ZEB-REVO* jsou uvedeny v tabulce 5.7.

Tabulka 5.7: Údaje z měření sochy – ZEB-REVO

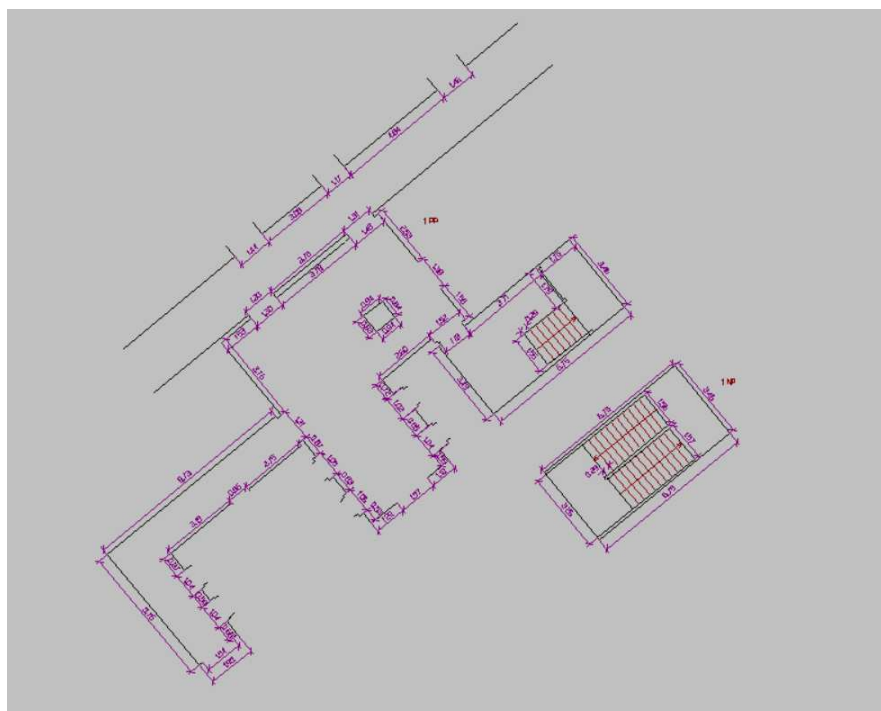
Parametr	Hodnota
Doba skenování	10 min
Cena – ZEB-REVO	950 000 Kč



Obrázek 5.13: Trajektorie měření 3D modelu – ZEB-REVO

6 Zpracování dat

Naměřená data byla zpracována do podoby vektorových kreseb, které jsou součástí práce jako elektronické přílohy ve formátu *dwg* a *dgn*. Pro potřeby porovnání metod obsahují výsledné výkresy obvod zdiva, kóty a schodiště, tudíž se nejedná o kompletní měřickou dokumentaci se všemi náležitostmi.



Obrázek 6.1: Ukázka výkresu

Mračna bodů z laserových skenerů jsou rovněž součástí práce jako elektronické přílohy ve formátech *wrp*, *bin*, *obj* a *ply*.

6.1 Leica Disto A5

Výkres byl zkonstruován přímo z oměrných a křížových měř v softwaru *Geus*. Časová náročnost a finanční náklady na software jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1: Údaje o zpracování – Leica Disto A5

Parametr	Hodnota
Doba zpracování	1 h 30 min
Cena – Geus	30 000 Kč

6.2 Leica TCR 307

Měření totální stanicí *Leica TCR 307* ve formátu *gsi* bylo zpracováno v programu *Groma*. V zápisníku měřených úhlů a délek byla zpracována měření v obou polohách a redukovány šikmé délky na vodorovné. Z upravených dat byly vypočteny souřadnice podrobných bodů a jsou v textovém souboru uvedeny v elektronických přílohách. Souřadnice bodů byly načteny do programu *Geus* a byla z nich vytvořena vektorová kresba. Některé části kresby byly doplněny pomocí rozměrů měřených přístrojem *Leica Disto A5*.

Nutno dodat, že k výpočtu souřadnic a vytvoření kresby by postačil pouze jeden ze zmiňovaných softwarů. Údaje o zpracování jsou k nalezení v tabulce 6.2.

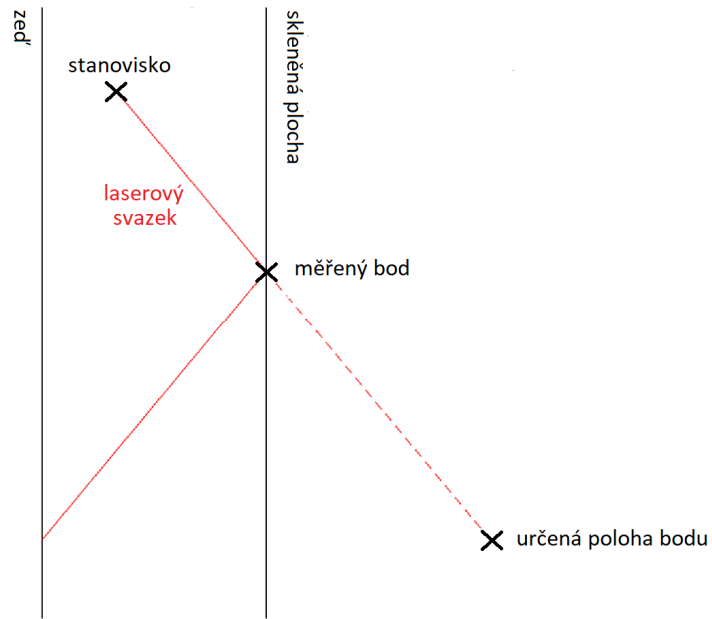
Tabulka 6.2: Údaje o zpracování – Leica TCR 307

Parametr	Hodnota
Doba zpracování	2 h
Cena – Geus	30 000 Kč
Cena – Groma	40 000 Kč

6.3 Surphaser 25 HSX

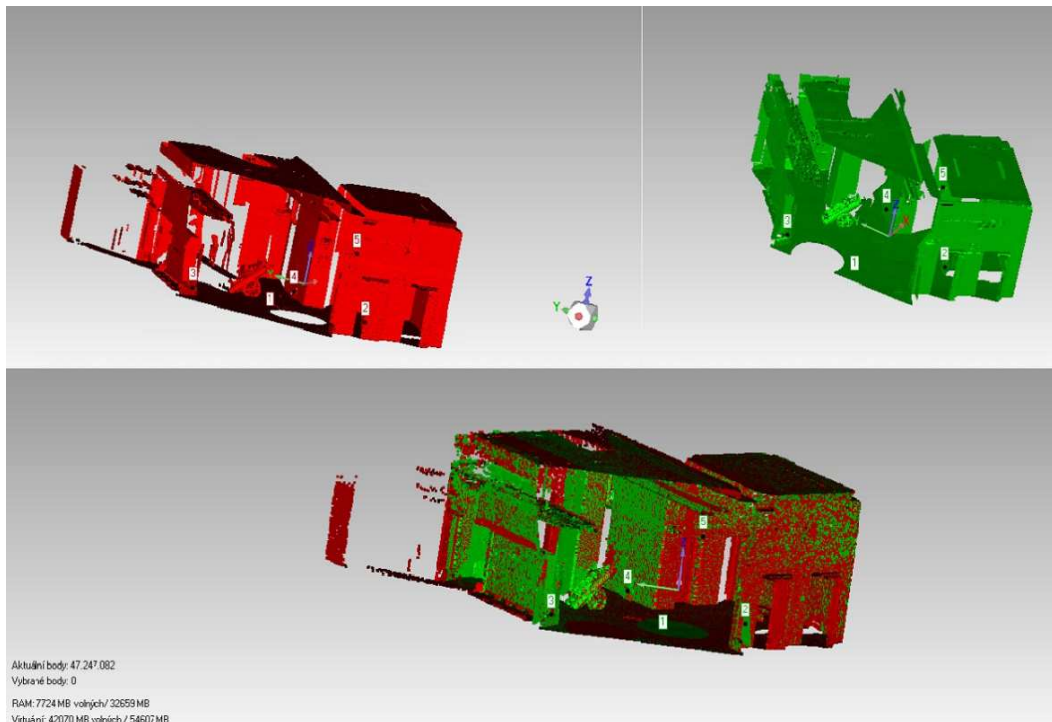
Měřená data ve formátu *c3d* byla zpracována programem *Surphexpress standard* a převedena pomocí dávkového souboru do formátu *xyz*. Mračna bodů obsahovala 741 477 204 bodů, což odpovídá přibližně 50 milionům bodů na jednom stanovisku. Jejich zpracování bylo provedeno v programu *Geomagic Wrap*. Byly odstraněny části mimo zájmovou oblast a nepřesně určené body na základě nastavené vzdálenosti od ostatních bodů. Zdrojem některých nepřesností byly například špatně určené délky po odrazu od prosklených ploch (viz. obrázek č. 6.2).

Kvůli plynulé a kvalitní práci byla mračna stínována a byl zredukován celkový počet bodů na 201 785 735. V oblastech mračna, kde se nacházely terče nebo jinak dobře identifikovatelné body byly redukce prováděny v menší míře.



Obrázek 6.2: Příklad chyby laserového skenování

Jelikož bylo každé mračno bodů měřeno v jiném lokálním souřadnicovém systému a program nedisponuje automatickou registrací (spojením) mračen bodů, byla provedena jejich manuální registrace. Registrace probíhá hrubým srovnáním mračen pomocí alespoň 3 identických bodů (nebo manuálního srovnání souřadnicových systémů a jednoho identického bodu) a následným spojením skenů založeném na prostorové korelaci.



Obrázek 6.3: Registrace mračen – Geomagic Wrap

Při procesu nastal problém při připojování skenů schodiště (stanoviska č. 11, 12 a 13), protože skeny obsahovaly málo identických ploch. Algoritmus vyhodnotil neodpovídající si plochy jako identické a mračna, i přesto že již byla hrubě zarovnána, byla umístěna chybně. Tento problém byl vyřešen registrací postupně ořezávaných částí připojovaného mračna bodů, čímž bylo vytvářeno více identických ploch pro připojení mračna celého.

V tabulce 6.3 je uvedena přesnost jednotlivých registrací.

Tabulka 6.3: Přesnost registrací jednotlivých mračen bodů – Surphaser 25 HSX

Číslo připojeného stanoviska	Průměrná vzdálenost identických bodů [mm]	Směrodatná odchylka vzd. id. bodů [mm]
4 a 5	1,10	0,45
8	0,90	0,33
10	0,94	0,31
9	0,76	0,27
6	0,85	0,27
7	0,77	0,26
2	1,02	0,29
3	1,22	0,56
1	0,94	0,26
11 (část č. 1)	1,09	0,40
11 (část č. 2)	0,03	0,01
11	$2 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5}$
12 (část č. 1)	0,78	0,24
12 (část č. 2)	0,67	0,21
12	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
13 (část č. 1)	0,68	0,26
13	$2 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$

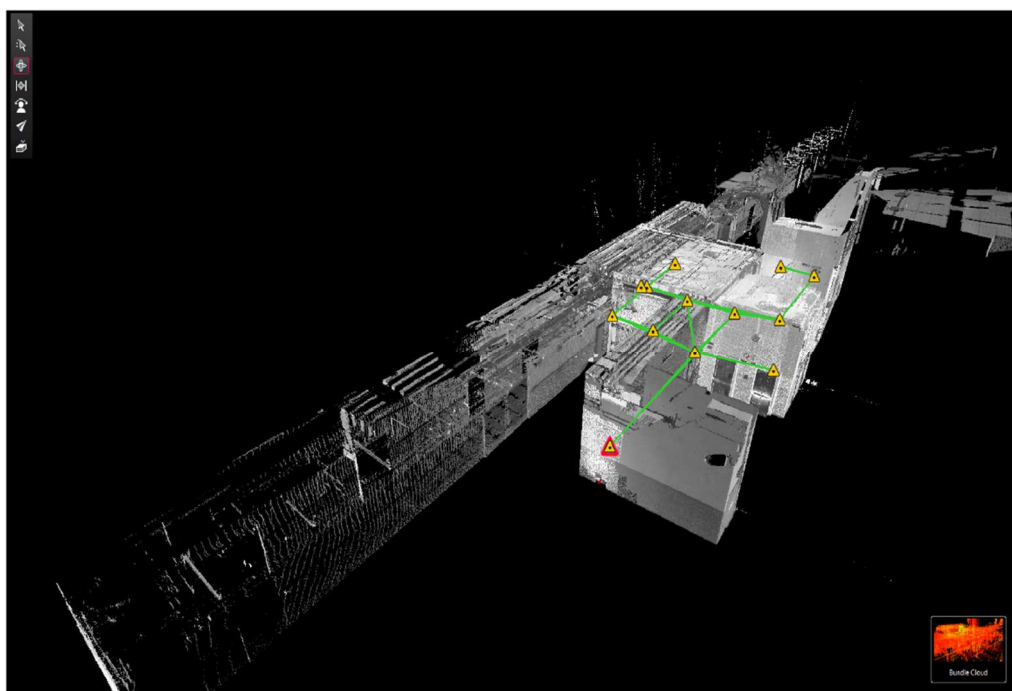
Dále bylo již celistvé mračno načteno do open source programu *CloudCompare*, ve kterém bylo porovnáno s výstupy z dalších skenerů a zpracováno do podoby řezů. Počet bodů jednotlivých řezů musel být výrazně snížen na 10–20 tisíc bodů, kvůli načtení do programu *Geus*. Následně byla provedena vektorizace řezů a tvorba výkresů doplněných pomocí oměrných měř. Údaje o zpracování popisuje tabulka 6.4.

Tabulka 6.4: Údaje o zpracování – Surphaser 25 HSX

Parametr	Hodnota
Doba zpracování	10 h
Cena – Surphexpress Standard	v ceně s laserovým skenerem
Cena – Geomagic Wrap	150 000 Kč
Cena – Geus	30 000 Kč

6.4 Leica BLK 360

Data, čítající 642 157 841 bodů, byla zpracována softwarem *BLK 360 Data Manager*. Mračna bodů byla dále upravena programem *Leica Cyclone Register 360*, který nabízí možnost automatické registrace mračen na základě korelace polohy bodů a rozmístěných terčů, které byly také identifikovány automatickým procesem.



Obrázek 6.4: Ukázka zpracování č. 1 – Leica Cyclone Register 360



Obrázek 6.5: Ukázka zpracování č. 2 – Leica Cyclone Register 360

Automatický proces registrace neproběhl zcela správně a některá mračna nemohla být připojena z důvodu malého počtu identických ploch nebo byla připojena chybně. Bylo tedy nutné provést manuální registraci, která je v programu *Leica Cyclone Register 360* poměrně jednoduchá. Mračno bodů se umístí tak, aby polohou odpovídalo připojovanému celku ze dvou na sebe kolmých pohledů. Následně proběhne registrace fungující na základě korelace poloh bodů. Výstupem byl soubor ve formátu *pts*. Přesnost registrace dvojic mračen je uvedena v tabulce 6.5.

Data byla dále zpracována v programech *Geomagic Wrap* a *CloudCompare* podobně jako v případě dat ze skeneru *Surphaser 25 HSX* s rozdílem, že registrace mračen bodů již nebyla nutná. Výsledný počet bodů mračna po redukci a úpravách byl 201 743 012. Řezy byly zpracovány v softwaru *Geus*, kde byly doplněny pomocí několika oměrných měr. Údaje o zpracování jsou uvedeny v tabulce 6.6.

Tabulka 6.5: Přesnost registrací jednotlivých mračen bodů – Leica BLK 360

Čísla spojovaných stanovisek	Průměrná vzdálenost identických bodů [mm]
4, 5	7
9, 10	6
5, 8	3
1, 2	3
4, 9	5
2, 3	5
2, 9	4
3, 4	6
10, 11	6
3, 5	3
5, 10	6
2, 10	6
5, 9	5
9, 11	6
5, 6	4
6, 10	5
11, 12	2
12, 13	3
6, 7	4

Celková přesnost registrace byla 4 mm.

Tabulka 6.6: Údaje o zpracování – Leica BLK 360

Parametr	Hodnota
Doba zpracování	6 h
Cena – BLK 360 Data Manager	v ceně s laserovým skenerem
Cena – Leica Cyclone Register 360	v ceně s laserovým skenerem
Cena – Geomagic Wrap	150 000 Kč
Cena – Geus	30 000 Kč

6.5 ZEB-REVO

Data ze skeneru *ZEB-REVO*, obsahující 13 061 333 bodů, byla zpracována v softwaru *GeoSLAM Hub* a *GeoSLAM Draw* do podoby mračna bodů a automaticky generovaných vektorových kreseb.

Z mračna bodů, jež bylo zpracováno v programech *Geomagic Wrap* a *CloudCompare*, byly vytvořeny řezy. Celkový počet bodů po zpracování byl 12 872 890. Automaticky vygenerovaná kresba byla upravena v softwaru *Geus* na základě řezů ze softwaru *CloudCompare*. Kresba vytvořená programem *GeoSLAM Hub*, nebyla příliš přesná a vyžadovala mnoho úprav, nicméně její použití snížilo čas pro vyhotovení výkresu.

Údaje o zpracování jsou uvedeny v tabulce 6.7.

Tabulka 6.7: Údaje o zpracování – ZEB-REVO

Parametr	Hodnota
Doba zpracování	2 h 15 min
Cena – GeoSLAM Hub	v ceně s laserovým skenerem
Cena – GeoSLAM Draw	v ceně s laserovým skenerem
Cena – Geomagic Wrap	150 000 Kč
Cena – Geus	30 000 Kč

6.6 3D model

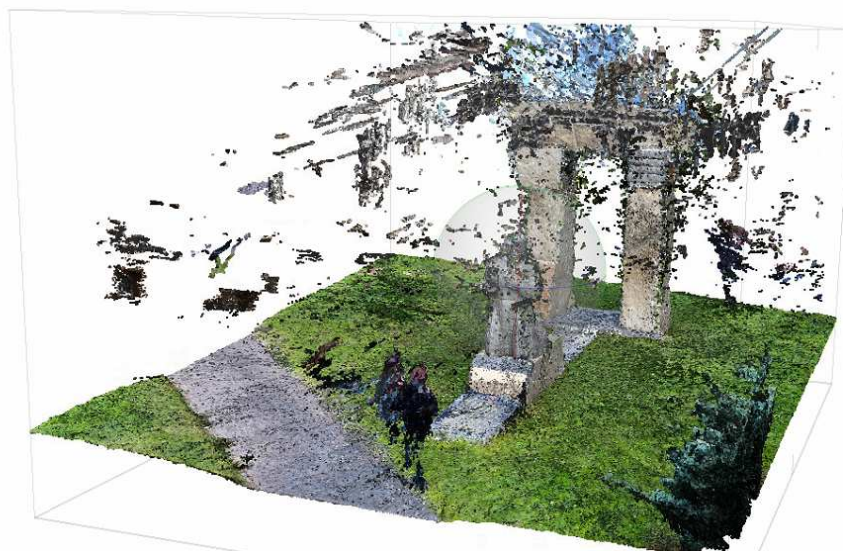
Fotografické snímky a sken sochy kardinála Josefa Berana byly zpracovány v softwaru *Agisoft Metashape* postupem uvedeným v podkapitolách 3.4.4 a 3.5.3.

Při určování vnitřních a vnějších prvků orientace kamer docházelo k identifikaci neexistujících bodů z důvodů například stejné barvy oblohy na více snímcích. Tyto nepřesnosti byly odstraněny výběrem bodů za pomoci funkce *Gradual selection*, kde se jednotlivým typům chybného vyhodnocení nastaví mez a body, jejichž parametry tuto mez přesahují (v případě *Image count* body, které byly vyhodnoceny z méně snímků, než je nastavená mez), jsou následně vybrány a mohou být vymazány. Jednotlivé typy chyb a jejich nastavené meze jsou v tabulce 6.8. Některé jednoznačně chybně určené body byly vymazány manuálně. Z původních 1 475 129 bodů řídkého mračna jich bylo použito 781 656 a pomocí nich byly optimalizovány parametry kamer.

Tabulka 6.8: Nastavené meze typů chybného vyhodnocení

Typ chybného vyhodnocení	Nastavená mez
Reprojection error	0,6
Reconstruction uncertainty	144,952
Image count	2
Projection accuracy	4,338 02

Stejný problém nastal i při tvorbě hustého mračna bodů a byl řešen pouze manuálním odstraněním chybně určených bodů. Chyby vznikly naskenováním operátorů a procházejících osob. Z původních 31 656 577 bodů jich bylo pro tvorbu trojúhelníkové sítě použito 17 396 291.



Obrázek 6.6: Ukázka zpracování 3D modelu – chybně určené body

Výsledný model obsahuje 3 479 258 stěn a je k dispozici jako elektronická příloha ve formátech *ply*, *obj* a *pdf*. Nastavené parametry jednotlivých fází výpočtu jsou k uvedeny v tabulkách 6.9, 6.10, 6.11 a 6.12 a údaje o zpracování v tabulce 6.13.

Tabulka 6.9: Parametry tvorby řídkého mračna bodů – IBMR

Parametr	Hodnota
Accuracy	High
Generic preselection	Ano
Reference preselection	Source
Key point limit	50 000
Tie point limit	10 000
Guided image matching	Ne
Adaptive camera model fitting	Ne

Tabulka 6.10: Parametry tvorby hustého mračna bodů – IBMR

Parametr	Hodnota
Quality	High
Depth filtering	Moderate
Calculate point colors	Ano
Calculate point confidence	Ne

Tabulka 6.11: Parametry tvorby TIN – IBMR

Parametr	Hodnota
Source data	Dense cloud
Surface type	Arbitrary (3D)
Face count	High
Interpolation	Enabled
Calculate vertex colors	Ano

Tabulka 6.12: Parametry tvorby textury – IBMR

Parametr	Hodnota
Texture type	Diffuse map
Source data	Images
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size/count	8192 × 1
Enable hole filling	Ano
Enable ghosting filter	Ano

Tabulka 6.13: Údaje o zpracování 3D modelu – IBMR

Parametr	Hodnota
Doba zpracování	9 h 20 min
Cena – Agisoft Metashape	15 000 Kč ⁴

V případě modelu z dat laserového skeneru byly z hustého mračna bodů rovněž vyjmuty odlehlé body. Z původních 8 675 048 bodů jich bylo použito 5 992 979. Aby bylo možné vytvořit model objektu, bylo nutné nastavit pracovní oblast, která se běžně nastavuje automaticky při tvorbě řídkého mračna bodů. Aby výsledkem tvorby TIN byly relevantní data, je třeba vypnout možnost interpolace. Pokusem o zvýšení přesnosti výsledného modelu bylo nastavení 20 000 000 stěn TIN oproti původnímu počtu 1 198 595 stěn. Model nemá texturu, jelikož body z mobilního skeneru *ZEB-REVO* neobsahovaly informaci o barvě.

Model je ve formě elektronické přílohy k dispozici ve formátech *obj* a *ply*. Nastavené parametry tvorby TIN jsou uvedeny v tabulce 6.14 a údaje o zpracování v tabulce 6.15.

⁴ Univerzitní cena, ve které je zahrnuta sleva přibližně 70 %.

Tabulka 6.14: Parametry tvorby TIN – ZEB-REVO

Parametr	Hodnota
Source data	Dense cloud
Surface type	Arbitrary (3D)
Face count	20 000 000
Interpolation	Disabled
Calculate vertex colors	Ne

Tabulka 6.15: Údaje o zpracování 3D modelu – ZEB-REVO

Parametr	Hodnota
Doba zpracování	1 h 20 min
Cena – GeoSLAM Hub	v ceně s laserovým skenerem
Cena – GeoSLAM Draw	v ceně s laserovým skenerem
Cena – Agisoft Metashape	15 000

7 Porovnání výsledků

7.1 Data z laserových skenerů

Data z laserových skenerů byla pro účely porovnání zpracována v programu *CloudCompare*. Nejprve proběhla registrace mračen stejným způsobem, jakým je popsána v kapitole 6.3 (*CloudCompare* vyžaduje k hrubému zarovnání minimálně 4 identické body).

Každé mračno bodů bylo zpracováváno zvlášť, a proto se koncové oblasti lišily v ořezání. Z tohoto důvodu byla vybrána pouze zastupující uzavřená část prostorů, jejíž ořezání bylo u obou již registrovaných mračen identické.

Porovnávací funkcí *Compute cloud/cloud distance* byly vypočteny vzdálenosti mezi identickými skupinami bodů mračen. Funkce poskytuje statistické bodové odhady porovnání v podobě aritmetického průměru a směrodatné odchylky vzdáleností mezi identickými body a příslušné obarvení zvoleného mračna. Do výpočtu statistických hodnot byla zadána maximální vzdálenost mezi body, aby výsledky nebyly ovlivněny chybami, které nemusely být odstraněny při zpracování. Chyby mohly být způsobeny naskenováním procházející osoby nebo dveří, které jsou v jiné poloze než v druhém porovnávaném skenu. Hodnoty parametrů použité při registraci a porovnávání jsou uvedeny v tabulkách 7.1 a 7.2.

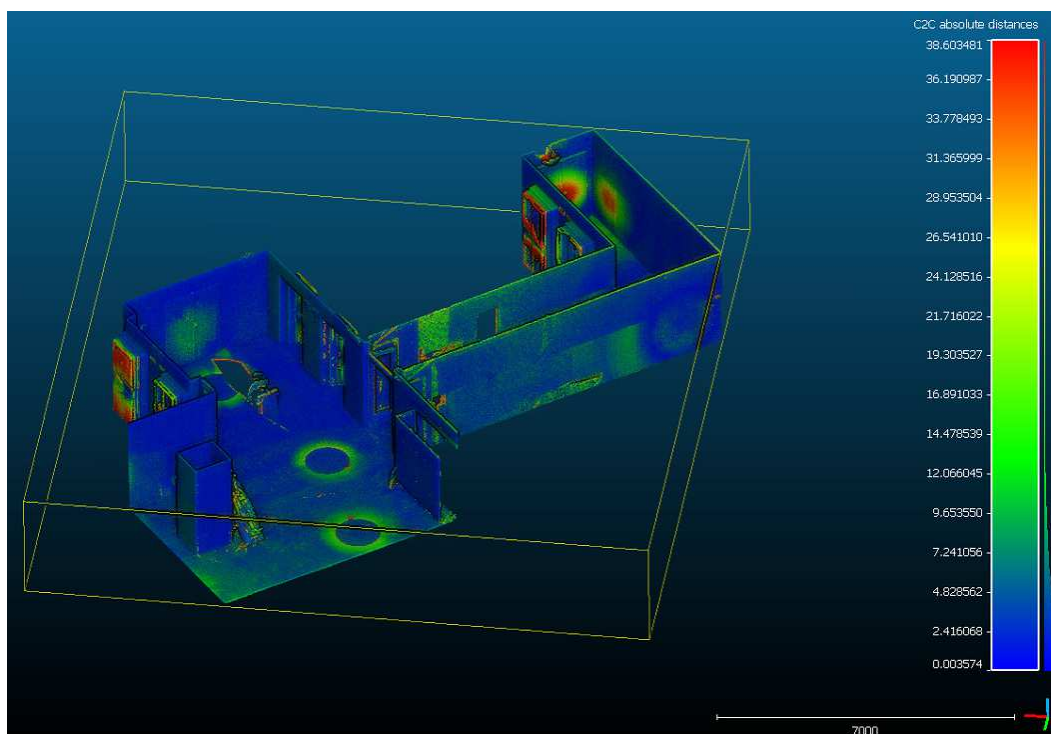
Tabulka 7.1: Parametry registrace mračen bodů – CloudCompare

Parametr	Hodnota
RMS difference	1.0e-5 mm
Final overlap	100 %
Adjust scale	Ne
Max thread count	8 / 8

Tabulka 7.2: Parametry výpočtu vzdáleností identických bodů – CloudCompare

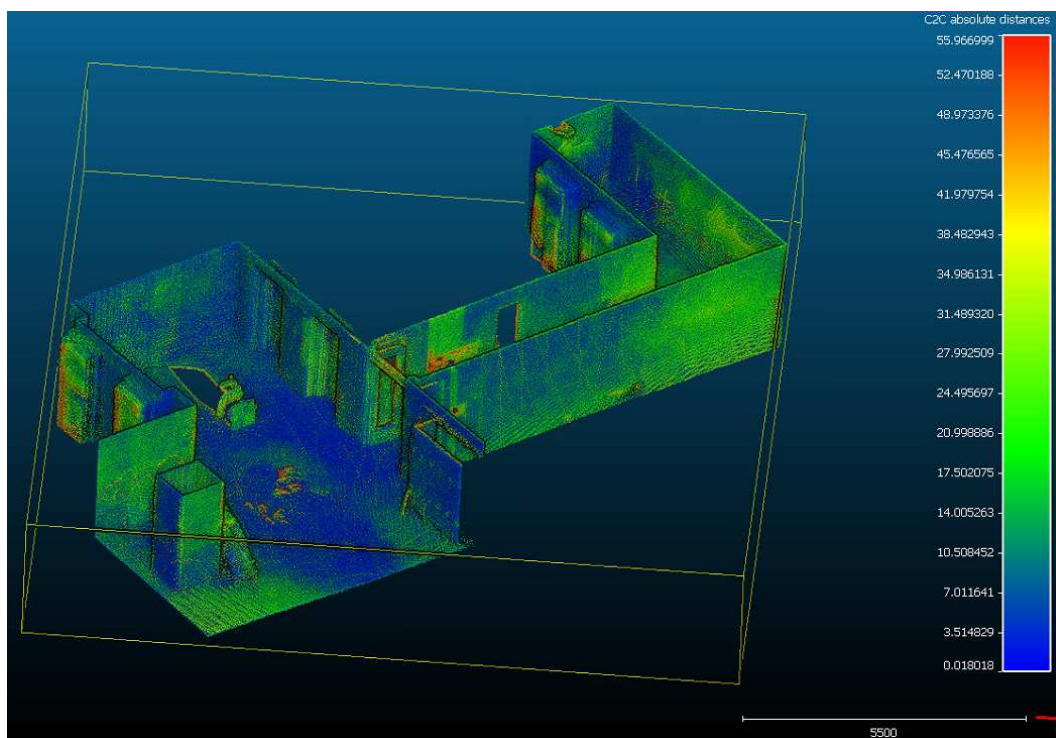
Parametr	Hodnota
Octree level	AUTO
Max. distance	100 mm
Split X,Y and Z components	Ne
Multi-threaded	Ano
Max thread count	8 / 8

Aritmetický průměr rozdílů vzdáleností mezi body měřenými skenery *Surphaser 25 HSX* a *Leica BLK 360* byl 6,35 mm se směrodatnou odchylkou 10,38 mm.



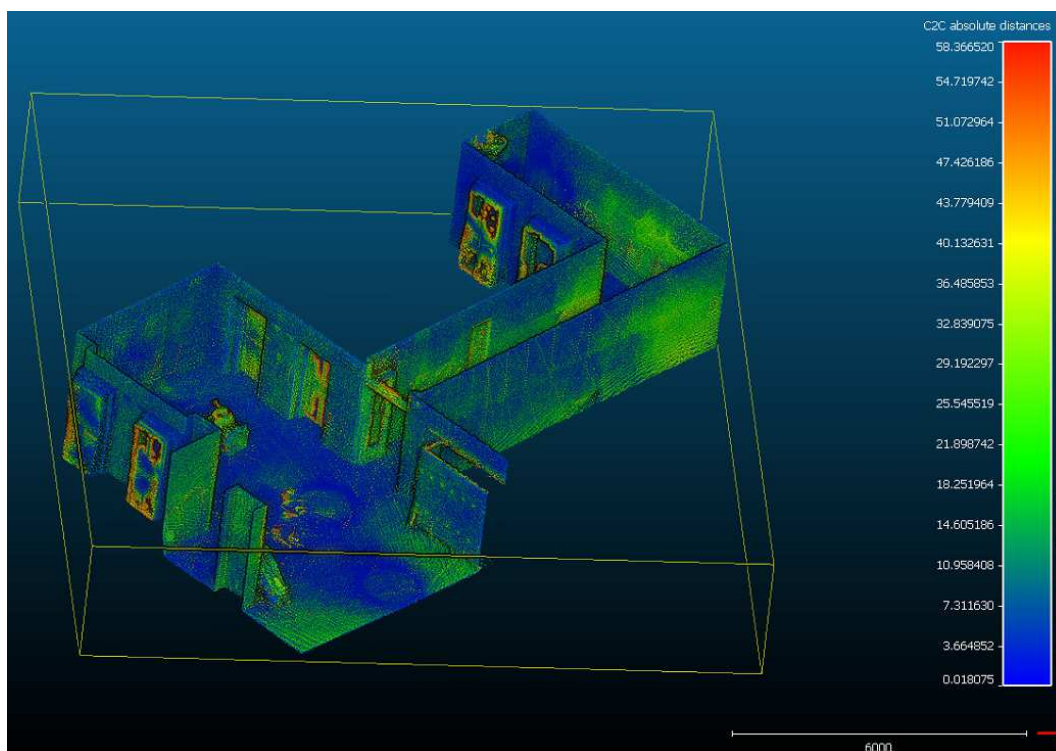
Obrázek 7.1: Porovnání mračen bodů – Surphaser 25 HSX a Leica BLK 360

Aritmetický průměr rozdílů vzdáleností mezi body měřeny skenery *Surphaser 25 HSX* a *ZEB-REVO* byl 10,12 mm se směrodatnou odchylkou 12,76 mm.



Obrázek 7.2: Porovnání mračen bodů – Surphaser 25 HSX a ZEB-REVO

Aritmetický průměr rozdílů vzdáleností mezi body měřeny skenery *Leica BLK 360* a *ZEB-REVO* byl 9,21 mm se směrodatnou odchylkou 14,74 mm.



Obrázek 7.3: Porovnání mračen bodů – Leica BLK 360 a ZEB-REVO

Směrodatné odchylky vzdáleností bodů byly větší než aritmetické průměry, což svědčí o tom, že statistické vyhodnocení mohlo být i po zadání maximální vzdálenosti zatíženo chybami, které nejsou předmětem porovnání. Vyhodnocení tedy není příliš důvěryhodné, tudíž bylo doplněno obrázky 7.1, 7.2 a 7.3.

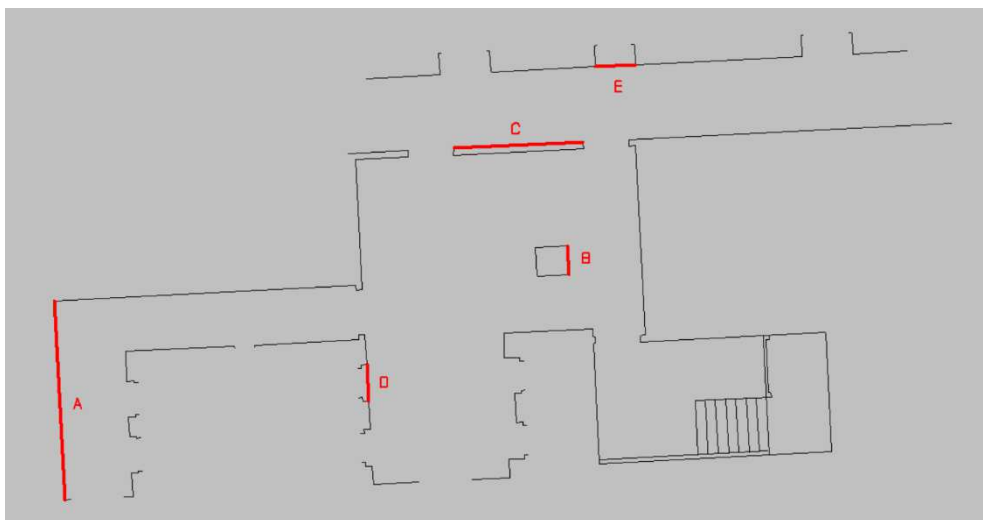
Z obrázku 7.1 je patrné, že vzdálenosti mezi většinou identických bodů jsou 5–6 mm, což odpovídá vypočtenému aritmetickému průměru. V případě některých dveří nebo ploch ve velmi malé vzdálenosti od skeneru dosahují rozdíly až 40 mm.

Na obrázku 7.2 lze pozorovat průměrnou vzdálenost mezi identickými body 10–14 mm. Maximální hodnoty rozdílů mračen pak dosahují až 60 mm.

Hodnoty na obrázku 7.3 vykazují podobný trend jako na obrázku 7.2.

7.2 Rozměry ve vektorových kresbách

Ve výstupech vytvořených všemi pěti testovanými způsoby byly zvoleny rozměry, na kterých bylo provedeno porovnání. Tyto rozměry jsou znázorněny v obrázku 7.4. Rozměry A, B, C představují délky vybraných segmentů zdí a D, E jsou rozměry vybraných otvorů. Výsledky porovnání jsou uvedeny v tabulce 7.3.



Obrázek 7.4: Přehled testovaných rozměrů

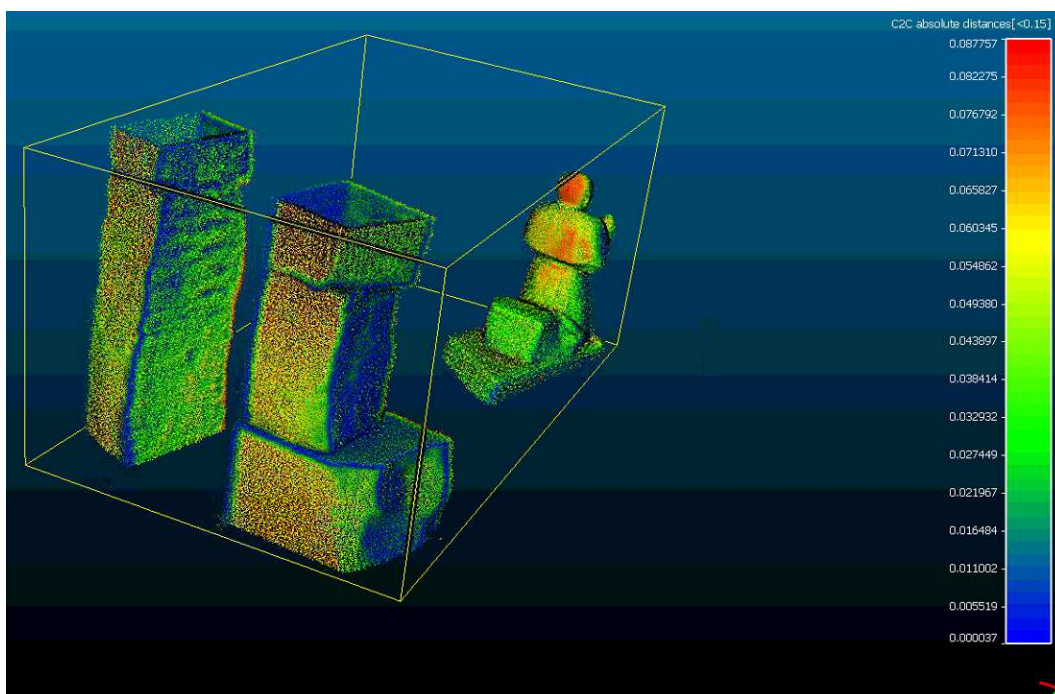
Tabulka 7.3: Zvolené rozměry ve výkresech tvořených z dat všech 5 přístrojů

Přístroj	A [m]	B [m]	C [m]	D [m]	E [m]
Leica Disto A5	5,761	0,835	3,771	1,048	1,166
Leica TCR 307	5,758	0,835	3,758	1,056	1,174
Surphaser 25 HSX	5,761	0,836	3,781	1,049	1,169
Leica BLK 360	5,767	0,833	3,775	1,043	1,164
ZEB-REVO	5,785	0,850	3,779	1,028	1,174

7.3 ZEB-REVO a IBMR

Výsledky tvorby 3D modelů byly porovnány ve formě mračen bodů a ve formě TIN. Mračna bodů byla porovnána v softwaru *CloudCompare* stejným způsobem, jaký je popsán v podkapitole 7.1 a výsledky jsou obsahem obrázku 7.5. 3D modely byly porovnány pouze vizuálně na obrázcích 7.6, 7.7, 7.8 a 7.9.

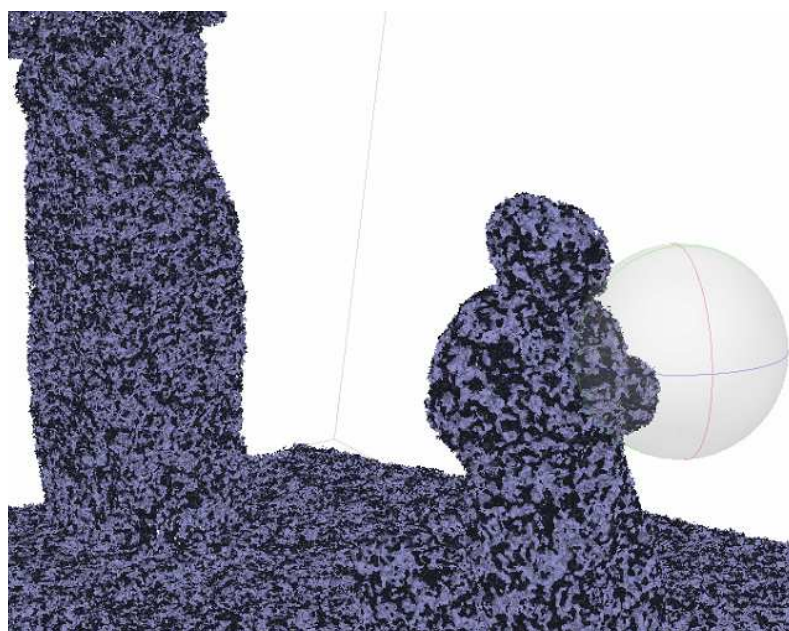
Aritmetický průměr rozdílů vzdáleností mezi mračny bodů vytvořených ze snímků a skenerem *ZEB-REVO* byl 25,04 mm se směrodatnou odchylkou 19,76 mm.



Obrázek 7.5: Porovnání mračen bodů – ZEB-REVO a IBMR



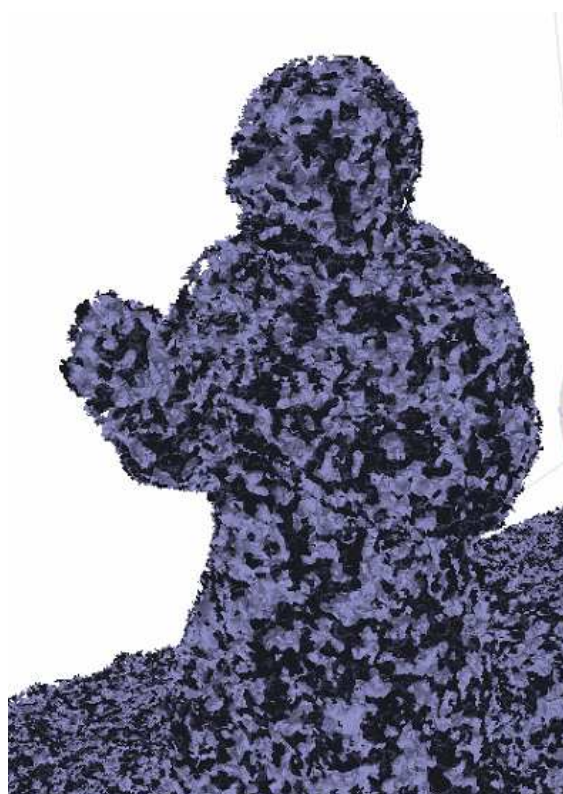
Obrázek 7.6: Detail 3D modelu č. 1 – IBMR



Obrázek 7.7: Detail 3D modelu č. 1 – ZEB-REVO



Obrázek 7.8: Detail 3D modelu č. 2 – IBMR



Obrázek 7.9: Detail 3D modelu č. 2 – ZEB-REVO

7.4 Celkové porovnání metod

Tabulky 7.4, 7.5 a 7.6 obsahují porovnání metod na základě různých kritérií od počátku procesu měření až po konečné zpracování výstupů.

Tabulka 7.4: Celkové porovnání metod – zaměření vnitřních prostorů (1. část)

Přístroj	Uváděná přesnost přístroje [mm]	Přesnost mračen bodů [mm] ⁵	Přesnost výkresů [mm] ⁶
Leica Disto A5	1,5	-	3
Leica TCR 307	2 + 2 / 10 ⁶ vzd.	-	8
Surphaser 25 HSX	0,6 / 10 m vzd.	-	-
Leica BLK 360	4 / 10 m vzd. 7 / 20 m vzd.	6,35	5
ZEB-REVO	30	10,12	13

Tabulka 7.5: Celkové porovnání metod – zaměření vnitřních prostorů (2. část)

Přístroj	Finanční náklady [kč]	Časová náročnost	Objem měřených dat
Leica Disto A5	40 000	3 h 20 min	0 B
Leica TCR 307	90 000	3 h 30 min	17 kB
Surphaser 25 HSX	1 980 000	12 h 10 min	17 GB
Leica BLK 360	980 000	7 h 48 min	23 GB
ZEB-REVO	950 000	2 h 26 min	0,4 GB

Tabulka 7.6: Celkové porovnání metod – Tvorba 3D modelu

Přístroj	Přesnost mračen bodů [mm] ⁷	Finanční náklady [kč]	Časová náročnost	Objem měřených dat
Fotoaparát, dron	-	49 000	10 h 20 min	2,7 GB
ZEB-REVO	25	965 000	1 h 30 min	0,3 GB

⁵ Jedná se o aritmetický průměr vzdáleností identických bodů mračna ve srovnání s mračenem pořízeným skenerem Surphaser 25 HSX.

⁶ Jedná se o aritmetický průměr rozdílů vzdáleností všech testovaných rozměrů mezi měřeními daným přístrojem a skenerem Surphaser 25 HSX.

⁷ Jedná se o aritmetický průměr vzdáleností identických bodů mračna ve srovnání s mračenem vytvořeným technologií IBMR.

8 Závěr

Cíle práce byly splněny. Byla provedena rešerše literatury a byly nalezeny zdroje s tématem zaměření stavebního objektu, laserového skenování (zejména mobilního) a *GeoSLAM*. Na základě informací z literatury byl vytvořen komplexní popis ručního mobilního skeneru *ZEB-REVO*.

Využitelnost přístroje byla testována na zaměření vnitřních prostorů Fakulty stavební ČVUT a tvorbě modelu pomníku kardinála Josefa Berana. Přístroj *ZEB-REVO* byl porovnán s ostatními přístroji a metodami z hlediska zadaných kritérií.

Velkou výhodou přístroje *ZEB-REVO* je rychlost sběru a zpracování dat. Časová náročnost byla nejnižší ze všech testovaných metod v této práci a byla 5krát nižší než u statického skeneru *Surphaser 25 HSX*. Přidružený software *GeoSLAM Hub* sloužící ke zpracování dat je velmi jednoduše ovladatelný a výstupy *GeoSLAM Draw* usnadňují uživateli následné zpracování.

Objem měřených dat je ve srovnání s ostatními testovanými laserovými skenery mnohonásobně nižší, což může být výhodou u archivace dat z mnoha projektů. Nižší počet bodů umožňuje snadnější a plynulejší práci s mračenem a výkonnost výpočetní techniky nemusí být tak vysoká jako v případě zpracování mračen bodů z přístrojů *Surphaser 25 HSX* a *Leica BLK 360*.

Zmíněnými výhodami disponuje *ZEB-REVO* na úkor ceny a přesnosti měření. Ceny laserové techniky jsou obecně několikanásobně vyšší než u přístrojů, které se používají v běžných metodách (metody oměrná a polární). Náklady na měření dat přístrojem *ZEB-REVO* a jejich zpracování byly až desetkrát vyšší než u totální stanice *Leica TCR 307*, ale dvakrát nižší než u skeneru *Surphaser 25 HSX*.

Přesnost dat z mobilního laserového skeneru je nejnižší ve srovnání s daty všech testovaných přístrojů. V případě mračen bodů i vektorových výstupů byla o 1–2 řády nižší než u skeneru *Surphaser 25 HSX* a u mračna bodů vytvořeného technologií IBMR.

Mobilní skener *ZEB-REVO* je využitelný pro zaměření vnitřních prostorů objektů. Je také částečně využitelný pro dokumentaci historických památek nebo mapování členitých prostorů, jako jsou například lesy, kde je ovšem měření omezeno dosahem skeneru. Je vhodný pro rychlé zachycení skutečnosti, například v případě dopravní nehody. Technologie SLAM umožňuje skenování podzemních prostor, kde mohou být výsledky přesnější než při využití totální stanice. Možnosti použití přístroje v podzemních prostorech, kde se vyskytují nebezpečné látky nebyly zjištěny.

Nízká přesnost zapříčiňuje, že skenerem *ZEB-REVO* nelze provádět jakékoliv práce vyžadující přesnost v řádech milimetrů a vyšší. Přístroj není použitelný pro sledování posunů a deformací staveb nebo měření detailů. V rámci porovnání lze soudit, že tímto způsobem nelze dokumentovat drobné a detailní objekty (viz. obrázky 7.7 a 7.9). Technologie SLAM navíc vyžaduje prostředí, které není proměnlivé. Pohybující se osoby či předměty mohou zapříčinit špatné vyhodnocení polohy přístroje. Výsledná data mohou být také zatížena chybami, pokud jsou s přístrojem prováděny prudké pohyby.

Některé nedostatky přístroje, jako je dosah skeneru, obarvení mračna bodů nebo georeferencování jsou kompenzovány v novějších produktech společnosti *GeoSLAM*.

Použitá literatura

- [1] VESELÝ, Jan. Měřická dokumentace historických staveb pro průzkum v památkové péči. V Praze: Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště středních Čech v Praze ve spolupráci s Národním památkovým ústavem, generálním ředitelstvím, 2014. Odborné a metodické publikace (Národní památkový ústav). ISBN 978-80-86516-79-0.
- [2] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-0104249-6. [3] VLČEK, Milan, Ivan MOUDRÝ, Miloslav NOVOTNÝ, Petr BENEŠ a Věra MACEKOVÁ. Poruchy a rekonstrukce staveb. 3. vyd. Brno: ERA, 2006. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-736-6073-3.
- [4] DOLANSKÝ, Tomáš. Lidary a letecké laserové skenování. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. Acta Universitatis Purkynianae. ISBN 80-704-4575-0.
- [5] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 20*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2762-7.
- [6] KAŠPAR, Milan, Jiří POSPÍŠIL, Martin ŠTRONER, Tomáš KŘEMEN a Miloš TEJKAL. *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. Hradec Králové: Vega, 2003. ISBN 80-900-8603-9.
- [7] SACKS, Rafael, Charles M. EASTMAN, Paul M. TEICHOLZ a Kathleen LISTON. *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. Second edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, [2011]. ISBN 978-0-470-54137-1.
- [8] XIONG, Xuehan, Antonio ADAN, Burcu AKINCI a Daniel HUBER. Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data. *Automation in Construction* [online]. 2013, 31, 325-337 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.10.006. ISSN 09265805. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580512001732>
- [9] OCHMANN, Sebastian, Richard VOCK, Raoul WESSEL a Reinhard KLEIN. Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. *Computers & Graphics* [online]. 2016, 54, 94-103 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1016/j.cag.2015.07.008. ISSN 00978493. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0097849315001119>
- [10] PAVELKA, Karel, Martina FALTÝNOVÁ, Zdeněk ŠVEC a Petr DUŠÁNEK. *Mobilní laserové skenování*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05261-7.

- [11] RUTZINGER, Martin, Snader Oude ELBERINK, S. PU a George VOSSelman. Automatic extraction of vertical walls from mobile and airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2009, 38, 7-11.
- [12] HŮLKOVÁ, Martina. Mobilní laserové skenování v dopravě. Praha, 2017. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geomatiky. Vedoucí práce Karel Pavelka.
- [13] GLENNIE, Craig, Benjamin BROOKS, Todd ERICKSEN, Darren HAUSER, Kenneth HUDNUT, James FOSTER a Jon AVERY. Compact Multipurpose Mobile Laser Scanning System — Initial Tests and Results. *Remote Sensing* [online]. 2013, 5(2), 521-538 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.3390/rs5020521. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/2/521>
- [14] *Home - GeoSLAM* [online]. Nottingham: GeoSLAM, 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://geoslam.com/>
- [15] THOMSON, C., G. APOSTOLOPOULOS, D. BACKES a J. BOEHM. Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2013, II-5/W2, 289-293 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-289-2013. ISSN 2194-9050. Dostupné z: <http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/II-5-W2/289/2013/>
- [16] LIANG, Xinlian, Juha HYYPPA, Antero KUKKO, Harri KAARTINEN, Anttoni JAAKKOLA a Xiaowei YU. The Use of a Mobile Laser Scanning System for Mapping Large Forest Plots. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* [online]. 2014, 11(9), 1504-1508 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1109/LGRS.2013.2297418. ISSN 1545-598X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719551/>
- [17] LEYLAND, Julian, Christopher R. HACKNEY, Stephen E. DARBY, Daniel R. PARSONS, James L. BEST, Andrew P. NICHOLAS, Rolf AALTO a Dimitri LAGUE. Extreme flood-driven fluvial bank erosion and sediment loads: direct process measurements using integrated Mobile Laser Scanning (MLS) and hydro-acoustic techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* [online]. 2017, 42(2), 334-346 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1002/esp.4078. ISSN 01979337. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/esp.4078>

- [18] CHEN, Yuwei, Jian TANG, Juha HYYPPA, Zhijie WEN, Chuanrong LI a Ting ZHU. Mobile laser scanning based 3D technology for mineral environment modeling and positioning. 2016 Fourth International Conference on Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location Based Services (UPINLBS) [online]. IEEE, 2016, 2016, , 289-294 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1109/UPINLBS.2016.7809987. ISBN 978-1-5090-2879-5. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7809987/>
- [19] WAJS, Jaroslaw, Damian KASZA, Paweł P. ZAGOŹDŹON, Katarzyna D. ZAGOŹDŹON, T.A. PRZYLIBSKI a D. KASZA. 3D modeling of underground objects with the use of SLAM technology on the example of historical mine in Ciechanowice (Ołowiane Range, The Sudetes). E3S Web of Conferences [online]. 2018, 29 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1051/e3sconf/20182900024. ISSN 2267-1242. Dostupné z: <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20182900024>
- [20] CABO, Carlos, Susana DEL POZO, Pablo RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, Celestino ORDÓÑEZ a Diego GONZÁLEZ-AGUILERA. Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level. Remote Sensing [online]. 2018, 10(4) [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.3390/rs10040540. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/540>
- [21] ZHENG, Yi, Michael PETER, Ruofei ZHONG, Sander OUDE ELBERINK a Quan ZHOU. Space Subdivision in Indoor Mobile Laser Scanning Point Clouds Based on Scanline Analysis. Sensors [online]. 2018, 18(6) [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.3390/s18061838. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1838>
- [22] DI FILIPPO, Andrea, Luis SÁNCHEZ-APARICIO, Salvatore BARBA, José MARTÍN-JIMÉNEZ, Rocío MORA a Diego GONZÁLEZ AGUILERA. Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site. Remote Sensing [online]. 2018, 10(12) [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.3390/rs10121897. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/12/1897>
- [23] DURRANT-WHYTE, H. a T. BAILEY. Simultaneous localization and mapping: part I. *IEEE robotics & automation magazine* [online]. 2006, **13**(2), 99-110 [cit. 2020-04-28]. DOI: 10.1109/MRA.2006.1638022. ISSN 1070-9932. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1638022/>

- [24] CADENA, Cesar, Luca CARLONE, Henry CARRILLO, Yasir LATIF, Davide SCARAMUZZA, Jose NEIRA, Ian REID a John J. LEONARD. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics* [online]. 2016, **32**(6), 1309-1332 [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754. ISSN 1552-3098. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7747236/>
- [25] Welcome to the ZEB REVOLUTION. *GEOmedia* [online]. 2016, (3), 22-25 [cit. 2020-04-28]. ISSN 2283-5687. Dostupné z: <https://www.geomediaonline.it/en/archive/archive-online-en>
- [26] *Handheld Imaging Laser Scanner - Leica BLK2GO* [online]. Heerbrugg: Leica Geosystems, c2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.blk2go.com>
- [27] *Gexcel home - Gexcel* [online]. Brescia: Gexcel, c2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://gexcel.it/en/>
- [28] *Home - Stonex - Design and production of Surveying Instruments* [online]. Paderno Dugnano: Stonex, 2019 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.stonex.it/>
- [29] *Paracosm - PX-80: Handheld 3D Scanner Built For Speed* [online]. Gainesville: Paracosm, c2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://paracosm.io/>
- [30] *DotProduct - Handheld 3D Scanning* [online]. Norwood: DotProduct, c2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.dotproduct3d.com>
- [31] *Home - FARO® Knowledge Base* [online]. FARO Technologies: Lake Mary, c2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://knowledge.faro.com>
- [32] *3D Skenování | 3DSCAN* [online]. Brno: SolidVision [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/>
- [33] *Professional 3D Scanners | Artec 3D | Best 3D Scanning Solutions* [online]. Luxembourg: Artec 3D, c2020 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://www.artec3d.com>
- [34] ŠARTNER, Jan. Metody dokumentace a vizualizace drobných objektů a předmětů. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geomatiky. Vedoucí práce Karel Pavelka.
- [35] *Agisoft* [online]. St. Petersburg: Agisoft, c2019 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <http://www.agisoft.com>

- [36] *CloudCompare - Open Source project* [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <http://www.cloudcompare.org/>
- [37] REUTEBUCH, Stephen E., Hans-Erik ANDERSEN a Robert J. MCGAUGHEY. Light Detection and Ranging (LIDAR): An Emerging Tool for Multiple Resource Inventory. *Journal of Forestry* [online]. 2005, **103**(6), 286–292 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://academic.oup.com/jof/article/103/6/286/4598654>

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Automobil jako nosič MLS; zdroj: [12]	15
Obrázek 2.2: Batoh s MLS aparaturou; zdroj: [13]	16
Obrázek 2.3: Héliový balón jako nosič MLS; zdroj: [13]	16
Obrázek 2.4: Viametris i-MMS; zdroj: [15]	17
Obrázek 2.5: ZEB1; zdroj: [15]	17
Obrázek 2.6: Šestikolové dálkově řízené vozidlo; zdroj: [16]	18
Obrázek 2.7: Leica BLK2GO; zdroj: [26]	21
Obrázek 2.8: HERON LITE; zdroj: [27]	21
Obrázek 2.9: STONEX F6; zdroj: [28]	22
Obrázek 2.10: PX-80; zdroj: [29]	22
Obrázek 2.11: DPI-S8; zdroj: [30]	23
Obrázek 2.12: FARO ScanPlan; zdroj: [31]	23
Obrázek 2.13: HANDYSCAN 3D; zdroj: [32]	24
Obrázek 2.14: Artec Eva; zdroj: [33]	24
Obrázek 3.1: Schématické znázornění prostorové polární metody; zdroj: [6]	29
Obrázek 3.2: Obecné schéma principu elektronického měření délky; zdroj: [6]	30
Obrázek 3.3: FARO Focus 3D; zdroj: [31]	31
Obrázek 4.1: ZEB-REVO a jeho příslušenství	34
Obrázek 4.2: Ukázka softwaru GeoSLAM Hub	38
Obrázek 4.3: Ukázka prostředí GeoSLAM Viewer	38
Obrázek 4.4: GeoSLAM Draw	39
Obrázek 4.5: ZEB-HORIZON; zdroj: [14]	40
Obrázek 4.6: ZEB-DISCOVERY; zdroj: [14]	40
Obrázek 4.7: ZEB-LOCATE; zdroj: [14]	41
Obrázek 4.8: ZEB-PANO; zdroj [14]	41
Obrázek 4.9: ZEB-REVO RT; zdroj: [14]	42
Obrázek 5.1: Měřené prostory Fakulty stavební ČVUT	43
Obrázek 5.2: Pomník kardinála Josefa Berana	43
Obrázek 5.3: Rozdělení měřených prostorů	44
Obrázek 5.4: Terč	44
Obrázek 5.5: Leica Disto A5	45
Obrázek 5.6: Surphaser 25 HSX	47
Obrázek 5.7: Náčrt s vyznačenými stanovisky – Surphaser 25 HSX	47
Obrázek 5.8: Leica BLK 360	48
Obrázek 5.9: Náčrt s vyznačenými stanovisky	49
Obrázek 5.10: Příklad předmětu pro algoritmus SLAM č. 1	50
Obrázek 5.11: Příklad předmětu pro algoritmus SLAM č. 2	50
Obrázek 5.12: Trajektorie měření vnitřních prostor – ZEB-REVO	51
Obrázek 5.13: Trajektorie měření 3D modelu – ZEB-REVO	52
Obrázek 6.1: Ukázka výkresu	53
Obrázek 6.2: Příklad chyby laserového skenování	55
Obrázek 6.3: Registrace mračen – Geomagic Wrap	55
Obrázek 6.4: Ukázka zpracování č. 1 – Leica Cyclone Register 360	57
Obrázek 6.5: Ukázka zpracování č. 2 – Leica Cyclone Register 360	58
Obrázek 6.6: Ukázka zpracování 3D modelu – chybně určené body	61
Obrázek 7.1: Porovnání mračen bodů – Surphaser 25 HSX a Leica BLK 360	66
Obrázek 7.2: Porovnání mračen bodů – Surphaser 25 HSX a ZEB-REVO	67
Obrázek 7.3: Porovnání mračen bodů – Leica BLK 360 a ZEB-REVO	67
Obrázek 7.4: Přehled testovaných rozměrů	68
Obrázek 7.5: Porovnání mračen bodů – ZEB-REVO a IBMR	69

Obrázek 7.6: Detail 3D modelu č. 1 – IBMR	70
Obrázek 7.7: Detail 3D modelu č. 1 – ZEB-REVO	70
Obrázek 7.8: Detail 3D modelu č. 2 – IBMR	71
Obrázek 7.9: Detail 3D modelu č. 2 – ZEB-REVO	71

Seznam tabulek

Tabulka 4.1: Technické specifikace ZEB-REVO	35
Tabulka 5.1: Údaje o měření – Leica Disto A5.....	45
Tabulka 5.2: Údaje o měření – Leica TCR 307	46
Tabulka 5.3: Údaje o měření – Surphaser 25 HSX.....	48
Tabulka 5.4: Údaje o měření – Leica BLK 360.....	49
Tabulka 5.5: Údaje o měření – ZEB-REVO	51
Tabulka 5.6: Údaje ze snímkování sochy – fotoaparát, dron	52
Tabulka 5.7: Údaje z měření sochy – ZEB-REVO.....	52
Tabulka 6.1: Údaje o zpracování – Leica Disto A5	53
Tabulka 6.2: Údaje o zpracování – Leica TCR 307	54
Tabulka 6.3: Přesnost registrací jednotlivých mračen bodů – Surphaser 25 HSX	56
Tabulka 6.4: Údaje o zpracování – Surphaser 25 HSX	57
Tabulka 6.5: Přesnost registrací jednotlivých mračen bodů – Leica BLK 360.....	59
Tabulka 6.6: Údaje o zpracování – Leica BLK 360.....	59
Tabulka 6.7: Údaje o zpracování – ZEB-REVO	60
Tabulka 6.8: Nastavené meze typů chybného vyhodnocení.....	61
Tabulka 6.9: Parametry tvorby řídkého mračen bodů – IBMR.....	62
Tabulka 6.10: Parametry tvorby hustého mračen bodů – IBMR	62
Tabulka 6.11: Parametry tvorby TIN – IBMR.....	62
Tabulka 6.12: Parametry tvorby textury – IBMR.....	63
Tabulka 6.13: Údaje o zpracování 3D modelu – IBMR	63
Tabulka 6.14: Parametry tvorby TIN – ZEB-REVO	64
Tabulka 6.15: Údaje o zpracování 3D modelu – ZEB-REVO.....	64
Tabulka 7.1: Parametry registrace mračen bodů – CloudCompare	65
Tabulka 7.2: Parametry výpočtu vzdáleností identických bodů – CloudCompare	66
Tabulka 7.3: Zvolené rozměry ve výkresech tvořených z dat všech 5 přístrojů	69
Tabulka 7.4: Celkové porovnání metod – zaměření vnitřních prostorů (1. část)	72
Tabulka 7.5: Celkové porovnání metod – zaměření vnitřních prostorů (2. část)	72
Tabulka 7.6: Celkové porovnání metod – Tvorba 3D modelu	72

Seznam příloh

- 1) 3D_model_snimky_mracno_bodu_las.las
- 2) 3D_model_snimky_mracno_bodu_obj.obj
- 3) 3D_model_snimky_mracno_bodu_ply.ply
- 4) 3D_model_snimky_obj.mtl
- 5) 3D_model_snimky_obj.obj
- 6) 3D_model_snimky_obj.png
- 7) 3D_model_snimky_pdf.pdf
- 8) 3D_model_snimky_ply.ply
- 9) 3D_model_snimky_ply.png
- 10) 3D_model_zeb_revo_mracno_bodu_las.las
- 11) 3D_model_zeb_revo_mracno_bodu_obj.obj
- 12) 3D_model_zeb_revo_mracno_body_ply.ply
- 13) 3D_model_zeb_revo_obj.mtl
- 14) 3D_model_zeb_revo_obj.obj
- 15) 3D_model_zeb_revo_ply.ply
- 16) 3D_model_zeb_revo_puvodni_data.las
- 17) 3D_model_zeb_revo_puvodni_data.ply
- 18) 3D_model_zeb_revo_puvodni_data.txt
- 19) Blk_puvodni_data.pts
- 20) Blk_rez_1.xyz
- 21) Blk_rez_2.xyz
- 22) Blk_rez_3.xyz
- 23) Blk_rez_4.xyz
- 24) Blk_vykres.dgn
- 25) Blk_vykres.dwg
- 26) Blk_zpracovane_mracno.bin
- 27) Blk_zpracovane_mracno.obj
- 28) Blk_zpracovane_mracno.ply
- 29) Blk_zpracovane_mracno.wrp
- 30) Disto_vykres.dgn
- 31) Disto_vykres.dwg
- 32) Leica_puvodni_data.gsi
- 33) Leica_souradnice_XY.txt
- 34) Leica_vykres.dgn
- 35) Leica_vykres.dwg
- 36) Surphaser_puvodni_data_st_1.xyz
- 37) Surphaser_puvodni_data_st_2.xyz
- 38) Surphaser_puvodni_data_st_3.xyz
- 39) Surphaser_puvodni_data_st_4.xyz
- 40) Surphaser_puvodni_data_st_5.xyz
- 41) Surphaser_puvodni_data_st_6.xyz
- 42) Surphaser_puvodni_data_st_7.xyz
- 43) Surphaser_puvodni_data_st_8.xyz
- 44) Surphaser_puvodni_data_st_9.xyz
- 45) Surphaser_puvodni_data_st_10.xyz
- 46) Surphaser_puvodni_data_st_11.xyz
- 47) Surphaser_puvodni_data_st_12.xyz
- 48) Surphaser_puvodni_data_st_13.xyz
- 49) Surphaser_rez_1.xyz
- 50) Surphaser_rez_2.xyz

- 51) Surphaser_rez_3.xyz
- 52) Surphaser_rez_4.xyz
- 53) Surphaser_vykres.dgn
- 54) Surphaser_vykres.dwg
- 55) Surphaser_zpracovane_mracno.bin
- 56) Surphaser_zpracovane_mracno.obj
- 57) Surphaser_zpracovane_mracno.ply
- 58) Surphaser_zpracovane_mracno.wrp
- 59) Zeb_revo_puvodni_data.las
- 60) Zeb_revo_puvodni_data.ply
- 61) Zeb_revo_puvodni_data.txt
- 62) Zeb_revo_rez_1.xyz
- 63) Zeb_revo_rez_2.xyz
- 64) Zeb_revo_rez_3.xyz
- 65) Zeb_revo_rez_4.xyz
- 66) Zeb_revo_rez_5.xyz
- 67) Zeb_revo_vykres.dgn
- 68) Zeb_revo_vykres.dwg
- 69) Zeb_revo_zpracovane_mracno.bin
- 70) Zeb_revo_zpracovane_mracno.obj
- 71) Zeb_revo_zpracovane_mracno.ply
- 72) Zeb_revo_zpracovane_mracno.wrp