

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T007 Průmyslové inženýrství
a management

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Digitalizace prostor univerzitního kampusu s pomocí laserového
skenování

Autor: **Ing. Matěj Kovařík**

Vedoucí práce: **Ing. Marek Bureš, Ph.D.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. Matěj KOVAŘÍK**

Osobní číslo: **S16N0031P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Průmyslové inženýrství a management**

Název tématu: **Digitalizace prostor univerzitního kampusu s pomocí laserového skenování**

Zadávací katedra: **Katedra průmyslového inženýrství a managementu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod do řešené problematiky
2. Popis měřicí techniky
3. Návrh postupu měření
4. Sběr dat a jejich zpracování
5. Závěr

Rozsah grafických prací: 0 výkresů
Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

1. **VOSELMAN, G., MAAS, H-G.** *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Velká Británie: Whittles Publishing, 2010. ISBN 9781904445876
2. **STRAPEK, M.** *Modelování výroby za pomoci metody 3D Laserscanningu*. Plzeň: ZČU, diplomová práce, 2016.
3. **STRAPEK, M., HOŘEJŠÍ, P., POLCAR, J.** *3D Laser Scanned Data Processing Possibilities for Production Floors Models*. **Proceedings of 28th International Business Information Management Association Conference, 2016, s. 2920 - 2930.** ISBN 978-098604198-3
4. **HŮLKOVÁ, M., PAVELKA, K., MATOUŠKOVÁ, E.** *Automatic classification of point clouds for highway documentation*. **Acta Polytechnica, vol. 58, no. 3, 2018, s. 165-170.** DOI:10.14311/AP.2018.58.0165
5. **Leica Geosystems.** <https://leica-geosystems.com>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Bureš, Ph.D.**
Regionální technologický institut
Konzultant diplomové práce: **Ing. Sergo Martirosov**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **24. září 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Michal Šimon, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 24. září 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Marku Burešovi, Ph.D., za odborné vedení a cenné rady, které mi při zpracování diplomové práce poskytl.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kovařík	Jméno Matěj	
STUDIJNÍ OBOR	2301T007 „Průmyslové inženýrství a management“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Bureš, Ph.D.	Jméno Marek	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KPV		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Digitalizace prostor univerzitního kampusu s pomocí laserového skenování		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KPV	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	63	TEXTOVÁ ČÁST	63	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p style="text-align: center;">ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se zabývá digitalizací části univerzitního kampusu s pomocí 3D laserového skenování. Výsledkem této práce je rozsáhlé bodové mračno, které bude možné využít k dalším aplikacím. V práci je uveden způsob měření pomocí laserové technologie, popis měřicí techniky a postup získání a zpracování dat. Dále je analyzován vztah mezi časovou náročností skenování a zvoleným rozlišením skeneru.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">Laserové skenování, 3D, bodové mračno, kampus, Cyclone, Leica Scan Station C5</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kovařík	Name Matěj	
FIELD OF STUDY	2301T007 „Průmyslové inženýrství a management“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Bureš, Ph.D.	Name Marek	
INSTITUTION	ZČU - FST - KPV		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Digitisation of university campus by the laser scanning		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Industrial Engineering and Management	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	63	TEXT PART	63	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis is focused on digitisation of a part of university campus using 3D laser scanning. The result of this thesis is an extensive point cloud which will be used for other applications. In the thesis, a way of laser measuring, a description of measuring equipment and a procedure of acquisition and data processing is described. Further, there is an analysis of the relationship between duration of scanning and selected scanner resolution.
KEY WORDS	Laser scanning, 3D, point cloud, campus, Cyclone, Leica Scan Station C5

Obsah

Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	11
Seznam zkratk.....	12
Úvod.....	13
1 Úvod do řešené problematiky.....	14
1.1 Laserové skenování a jeho využití.....	14
1.1.1 Výrobní průmysl.....	14
1.1.2 Kontrola kvality výroby.....	15
1.1.3 Skenování automobilů.....	15
1.1.4 Stavebnictví.....	16
1.1.5 Geodézie.....	17
1.1.6 Archeologie.....	17
1.2 Princip laserového skenování.....	18
1.2.1 Rozdělení operačních principů skenování.....	19
1.2.2 Rozdělení laserových skenerů.....	20
1.3 Iniciativa Smart Campus ZČU.....	21
1.4 Cíl práce.....	23
2 Popis měřicí techniky.....	24
2.1 Technická specifikace zařízení.....	24
2.2 Instalace skeneru.....	25
2.3 Záznam dat pomocí skeneru.....	28
2.4 Zpracování dat v Cyclone.....	32
2.5 Výsledky pilotního měření.....	38
3 Postup měření.....	42
3.1 Volba skenovacích pozic.....	42
3.2 Vztah časové náročnosti a kvality rozlišení skenování.....	42
4 Chyby při skenování a jejich zpracování.....	46
5 Výsledek digitalizace kampusu.....	50
5.1 Dron.....	50
5.2 Doplnění plánovaného postupu měření.....	50
5.3 Výsledné zobrazení digitalizace kampusu.....	52
5.4 Zobrazení časových požadavků na získání a zpracování dat.....	58
6 Závěr.....	61

Seznam zdrojů..... 62

Seznam obrázků

Obrázek 1-1: Prototyp; [3]	14
Obrázek 1-2: Převod z bodového mračna na CAD model; [4]	15
Obrázek 1-3: Kontrola kvality; [6]	15
Obrázek 1-4: Sken automobilu; [8]	16
Obrázek 1-5: Sken domu; [10]	16
Obrázek 1-6: Skenování ve stavebnictví; [11], [12]	17
Obrázek 1-7: Skenování v archeologii; [15]	18
Obrázek 1-8: Úhlový posun laserového skeneru; [18]	18
Obrázek 1-9: Schéma triangulačního skeneru; [18]	19
Obrázek 1-10: Lokace možných miniprojektů v prostoru univerzitního kampusu; [21]	22
Obrázek 2-1: Fotografie, Leica Scan station C5	24
Obrázek 2-2: Stativ	26
Obrázek 2-3: Hlavní menu	26
Obrázek 2-4: Konfigurační a řídicí menu	27
Obrázek 2-5: Nivelační šrouby	27
Obrázek 2-7: Zvolení projektu	28
Obrázek 2-8: Správa projektů	28
Obrázek 2-6: Grafické zobrazení nivelace	28
Obrázek 2-9: Zadání nového projektu	29
Obrázek 2-10: Správa projektů 2	29
Obrázek 2-11: Nastavení parametrů skenování	30
Obrázek 2-12: Spuštění skenování a fotografování	31
Obrázek 2-13: Průběh skenování a fotografování	31
Obrázek 2-14: Náhled na bodové mračno	31
Obrázek 2-15: Import dat	32
Obrázek 2-16: Zvolení databáze	33
Obrázek 2-17: Vytvoření nové databáze	33
Obrázek 2-18: Import projektu	34
Obrázek 2-19: Nastavení MultiImages	34
Obrázek 2-20: Hierarchie skenů v Cyclone	35
Obrázek 2-21: Ohraničení výřezu	36
Obrázek 2-22: Potvrzení úprav a kopírování do Control Space	36
Obrázek 2-23: Přidání ScanWorld	37

Obrázek 2-24: Spojení ScanWorldů	37
Obrázek 2-25: 2D vizuální zarovnání	38
Obrázek 2-26: Laboratoř UL 312 – vnitřní pohled	38
Obrázek 2-27: Laboratoř UL 312 – vnější pohled	39
Obrázek 2-28: Chodba – vnitřní pohled	39
Obrázek 2-29: Spojovací chodba – vnější pohled	40
Obrázek 2-30: Spojená bodová mračna pilotního měření	40
Obrázek 2-31: Spojená bodová mračna pilotního měření – barevně rozlišeno	41
Obrázek 3-1: Mapa skenovacích pozic	42
Obrázek 3-2: Graf časové náročnosti dle kvality rozlišení	44
Obrázek 4-1: Siluety lidí	46
Obrázek 4-2: Kuřák	47
Obrázek 4-3: Déšť	47
Obrázek 4-4: Stíny překážek	48
Obrázek 4-5: Histogram kvality spojení dvou skenů	49
Obrázek 4-6: Postup přenastavení upraveného mračna	49
Obrázek 5-1: Dron DJI Mavic 2 Pro; [25]	50
Obrázek 5-2: Stíny u rektorátu	51
Obrázek 5-3: Rektorát bez stínů	51
Obrázek 5-4: Vestibul FST	52
Obrázek 5-5: Vnitřní pohled do vestibul – fotografie	52
Obrázek 5-6: Celková registrace v software Cyclone	53
Obrázek 5-7: Celkový pohled – dron	54
Obrázek 5-8: Celkový pohled – Cloud Slicer – bodové mračno	54
Obrázek 5-9: Celkový pohled – bodové mračno	55
Obrázek 5-10: Pohled před Fakultu strojní	55
Obrázek 5-11: Rektorát – fotografie	56
Obrázek 5-12: Rektorát – bodové mračno	56
Obrázek 5-13: Menza – fotografie	57
Obrázek 5-14: Menza – bodové mračno	57
Obrázek 5-15: Fakulta strojní – fotografie	58
Obrázek 5-16: Fakulta strojní – bodové mračno	58
Obrázek 5-17: Graf doby trvání činností na získání a zpracování dat	60

Seznam tabulek

Tabulka 2-1: Hlavní technické parametry Leica Scan Station C5	24
Tabulka 2-2: Technická specifikace	25
Tabulka 3-1: Časová náročnost pro jednotlivé druhy rozlišení	43
Tabulka 3-2: Počet bodů v jednotlivých kvalitách rozlišení skenu	45
Tabulka 5-1: Tabulka časových požadavků na získání a zpracování dat	59

Seznam zkratek

2D – dvojdimenzionální, dvojrozměrný

3D – trojdimenzionální, trojrozměrný

Atd. – a tak dále

CNC – počítačově číslicově řízené

FEL – Fakulta elektrotechnická

FST – Fakulta strojní

IoT – Síť zařízení, která si mezi sebou vyměňují data

IP – internetový protokol

KET – Katedra technologií a měření

LAN – místní síť

RTI – Regionální technologický institut

SSD – zařízení pro ukládání dat

SSID – název bezdrátové sítě

ToF – doba letu

USB – univerzální sériová sběrnice

Wi-Fi – bezdrátová komunikace

WLAN – bezdrátová síť

ZČU – Západočeská univerzita

Úvod

Možnosti laserového měření se během posledních let velmi rychle rozvíjí. V dnešní době je využívání laserového měření a skenování samozřejmostí. S rostoucím trendem všeobecné digitalizace rostou i nároky na přesnost, a proto je v dnešní době 3D laserové skenování vhodným nástrojem v mnoha odvětvích od lékařství až po průmysl.

V této diplomové práci je využito technologie 3D laserového skenování pro digitalizaci části univerzitního kampusu. Cílem práce je vytvoření bodového mračka ze skenované oblasti, které bude možno dále využít. Tím může být například vytvoření modelu k vizualizaci kampusu, rozhodování o stavebních úpravách, navigace autonomního zařízení v prostoru, iniciativa SmartCAMPUS a podobně.

V teoretické části je nejprve představeno využití laserového skenování, dále také princip fungování laserového skenování a stručné rozdělení dle jednotlivých parametrů. Následně je detailněji popsána zvolená měřicí technika a postup práce při získávání a zpracování dat. Závěr teoretické části tvoří pilotní měření, které převádí získané teoretické poznatky do praxe.

Praktická část se nejprve věnuje návrhu postupu měření, který se skládá z mapy skenovacích pozic a analýzy časové náročnosti. Další kapitola se věnuje chybám, které nastaly při skenování. U těchto chyb je přidán popis, jak je odstranit, je-li to možné. Následuje kapitola shrnující výsledky digitalizace. Ta zobrazuje nejen její obrazové výstupy, ale obsahuje také srovnání plánovaného postupu měření s jeho reálným provedením. Dále tato kapitola obsahuje zobrazení časových požadavků na získání a zpracování dat.

1 Úvod do řešení problematiky

V této kapitole budou vymezeny základní pojmy nezbytné k teoretickému porozumění tématice laserového skenování. Bude popsáno praktické využití laserového skeneru, odvětví, ve kterém se využívá nejčastěji, princip fungování a význam jeho využití.

1.1 Laserové skenování a jeho využití

Laserové skenování je relativně novou metodou využívanou pro měření. Tato metoda se během posledních let výrazně vyvíjí, ať už se jedná o přístroje, které se používají na měření, nebo o software, který je nezbytný pro následné zpracování. Obecně pracují 3D skenery na různých principech, spolu s dalšími technické parametry budou zpracovány v další kapitole. [1]

V současné době se společně s vývojem skenovací technologie rozšiřuje také jeho využití. S všeobecnou digitalizací roste i potřeba přesnosti a práce s modelem reality. Proto jsou 3D skenery výborným nástrojem při výrobě prototypů ve strojírenství, archeologii, kriminalistice, lékařství, filmovém a herním průmyslu, atd. [2]

1.1.1 Výrobní průmysl

Výhodou 3D skenerů je jejich přesné a rychlé skenování předmětů, které mají vysoký stupeň složitosti a různé velikosti. Díky tomu jsou využívány v mnoha průmyslových aplikacích. Vytvořený model a technická dokumentace vytvářejí vstupní podklady pro tvorbu prototypu, vylepšení designu, kontrolu kvality, zlepšení ergonomických a užitných vlastností, atd. [3]

Na obrázku 1-1 lze vidět příklad vytvořeného modelu prototypu, který lze vytvořit v relativně krátkém čase. Je možno získat 3D model nejsložitějších tvarů a velikostí. Původní podklady modelu mohou být po čase využity také k další inovaci a vývoji. Jinou výhodou těchto 3D modelů je jejich možná kompatibilita s 3D tiskárnami a CNC stroji. [3]

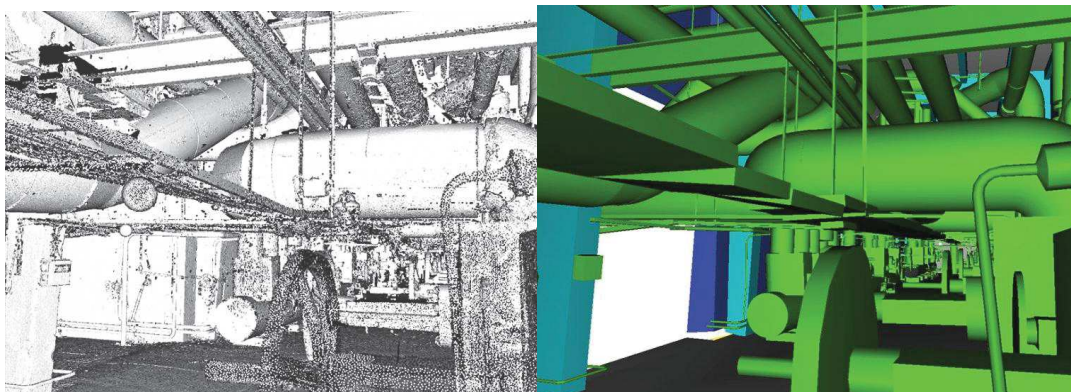


Obrázek 1-1: Prototyp; [3]

Laserové skenování se stalo významným pomocníkem také i v oblasti reverzního inženýrství, které má za cíl podle daného předmětu odhalit jeho fungování. Pomocí 3D skenu lze po vytvoření modelu zhotovit věrnou kopii předmětu. [3]

V průmyslu se také využívá skenování celých technologických celků. Pomocí rozsáhlého projektu je tak možno vytvořit sken obsahující celou halu včetně instalované technologie. Sken je jako přesná kopie reality vstupním souhrnem dat pro projekční činnost

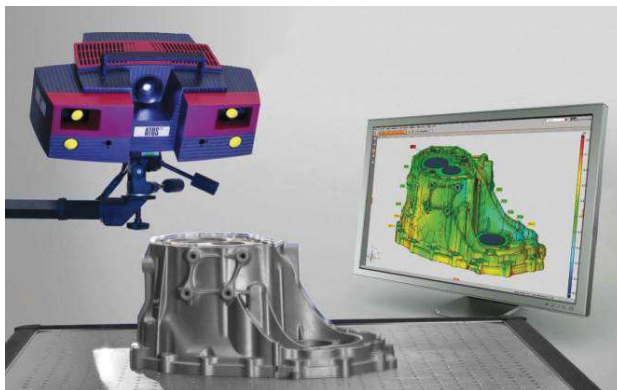
nebo pro tvorbu layoutů. Příklad takového skenu (bodové mračno), který je následně převeden do CAD modelu, je zobrazen na obrázku 1-2. [4]



Obrázek 1-2: Převod z bodového mračna na CAD model; [4]

1.1.2 Kontrola kvality výroby

Vysoký nárůst využití 3D skenování probíhá v kontrole kvality výroby. Podstatným uplatněním 3D skeneru pro kontrolu kvality jsou výrobky složitých tvarů, které nelze změřit běžnými měřidly. Můžou jimi být například výlisky, tvarové vyjiskřovací elektrody, atd. Po naskenování výrobku je sken převeden na CAD model a porovnán s CAD modelem, který vytvořil konstruktér. Jednotlivé odchylky mohou být vizualizovány pomocí barevné škály způsobem, který je patrný na obrázku 1-3. [5]

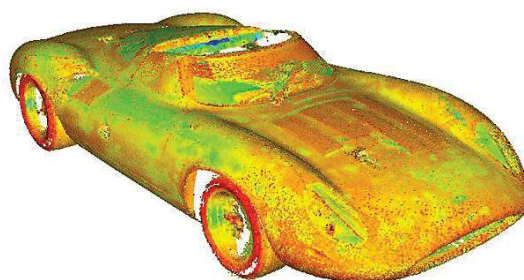


Obrázek 1-3: Kontrola kvality; [6]

Jelikož vyráběný objekt nebude nikdy zcela identický s návrhem, je nezbytné pro jeho kontrolu správně určit jednotlivé odchylky, na jejichž základě bude na skenu zobrazeno výsledné hodnocení. V závislosti na velikosti odchylky je nutno určit úroveň detailu skenování – počet bodů – tak, aby byly zachyceny i lokální nedokonalosti povrchu a tvaru. [5], [7]

1.1.3 Skenování automobilů

U skenování automobilů dochází ve spojitosti s předchozí kapitolou v poslední době k výraznému nárůstu využití 3D skenování k analýze a kontrole takzvaných tornádo linií. Jsou to ostré linie na karoserii automobilu, které jsou charakteristické pro jednotlivé vozy.



Obrázek 1-4: Sken automobilu; [8]

Obecně lze skenování automobilů rozdělit do několika skupin podle potřeb využití:

- skenování jednotlivých dílů,
- skenování celku,
- konkurenční skenování.

Skenování jednotlivých dílů je využíváno především pro výrobu neoriginálních náhradních dílů. Takový sken zaručuje přesné podklady pro výrobu kopie. U výrobku je zaručena přesnost jednotlivých linek, uložení a dalších prvků.

Další možností je skenování celku, které může být využito například pro výrobu zmenšených a naprosto přesných modelů.

Posledním typem je skenování konkurenční. Je využíváno především mezi jednotlivými výrobci automobilů. Díky skenům celého vozidla může být zpracována analýza tvarů, interiéru, ergonomie, ovládacích prvků, spár mezi jednotlivými díly karoserie a interiérových dílů a další. Detailní analýzou jednotlivých prvků konkurenčních vozů přispívají firmy vyrábějící automobilky k inovaci a rozvoji svých vozů.

1.1.4 Stavebnictví

Dalším odvětvím, v němž se ve velké míře využívá 3D skenování, je stavebnictví. Pro současné potřeby jsou 2D modely již nedostačující. Laserové skenování poskytuje vhodné podklady pro tvorbu modelů k projektové dokumentaci, ale i k modelování a navrhování interiéru. Příklad naskenované budovy je na obrázku 1-5. [9]



Obrázek 1-5: Sken domu; [10]

Další oblast stavebnictví, kde nachází skenování své uplatnění, je například skenování podzemních štol, kanalizací, tunelů, mostů, atd. Na inženýrské sítě jsou kladeny vysoké nároky na přesnost a kvalitu provedení. Jelikož dochovaná dokumentace často nesplňuje požadavky pro současnou úroveň plánování, bývají tyto sítě často skenovány a tím i přesně zdokumentovány. Příklady výstupů laserového skenování jsou uvedeny níže na obrázku 1-6. [1], [9]



Obrázek 1-6: Skenování ve stavebnictví; [11], [12]

1.1.5 Geodézie

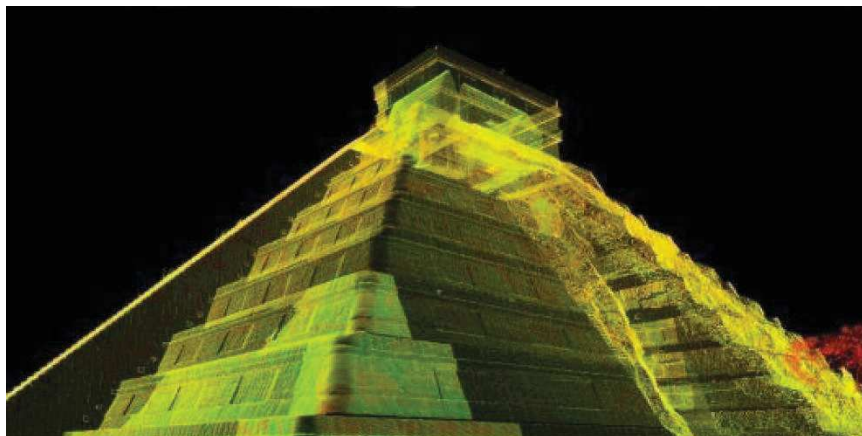
Topografické profilování a skenovací systémy se staly předmětem významného rozvoje za poslední roky. Nepochybně se staly nejdůležitějšími geoprostorovými technologiemi (technologie pro stanovení souřadnic polohy) pro získávání dat, které byly zavedeny po roce 2000. Na rozdíl od klasické geodézie se liší neselektivním sběrem dat – nejsou zaměřeny vybrané body, ale sbírá se velké množství bodů (až statisíce za sekundu) automaticky a ve stanoveném prostorovém rozsahu.

Při použití těchto skenovacích systémů na letadlech lze získat 3D data ve velkých objemech s velmi vysokou přesností. Složitost požadovaného zpracování měřených dat je poměrně nízká, což nadále vede k rychlému nárůstu využití této technologie k nejrůznějším účelům. Ačkoliv vynalezení laseru se datuje k počátku 60. let minulého století, nedostatek podporujících technologií zamezil využití tohoto přístroje na několik dalších dekád. Zavedení georeferenční¹ technologie v polovině 90. let 20. století a obecný rozvoj výpočetní techniky byly klíčem k technologiím, které dále rozvíjely využití laserového profilování a skenování v topografickém mapování. [13]

1.1.6 Archeologie

V archeologii se uplatňuje výhoda 3D skeneru, který je šetrný k velmi vzácným nálezům a dokáže snadno vytvořit jejich 3D model bez nutnosti hýbat s objektem nebo umisťovat tzv. markery. Při restaurátorské činnosti se uplatňuje možnost doplnění chybějících částí soch, štukové výzdoby, atd., pomocí dotvoření původního stavu v modelu. [14]

¹ Možnost měření přímo určených souřadnic bodu bez nutnosti následného výpočtu souřadnic.

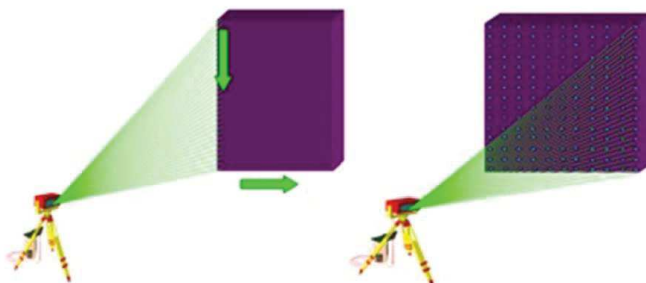


Obrázek 1-7: Skenování v archeologii; [15]

1.2 Princip laserového skenování

Laserové skenování je proces snímání digitálních informací o tvaru objektu pomocí zařízení, které používá laser nebo světlo pro měření vzdálenosti mezi skenerem a objektem. Laserové skenování je také známo jako 3D zobrazování, 3D skenování anebo laserová digitalizace. 3D skenování dokáže zachytit data o velmi malých objektech až po plné velikosti letadel a budov. [16], [17]

Jak již bylo popsáno, laserové skenování je neselektivní. Na začátku každého skenování je určen posun horizontálního a vertikálního úhlu a tím je získána matice bodů, viz obrázek 1-8.



Obrázek 1-8: Úhlový posun laserového skeneru; [18]

Každý bod má informaci o vodorovném úhlu, svislém úhlu a vzdálenosti. Tyto body jsou uloženy v seznamu měřených polárních souřadnic nebo kartézských souřadnic XYZ (vypočteny ke středu skeneru). Tyto body lze vizualizovat jako 2D obrázek, ale častěji se pro snazší představivost prezentují jako bodové mračno.

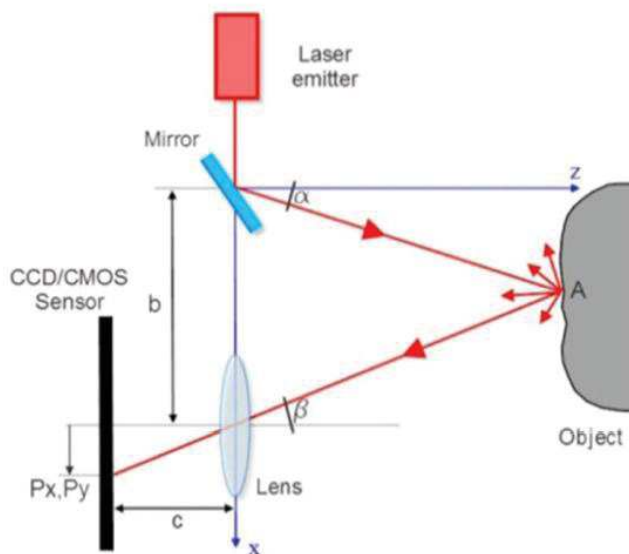
Získaný obraz povrchu ve 3D jediným laserovým paprskem vyžaduje mechanismus pro přesun laserového paprsku na objekt, jednotku pro zachycení laserového paprsku od objektu a také jednotku pro posun laserové stopy kolem osy zařízení. Existuje několik možností, jak zajistit tyto funkce laserového skeneru. Rozdělení skenerů je zpracováno v následujících kapitolách. [18]

1.2.1 Rozdělení operačních principů skenování

- **Princip triangulačního skeneru**

Triangulační skenery vycházejí ze znalosti pro výpočet souřadnic trojúhelníku. Při měření prováděném triangulačním skenerem jsou základní linie a dva úhly známy, a tak je souřadnice určena dle Kosinova zákona. [17]

Laserový paprsek je vysílán z jedné strany pod známým úhlem α . CCD nebo CMOS snímač umístěný na druhém konci dráhy laserového paprsku rozpozná úhel β . Viz obrázek 1-9.



Obrázek 1-9: Schéma triangulačního skeneru; [18]

Triangulační skenery jsou limitovány svou přesností, která klesá s rostoucí vzdáleností skeneru a skenovaného objektu. Jejich dosah je v řádu několika metrů. Chybovost závisí na typu snímače, algoritmu detekce špiček a poměru šumu a přesnosti použité kamery. [18]

- **ToF skenery**

Označení ToF vychází z anglicky vyjádřeného principu – „Time-of-flight“ (doba letu). ToF skenery lze rozdělit na dva druhy podle metod, které využívají při měření. První z nich je **pulzní metoda**, jež je starší, ale velmi často využívána, druhá je **metoda fázového srovnávání**. Ta je sice rychlejší, ale skenuje v kratším rozsahu.

Pulzní metoda je založena na vytváření krátkých laserových pulzů a měření doby, kdy se laserový pulz vrátí zpět do přijímače. Jelikož se světlo šíří konstantně, může skener dopočítat vzdálenost dle doby letu. [18]

Vzdálenost je určena dle vzorce:

$$\rho = \frac{C \times \tau}{\eta \times 2}$$

ρ ...vzdálenost od zdroje k měřenému objektu

c ...rychlost světla (299 792 458 m/s ve vakuu)

τ ...doba letu

η ...korekční faktor ($n = 1.00025$ pro vzduch, $n = 1$ pro vakuum) [18]

Detekce pulzní metody se dosahuje pomocí různých metod. Pro představu budou uvedeny tři nejpoužívanější:

Detekce špiček

Detektor generuje spoušťový pulz v maximu amplitudy ozvěny – měření časového intervalu od maxima vytvořeného pulzu k maximální ozvěně.

Problémy mohou nastat, pokud ozvěna poskytuje více než jeden vrchol.

Detekce prahu nebo náběžné hrany

Pokud ozvěna překročí předem definovanou mez, aktivuje se spoušťecí impuls.

Nevýhodou této metody je, že naměřená doba je silně závislá na ozvěně amplitudy.

Detekce konstantních frakcí

Spoušťecí impuls se vytvoří v okamžiku, když ozvěna dosáhne přednastavené frakce (obvykle 50 %) maximální amplitudy. Takto měřený čas letu je relativně nezávislý na amplitudě ozvěny.

- **Fázové srovnávací skenery**

Fázové srovnávací skenery jsou založené na principu fázového porovnání vlny světla. V porovnání s pulzními skenery vyzařují fázové skenery souvislý paprsek. Na základě známého tvaru vlny světla jsou generovány a shromážděny signály. Časová prodleva je následně vypočítána z fázového rozdílu. Výsledek je velmi přesný. [18]

Mohou být použity různé druhy modulace:

- amplitudová modulace,
- frekvenční modulace,
- pseudo-šumové sekvence. [18]

1.2.2 Rozdělení laserových skenerů

Je známo mnoho různých možností, jak rozdělit laserové skenery podle principu měření, přesnosti, rychlosti měření, laserové třídy, atd.

Dvě hlavní skupiny skenerů, které rozlišujeme dle způsobu použití, jsou pozemní a vzdušné skenery. Pozemní skenery lze dále rozdělit na mobilní a statické skenery.

Z důvodu možné rozsáhlosti úplného rozdělení skenerů budou uvedeny skenery, které jsou statické, pozemní a laserové. [18]

Již v předchozí kapitole při popisu principu fungování laserového skenování bylo představeno jedno rozdělení, které lze zařadit také mezi základní. Je jím rozdělení dle principu činnosti – triangulace a ToF (doba letu).

1) Rychlost získávání bodů

- Systémy s nízkou rychlostí (méně než 50 000 bodů/s).
- Systémy středních rychlostí (od 50 000 do 200 000 bodů/s).
- Vysokorychlostní systémy (od 200 000 do 1 000 000 bodů/s).
- Systémy s velmi vysokou rychlostí (více než 1 000 000 bodů/s).

2) Přesnost

Přesnost skeneru je velmi ovlivněna vzdáleností mezi skenovaným objektem a skenerem, dále také úhlem skenování a typem povrchu skenovaného objektu. Výrobce laserového skeneru proto informuje o podmínkách, při kterých jsou definovány hodnoty skeneru. [18]

- Velmi přesné systémy (od 0,01 do 1 mm) – triangulační skenery pro krátkou vzdálenost.
- Přesné systémy (od 0,5 do 2 mm) – triangulační skenery určené pro delší vzdálenosti a fázové srovnávací skenery.
- Středně přesné systémy (od 2 do 6 mm) – ToF skenery pro střední vzdálenosti.
- Systémy s nízkou přesností (od 10 do 100 mm) – ToF skenery pro dlouhé vzdálenosti.

(4) Třída laserových zařízení

Skupiny laserových tříd upravuje ISO 11553 standard a v České republice ČSN EN 60825-1. Používané třídy při laserovém skenování:

- Třída II. – Oko je dostatečně chráněno mrkacím reflexem.
- Třída III.A – Při pohledu do laseru může dojít k poškození oka pouze přes jiný optický systém (brýle, dalekohled, lupa, atd.)
- Třída III.R – Potenciálně nebezpečný pro oči.

(5) Rozsah

- Systémy s velmi krátkým dosahem (od 0,1 do 2 m).
- Systémy krátkého dosahu (od 2 do 10 m).
- Systémy středního dosahu (od 10 do 100 m).
- Systémy s dlouhým dosahem (více než 100 m). [19], [17]

Současný rychlý vývoj technologií předčil tato rozdělení. Současné laserové skenery často vůbec neobsadí některé skupiny, nebo naopak dle svých technologických parametrů potřebují spíše nové skupiny, jako například ultrarychlé skenování. [19]

1.3 Iniciativa Smart Campus ZČU

SmartCAMPUS je v současné době iniciativa celé Západočeské univerzity, do které se již zapojila většina fakult v čele s technicky zaměřenými. Ideou projektu je poskytnout univerzitní kampus jako zmenšený model města, živou laboratoř (living testbed), umož-

ňující testování nejmodernějších Smart a IoT technologií ve zmenšeném měřítku pro důkladné odzkoušení „předpilotního“ provozu a následně pro finální nasazení do větších celků, jako jsou města, kraje, apod. Z hlediska moderních komunikačních sítí je univerzitní kampus pokryt vlastní sítí LoRaWAN a dále využívá pokrytí komerční sítí Sigfox. [20]

Na obrázku 1-10 jsou demonstrovány různé miniprojekty, které lze realizovat v budoucnu v rámci projektu Smart Campus. Jedná se například o:

- 1) Chytré parkování 1
 - 2) Chytré parkování 2
 - 3) Menza
 - 4) Bibliobox
 - 5) Koloběžky
 - 6) Chytré lavičky
 - 7) Posluchárny
 - 8) Kavárna
 - 9) Informační panel
 - 10) Chytrý koš
 - 11) Meteostanice
 - 12) Sportoviště
 - 13) Sportovní hala
 - 14) Nabíjecí stanice na elektromobily
 - 15) Nabíjecí kiosek
 - 16) LoRaWAN gateway
- atd.



Obrázek 1-10: Lokace možných miniprojektů v prostoru univerzitního kampusu; [21]

Univerzitní kampus se tedy pomalu stává místem pro testování progresivních technologií. Na projektu mohou participovat externí firmy, které si zde mohou otestovat své technologie, i studenti a výzkumníci při provádění studentských prací. Myšlenka projektu vznikla poprvé v roce 2015 na FEL/KET. Přes vznik pracovní skupiny SmartCity na FEL v roce 2016 byla následně v roce 2017 zformována celouniverzitní aktivita.

V současné době je v projektu SmartCAMPUS šest aktivních, různě zaměřených pracovních skupin:

- ICT infrastruktura a sensorika,
- Chytré parkování,
- Mapování a navigace,
- OpenData a standardy,
- Energetika a úspory,
- Marketing a komunikace.

Tato práce je řešena v rámci pracovní skupiny Mapování a navigace.

1.4 Cíl práce

Hlavním cílem práce je vytvoření digitálního modelu části univerzitního kampusu na Borských polích ve formě bodového mračka s pomocí 3D laserového skenování. Získané bodové mračno bude v budoucnu možno použít pro různé aplikace. Jednou z možností je následná tvorba 3D modelu pro vizualizaci prostorů kampusu pro návštěvy či nové studenty. Laserové skenování umožní také vytvoření velmi přesných podkladů pro rozhodování o stavebních úpravách, instalaci nových technologií, nebo pro navigaci autonomních zařízení v prostoru. Přesnost modelu bude v řádu milimetrů. V první fázi bude skenován koridor od tělocvičny (pouze vchod), celá menza, celý rektorát, FEL hlavní vchod s částí parkoviště, alej ke vchodu FST a zadní část FEL až k RTI. Následně dojde ke zpracování dat a podle časové náročnosti prací a komplexnosti modelu bude rozhodnuto o případném doskenování dalších prostranství.

2 Popis měřicí techniky

V této kapitole bude zpracován popis technické specifikace zařízení, které bude použito k měření. Dále budou rámcově vysvětleny kroky, které jsou důležité ke správné instalaci skeneru a nastavení skenu před skenováním. V poslední části kapitoly bude představen postup práce při očišťování bodových mračen a spojování očištěných skenů pomocí softwaru Cyclon od společnosti Leica.

2.1 Technická specifikace zařízení

Pro laserové měření byl vybrán skener Leica Scan Station C5. Jeho základní technické parametry představuje tabulka 2-1, 2-2 a vizuální podobu fotografie 2-1.



Obrázek 2-1: Fotografie, Leica Scan station C5

Tabulka 2-1: Hlavní technické parametry Leica Scan Station C5

Hlavní technické parametry	
Označení přístroje	Leica Scan Station C5
Typ přístroje	Kompaktní, pulzní, vysokorychlostní laserový snímač
Uživatelské rozhraní	Ovládání na zařízení, PC, dálkový ovladač
Ukládání dat	Integrovaná jednotka SSD, externě: PC, USB
Kamera	Automatické přizpůsobení expozice, vysoké rozlišení

Zdroj: [22]

Tabulka 2-2: Technická specifikace

Technická specifikace	
Třída laseru	3.
Rozlišení skenování: Bodová velikost	Od 0 do 50 m: 4,5 mm (na bázi FWHH); 7 mm (na bázi Gauss)
Rozteč bodů	Plně volitelný vodorovný a svislý; < min. 1 mm
Zorné pole: Horizontální Vertikální Zaměření/pozorování	360 ° (maximum) 270 ° (maximum) Bez paralaxu, integrované zoom video
Skenovací optika	Vertikálně rotující zrcadlo na vodorovně rotujícím podstavci; Smart X-Mirror™ se automaticky otáčí nebo osciluje
Kapacita pro ukládání dat	80 GB pevného disku (SSD) nebo externího USB
Komunikace	Dynamická IP adresa, Ethernet nebo bezdrátová síť LAN (WLAN) s externím adaptérem
Displej	Dotyková obrazovka se stylusem, plnobarevnou grafikou

Zdroj: [22]

2.2 Instalace skeneru

Před začátkem skenování je nutno v první řadě připravit stativ, na který bude skener následně upevněn. Stativ (tripod) se skládá ze tří nohou, které jsou výškově nastavitelné (pro vyrovnání výškových rozdílů mezi nohami) a hlavy s pojistným šroubem. U povrchů s pevným podkladem, na nichž by hroty stojanu držely nedostatečně, lze využít hliníkový podstavec. Po zabezpečení stativu proti pohybu lze nasadit skener na hlavu stativu a zajistit ho pojistným šroubem zespodu.



Obrázek 2-2: Stativ

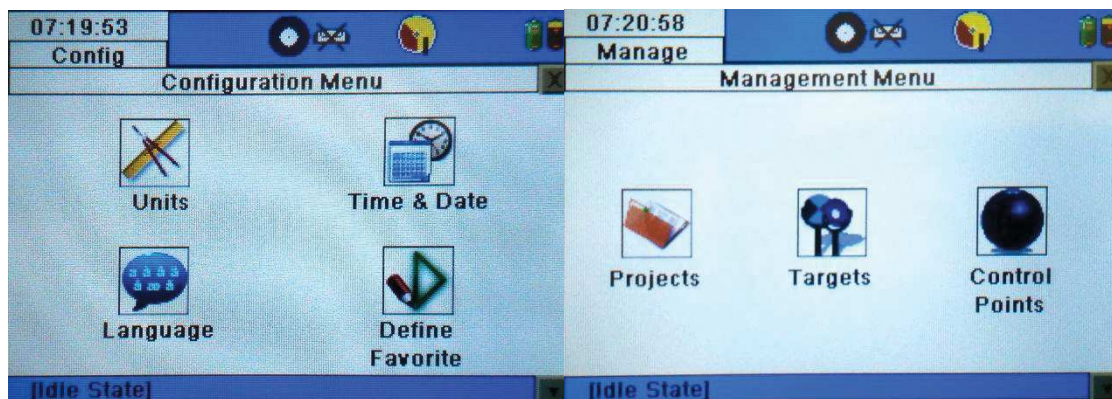
Následně musí být ze skeneru sejmuto horní madlo, které by překázelo skenování, a ochranný kufr skeneru musí být umístěn mimo skenovanou oblast (např. pod stativ).

Po zapnutí přístroje a naběhnutí operačního systému se automaticky spustí program od společnosti Leica. Hlavní menu je zobrazeno na obrázku 2-3.



Obrázek 2-3: Hlavní menu

V hlavním menu lze mimo skenování nastavit či provést správu informací, jako například správa projektů, cílů a kontrolních bodů pod položkou „Manage“, a nastavení jednotek, času a data, jazyka a oblíbeného nastavení pod položkou „Config“. Viz obrázek 2-4.



Obrázek 2-4: Konfigurační a řídicí menu

Před skenováním je nezbytné nastavit nebo překontrolovat v hlavním menu programu následující body:

- 1) stav baterií,
- 2) stav interní paměti skeneru,
- 3) nivelace.

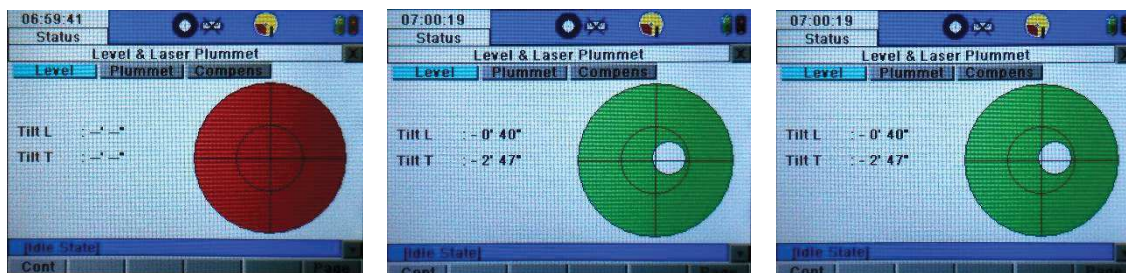
Všechny tyto body se nacházejí v horní liště okna (viz obrázek 2-3) a lze je otevřít pro detailní informace, jak bude dále uvedeno na příkladu nivelace. Baterie i velikost interní paměti jsou pro pokračování dostačující.

Pro nivelaci jsou ve spodní části skeneru tři niveláčnické šrouby s velmi jemným závitem, viz obrázek 2-5.



Obrázek 2-5: Niveláčnické šrouby

Jejich pootáčením zajistíme rovinu potřebnou ke skenování. K nalezení správné polohy slouží zobrazení přímo v programu skeneru. Postup vyrovnání zobrazený na displeji skeneru zobrazuje následující obrázek 2-6.

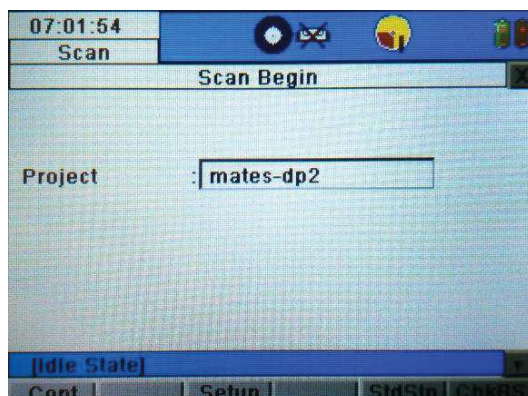


Obrázek 2-6: Grafické zobrazení nivelace

Těmito kroky je hlavní průvodní nastavení hotové a je možné přistoupit k nastavení skenu, které bude popsáno v další kapitole.

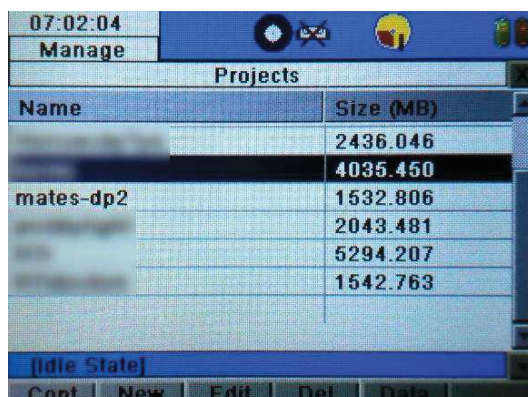
2.3 Záznam dat pomocí skeneru

V předchozí kapitole bylo popsáno sestavení a nastavení skeneru. Nyní lze přistoupit ke konkrétním možnostem při volbě nastavení a spuštění skenování. Nastavení jednotlivých parametrů skenu začíná v hlavním menu (viz obrázek č. 13), kde po zvolení tlačítka „Scan“ získáme nabídku s možností pokračovat v předchozím projektu, jak vidno na obrázku 2-7.



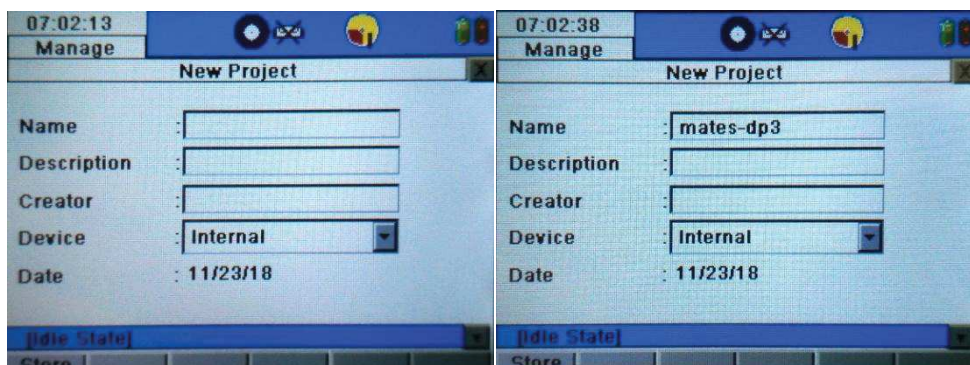
Obrázek 2-7: Zvolení projektu

V tomto kroku by se pokračovalo v předchozím projektu stisknutím „Cont“. Vytvoření skenu v novém projektu se provede stisknutím „Setup“. Tím se zobrazí správa projektů s nabídkou uložených projektů v interní paměti, jak je vidět na obrázku 2-8.



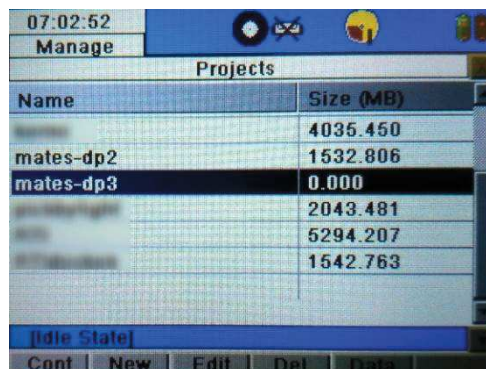
Obrázek 2-8: Správa projektů

Na obrazovce s projekty se založí nový projekt stisknutím „New“, které vyvolá nabídku zadání nového projektu. Viz obrázek 2-9.



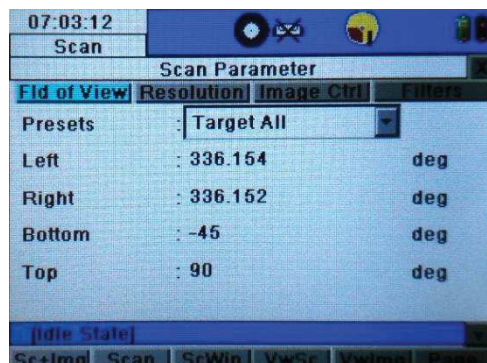
Obrázek 2-9: Zadání nového projektu

V novém projektu byl vyplněn název „mates-dp3“, dále je možno vyplnit popis a autora projektu. To však není nezbytně nutné a pro potřeby popisu postupu nebudou vyplněny. Následuje možnost výběru úložiště (zde bude využito interní) a datum založení projektu, které se nastaví automaticky. Potvrzení se provede stisknutím „Store“, to vrátí postup nastavení do správy projektů, ve kterém si již můžeme zvolit nový projekt s názvem „mates-dp3“, jak je vidět na obrázku 2-10.



Obrázek 2-10: Správa projektů 2

Projekt potvrdíme stisknutím „Cont“, což umožní zpřístupnění nastavení parametrů skenování. Viz obrázek 2-12.



Obrázek 2-11: Nastavení parametrů skenování

Nastavení parametrů skenování lze rozdělit do čtyř částí dle záložek na obrázku 2-11.

- Rozsah skenování (Fld of View)

V rozsahu skenování jsou přednastavené možnosti, které lze zvolit. Jsou to:

- Vlastní nastavení (Custom view)
- Rychlý sken (Quick Scan)
- Čtverec 60×60 (Rectang 60×60)
- Čtverec 90×90 (Rectang 90×90)
- Panoramatické skenování 360×60 (Panoram 360×60)
- Panoramatické skenování 360×90 (Panoram 360×90)
- Plný rozsah (Target All)
- Rozlišení (Resolution)

V záložce Rozlišení lze nastavit tyto hodnoty:

- Vlastní
- Nízké (3141×1178 bodů)
- Střední (6282×2356 bodů)
- Vysoké (12565×4712 bodů)
- Nejvyšší (31414×11780 bodů)
- Nastavení fotografií (Image Ctrl)

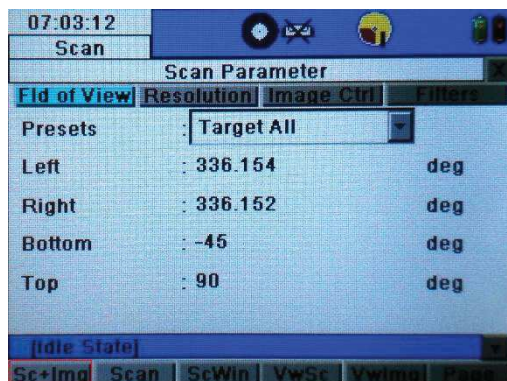
Záložka Nastavení fotografií umožňuje nastavení vlastností fotografií, které jsou kamerou pořízeny po skenování, a to v případě, že jsou požadovány. Tyto fotografie se ukládají společně se skenem do zvoleného projektu. Mohou být dobrým vodítkem při následné práci se skeny k orientaci ve skenovaném prostoru. Nastavení fotografií umožňuje tyto volby:

- Expozice (možnost automatického vyhodnocení)
- Čas
- Formát obrázku (nastaveno bez komprese – formát RAW)
- Rozlišení (čtverce o velikostech 1920, 960 a 640 pixelů)

- Filtry (Filters)

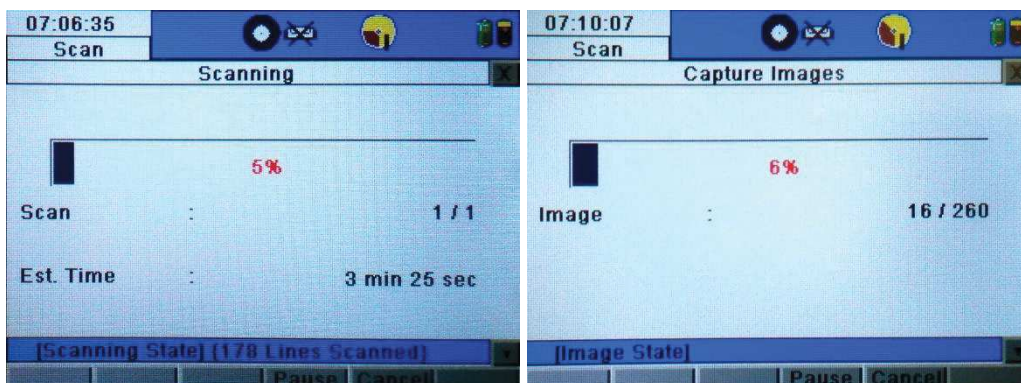
Filtr umožňuje nastavení filtru rozsahu fotografování.

Po kontrole a nastavení všech hodnot potřebných k vytvoření skenu a fotografií lze stisknout „Sc + Img“, který spustí skenování s následnou tvorbou fotografií prostoru. Viz fotografie 2-12.



Obrázek 2-12: Spuštění skenování a fotografování

Následuje proces skenování a fotografování. Obrázek 2-13 zobrazuje průběh činností. Jejich délka je závislá na parametrech, které byly nastaveny (rozlišení, rozsah, atd.).



Obrázek 2-13: Průběh skenování a fotografování

Po dokončení skenování a fotografování stanoveného rozsahu prostoru se na displeji skeneru objeví náhled bodového mračna ke kontrole. Viz obrázek 2-15.



Obrázek 2-14: Náhled na bodové mračno

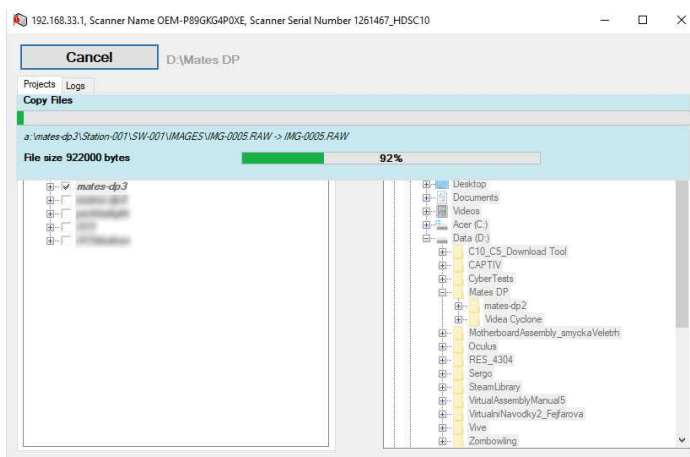
Zde jsou možné základní práce s bodovým mračnem a fotografiemi s využitím ikon symbolizujících svou funkci. Náhled se po stisknutí ikony „×“ v pravém horním rohu zavře a zobrazí se Nastavení parametrů skenu (viz obrázek 2-11), kde je zachováno nastavení předchozího skenování. Pro další skenování z jiné pozice se stejným nastavením tak stačí pouze přemístit skener, vybrat nové označení pro skenovací pozici a opět

stisknout tlačítko pro zahájení skenování. Všechny skeny se uloží do stejného projektu a budou postupně číslovány.

2.4 Zpracování dat v Cyclone

V předchozích kapitolách byl zpracován postup od přípravy skeneru až po jeho nastavení hodnot. V této kapitole bude vysvětlen postup importování skenů ze skeneru do počítače, očištění bodových mračen a spojení skenů. Import dat ze skeneru do počítače bude probíhat pomocí Wi-Fi připojení.

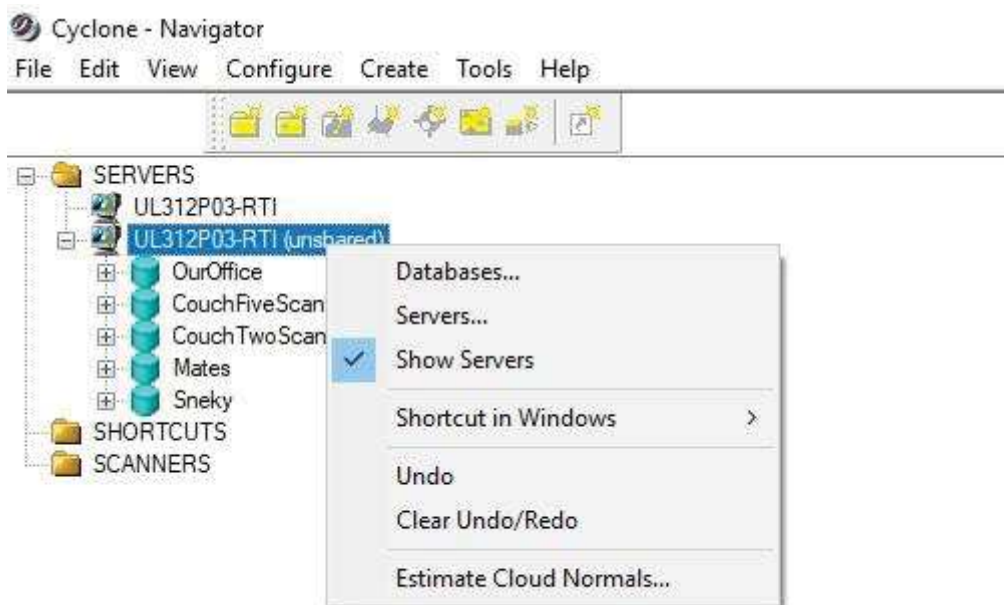
Do USB konektoru ve skeneru je umístěn USB Wi-Fi adaptér, jehož vysílané SSID se zobrazí v počítači v seznamu dostupných bezdrátových sítí. Poté se ke komunikaci mezi počítačem a skenerem využije aplikace C10DataCopy, jejíž prostředí lze vidět na obrázku 2-15. V tomto okně je zvolen projekt (na levé straně), který chceme zkopírovat do paměti počítače, a adresář, v němž bude projekt umístěn v počítači (na pravé straně).



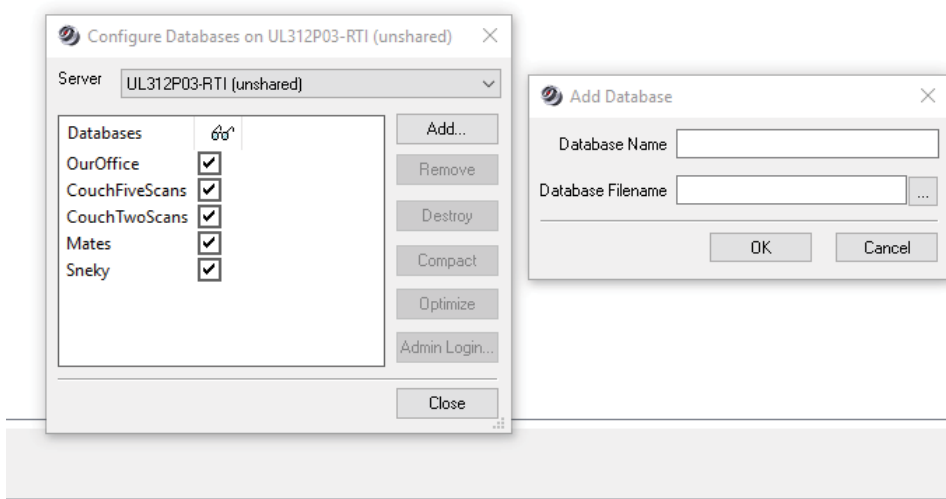
Obrázek 2-15: Import dat

Po úspěšném importu dat skenů do počítače lze spustit program Leica Cyclone, ve kterém lze dále pracovat se skeny.

V Cyclone je v první řadě potřeba založit databázi. Tu lze založit na zvoleném počítači (server), v nabídce vyvolané levým tlačítkem myši. Následně je přidána nová databáze a zvolen její název. Viz obrázek 2-16 a 2-17.

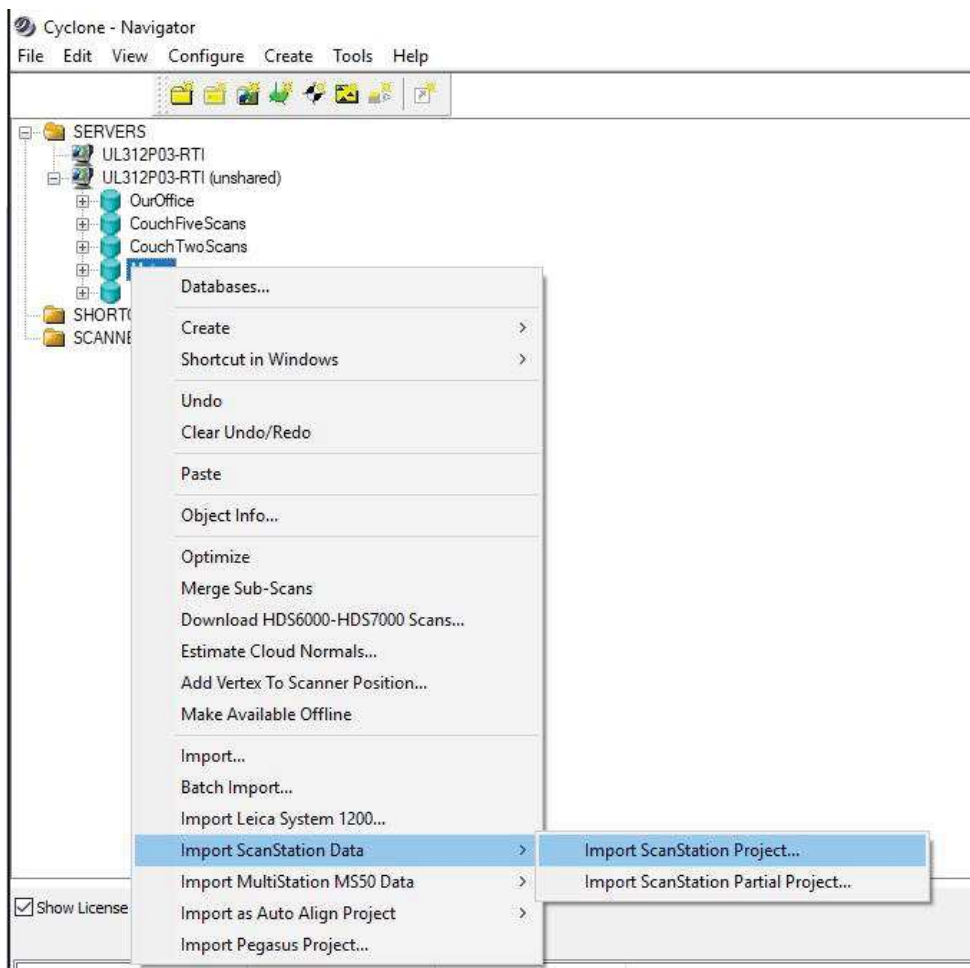


Obrázek 2-16: Zvolení databáze



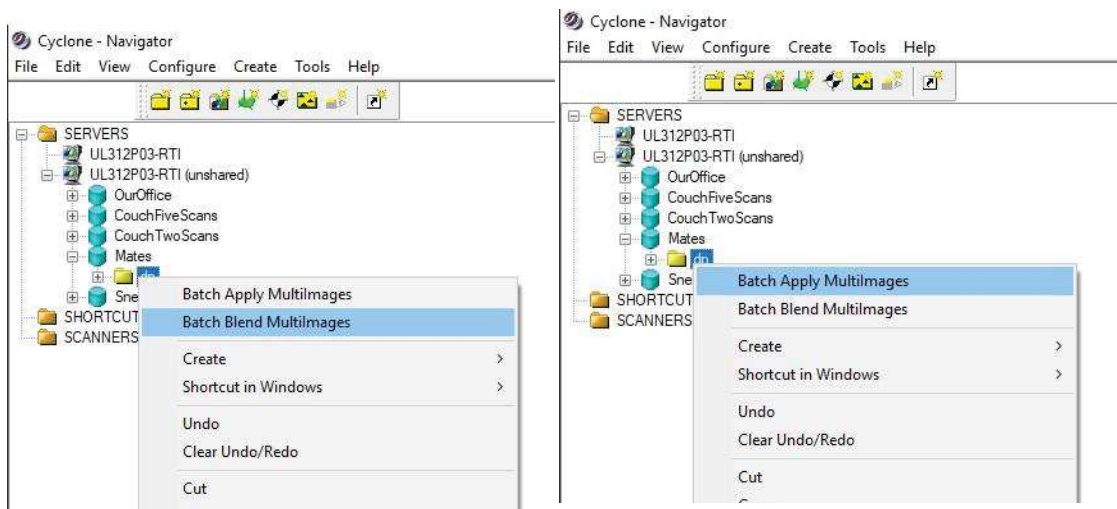
Obrázek 2-17: Vytvoření nové databáze

V dalším kroku jsou přidány do založené databáze skeny, jejichž import byl popsán výše. Import do Cyclone opět proveden levým tlačítkem myši a výběrem z nabídky – Import ScanStation Data a možnost Import ScanStation Project, jak zobrazuje následující obrázek 2-18.



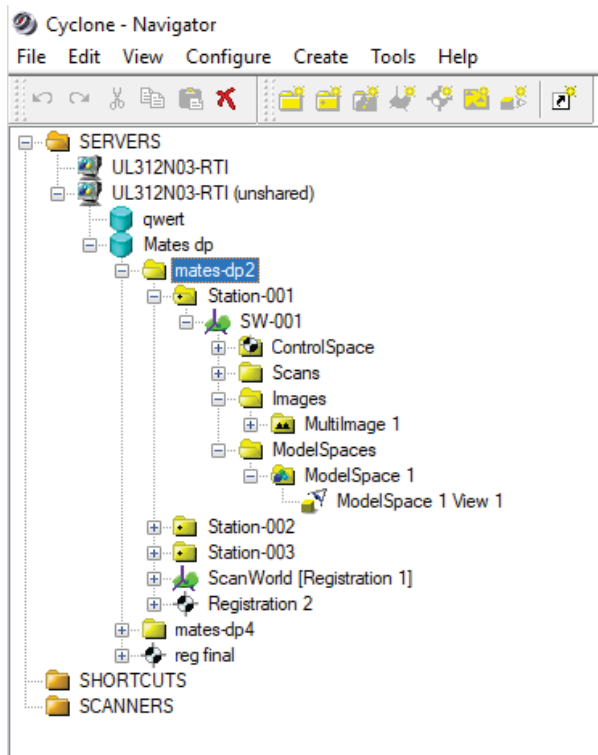
Obrázek 2-18: Import projektu

V případě, že je plánováno obarvit bodové mračno pomocí pořízených fotografií, je nezbytné po importu provést volbu Batch Blend MultiImages (odstraňuje šestiúhelníkové tvary z pořízeného skenu) a následně Batch Apply MultiImages (přenesou barvy z fotografií na bodové mračno). Tak, jak je vidět na obrázku 2-19.



Obrázek 2-19: Nastavení MultiImages

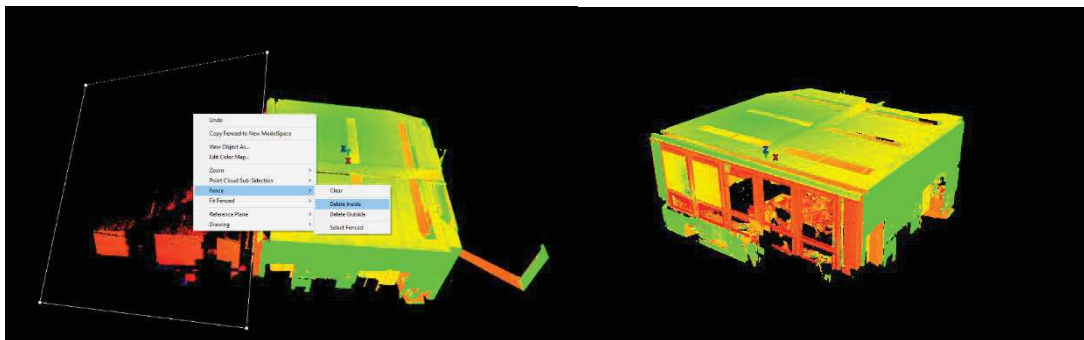
Na obrázku 2-20 lze vidět hierarchii zobrazení jednotlivých projektů a skenů z jednotlivých pozic (Station-00x). Každá ze skenovaných pozic obsahuje SW (Scan World), který se skládá z Control Space², obrázky ze skenovaného prostředí (pokud bylo při nastavování parametrů skenu požadováno vytvoření fotografií) a Model Space, který slouží k úpravě bodových mračen skenu.



Obrázek 2-20: Hierarchie skenů v Cyclone

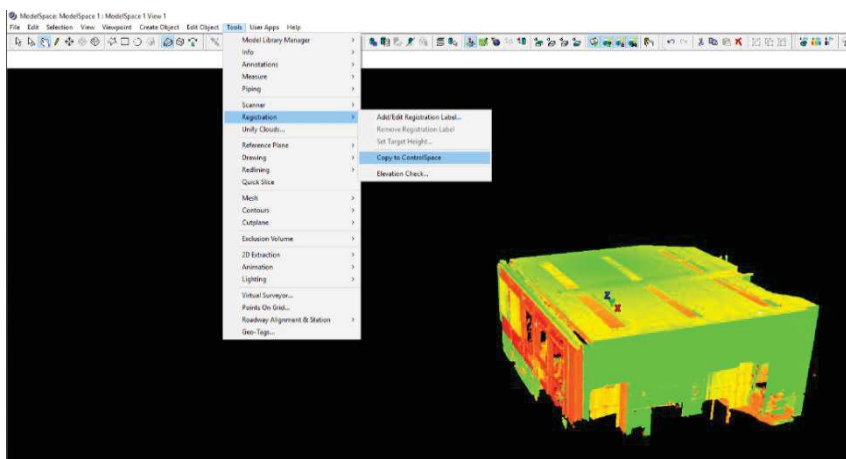
Téměř každé bodové mračno je nezbytné před dalším využíváním podrobně zkontrolovat a případně očistit od ruchů, které mohou nastat při skenování. Jsou jimi například prostoupení laserového paprsku oknem, pohyb osob či objektů v průběhu skenování, prostor pod skenerem, atd. Úprava bodového mračna bude provedena v Model Space, v němž se nejčastěji využívá funkce Fence. Příklad očištění bodového mračna je zobrazen na obrázku 2-21, kde je zobrazen model před očištěním a po něm. Na tomto obrázku jsou očištěny ruchy vzniklé průchodem laserového paprsku oknem a otevřenými dveřmi.

² Control Space je funkce k zobrazení upraveného skenu z Model Space. Pouze po přenesení skenu do Control Space lze vytvořit registraci a spojovat skeny.



Obrázek 2-21: Ohraničení výřezu

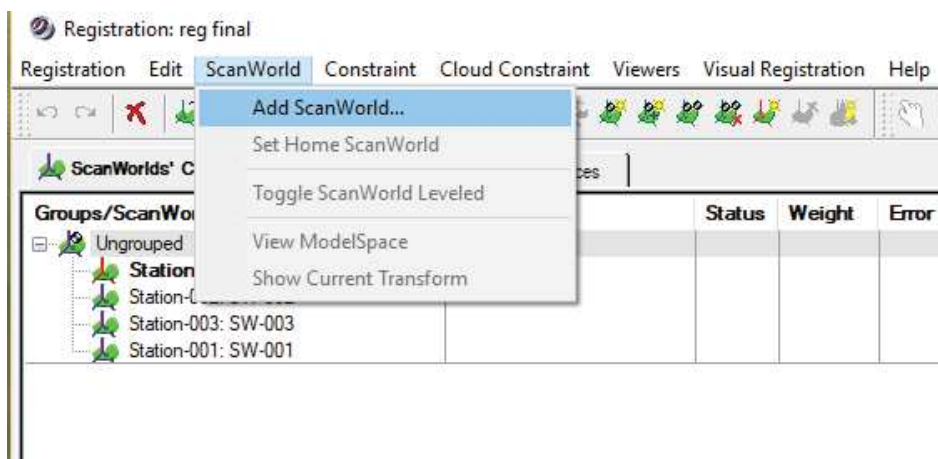
Po ukončení úprav bodového mračka v Model Space se provede krok, který je nezbytný k pokračování práce s bodovým mračkem. Je jím přenesení upraveného modelu do Control Space, který bude později potřeba ke spojování bodových mraček. Postup je zobrazen na obrázku 2-22.



Obrázek 2-22: Potvrzení úprav a kopírování do Control Space

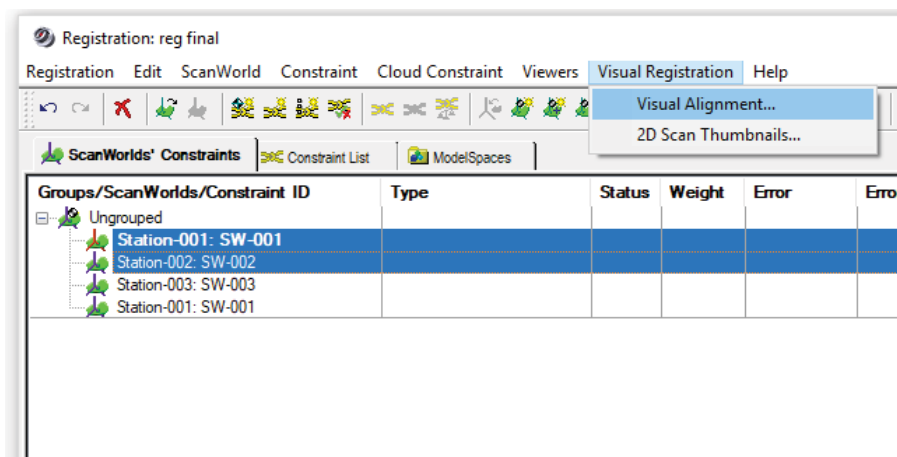
Všechna potřebná bodová mračka budou upravena podle stejného postupu. V momentě, kdy jsou bodová mračka očištěna a zkopírována do Control Space, mohou být spojována. Postup pro spojení bodových mraček začíná vytvořením Registrace (zde pojmenováno „reg final“).

Proces spojení skenů pomocí registrace je zahájen přidáním všech Scan World (bodových mraček) do registrace. To zobrazuje obrázek 2-23. Do registrace je možno přidat ScanWorld z více projektů. Příkladem je v seznamu poslední SW-001, který je z projektu mates-dp4.



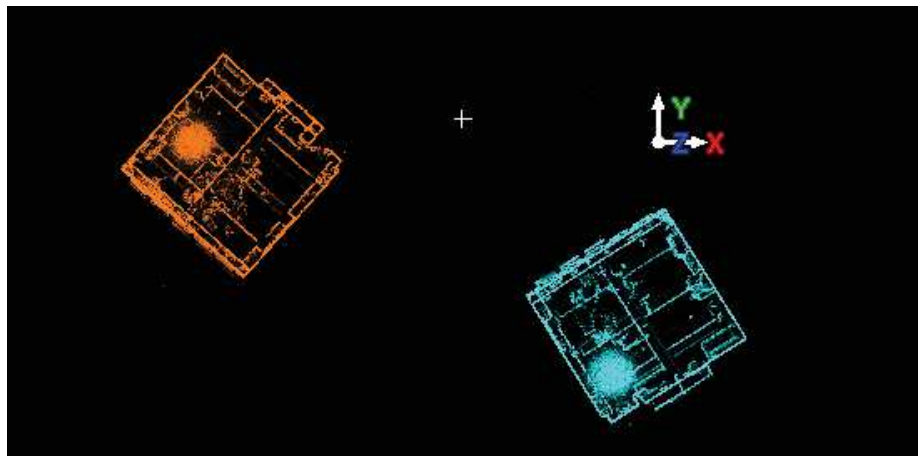
Obrázek 2-23: Přidání ScanWorld

Po přidání všech ScanWorldů lze spojit bodová mračna přes záložku Visual Registration a možnost Visual alignment (viz obrázek 2-24). Pro tuto volbu je potřebné vybrat ze seznamu dva ScanWorldy, které budou spojovány. V příkladu uvedeném na obrázku to znamená, že jako první bude zvolen například SW-001 a SW-002. Po spojení bude v dalším kroku označen výsledek spojení z prvního kroku a jako druhý bude označen SW-003, atd.



Obrázek 2-24: Spojení ScanWorldů

Ve Visual Alignment je zvolena dvojice bodových mračen, barevně odlišených, ve 2D zobrazení. V tomto prostředí jsou pomocí jednoduchých nástrojů posunu umístěna mračna tak, aby na sebe navazovala, popřípadě se doplňovala. Na obrázku 2-25 jsou dvě bodová mračna místnosti, která byla naskenována ze dvou míst, aby se eliminovalo zastínění (v bodovém mračnu je zastínění zobrazeno černými plochami). V tomto případě je nezbytné, aby se bodová mračna překrývala a zastíněná místa neobsahující data využila data z druhého skenu.



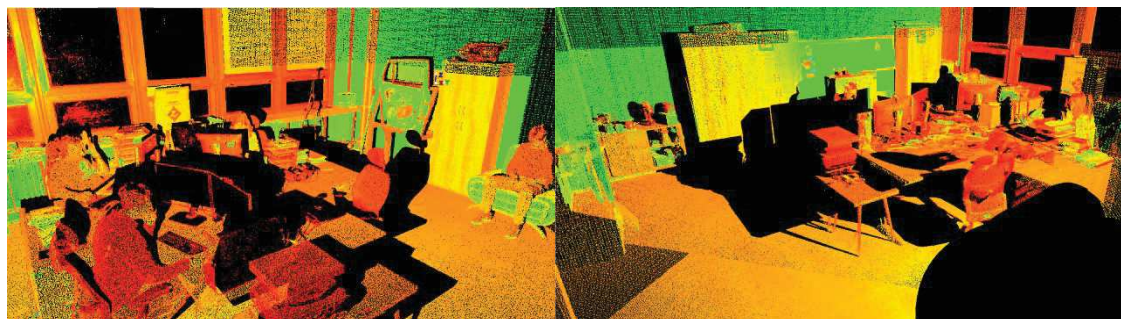
Obrázek 2-25: 2D vizuální zarovnání

Spojování s dalšími bodovými mračkami pokračuje stejně dle výše popsaného postupu.

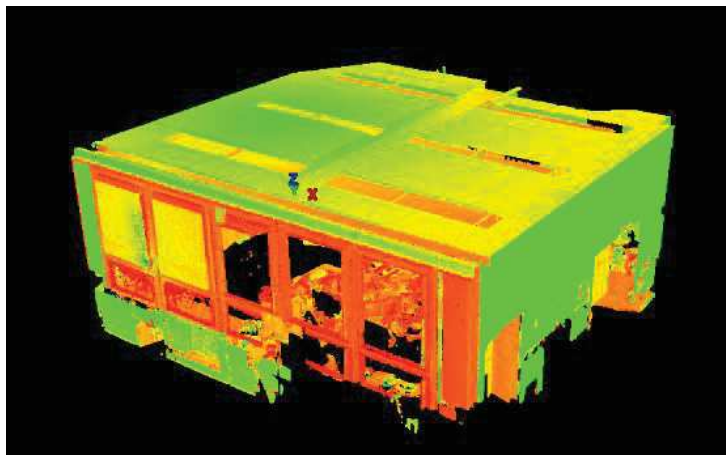
2.5 Výsledky pilotního měření

V této kapitole budou shrnuty a zobrazeny výstupy z pilotního měření, které byly provedeny v laboratoři UL 312 a v její přilehlých prostorách. Výsledek se skládá ze čtyř bodových mraček.

Jako první byla naskenována laboratoř ze dvou pozic, aby byly eliminovány stíny, které jsou zobrazeny černými plochami. Vnitřní pohled představuje obrázek 1-26. Vnější pohled je zobrazen na obrázku 1-27.

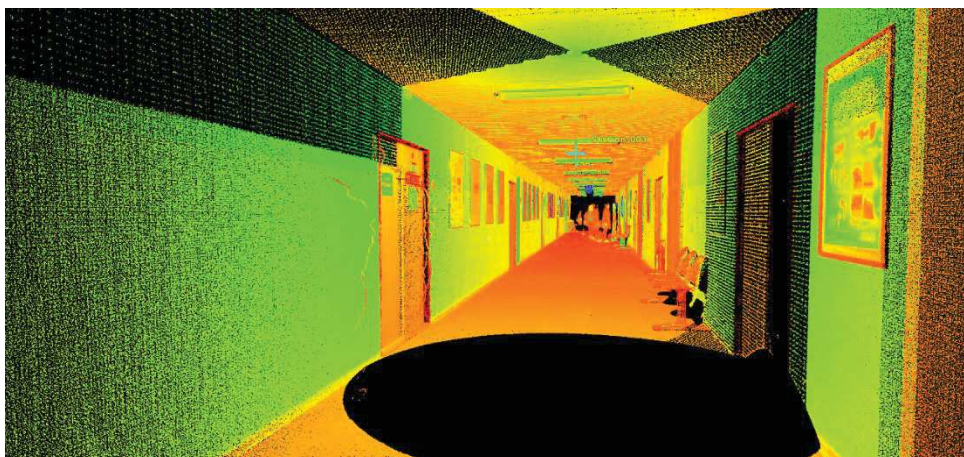


Obrázek 2-26: Laboratoř UL 312 – vnitřní pohled



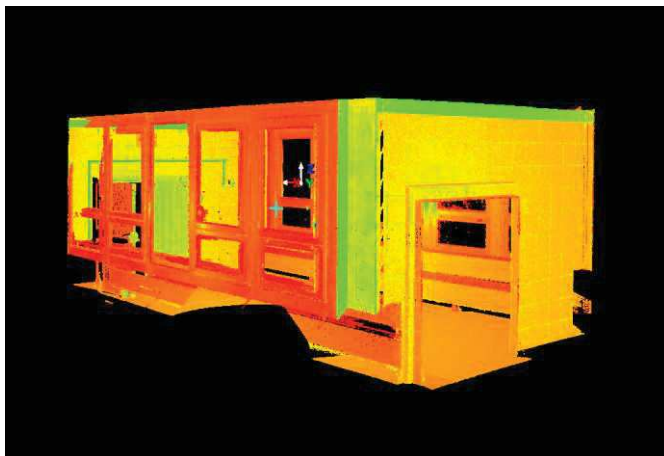
Obrázek 2-27: Laboratoř UL 312 – vnější pohled

Další naskenovanou částí byla dlouhá chodba, z níž se vstupuje do výše zmíněné laboratoře. Na obrázku 2-28 je zobrazen vnitřní pohled chodby, na kterém je dobře demonstrován stín v podobě kruhové černé plochy, jenž je způsoben tím, že skener nemůže skenovat plochu pod sebou.



Obrázek 2-28: Chodba – vnitřní pohled

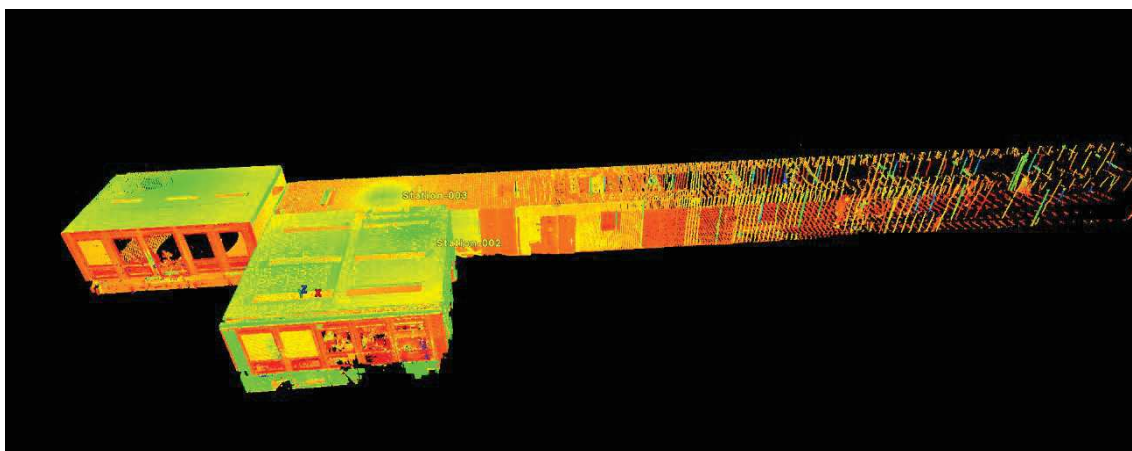
Poslední skenovanou oblastí pro účely pilotního skenování byla krátká spojovací chodba. Tento sken bylo třeba poměrně hodně očistit od ruchů. Velká prosklená okna na obou stranách této chodby způsobila mnoho ruchů a odrazy od okolních objektů bylo nezbytné odstranit. Obrázek 2-29 zobrazuje prosklenou spojovací chodbu z vnějšího pohledu.



Obrázek 2-29: Spojovací chodba – vnější pohled

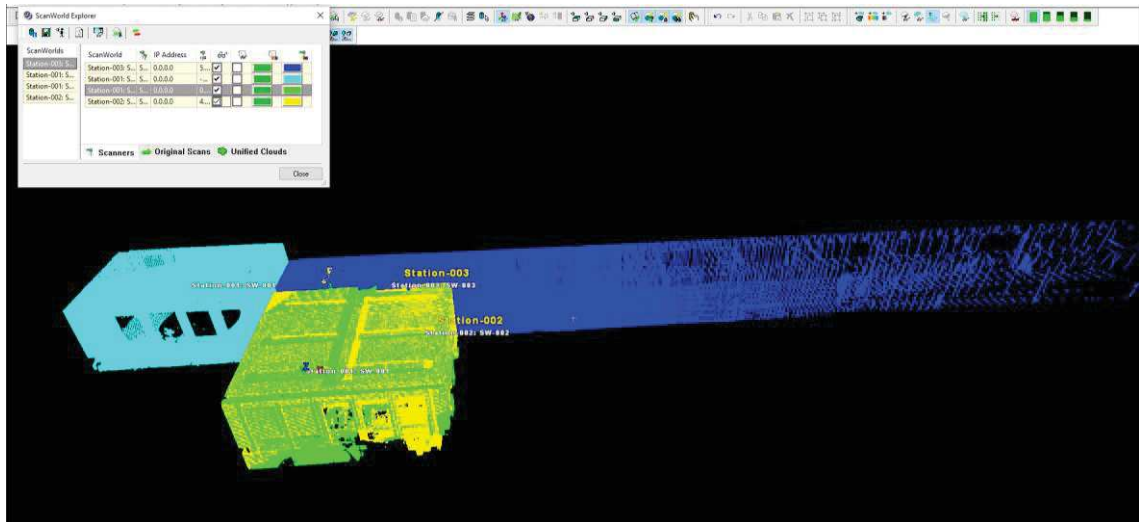
V poslední části pilotního měření bylo zpracováno spojení bodových mračen tak, aby reálně zobrazovalo skutečný stav.

Obrázek 2-30 zobrazuje část vnitřních prostor laboratoře UL 312, v níž bylo provedeno měření navazující chodby. Obrázek také dobře demonstruje, jaký má vliv vzdálenost a úhel měřeného objektu na schopnosti laserového skeneru. S postupně rostoucí vzdáleností od skenovaného místa klesá přesnost, což odpovídá rostoucímu množství stínů, které jsou zobrazeny černou barvou. Pro hodnověrnější naskenování celé délky choby by bylo potřeba přibližně 4–5 skenovacích míst.



Obrázek 2-30: Spojená bodová mračna pilotního měření

Pro snazší orientaci s více skenovacími místy lze využít rozlišení jednotlivých bodových mračen pomocí barev. To zobrazuje obrázek 2-31. Za povšimnutí stojí především viditelné barevné rozlišení barev i u bodových mračen, která jsou spojena přes sebe (prostory laboratoře UL 312).



Obrázek 2-31: Spojená bodová mračka pilotního měření – barevně rozlišeno

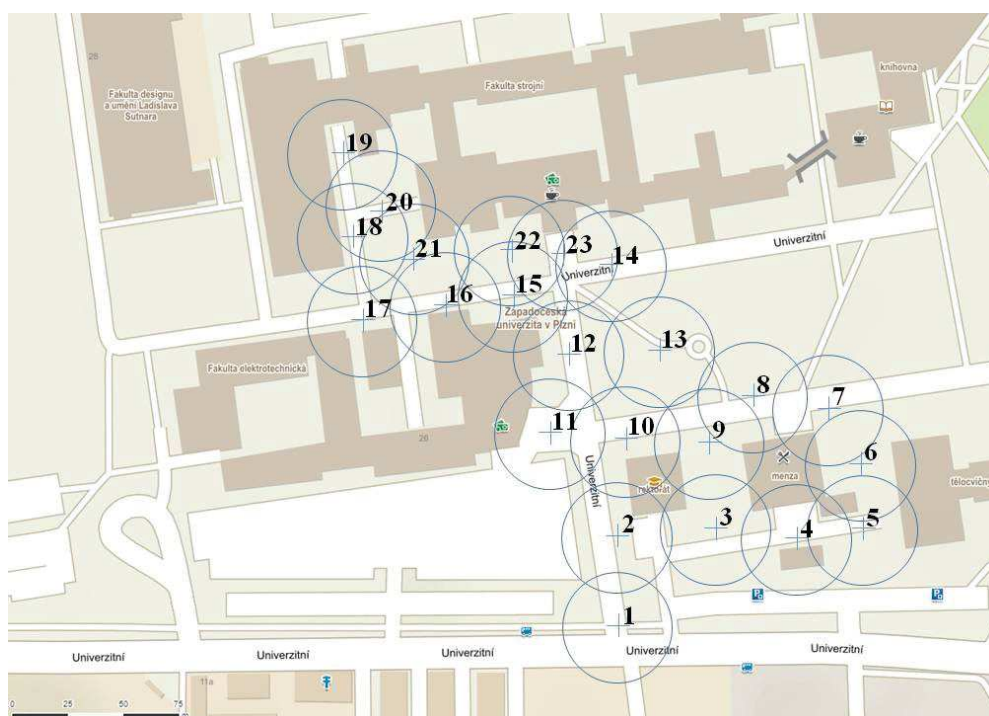
3 Postup měření

Tato kapitola obsahuje popis základních faktorů postupu měření při digitalizaci kampusu. Jedná se o plán skenovacích pozic, volbu kvality rozlišení skeneru a časovou náročnost.

3.1 Volba skenovacích pozic

Před zahájením měření bylo provedeno seznámení se zařízením a softwarem. Dále bylo realizováno pilotní měření. Pilotní měření zajistilo získání potřebných znalostí k obsluze a možnost přistoupit k digitalizaci univerzitního kampusu.

Před zahájením měření požadovaných prostor byla vytvořena mapa plánovaných skenovacích pozic, kterou zobrazuje následující obrázek 3-1.



Obrázek 3-1: Mapa skenovacích pozic

Pro naskenování plánované oblasti kampusu bylo zvoleno celkem 23 skenovacích pozic, které se vzájemně dostatečně překrývají tak, aby je bylo možné spojit s vysokou přesností. Při navrhování pozic byl brán zřetel na jednotlivé významné překážky a dosah skeneru. Proto se počítalo s dosahem 25 m. Při skenování se však objevily situace a překážky, které omezily skenování. Byly jimi například stromy a keře, kterých je ve skenované oblasti relativně velké množství. Tyto stromy a keře vytvářejí stín v bodovém mračnu. Další významnou překážkou jsou terénní nerovnosti. O tom více v 4. Kapitole.

3.2 Vztah časové náročnosti a kvality rozlišení skenování

Pro výběr kvality rozlišení skenu, který bude využit k digitalizaci kampusu, bylo nejprve nutno zpracovat vztah mezi časovou náročností na jednotlivých možnostech rozlišení. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.3, jsou možné tyto úrovně rozlišení: nízká, střed-

ní, vysoká a nejvyšší. Pro fotografie: čtverce o velikosti 1920, 960 a 640 pixelů. Proto byly, v rámci pilotního skenování, naměřeny hodnoty jednotlivých časů pro jednotlivá rozlišení k porovnání a pomoci při výběru vhodného nastavení.

Pro potřeby této diplomové práce bylo vybráno jako nejvhodnější využití plných skenů (rozsah $360^{\circ} \times 270^{\circ}$) na každou skenovací pozici. V některých případech by sice stačilo skenovat například výseč 180° v horizontálním rozsahu, avšak tato možnost by nikterak nesnížila dobu skenování (hlava skeneru se otáčí okolo své horizontální osy a skenuje tím na obě strany současně). Získaný plný sken bude alespoň možno lépe spojit s okolními, protože bude k dispozici větší plocha bodových mračen k překrytí.

Nejvyšší rozlišení skenu nebylo zahrnuto do analýzy, jelikož tato možnost v plném skenovacím režimu vyžaduje přibližně 336 minut. Toto rozlišení se využívá především pro výsečové skenování (i z důvodu výdrže baterií, které vydrží přibližně 2 hodiny)

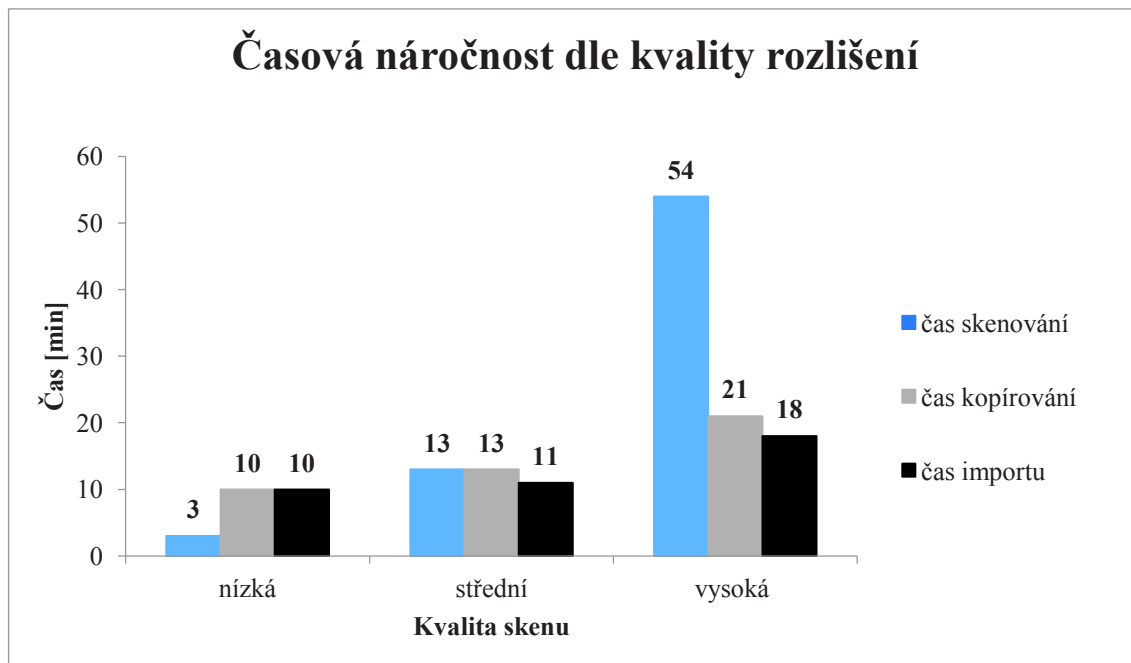
V následující tabulce 3-1 je uveden čas skenování, čas kopírování ze skeneru do počítače a čas importu do software Cyclone (včetně funkcí Batch Blend MultiImages a Batch Aplly MultiImages) pro každý druh rozlišení skeneru.

Tabulka 3-1: Časová náročnost pro jednotlivé druhy rozlišení

Kvalita rozlišení skenu	Čas skenování [min]	Čas kopírování [min]	Čas importu* [min]	Čas celkový [min]
Nízká	3	10	10	23
Střední	13	13	11	37
Vysoká	54	21	18	93
Nejvyšší	336	neměřeno	neměřeno	neměřeno

* včetně Batch blend MultiImages a Batch Aplly MultiImages

Výše uvedenou tabulku graficky reprezentuje obrázek 3-2.



Obrázek 3-2: Graf časové náročnosti dle kvality rozlišení

Na výše uvedeném obrázku 3-2 lze vidět největší rozdíl v čase skenování mezi středním a vysokým stupněm rozlišení.

V rámci měření byly také měřeny hodnoty časů pro fotografování při jednotlivých možnostech rozlišení. Bylo však zjištěno, že rozlišení fotografií nemá zásadní vliv na výsledný čas. **Čas fotografování pro jednotlivá rozlišení vycházel stejně, a to přibližně 8 minut.**

Jelikož se plánuje vytvoření 23 plných skenů, je nezbytné vhodně zhodnotit také celkovou časovou náročnost. V případě času na skenování je nárůst mezi středním a vysokým rozlišením více než čtyřnásobný. Celkový rozdíl časů na skenování mezi vysokým a středním rozlišením tvoří:

- střední rozlišení – 13 minut \times 23 skenovacích pozic = 299 minut
- vysoké rozlišení – 54 minut \times 23 skenovacích pozic = 1242 minut

Rozdíl pro celkový čas skenování je 943 minut, což je téměř 16 hodin.

V tabulce 3-2 je pro jednotlivá rozlišení uveden počet bodů bodového mračka plného skenu. Jedná se o přibližné množství, protože celkový počet bodů je závislý na četnosti tvarů ve skenované oblasti. Například při skenování malé místnosti bude naměřeno více bodů, než při skenování v exteriéru.

Tabulka 3-2: Počet bodů v jednotlivých kvalitách rozlišení skenu

Kvalita rozlišení skenu	Počet bodů v milionech
Nízká	4–5
Střední	5–6
Vysoká	6–7

Vzhledem k celkovému množství plánovaných skenovacích pozic a velkému počtu získaných dat, se kterými by bylo velmi obtížné pracovat, byla vybrána střední úroveň rozlišení skeneru.

4 Chyby při skenování a jejich zpracování

V průběhu skenování bylo potřeba překonat některá úskalí, kterými jsou například vítr, pohybující se osoby ve skenovaném prostředí, déšť, statické překážky, špatné spojení skenů a chybné zpracování skenů SW Cyclone.

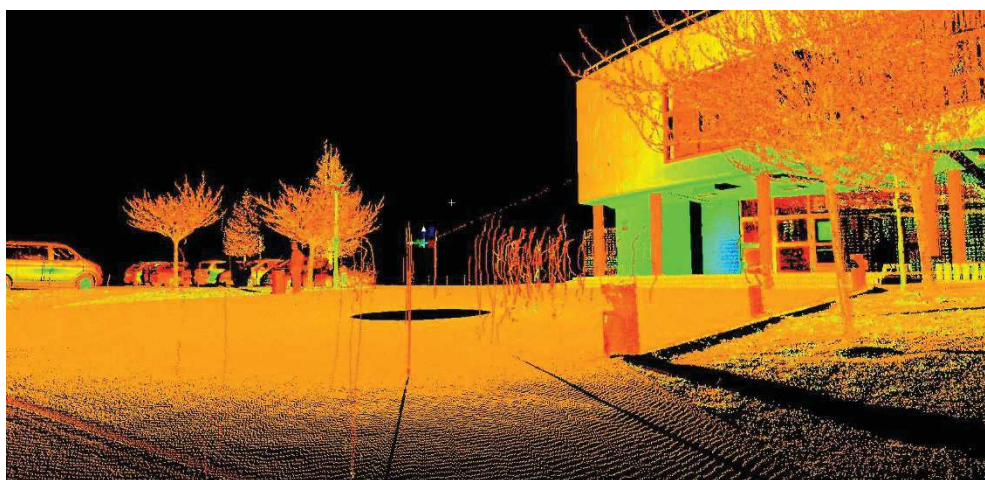
- **Vítr**

Jedním z prvních elementů, který bránil průběhu skenování, byl vítr. Pokud dosahuje vysokých nárazových hodnot, může při probíhajícím skenu posunout skener v jeho ose otáčení a tím znehodnotit naměřené výsledky.

S tím souvisí také zajištění dobrých skenovacích podmínek i pro jiná stanoviště, kterými mohou být například výrobní haly, v nichž je nutno zajistit dostatečně pevný podklad, na který bude následně umístěn stativ se skenerem. V průběhu skenování nesmí dojít k žádným vnějším pohybům.

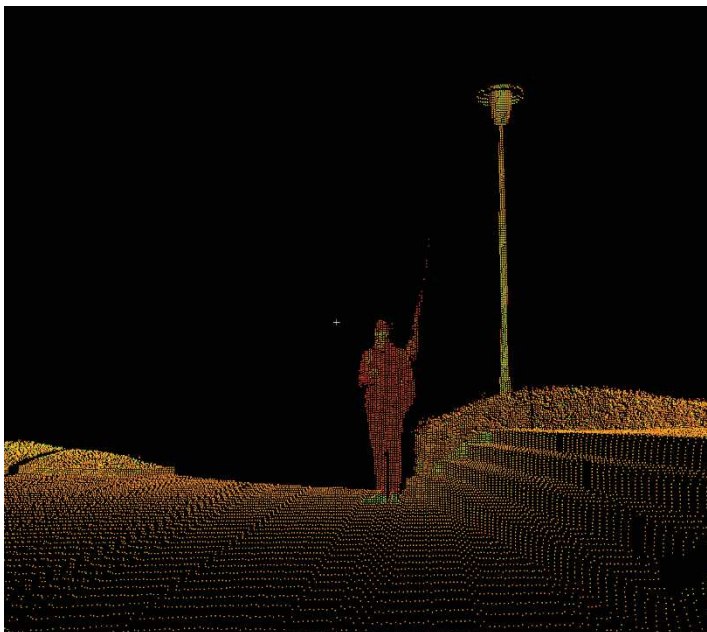
- **Lidé**

Dalším z pozorovaných jevů, které působí negativně na měřené výsledky, jsou pohybující se lidé ve skenovaném prostoru. Tomu však především v prostorách kampusu nelze vhodným způsobem zabránit. Proto bylo potřeba vymazat tyto naskenované siluety pohybujících se osob a bodové mračno tím očistit od těchto chyb. Siluety osob lze vidět na obrázku 4-1. Jedná se pouze o siluety, protože v průběhu skenování byli skenovaní lidé v pohybu.



Obrázek 4-1: Siluety lidí

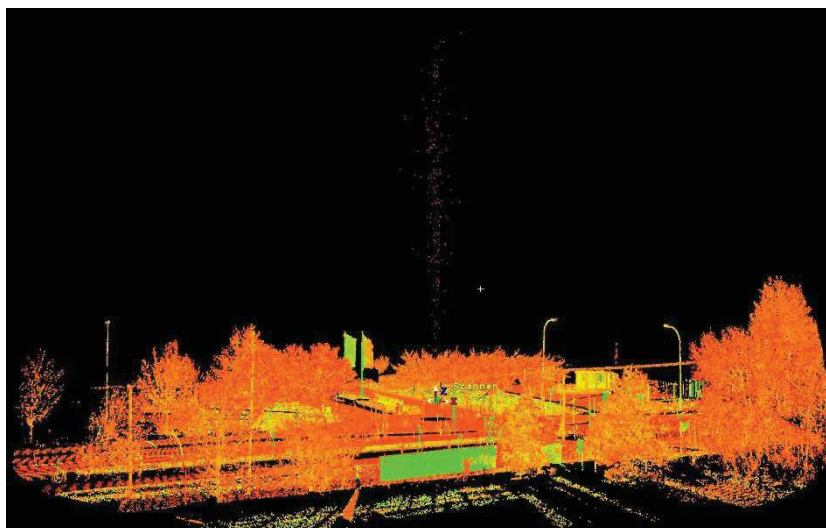
Výjimku tvoří obrázek kuřáka, který se v průběhu skenování pohyboval pouze minimálně a je zobrazen na obrázku 4-2. Zajímavostí na tomto obrázku je také skutečnost, že skener dokázal rozpoznat dým, jenž je vyobrazen pomocí bodů.



Obrázek 4-2: Kuřák

- **Děšť**

Zařízení sice není technicky určeno do deště, ale drobné a krátkodobé dešťové srážky nelze vždy dobře předvídat. Laserový paprsek se od dešťových kapek odráží podobně jako od překážky, proto je bodové mračno opět nepoužitelné. Na obrázku 4-3 je uveden příklad drobného mrholení, které způsobilo chybné zobrazení pouze v jednom z úhlů v závislosti na úhlu slunečního svitu. Takové bodové mračno lze očistit od chyb. Jsou totiž v oblasti, která není potřebná pro potřeby skenovaného prostředí.



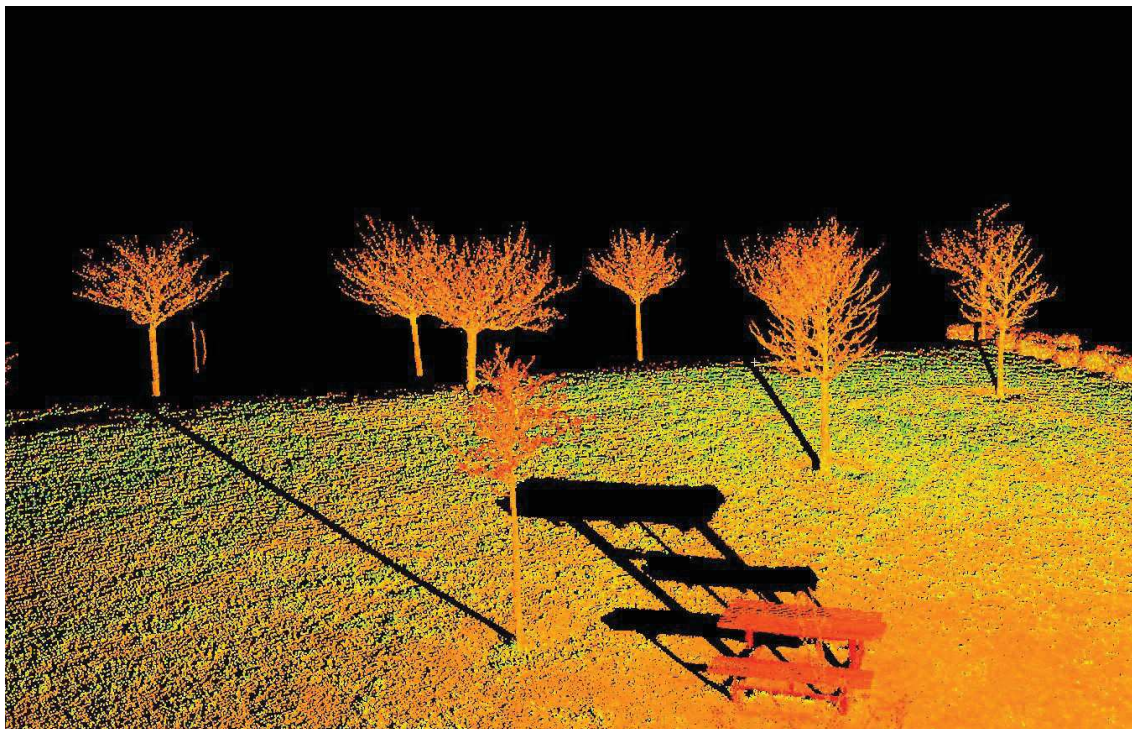
Obrázek 4-3: Děšť

- **Překážky**

Nejčastějším jevem, který ovlivňuje průběh a kvalitu skenování, jsou fyzické a statické překážky ve skenovaném prostředí. Jsou jimi nejčastěji stromy, keře, atd. Tyto překážky vytvářejí v bodovém mračnu tzv. stíny, které jsou zobrazeny černou barvou. Jedná se

o plochu, která nebyla naskenována. Často jsou tyto plochy překryty naskenováním daného prostoru z jiné pozice tak, aby byl stín co nejvíce eliminován a skeny následně spojeny. Na velké skenované ploše, jež je zpracována v rámci této diplomové práce, není reálné eliminovat všechny stíny při zachování rozsahu skenované plochy a náročnosti na zpracování. Byly proto eliminovány jen největší stíny a místa, která jsou významná pro potřeby výstupu skenovaného prostředí.

Příklady stínů vytvořených překážkami při laserovém skenování jsou zobrazeny na následujícím obrázku 4-4.

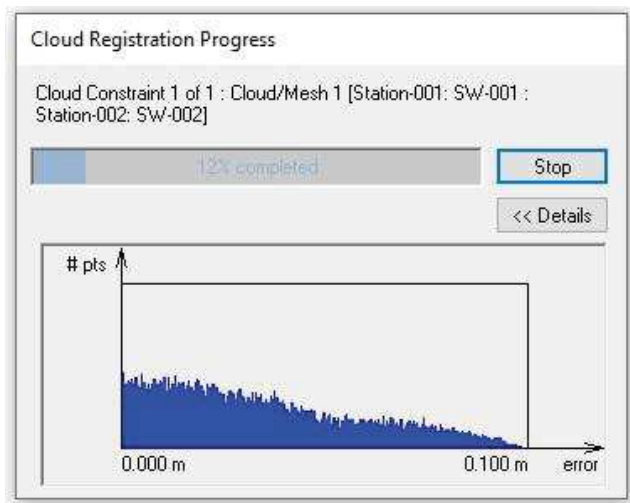


Obrázek 4-4: Stíny překážek

- **Špatné spojení skenů**

Pomocí software Cyclone lze spojovat jednotlivé skeny k sobě tak, jak bylo popsáno v kapitole 2.4. Před spuštěním spojení bodových mračen za využití funkce Visual Alignment (obrázek 2-25) je nutno skeny k sobě správně přiložit tak, aby se alespoň v některých částech překrývaly a software byl schopen tyto skeny porovnat a případně je v omezeném rozsahu pootočit či posunout.

O průběhu spojování a kvalitě spojení informuje histogram, zobrazující závislost počtu spojených bodů a velikosti jejich odchylky vzdálenosti. Příklad takového histogramu lze vidět na obrázku 4-5. V případě dosažení hranice (0,1 m) by nebyly skeny správně spojeny a bylo by nutno proces opakovat, případně provést spojení skenů přidáním nového skenu ze skenovací pozice, která bude obsahovat dostatek bodů po spojení obou původních skenů.

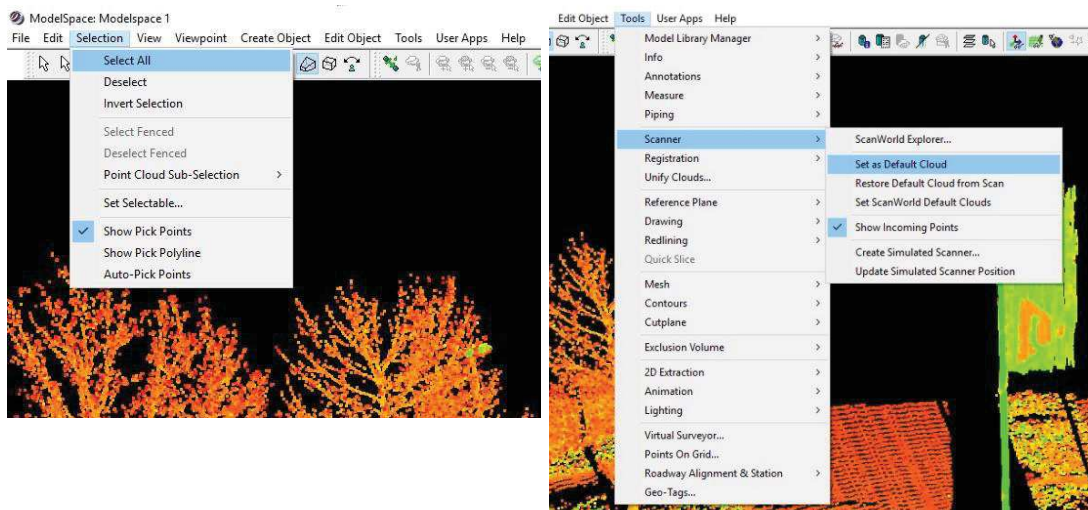


Obrázek 4-5: Histogram kvality spojení dvou skenů

- **Chyba při potvrzení změn očištění bodového mračna**

V procesu práce s bodovými mračny se v několika případech objevila situace, kdy nebylo možno načíst v registraci upravené bodové mračno. Zobrazovalo se pouze neupravené, ačkoliv již bylo upraveno dle standardního postupu v Model Space a následně zkopírováno do Control Space.

Tuto situaci pomohlo odstranit vymazání bodového mračna v Control Space a dále označit v Model Space označit upravené bodové mračno, zvolit toto mračno jako základní, (tak jak je vidět na obrázku 4-6) a opět zkopírovat do Control Space (viz obrázek 2-22).



Obrázek 4-6: Postup přenastavení upraveného mračna

5 Výsledek digitalizace kampusu

V této kapitole bude krátce popsán dron, který byl využit k získání výstupů potřebných k vizualizaci výsledků digitalizace kampusu. Dále bude představeno doplnění původního návrhu postupu měření. Především pak budou shrnuty nejdůležitější výsledky z digitalizace kampusu.

5.1 Dron

V průběhu digitalizace kampusu byl využit i dron, díky němuž byly pořízeny záběry, jež poslouží k podpoře vizualizace výstupu této diplomové práce. Jedná se o kvadrokoptéru DJI Mavic 2 Pro, s jejíž pomocí bylo vytvořeno video a fotografie digitalizovaného prostředí.

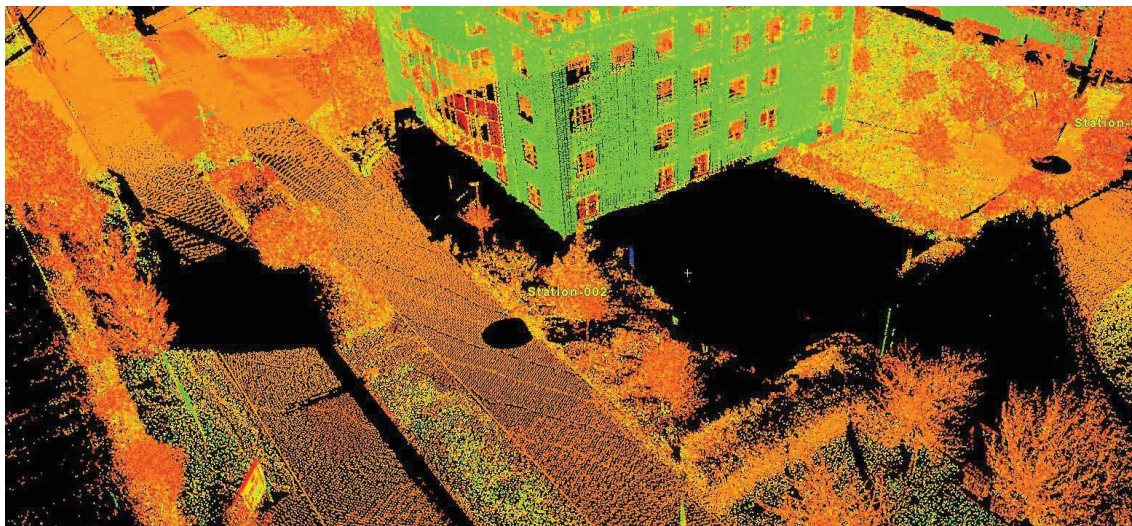
Hmotnost tohoto dronu je 907 gramů, splňuje tak zákonem stanovené normy pro létání bez ohlašovací povinnosti. O pořízení videa a fotografií se stará snímač, který dokáže vytvořit rozlišení v kvalitě 4K – 4096×2160 bodů. [23], [24]



Obrázek 5-1: Dron DJI Mavic 2 Pro; [25]

5.2 Doplnění plánovaného postupu měření

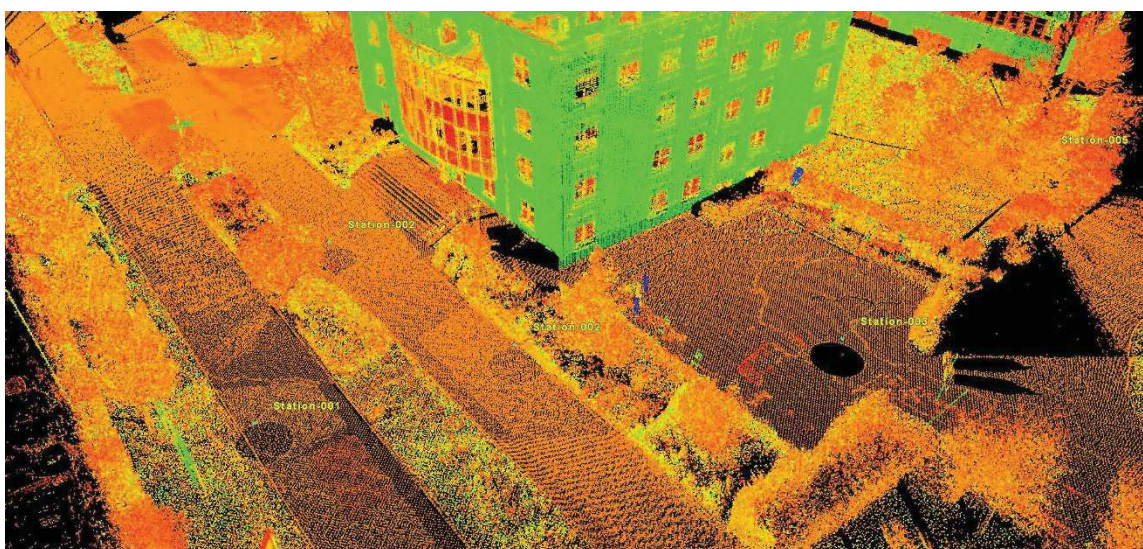
V rámci digitalizace kampusu bylo naplánováno skenování laserovým skenerem na 23 pozicích s využitím plných skenů. V průběhu práce však byly nalezeny rozsáhlé stíny v okolí rektorátu – viz obrázek 5-2.



Obrázek 5-2: Stíny u rektorátu

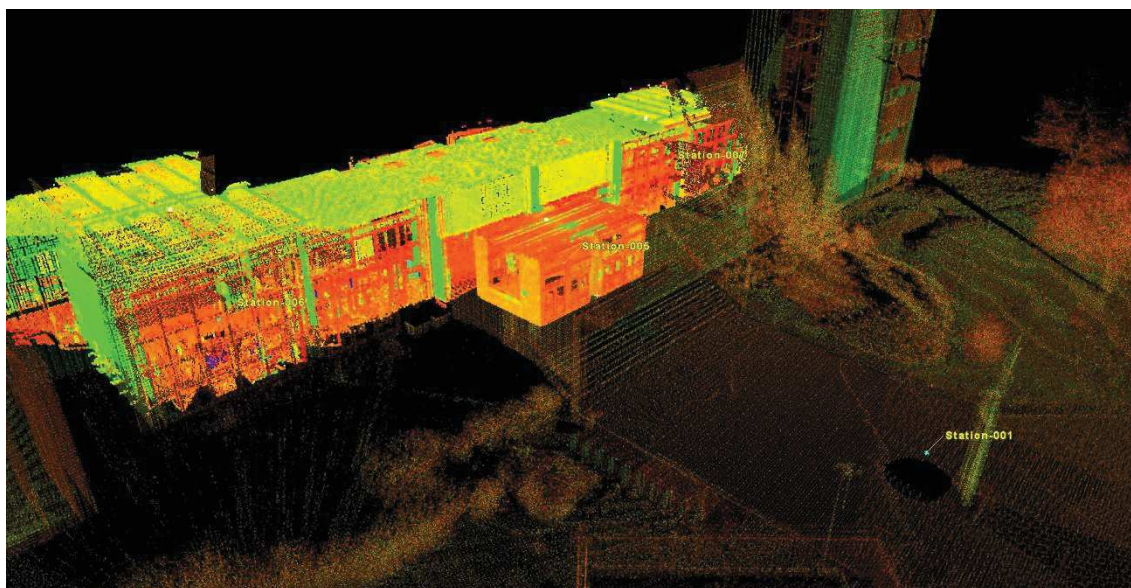
Tyto stíny byly svým rozsahem významné, a proto bylo rozhodnuto o doplnění této naskenované plochy. Na obrázku 5-2 je stín vlevo vytvořen od keře, stín před rektorátem je způsobený vzrostlými stromy a keři. Poslední zastíněnou částí je parkoviště u rektorátu. Tyto stíny měly být naskenovány z pozice číslo 2. (viz obrázek 3-1 – Mapa skenovacích pozic). Zde na obrázku 5-2 je pozice patrná podle své charakteristické stopy v podobě kruhového stínu.

Stíny byly doplněny třemi dalšími skeny a výsledné bodové mračno z této oblasti zobrazuje obrázek 5-3.



Obrázek 5-3: Rektorát bez stínů

Na závěr byla připojena část interiéru, který je opět vytvořen ze tří skenovacích pozic. Jako část interiéru, který bude připojen k celkovému bodovému mračnu digitalizující kampus, byl vybrán vrátnice a vestibul FST. Obrázek 5-4 zobrazuje vybraná bodová mračna, pomocí kterých byl interiér budovy připojen do celkového bodového mračna.



Obrázek 5-4: Vestibul FST

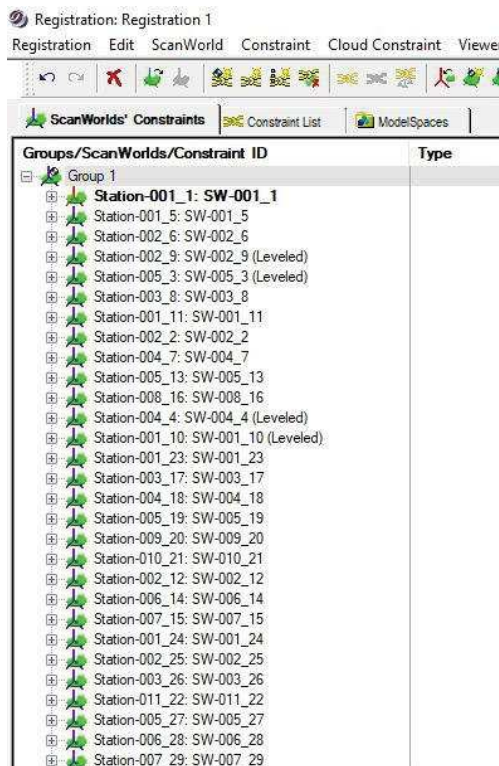
Obrázek 5-5 pak zobrazuje vnitřní pohled do vestibulu obarvený pomocí fotografií.



Obrázek 5-5: Vnitřní pohled do vestibul – fotografie

5.3 Výsledné zobrazení digitalizace kampusu

Digitalizace prostor univerzitního kampusu byla celkem zpracována pomocí 29 plných skenů. 26 těchto skenů bylo pořízeno v exteriéru kampusu a 3 v interieru (v budově FST). Následující obrázek 5-6 zobrazuje výslednou podobu registrace 29 Scan Worldů v software Cyclone.



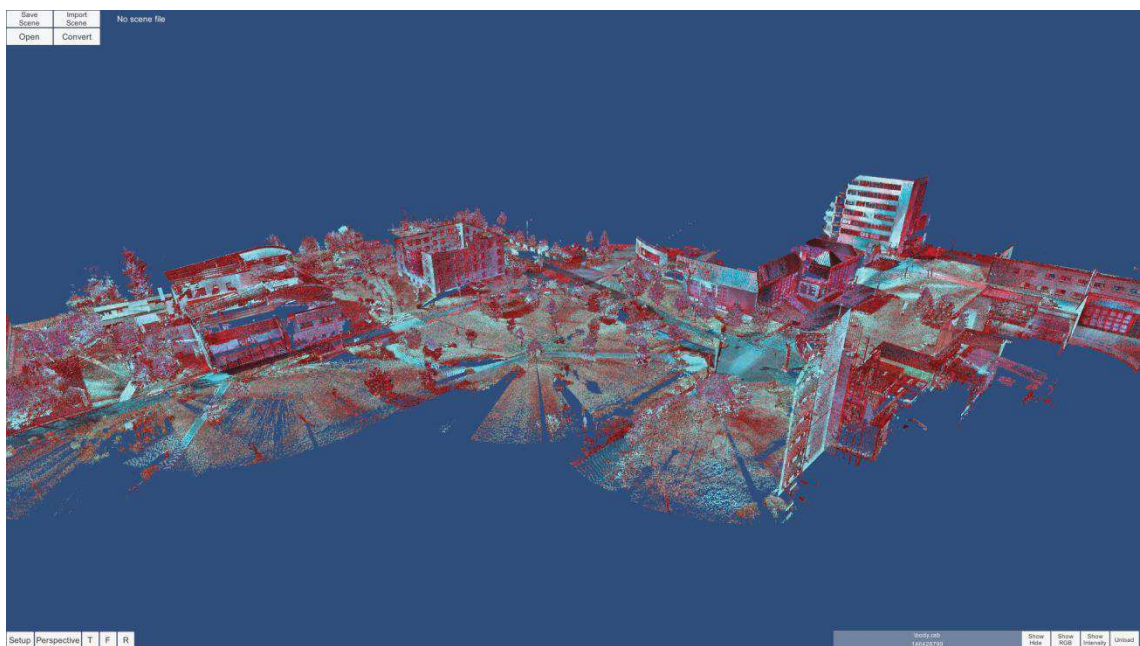
Obrázek 5-6: Celková registrace v software Cyclone

Celkový pohled na skenovanou část kampusu zobrazuje obrázek 5-7, 5-8 a 5-9. Pro snazší orientaci ve skenovaném prostředí bylo vybráno více variant zobrazení – první snímek prostředí pomocí dronu, druhý pomocí bodového mračna ze software Cloud Slicer a třetí je bodové mračno ze software Cyclone.

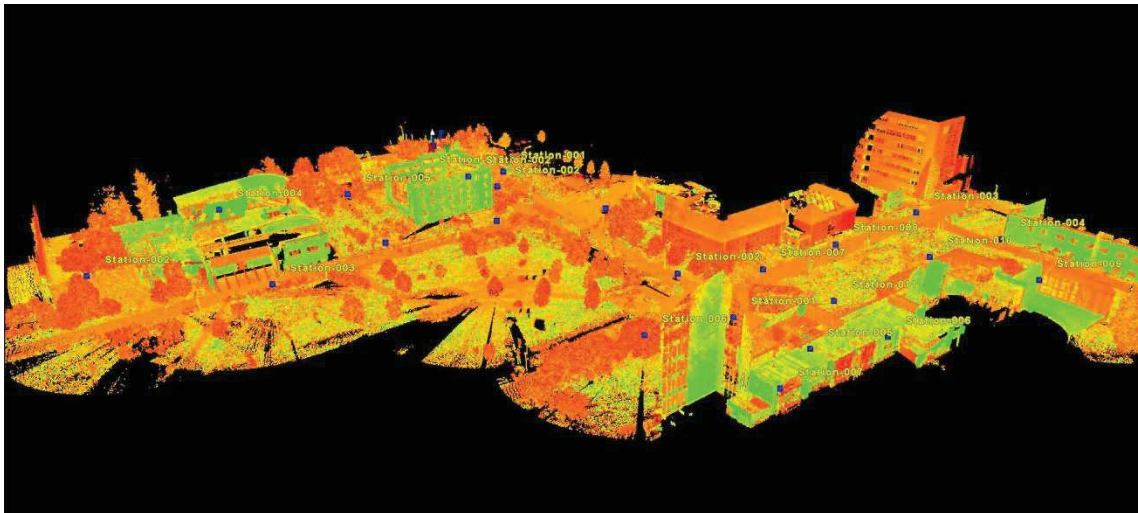
V levé části těchto obrázků jsou patrné stavby, jako je menza a rektorát. Uprostřed obrázků je zobrazen prostor nacházející se mezi Fakultou strojní a rektorátem společně s hlavním koridorem od hlavní silnice pokračující okolo Fakulty elektrotechnické. V pravé části obrázků je vidět koridor mezi Fakultou strojní a Fakultou elektrotechnickou vedoucí k RTI.



Obrázek 5-7: Celkový pohled – dron

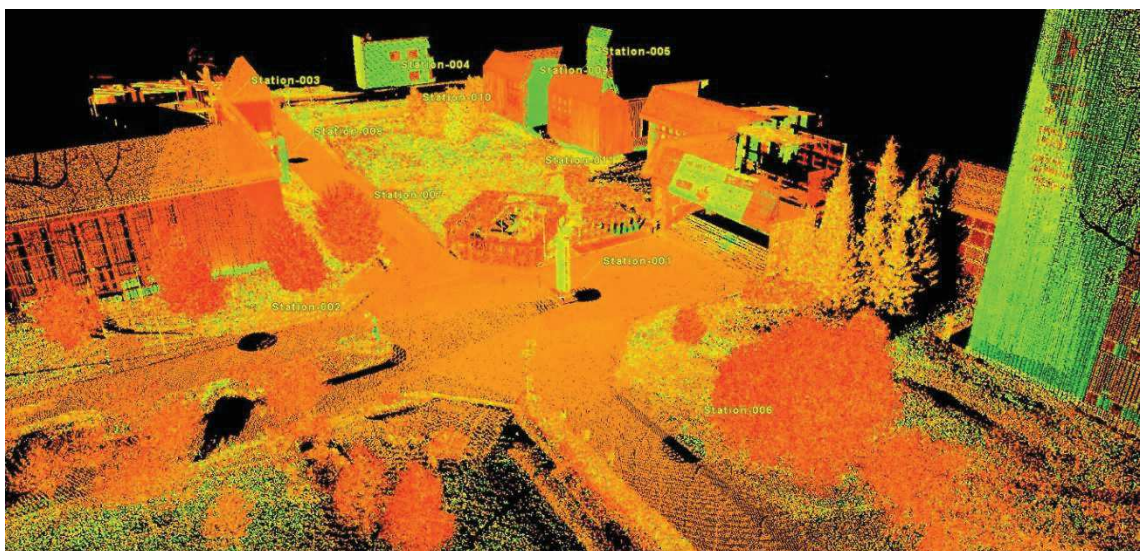


Obrázek 5-8: Celkový pohled – Cloud Slicer – bodové mračno



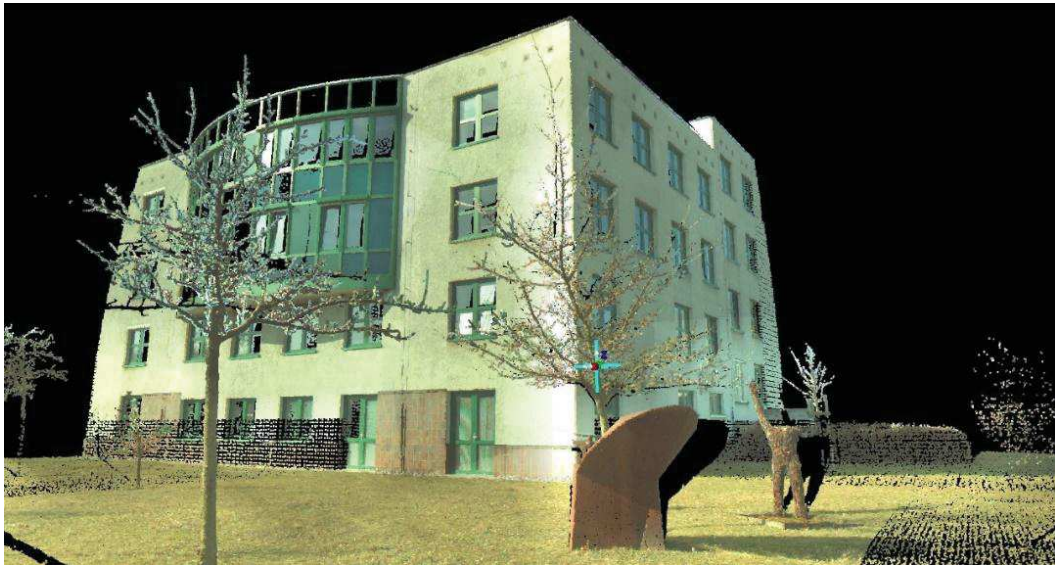
Obrázek 5-9: Celkový pohled – bodové mračno

Obrázek 5-10 zobrazuje výseč z celkového bodového mračna s pohledem na Fakultu elektrotechnickou na levé straně a Fakultu strojní na straně pravé. Na snímcích si lze všimnout stínů ve tvaru kruhu. Jsou vytvořeny skenerem, který má dosah ve své vertikální ose 270°.

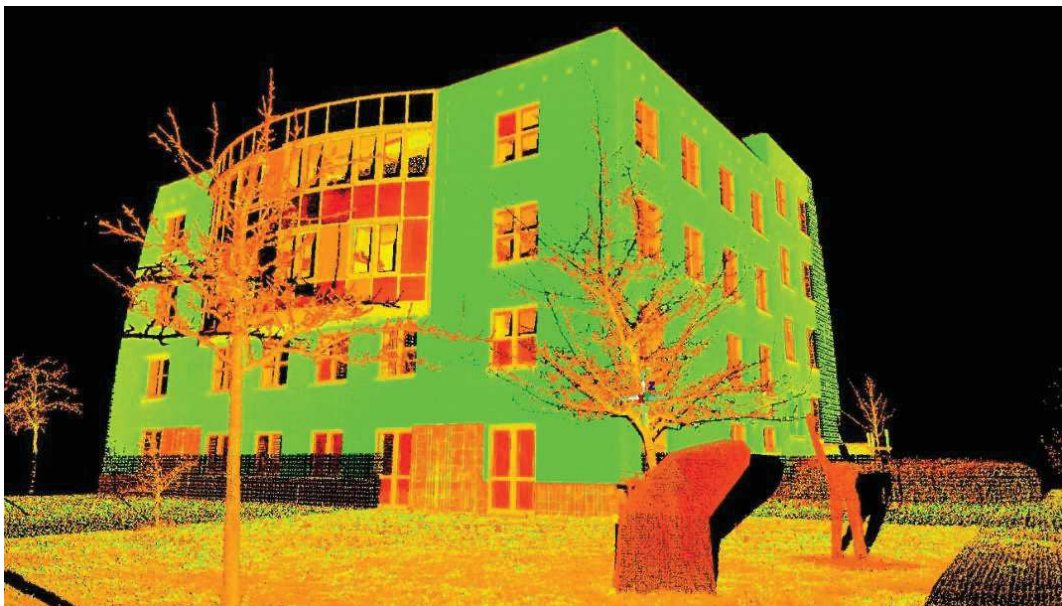


Obrázek 5-10: Pohled před Fakultu strojní

Následující obrázky zobrazují pohled na některé stavby z areálu kampusu. Jsou jimi rektorát, menza a vstup do Fakulty strojní.



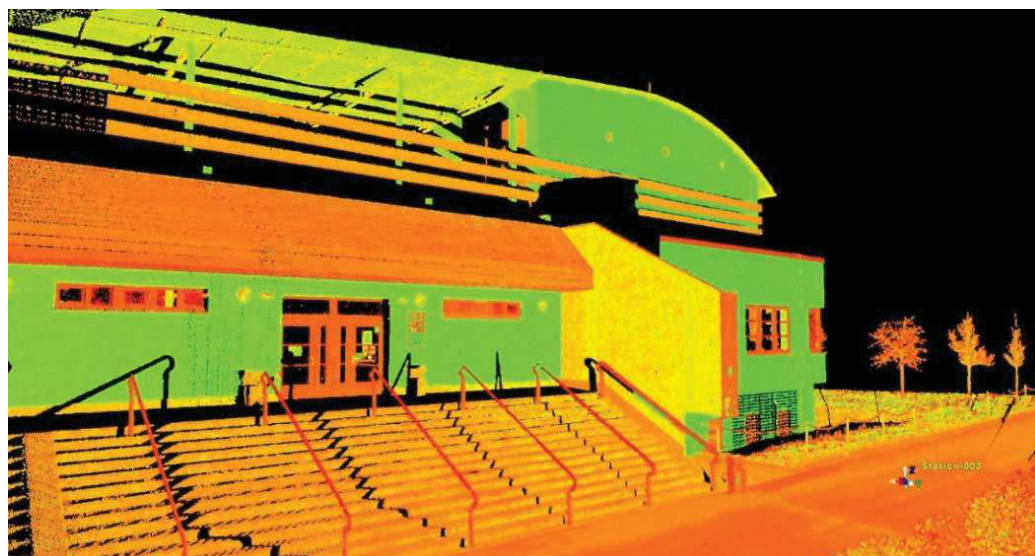
Obrázek 5-11: Rektorát – fotografie



Obrázek 5-12: Rektorát – bodové mračno



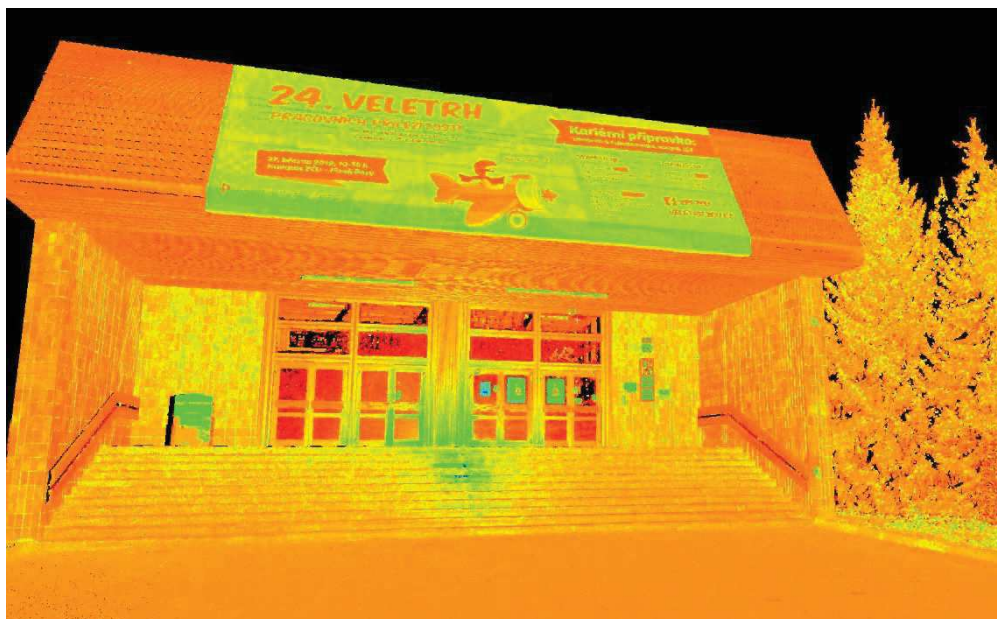
Obrázek 5-13: Menza – fotografie



Obrázek 5-14: Menza – bodové mračno



Obrázek 5-15: Fakulta strojní – fotografie



Obrázek 5-16: Fakulta strojní – bodové mračno

5.4 Zobrazení časových požadavků na získání a zpracování dat

Na základě výběru středního rozlišení pro digitalizaci kampusu byla časová analýza detailněji rozpracována na:

- **Přípravu skenovací pozice**
Tato činnost obnáší nalezení zvolené pozice, sestavení stativu a hliníkového podstavce, instalace, zapnutí a nastavení skeneru.
- **Skenování**
Obsahuje čas, při němž je skener v chodu a probíhá sběr dat pro tvorbu bodového mračna.

- **Fotografování**
Čas, při němž jsou pořízeny fotografie z prostředí, které bylo naskenováno.
- **Kopírování dat do PC**
Časový úsek, během něhož jsou již kompletní Scan Worldy kopírovány pomocí Wi-Fi připojení.
- **Import dat do Cyclone**
V tomto časovém úseku jsou Scan Worldy importovány do Cyclone a následně provedeny funkce Batch Blend MultiImages a Batch Apply MultiImages.
- **Očištění a registraci skenu**
Doba, která je v průměru potřebná k očištění, registraci a spojení jednoho Scan Worldu.

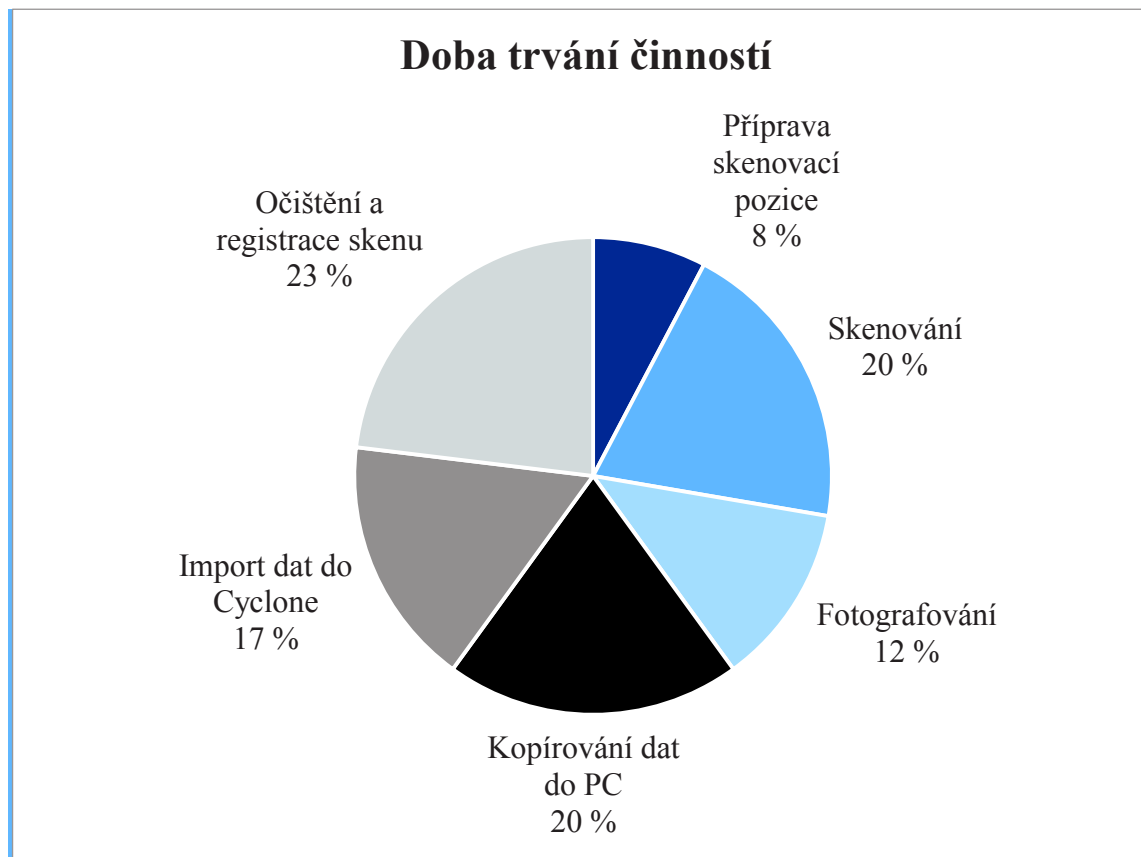
Následující tabulka 5-1 zobrazuje průměrné časy jednotlivých činností, které byly měřeny na posledních deseti skenovaných Scan Worldech při digitalizaci univerzitního kampusu. Hodnoty měřené při pilotním skenování se shodují s hodnotami změřenými při digitalizaci.

Tabulka 5-1: Tabulka časových požadavků na získání a zpracování dat

Činnost	Doba trvání [min]
Příprava skenovací pozice	5
Skenování	13
Fotografování	8
Kopírování dat do PC	13
Import dat do Cyclone*	11
Očištění a registrace skenu	15
Celkem	65

* včetně Batch blend MultiImages a Batch Apply MultiImages

Na níže uvedeném obrázku 5-17 jsou data dále interpretována pomocí grafu. Modré odstíny zobrazují dobu potřebnou k pořízení dat, šedé odstíny zobrazují jejich zpracování. **Čas na zpracování dat je vyšší a tvoří 60 % celkového času** (39 minut na jeden plný sken).



Obrázek 5-17: Graf doby trvání činností na získání a zpracování dat

Celkem bylo bodové mračno vytvořeno z 29 plných skenů. Celkový čas na získání a zpracování dat je: $29 \text{ skenů} \times 65 \text{ minut} = 1\,885 \text{ minut}$ (31,4 hodin). Při zadání této zakázky u společnosti, jež mimo jiné poskytuje i digitalizaci prostor pomocí laserového skeneru, byla cena přibližně 52 000 Kč.

6 Závěr

Diplomová práce byla zpracována na téma „*Digitalizace prostor s pomocí laserového skenování*“. V teoretické části byly popsány oblasti, ve kterých se často uplatňuje laserové skenování, dále byly na základě odborné literatury zpracovány hlavní principy laserového skenování a rozdělení podle klíčových parametrů. Součástí teoretické části je také detailní popis zvolené měřicí techniky, kterou se stala Leica Scan Station C5 a postup získávání a zpracování dat na pilotním měření.

Praktickou částí práce byla digitalizace části univerzitního kampusu. Pro splnění tohoto cíle byla nejprve vypracována mapa skenovacích pozic a analýza vhodného nastavení skenovacího zařízení. Mapa skenovacích pozic byla vytvořena s ohledem na výrobcem deklarovaný dosah skenovacího zařízení, kvalitu a dostatečné překrytí bodových mračen při spojení a minimalizaci zastínění. Nastavení bylo vzhledem k rozsáhlosti digitalizovaného prostoru, a tedy významnému dopadu na celkový objem dat a časovou náročnost, zvoleno na střední úroveň. Pokud by namísto středního rozlišení bylo zvoleno vysoké, zvýšil by se celkový čas na získání a zpracování jednoho bodového mračka přibližně o 56 minut.

Během skenování byly analyzovány jednotlivé druhy ruchů, které negativně ovlivňují celkovou kvalitu výstupního bodového mračka. Byly jimi například překážky ve skenovaném prostoru, které vytvářejí stín, protože je laserový paprsek není schopen prostoupit. Velké množství těchto drobných stínů však není reálně plně redukovat při zachování rozsahu skenovaného prostředí. Dalším z ruchů, který negativně ovlivňuje bodové mračno, jsou siluety procházejících lidí. Tyto nedostatky šlo většinou odstranit při úpravě jednotlivých bodových mračen před jejich registrací. Detailněji se této problematice věnuje kapitola Chyby při skenování a jejich zpracování.

Na každé skenovací pozici byly společně s bodovým mračnem pořízeny také fotografie. Pomocí těchto fotografií lze následně pořízené bodové mračno obarvit a získat tím lépe představitelnou podobu skenovaného prostředí. Získaná data byla zpracovávána především v softwaru Cyclone, dodávaný ke skenovacímu zařízení. S rostoucím počtem přidávaných bodových mračen však rostly nároky na zpracování těchto dat. Pro vizualizaci výsledků digitalizace byl Cyclon nedostačující. Byl proto využit také software Cloud Slicer.

Celkově bylo naplánováno 23 plných skenů na 23 skenovacích pozicích. V průběhu zpracování dat však bylo rozhodnuto o doskenování významných stínů v okolí rektorátu a také o připojení části interiéru. Skenovaným interiérem je vestibul budovy Fakulty strojní. Celkový počet skenovacích pozic se tak zvýšil na 29. Digitalizace části univerzitního kampusu v této diplomové práci trvala přibližně 31,4 hodin, to je 65 minut na jedno bodové mračno.

Seznam zdrojů

Seznam literárních zdrojů

- [1] PROKOPOVÁ, Alžběta. *Laserové skenování v podzemí Jihlavy*. Praha, 2013. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.
- [9] STRAPEK, Martin. *Modelování výroby za pomoci metody 3D Lasescanningu*. Plzeň: ZČU, diplomová práce 2016.
- [13] JIE, Shna a TOTH, Charles K. *Topographic laser ranging and scanning*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-5142-1.
- [17] ŠTRONER, Martin a POSPÍŠIL, Jiří. *Terestrické skenovací systémy*. Vydání první. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04141-3.
- [18] PROKOPOVÁ, Alžběta. *Zaměření hradu Helfenburk u Úštěka a vytvoření části jeho prostorového modelu*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.
- [19] *Stavební obzor: Moderní geodetické technologie a přístroje pro laserové skenování* POSPÍŠIL J. a ŠTRONER M., Praha: 2005. ISSN 1210-4027.

Seznam elektronických zdrojů

- [2] Skenování ve 3D. *Oblasti využití 3D skenerů* [online]. [cit. 16.11.2018]. Dostupné z: <http://www.skenovani3d.cz/vyuziti-3d-skeneru/>.
- [3] Skenování ve 3D. *3D skenování v průmyslu* [online]. [cit. 16.11.2018]. Dostupné z: <http://www.skenovani3d.cz/skenovani/vyuziti-3d-skeneru/prumysl/>.
- [4] G4D. *3D laserové skenování technologických celků* [online]. [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <https://www.g4d.cz/laserove-skenovani/3d-laserove-skenovani-technologicky-celku>.
- [5] SPSKS. *Technologie skenování ve 3D* [online] [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17600850-Spsks-cz-technologie-skenovani-ve-3d-zpracovano-v-ramci-projektu-cz-1-07-3-2-10-04-0024-financovaneho-z-fondu-eu.html>.
- [6] Scan site. *Engineering Automotive Parts* [online]. [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <http://www.scansite.com/portfolio-items/engineering-automotive-parts/>.
- [7] GD&T Basics – An Introduction. *Sigmetrix* [online]. [cit. 26. 11. 2018]. Dostupné z: <https://www.sigmetrix.com/case-studies-2/gdt-case-studies-and-whitepapers/gdt-basics/>.
- [8] 3D Scanning and Modelling. *Land scope* [online]. [cit. 1.12.2018]. Dostupné na: <https://www.land-scope.com/services/3d-scanning-and-modelling/>.
- [10] 3D Sannern veldschuur tilburh voor architect. *3D Scan voordebouw* [online]. [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <http://3dscanvoordebouw.nl/3D-scanning-projecten/3d-scannen-veldschuur-tilburg/>.
- [11] Mensuro. *Nivelační přístroje, stavební lasery a potrubní lasery* [online]. [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <http://mensuro.cz/>.
- [12] CMFE News. *3D Laser Market* [online]. [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <https://cmfenews.com/3d-laser/>.

- [14] Skenování ve 3D. *3D skenování v archeologii a restaurátorství* [online]. [cit. 26.11.2018]. Dostupné z: <http://www.skenovani3d.cz/skenovani/kde-skener-vyuzit/archeologie/>.
- [15] Hexagon geosystems. *Measure what you treasure: Laser scanning for heritage conservation*. [online]. [cit. 30.11.2018]. Dostupné z: <http://blog.hexagongeosystems.com/measure-what-you-treasure-laser-scanning-for-heritage-conservation/>.
- [16] Absolute geometries. *Redefining the engineering process* [online]. AbsoluteGeometrie.com. [cit. 16.11.2018]. Dostupné z: <http://www.absolutegeometries.com/3D-Scanning.html>.
- [20] SmartCampus. *O projektu SmartCAMPUS ZČU* [online]. [cit. 6.12.2018]. Dostupné z: <https://www.smartcampus.cz/>.
- [22] Leica ScanStation C5. *Scalable Laser Scanner* [online]. Leica Geosystems. [cit. 1.12.2018]. Dostupné z: http://www.leica-geosystems.hu/downloads123/hds/general/ScanstationC5/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_C5_DAT_us.pdf.
- [24] DJI.com. *Mavic 2* [online]. [cit. 13.4.2019]. Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/mavic-2?site=brandsite&from=nav>.
- [25] Alza.cz. *Mavic 2 Pro* [online]. [cit. 2.5.2019]. Dostupné z: <https://cdn.alza.cz/ImgW.ashx?fd=FotoAddOrig&cd=CVI516a90-02&i=1.jpg>.

Ostatní zdroje

- [21] Skupina SmartCampus. *SmartCampus* [prezentace]. Plzeň: ZČU, 2017.
- [23] Letecký předpis: *Pravidla létání L2: číslo jednací 153/2014-220* [online]. [cit. 30.4.2019]. Dostupné z: <https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/index.htm>.