

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kamera Raspberry Pi HQ pro fotogrammetrii

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D

Katedra geomatiky

2022

Andršová Sára

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Andršová Jméno: Sára Osobní číslo: 494220
Zadávající katedra: Katedra geomatiky
Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Kamera Raspberry PI HQ pro fotogrammetrii
Název bakalářské práce anglicky: Raspberry PI HQ camera for photogrammetry
Pokyny pro vypracování:
Určení kalibrace Raspberry PI HQ s objektivem
Otestování možnosti kamery pro metodu SfM
Otestování možnosti využití mobilního mapovacího zařízení skládající se z kamer Raspberry Pi HQ

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 18.02.2022 Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.05.2022
Údaj uveďte v souladu s datem v čase, kdy práci odevzdáte, tj. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

18.02.2022
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá sestavením nového experimentálního zařízení a jeho využitím ve fotogrammetrii z hlediska přesnosti a kvality výstupu. V první části práce lze najít stručný popis fotogrammetrie v dnešním i historickém kontextu. V další části je popsán postup kalibrace kamery pomocí vlčovicových bodů a šachovnice. Následuje tvorba 3D modelu malého objektu pomocí jedné z kamer přístroje a porovnání téhož modelu vytvořeného kamerou mobilního telefonu. V samotném závěru je porovnána přesnost geodetického zaměření a fotogrammetrického vyhodnocení.

Klíčová slova

3D model, fotogrammetrie, kamera Raspberry Pi HQ, Agisoft Metashape Pro, kalibrace

Abstract

This bachelor thesis deals with the assembly of new experimental equipment and its use in photogrammetry in terms of accuracy and quality of output. In the first part of the work you can find a brief description of photogrammetry in today's and historical context. The next section describes the procedure of camera calibration using control points (coded targets) and a chessboard. This is followed by the creation of a 3D model of a small object using one of the cameras of the device and a comparison of the model created by a mobile phone camera. In the end, the accuracy of geodetic survey and photogrammetric evaluation is compared.

Key words

3D model, photogrammetry, camera Raspberry Pi HQ, Agisoft Metashape Pro, calibration

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „*Kamera Raspberry Pi HQ pro fotogrammetrii*“ jsem vypracovala samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Vyskočila, Ph.D a za využití zdrojů, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne

Sára Andršová

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D a Ing. Davidu Zahradníkovi za cenné rady, připomínky a ochotu při vedení bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat prof. Dr. Ing. Karlu Pavelkovi za poskytnutí odborných rad a poskytnutí odborné literatury.

Obsah

1	ÚVOD	1
2	REŠERŠE	2
3	FOTOGRAMMETRIE	4
3.1.	ZÁKLADY FOTOGRAMMETRIE	4
3.1.1.	<i>Prvky vnitřní orientace</i>	4
3.1.2.	<i>Prvky vnější orientace</i>	5
3.2.	ROZDĚLENÍ FOTOGRAMMETRIE	6
3.2.1.	<i>Podle polohy stanoviska</i>	6
3.2.2.	<i>Podle počtu snímků</i>	7
3.2.3.	<i>Podle vyhodnocení snímku</i>	8
3.2.4.	<i>Podle typu výstupu</i>	9
4	KAMERA RASPBERRY PI HQ	10
4.1.	SESTAVENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MAPOVACÍHO ZAŘÍZENÍ	10
4.1.1.	<i>Kovový stojan</i>	11
4.1.2.	<i>GNSS</i>	11
4.1.3.	<i>Chipset Raspberry Pi 4 Model B</i>	11
4.1.4.	<i>Multi Camera Board V2.2</i>	12
4.1.5.	<i>Objektivy Arducam</i>	13
4.1.6.	<i>Kamery Raspberry Pi HQ</i>	13
4.1.7.	<i>Zdrojový kód pro pořízení fotografií</i>	14
4.1.8.	<i>Shrnutí sestavení experimentálního zařízení</i>	15
4.2.	KALIBRACE KAMERY	16
4.2.1.	<i>Použitý software</i>	16
4.2.2.	<i>Kalibrace pomocí šachovnice</i>	17
4.2.3.	<i>Kalibrace pomocí vřícovacích bodů</i>	18
4.2.4.	<i>Parametry kamery získané kalibrací</i>	20
4.2.5.	<i>Výsledné hodnoty kalibrací</i>	20
4.2.6.	<i>Shrnutí kalibrace</i>	23
4.3.	TVORBA 3D MODELU.....	24
4.3.1.	<i>Tvorba 3D modelu kamerou Raspberry Pi HQ</i>	25
4.3.2.	<i>Tvorba 3D modelu kamerou mobilního telefonu</i>	28
4.3.3.	<i>Porovnání 3D modelů</i>	31
4.4.	POROVNÁNÍ PŘESNOSTI	32
4.4.1.	<i>Geodetické měření</i>	32
4.4.2.	<i>Fotogrammetrické vyhodnocení</i>	33
4.4.3.	<i>Zpracování dat</i>	34
5	ZÁVĚR	40
6	DOSLOV	41
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	42
	SEZNAM OBRÁZKŮ	43
	SEZNAM TABULEK	44
	SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH	45

1 Úvod

V současné době je fotogrammetrie intenzivně využívanou částí oboru geodézie, a to i přes stále se vyvíjející klasické i netradiční metody měření, přístroje a postupy. Blízká fotogrammetrie má své výhody například v cenově dostupnějších zařízeních a dostupných softwarech oproti laserovému skenování. I přes tento fakt je finanční náročnost pro pořízení profesionálního softwaru i hardwaru znatelná. Z pohledu uživatele je hlavní výhodou dostupnost snímacího zařízení ve formě digitálních fotoaparátů, případně již i mobilních telefonů s vestavěnou kamerou, kterými lze snadno a rychle pořídit snímky, a následně z nich vytvořit 3D model blízkých objektů. Z tohoto důvodu je cílem této práce sestavení experimentálního mapovacího zařízení, skládajícího se ze čtyř kamer Raspberry Pi HQ. Na tyto kamery budou umístěny čtyři širokoúhlé objektivy s proměnlivou ohniskovou vzdáleností. Rozmístění kamer bude nastaveno tak, aby byl snímán 360° úhel záběru.

V úvodní části této práce budou popsány základy fotogrammetrického měření, metody fotogrammetrie a vyhodnocení fotografických snímků.

V další kapitole bude popsána kalibrace kamery Raspberry Pi HQ. Pro začínající uživatele software Agisoft Metashape Pro bude provedena ukázková zkušební kalibrace mobilního telefonu a dále bude provedena kalibrace čtyř kamer testovaného zařízení.

Dalším cílem práce je tvorba 3D modelu malého objektu ze snímků z mobilního telefonu a z jedné z kamer Raspberry Pi HQ a následné porovnání těchto modelů.

Pro otestování možnosti reálného využití mapovacího zařízení bude porovnávána přesnost vyhodnocených souřadnic vlíčovacích bodů, které budou určeny geodetickým měřením a fotogrammetrickým vyhodnocením. Body budou umístěny v laboratoři geodézie, nacházející se na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze,

Při splnění požadovaných podmínek přesnosti do 14 cm by mohlo být toto zařízení použitelné v praxi.

2 Rešerše

Při vyhledávání prací s podobným tématem nalezeny závěrečné práce, které inspirovaly tuto bakalářskou práci a které jsou dále uvedeny.

Rekonstrukce 3D tvaru movitého předmětu zvolenou technikou

Tato bakalářská práce z roku 2016 od autorky Hany Kubíčkové (Západočeská univerzita v Plzni) se zabývá porovnáním dvou způsobů sběru dat. Autorka se zabývá sběrem dat pomocí laserového skenování a pomocí neměřické komory za využití metody Structure from Motion. Dále je v práci popsán postup zpracování dat v programech Meshlab a Agisoft PhotoScan. Na závěr jsou výsledné 3D modely porovnány na základě objemů a na základě porovnání v programu CloudCompare.

Vývoj nízkonákladového GNSS zařízení

Tato diplomová práce z roku 2019 od autora Bc. Štěpána Hodíka (Fsv ČVUT v Praze) se zabývá vývojem aplikace pro sestavené GNSS zařízení. Autor se v této diplomové práci zabývá Globálními navigačními satelitními systémy, metodami měření polohy, a především vývojem aplikace GNSS Kontrolér jejímž hlavním úkolem je zobrazení, vizualizace a ukládání dat, které vysílá GNSS přijímač. Dále je zde ukázáno, jaký hardware a software autor použil pro sestavení vlastního GNSS zařízení a porovnání s jinými GNSS zařízeními.

Před sestavením experimentálního zařízení byla vyhledána zařízení fungující na podobném principu. Bylo nalezeno zařízení Trimble V10 Imaging Rover a Leica Pegasus: Backpack.

Trimble V10 Imaging Rover

Zařízení, které slouží k pozemnímu snímkování, se skládá celkem z dvanácti kamer, z nichž je sedm kamer panoramatických a pět kamer spodních. Zařízení lze kombinovat s 360° hranolem Trimble a s GNSS přijímačem Trimble R10. Tento rover umožňuje nasnímání a uložení panoramatického snímku, včetně reálného náhledu a dokumentace situace.



Obr. 1 – Příklad Trimble V10 Imaging Rover^[1]

Leica Pegasus: Backpack

Mobilní mapovací systém, který je umístěn v batohu, slouží k pozemnímu snímkování. Skládá se celkem z pěti kamer, které jsou schopny snímat 360° úhel pohledu, a také ze dvou LiDAR senzorů, které umožňují měření hloubky obrazu. Dále umožňuje efektivní dokumentaci a zachycení situace.



Obr. 2 – Příklad Leica Pegasus Backpack^[2]

3 Fotogrammetrie

V této kapitole budou přiblíženy základy fotogrammetrie, rozdělení fotogrammetrie a metody fotogrammetrického vyhodnocení snímků. Jednotlivé druhy fotogrammetrie se od sebe mohou výrazně lišit časovou a finanční náročností nebo způsobem zpracování a využitelností.

3.1. Základy fotogrammetrie

Slovo fotogrammetrie je složeno ze tří řeckých slov – photos (světlo), gramma (záznam) a metron (měřit). *Fotogrammetrie je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu.*^[3]

Fotografický snímek je středovým průmětem zobrazovaného předmětu. Podklady, které jsou potřeba pro další zpracování, jsou snímek, který je zdrojem informací, ze kterého budeme čerpat, geodetické souřadnice vlíčovacích bodů a prvky vnitřní (viz Obr. 3) a vnější orientace (viz Obr. 4).

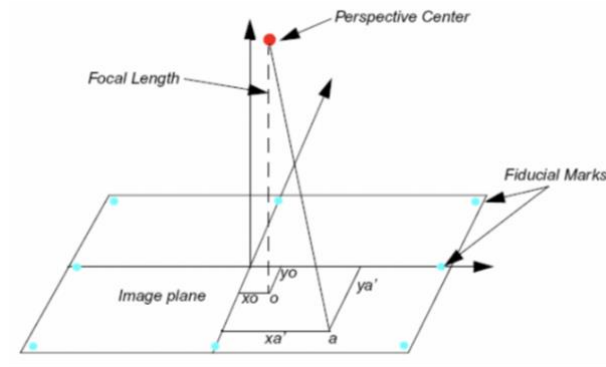
3.1.1. Prvky vnitřní orientace

Prvky vnitřní orientace přesně definují polohu středu promítání vzhledem k rovině snímku. Prvky vnitřní orientace by měly být dopředu známy a umožňují rekonstruovat trs paprsků, který v okamžiku expozice vytvořil měřický snímek. Pro umístění trsu paprsků v prostoru definovanému vůči požadovanému geodetickému systému souřadnic je nutné znát ještě prvky tzv. vnější orientace.^[4]

Prvky vnitřní orientace se určují kalibrací kamer. Prvky vnitřní orientace se rozumí:

- a) konstanta komory f ,
- b) poloha hlavního bodu H' ,
- c) dodatečně u neměřických kamer znalost průběhu distorze objektivu.

Konstantou komory se rozumí vzdálenost mezi středem promítání a hlavním bodem snímku H' . Polohou hlavního bodu se rozumí průsečík hlavního paprsku s obrazovou rovinou. Distorzí objektivu se rozumí deformace obrazu, způsobená zbytkovými optickými vadami objektivu.



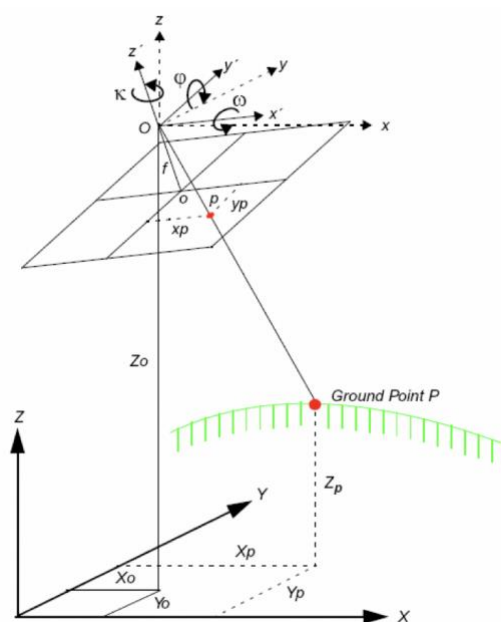
Obr. 3 – Prvky vnitřní orientace [4]

3.1.2. Prvky vnější orientace

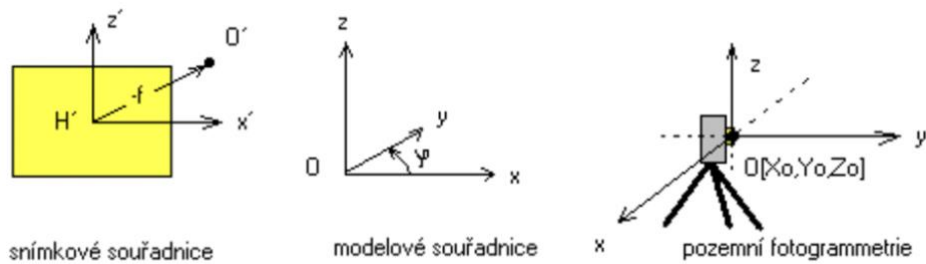
Prvky vnější orientace určují polohu snímacího systému v prostoru. Určení vnější orientace snímku za pomoci vlíčovacích bodů je tedy založena na procesu prostorového protínání zpět. Po vypočtení prvků vnější orientace dvou a více snímků a vytvoření modelu je potom možno určovat polohu podrobných bodů prostorovým protínáním vpřed. Prvky vnější orientace se určují v dnešní době početně.[4]

Mezi prvky vnější orientace patří:

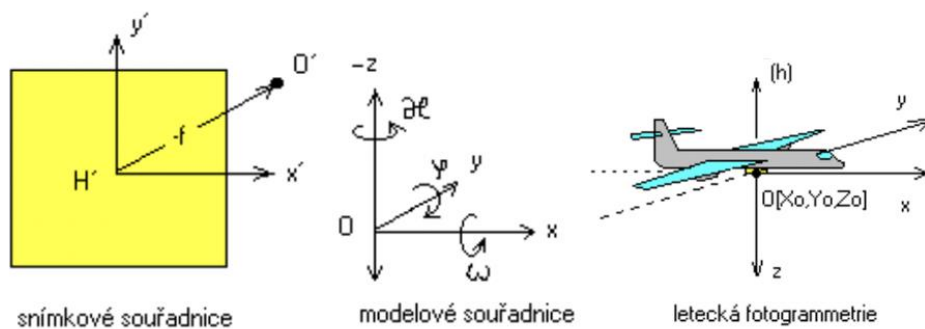
- a) prostorové souřadnice vstupní pupily (X_0, Y_0, Z_0),
- b) příčný sklon ω ,
- c) podélný sklon φ ,
- d) pootočení snímku ve vlastní rovině χ .



Obr. 4 – Prvky vnější orientace [4]



Obr. 5 – Prvky vnitřní a vnější orientace pro pozemní fotogrammetrii [3]



Obr. 6 – Prvky vnitřní a vnější orientace pro leteckou fotogrammetrii [3]

3.2. Rozdělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie se dělí podle:

- a) polohy stanoviska,
- b) počtu snímků,
- c) vyhodnocení snímku,
- d) typu výstupu.

3.2.1. Podle polohy stanoviska

Podle polohy stanoviska se fotogrammetrie dělí na:

- a) pozemní,
- b) letecká.

3.2.1.1. Pozemní fotogrammetrie

Pozemní fotogrammetrie využívá snímky, pořízené historicky pomocí fototeodolitu, v dnešní době pomocí digitálního fotoaparátu ze stanovisek na povrchu Země. Pořizují se snímky stereoskopické nebo s konvergentními osami záběru pro průsekovou fotogrammetrii. Tyto metody lze využít při dokumentaci historických objektů (fasády, klenby atd.), určování kubatur v dolech atd.

3.2.1.2. Letecká fotogrammetrie

Letecká fotogrammetrie se nejvíce využívá pro vyhotovení map, digitálního ortofota nebo pro mapování při pozemkových úpravách. Snímací komora systematicky pořizuje s překrytem snímanou oblast a může být umístěna na různých leteckých prostředcích (např. letadlo, vrtulník, dron). Nevýhodou je náročnější určení prostorové polohy záznamového zařízení (kamery), které se pohybuje společně s dopravním prostředkem, na kterém je umístěna. Působí na něj vnější vlivy, kterými mohou být např. náklon, natočení.

3.2.2. Podle počtu snímků

Podle počtu snímků dělíme fotogrammetrii na:

- a) jednosnímková fotogrammetrie,
- b) vícesnímková fotogrammetrie.

3.2.2.1. Jednosnímková fotogrammetrie

Jednosnímková fotogrammetrie zpracovává jednotlivé snímky do podoby fotoplánu. Tuto metodu fotogrammetrie lze využít pouze pro rovinné útvary. Z jednosnímkové fotogrammetrie lze získat pouze rovinné souřadnice. Historicky se snímky zpracovávaly pomocí překreslovače, v dnešní době se využívá digitální překreslování. Výsledkem pozemní jednosnímkové fotogrammetrie je fotoplán, fotomapa či fotomozaika.

Výsledkem letecké jednosnímkové fotogrammetrie je fotoplán, který může být využit pro tvorbu polohopisné složky mapy v rovinatém terénu.

3.2.2.2. Vícesnímková fotogrammetrie

Vícesnímková fotogrammetrie využívá alespoň dva snímky, které se musí částečně překrývat. Ze dvou a více se překrývajících snímků, pořízených z různých stanovisek, lze získat prostorové souřadnice podrobných bodů na snímcích. Vícesnímková pozemní fotogrammetrie se dělí na průsekovou fotogrammetrii a stereofotogrammetrii. Při průsekové fotogrammetrii je objekt fotografován s konvergentními osami záběrů. Při stereofotogrammetrii je objekt fotografován vždy dvojicí snímků, jejichž osy záběru musí být přibližně rovnoběžné. Výsledkem vícesnímkové fotogrammetrie je obecně fotogrammetrický 3D model, ze kterého lze získat polohopis, výškopis nebo ortofoto.

Moderní metodou vícesnímkové fotogrammetrie je technologie Structure from Motion (SfM), která je schopna zpracovávat snímky s různými osami záběru (nemusí být rovnoběžné). Nerovnoběžnost os záběru je následně řešena při postprocessingu. Řešení spočívá v seřazení snímků a možnosti výpočtu prvků vnitřní a vnější orientace pomocí svazkového vyrovnání.

3.2.3. Podle vyhodnocení snímku

Podle vyhodnocení snímku dělíme fotogrammetrii na:

- a) analogová,
- b) analytická,
- c) digitální.

3.2.3.1. Analogové vyhodnocení snímku

Analogová metoda funguje na principu rekonstrukce stavu okamžiku pořízení snímku. Po nastavení situace v okamžiku pořízení snímku lze vytvořit model a z něj odečítat modelové 3D souřadnice. Rekonstrukce stavu probíhá na speciálních vyhodnocovacích přístrojích, do kterých je fyzicky vložen vyhodnocovaný snímek. Dnes se již nevyužívá.

3.2.3.2. Analytické vyhodnocení snímku

Analytická metoda využívá analytické vyhodnocovací stroje s počítačem. V zařízení jsou odečítány modelové souřadnice na snímcích, které jsou poté převáděny pomocí transformace na geodetické souřadnice.

3.2.3.3. Digitální vyhodnocení snímku

Digitální metodu nelze řešit bez počítače. Snímkové souřadnice měříme na obrazovce. Vstupem je přímo pořízený digitální snímek nebo digitalizovaný analogový záznam. Pomocí transformace, která probíhá na počítači, jsou snímkové souřadnice transformovány na geodetické souřadnice. Při složitějších zpracováních je nutný specializovaný software a hardware. Toto vyhodnocení je hlavním problémem fotogrammetrie v dnešní době z důvodu finanční náročnosti.

Digitální postupy využívají metodu obrazové korelace. Jedná se o automatický vyhodnocovací postup, který pracuje na principu nalezení polohy odpovídajících si bodů na dvou a více snímcích. Principem je korelační analýza, což je vyhledávací algoritmus, který hledá maxima korelační funkce pro bod v jednom snímku ku vyhledávacímu okolí v druhém snímku ^[5].

3.2.4. Podle typu výstupu

Při použití fotogrammetrie je možné získat:

- a) grafický výstup,
- b) číselný výstup.

3.2.4.1. Grafický výstup

Grafický výstup je výsledek graficky vyhodnocený pomocí vyhodnocovacích přístrojů na kreslícím stole. Vyhodnocením lze získat například polohopisnou složku mapy. Zpracování bývalo rychlejší, ale dále početně nevyužitelné, needitovatelné.

3.2.4.2. Číselný výstup

Číselný výstup využívá záznam informace pomocí čísel. Může jím být vektorový nebo rastrový soubor. Oproti grafickému výstupu lze s číselným výstupem výhodně dále pracovat. Výhodou číselného výstupu je možnost editace, ukládání a přenosu dat.

4 Kamera Raspberry Pi HQ

4.1. Sestavení experimentálního mapovacího zařízení

Přístroj byl sestaven za účelem využití v oboru fotogrammetrie, konkrétně jako mobilní mapovací zařízení. Hlavní výhodou zařízení je možnost snímání 360° úhlu záběru. Dalším významným benefitem je určování polohy v reálném čase metodou GNSS (Global Navigation Satellite System). Určování polohy je zajištěno GNSS modulem a anténou, které jsou součástí zařízení. V budoucnu může být tento přístroj využit jako autonomní mapovací zařízení.

Zařízení je sestaveno z následujících komponentů: z kovového stojanu s tyčí, na kterém je zařízení upevněno, GNSS (u-blox a anténa), které určují polohu v reálném čase, z počítače Raspberry (chipset Raspberry Pi 4 Model B, modul Multi Camera Board V2.2), a čtyř kamer Raspberry Pi HQ se čtyřmi širokoúhlými objektivy Arducam.

Přístroj byl sestaven v laboratoři katedry geomatiky na Fakultě stavební ČVUT v Praze s pomocí Ing. Davida Zahradníka. Cílem bylo sestavit zařízení, které umožňuje snímat svou polohu a zároveň pořizovat snímky s 360° úhlem záběru, ze kterých je možné vytvořit prostorový model.



Obr. 7 – Sestavené zařízení

4.1.1. Kovový stojan

Jedná se o kovovou podložku s tyčí. Podložka slouží k upevnění přístroje, aby nedocházelo ke změně polohy při měření. Kovová tyč slouží k uchycení jednotlivých částí, ze kterých je zařízení složeno. Na vrchu tyče se nachází GNSS přijímač.

4.1.2. GNSS

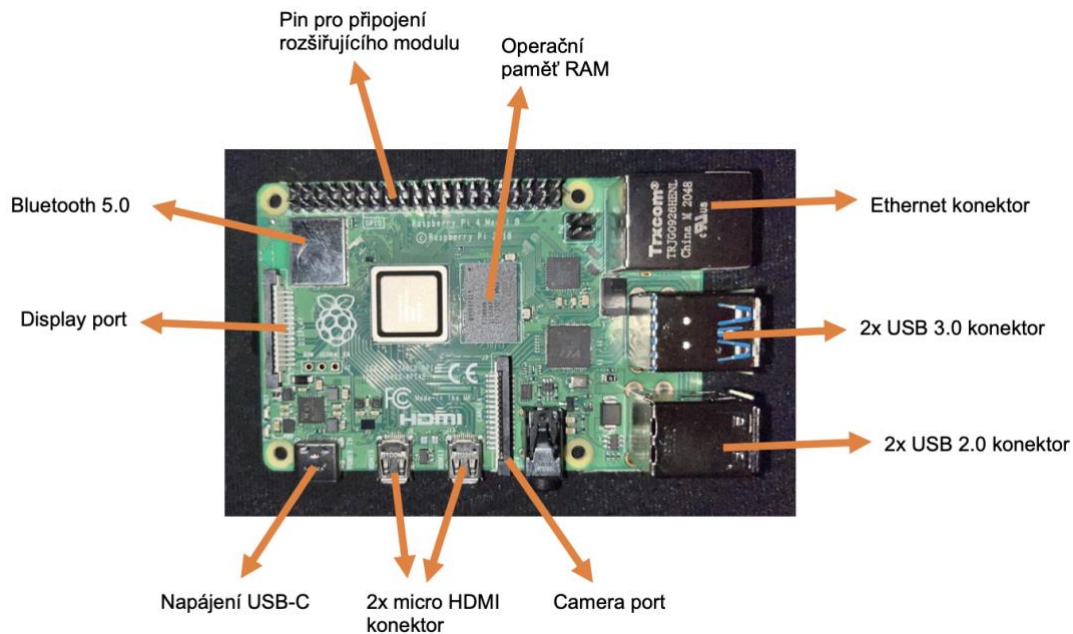
Součástí zařízení je GNSS modul u-blox Zed-F9P a anténa u-blox ANN-MB, které určují polohou v reálném čase metodu Real Time Kinematic. GNSS modul je schopen přijímat signál z družic Galileo, GLONASS, GPS a BeiDou. Ovládání GNSS je zajištěno pomocí mobilní aplikace GNSS Kontrolér, vytvořené v rámci diplomové práce Ing. Štěpána Hodíka v roce 2019.

Další důležitou částí aplikace je funkcionalita tzv. NTRIP Klienta, která uživateli poskytuje možnost přihlášení k poskytovateli korekcí skrze internetové připojení a následně tyto korekce zasílat do GNSS přijímače. Tato funkce má zcela zásadní vliv na přesnost určení polohy, jelikož můžeme využívat metod diferenčního měření DGNSS (modul NEO-M8T) a RTK (modul NEO-M8P).^[6]

4.1.3. Chipset Raspberry Pi 4 Model B

Jedná se o čipovou sadu od firmy Raspberry, plnící funkci hlavního počítače, který ovládá kamery a čte data z GNSS zařízení. Velikostně odpovídá přibližně kreditní kartě. Základem je čtyřjádrový procesor ARM Cortex-A72 o frekvenci 1.5GHz. Operační paměť RAM má velikost 2 GB, což je pro toto využití dostačující. Konektivita zařízení je zajištěna pomocí 2x USB 2.0 konektorů a 2x USB 3.0 konektorů, pomocí nichž lze propojit čip s periferiemi (klávesnice, myš).

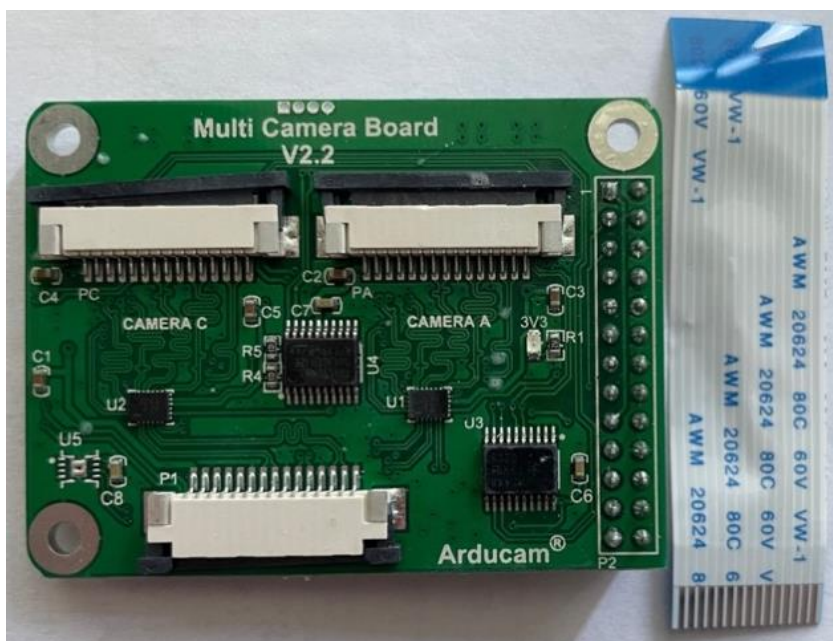
Dále je součástí chipsetu 2x micro HDMI konektor pro připojení dalších periferií. Napájení je zajištěno buď přes USB-C konektor nebo přes GPIO header. V tomto případě je využito napájení pomocí USB-C konektoru. Připojení k internetu je zajištěno pomocí Wi-Fi přijímače nebo pomocí Gigabit Ethernet konektoru. Další jednotlivé části jsou popsány na obrázku 8.



Obr. 8 – Chipset Raspberry Pi 4 Model B

4.1.4. Multi Camera Board V2.2

Standardní chipset Raspberry Pi 4 Model B umožňuje připojení pouze jedné kamery. Rozšiřující modul Multi Camera Board V2.2 zajišťuje připojení celkem až čtyř kamer. Nevýhodou modulu je, že kamery nelze spouštět najednou, ale pouze postupně. Je plně kompatibilní s použitým chipsetem.



Obr. 9 – Multi Camera Board V2.2

4.1.5. Objektivy Arducam

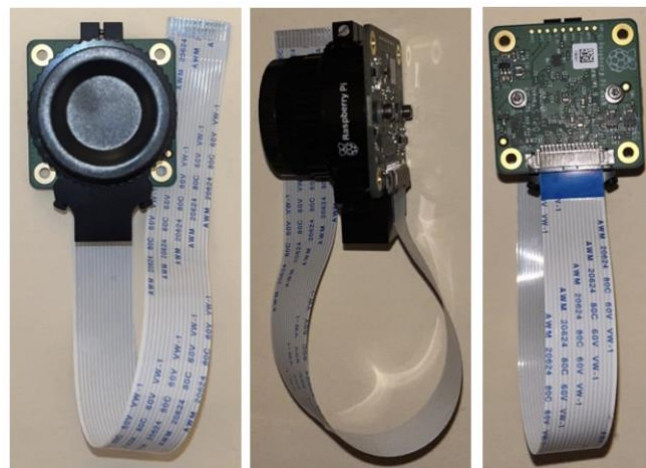
Pro účely této bakalářské práce byly použity čtyři varifokální objektivy, tedy objektivy s proměnlivou ohniskovou vzdáleností v rozmezí 2.8 až 12 mm a úhlem záběru v rozmezí 43° až 125°. Minimální ostřicí vzdálenost je 30 cm. Nevýhodou těchto objektivů je proměnlivá ohnisková vzdálenost, která se nedá nastavit u všech objektivů stejně ale jen přibližně. Výhodou, ale i nevýhodou je velký úhel záběru, který není vhodný pro fotogrammetrické zpracování (velké zkreslení na okrajích snímků).



Obr. 10 – Širokoúhlý objektiv Arducam

4.1.6. Kamery Raspberry Pi HQ

Vzhledem k tomu, že je cílem získat úhel záběru 360°, je nutné využít čtyři kamery Raspberry Pi HQ a s nimi čtyři širokoúhlé objektivy. Použití těchto kamer lze zdůvodnit kompatibilitou s počítačem Raspberry Pi 4 Model B. Užívané kamery mají senzor Sony IMX477R s rozlišením 12.3 MPx, velikost pixelu na tomto senzoru je 1.55 μm \times 1.55 μm . Odkaz na popis kamery je uveden v seznamu použité literatury. [7]



Obr. 11 – Kamera Raspberry Pi HQ

4.1.7. Zdrojový kód pro pořízení fotografií

Pro prvotní zaostření a kontrolu zorného pole kamery je použit příkaz, kterým je spuštěno dialogové okno, ve kterém je vidět zorné pole kamery:

```
raspistill -t 0
```

Pro zachycení snímku kamerou je použit příkazový řádek, ve kterém je možnost nastavení názvu fotografického snímku, který je následně uložen ve formátu *.jpg:

```
raspistill -o nazev.jpg
```

Pro automatické postupné pořízení snímků ze čtyř kamer byl použit samostatný skript, který je při pořizování fotografií pouze z adresáře, kde se nachází. Zdrojový kód funguje na principu spuštění jedné kamery, zobrazení zorného pole v dialogovém okně, a následném pořízení snímku, který je uložen do paměti počítače Raspberry. Následuje spuštění druhé kamery, u které je stejným způsobem pořízen a uložen snímek. Takto jsou nasnímány fotografie ze všech čtyř kamer.

Odkaz na zdrojový kód:

https://github.com/ArduCAM/RaspberryPi/blob/master/Multi_Camera_Adapter/Multi_Adapter_Board_4Channel/Multi_Camera_Adapter_V2.2_python/AdapterTestDemo.py

Použitý zdrojový kód:

```
import RPi.GPIO as gp
import os

gp.setwarnings(False)
gp.setmode(gp.BOARD)

gp.setup(7, gp.OUT)
gp.setup(11, gp.OUT)
gp.setup(12, gp.OUT)

def main():
    print('Start testing the camera A')
    i2c = "i2cset -y 1 0x70 0x00 0x04"
    os.system(i2c)
    gp.output(7, False)
    gp.output(11, False)
    gp.output(12, True)
    capture(1)
    print('Start testing the camera B')
```

```

i2c = "i2cset -y 1 0x70 0x00 0x05"
os.system(i2c)
gp.output(7, True)
gp.output(11, False)
gp.output(12, True)
capture(2)
print('Start testing the camera C')
i2c = "i2cset -y 1 0x70 0x00 0x06"
os.system(i2c)
gp.output(7, False)
gp.output(11, True)
gp.output(12, False)
capture(3)
print('Start testing the camera D')
i2c = "i2cset -y 1 0x70 0x00 0x07"
os.system(i2c)
gp.output(7, True)
gp.output(11, True)
gp.output(12, False)
capture(4)

def capture(cam):
    cmd = "libcamera-still -o capture_%d.jpg" % cam
    os.system(cmd)

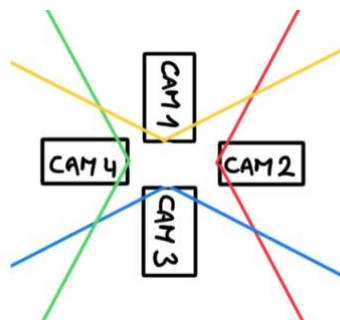
if __name__ == "__main__":
    main()

    gp.output(7, False)
    gp.output(11, False)
    gp.output(12, True)

```

4.1.8. Shrnutí sestavení experimentálního zařízení

Na kovový stojan byly připevněny dřevěné desky, na které byl uchycen počítač Raspberry. Poté byly na stojan umístěny všechny čtyři kamery i s objektivy. Kamery byly následně připojeny k počítači Raspberry pomocí FPC kabelu. Na vrchol stojanu byla umístěna GNSS anténa, která je propojena s GNSS modulem, jenž je uchycen z druhé strany dřevěné desky.



Obr. 12 – Ukázka záběru a překrytu kamer

4.2. Kalibrace kamery

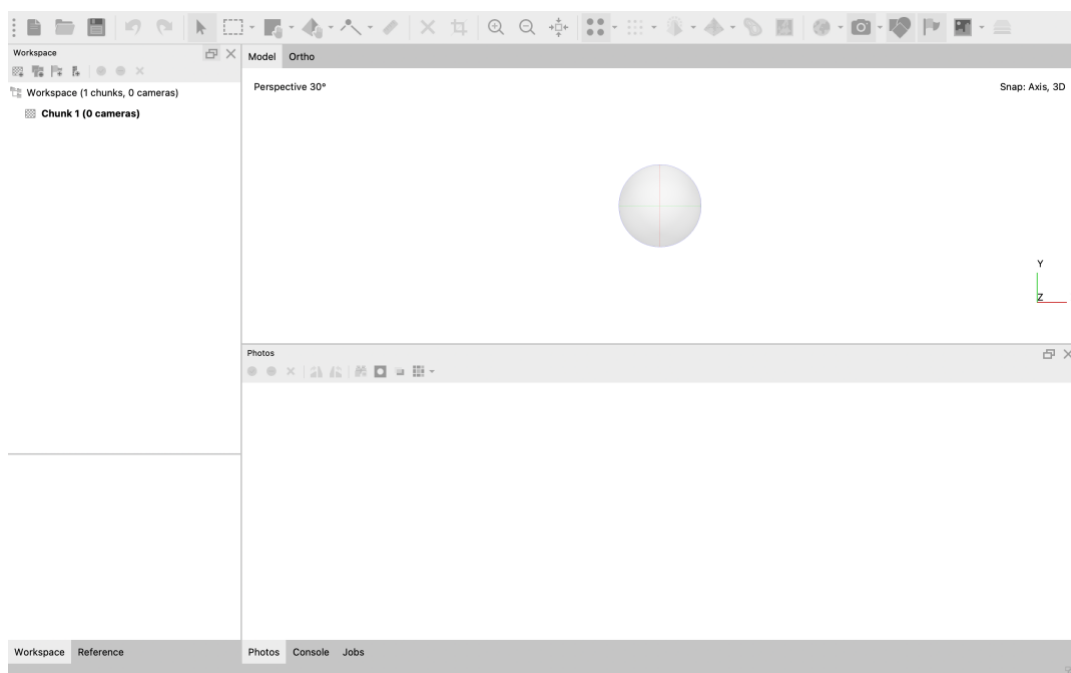
Kalibrací se zde rozumí určení vlastností použitého fotografického přístroje, zejména zjištění jeho prvku vnitřní orientace. Při tomto postupu se určuje: ^[3]

- a) *konstanta komory,*
- b) *poloha hlavního snímkového bodu,*
- c) *radiálně – symetrické zkreslení,*
- d) *tangenciální a asymetrické zkreslení,*
- e) *afinita a nekolmost os souřadnicového systému,*
- f) *a další přídavné parametry.*

Kalibrací kamer se obecně udržuje optika přístroje, chod přístroje a určují se prvky vnitřní orientace.

4.2.1. Použitý software

Pro tuto bakalářskou práci byly využity funkcionality softwaru Agisoft Metashape Professional v. 1.8.1. Agisoft Metashape Pro je program umožňující zpracování fotogrammetrických digitálních snímků a případné následné vytvoření 3D modelu nebo fotoplánu.



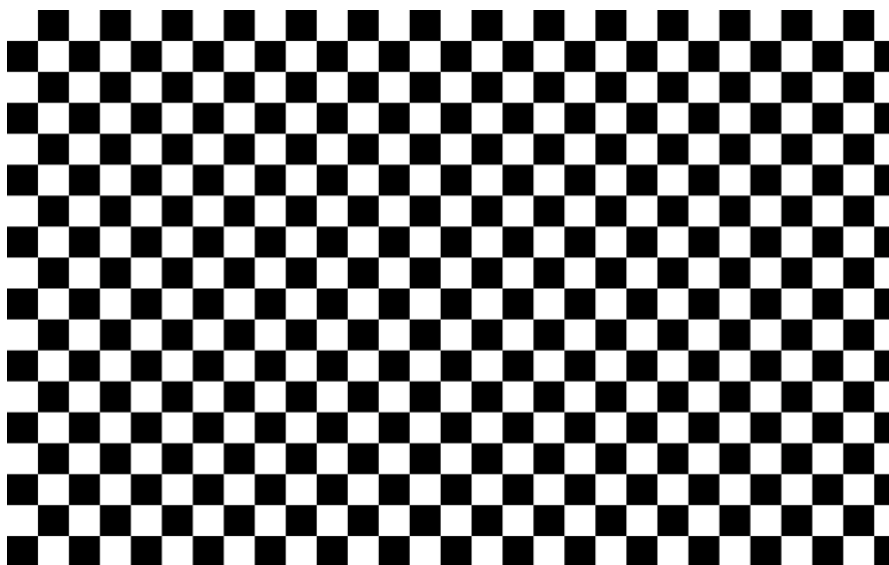
Obr. 13 – Prostředí Agisoft Metashape Professional v. 1.8.1

4.2.2. Kalibrace pomocí šachovnice

Pro prvotní seznámení s prostředím softwaru Agisoft Metashape Pro byla provedena zkušební kalibrace pomocí šachovnice. Nevýhodou kalibrace pomocí šachovnice je umístění bodů v jedné rovině. Kalibrace byla provedena pro kameru v mobilním telefonu Apple iPhone 12 mini 64 GB.

4.2.2.1. Postup kalibrace pomocí šachovnice

- a) V software Agisoft Metashape byla v záložce TOOLS -> LENS -> SHOW CHESSBOARD zobrazena kalibrační deska (šachovnice).
- b) Šachovnice byla nastavena tak, aby počet čtverců na délku i šířku byl větší než deset.
- c) Pro kalibraci jsou potřeba alespoň tři snímky z různých úhlů pohledu.
- d) Výsledné fotografie byly načteny do softwaru.
- e) V záložce TOOLS -> LENS -> CALIBRATE LENS byly zaškrtnuty všechny požadované parametry.
- f) Následovalo odstranění přebytečných bodů (okolní rohy, rohy monitoru atd.).
- g) Z důvodu předešlého odstranění přebytečných bodů bylo potřeba provést svazkové vyrovnání funkcí PROCESS -> OPTIMIZE CAMERAS.
- h) V záložce TOOLS -> CAMERA CALIBRATION v menu ADJUSTED byly zobrazeny vypočtené parametry kamery.
- i) Výsledné parametry kamery lze uložit ve formátu *.txt z důvodu pozdějšího využití.



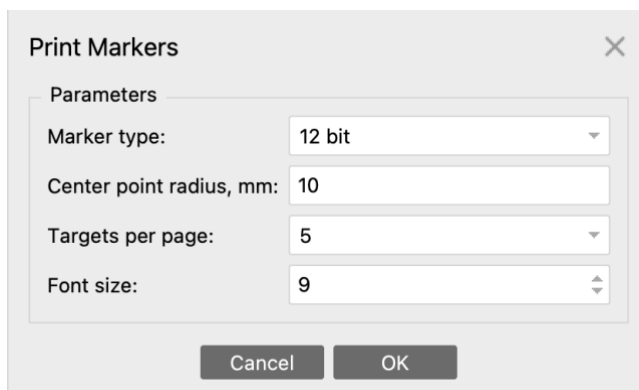
Obr. 14 – Kalibrační deska (šachovnice)

4.2.3. Kalibrace pomocí vlíčovacích bodů

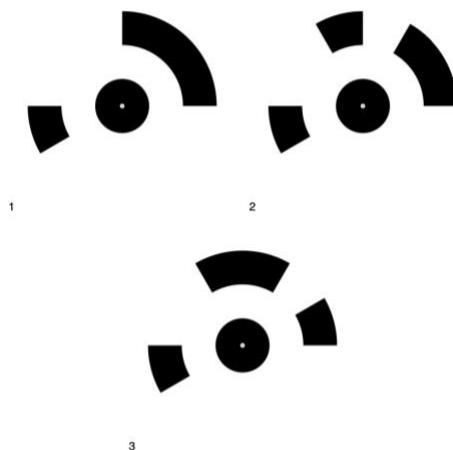
Pro srovnání různých způsobů kalibrace byla provedena kalibrace pomocí vlíčovacích bodů. Tyto body byly generovány v softwaru Agisoft Metashape Pro. Výhodou použití těchto kódových značek je následné zjednodušené zpracování, kdy Agisoft Metashape Pro je schopen rozeznat jednotlivé kódové značky a přiřadit jim jejich správné označení (číslo bodu). Výhodou kalibrace pomocí vlíčovacích bodů je možnost prostorového umístění bodů.

4.2.3.1. Postup generování vlíčovacích bodů v softwaru Agisoft Metashape Pro

- a) V záložce TOOLS -> MARKERS -> PRINT MARKERS je otevřeno dialogové okno (viz Obr. 15), kde lze nastavit typ bodů, průměr středu bodu, počet bodů na stranu a velikost čísel kódových značek.
- b) Po stisknutí tlačítka OK se konfigurované vlíčovací body uloží ve formátu *.pdf (viz Obr. 16), které lze následně vytisknout.



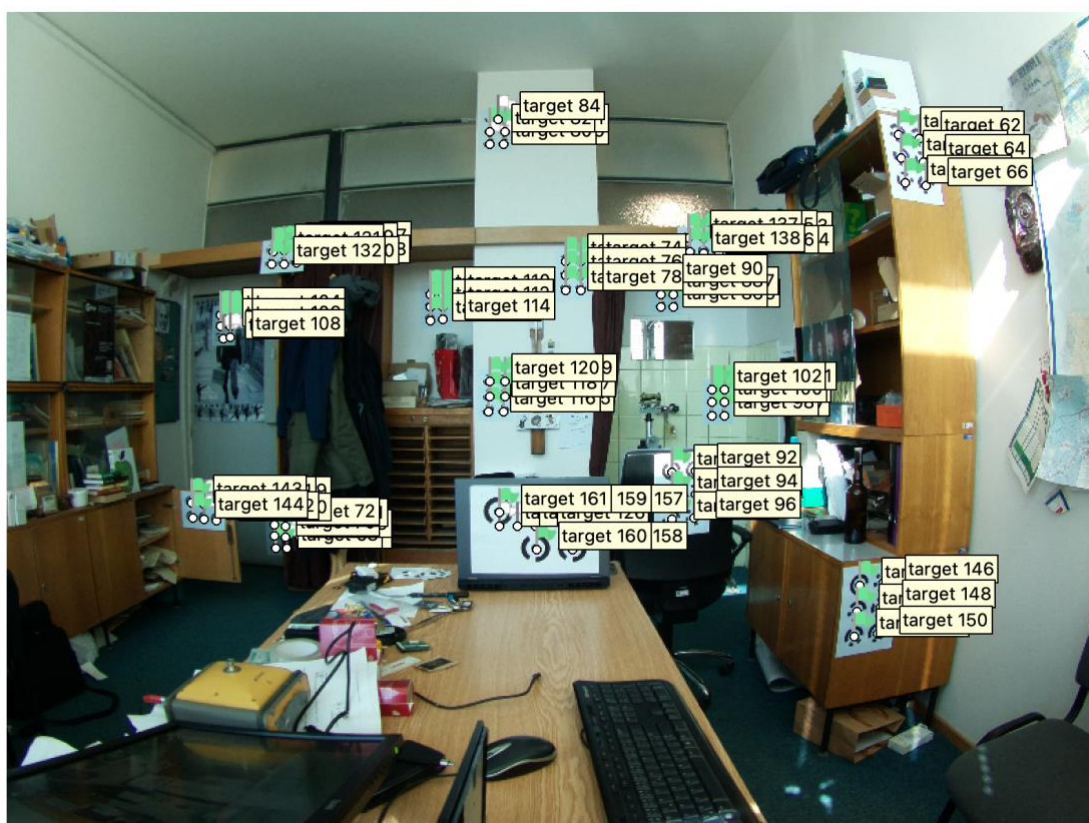
Obr. 15 – Dialogové okno pro generování vlíčovacích bodů



Obr. 16 – Ukázka kódových značek generovaných programem Agisoft Metashape Pro

4.2.3.2. Postup kalibrace pomocí vlíčovacích bodů

- a) Prvním krokem byla generace vlíčovacích bodů v softwaru Agisoft Metashape Pro.
- b) Dalším krokem bylo rozmístění těchto generovaných kódových značek, následné pořízení snímků a načtení těchto snímků do programu.
- c) Ve složce CHUNK pomocí funkce PROCESS -> ALIGN PHOTOS byly seřazeny jednotlivé fotografie a naznačena pozice kamery v okamžicích pořízení jednotlivých snímků.
- d) Funkcí TOOLS -> MARKERS -> DETECT MARKERS byly detekovány kódové značky na jednotlivých snímcích.
- e) V záložce TOOLS -> LENS -> CALIBRATE LENS byly zaškrtnuty všechny požadované parametry.
- f) Následovalo odstranění přebytečných bodů (okolní rohy, rohy monitoru atd.).
- g) Z důvodu předešlého odstranění přebytečných bodů bylo potřeba provést svazkové vyrovnání funkcí PROCESS -> OPTIMIZE CAMERAS.
- h) V záložce TOOLS -> CAMERA CALIBRATION v menu ADJUSTED byly zobrazeny vypočtené parametry kamery.
- i) Výsledné parametry kamery lze uložit ve formátu *.txt z důvodu pozdějšího využití.



Obr. 17 – Ukázka detekování kódových značek v programu Agisoft Metashape Pro

4.2.4. Parametry kamery získané kalibrací

Při kalibraci kamery v softwaru Agisoft Metashape Pro lze výpočtem získat až jedenáct parametrů kamery, kterými jsou ^[8]:

- a) ohnisková vzdálenost f [pixel],
- b) souřadnice hlavního bodu c_x a c_y [pixel],
- c) koeficienty afinity b_1 [pixel],
- d) koeficient neortogonality (zešikmení) b_2 [pixel],
- e) koeficienty radiálního zkreslení/distorze k_1, k_2, k_3, k_4 [bezrozměrná],
- f) koeficienty tangenciálního zkreslení/distorze p_1, p_2 [bezrozměrná].



Obr. 18 – Výstupní parametry z kalibrace kamery

4.2.5. Výsledné hodnoty kalibrací

Pro zkušební kalibraci v programu Agisoft Metashape Pro byla použita kamera mobilního telefonu Apple iPhone 12 mini. Kalibrace byla provedena nejprve pomocí šachovnice a posléze pomocí vlčovicových bodů. Výsledné parametry jsou uvedeny v jednotkách pixel v tabulkách 1 a 2.

f	3082.96632	c_x	22.6936
k_1	0.19229	c_y	-52.5258
k_2	-0.99598	p_1	0.000235104
k_3	2.84208	p_2	-0.000153496
k_4	-3.35177	b_1	1.38
		b_2	-1.34555

Tabulka 1 – Výstupní parametry kalibrace pomocí šachovnice [pix]

f	3066.84687	cx	-30.8365
k1	0.0747815	cy	-22.5346
k2	-0.233649	p1	-0.00720592
k3	-0.412362	p2	0.0018735
k4	1.20787	b1	-4.17039
		b2	-5.30696

Tabulka 2 – Výstupní parametry kalibrace pomocí vlícovacích bodů [pix]

Kalibrace pomocí vlícovacích bodů byla použita při kalibraci kamer Raspberry Pi HQ, které budou dále používány. Nejprve byla zadána velikost pixelu na senzoru, která je pro všechny kamery stejná (viz Tab. 3), do programu Agisoft Metashape Pro a následně byly vypočítány zbylé parametry kamer. Výsledné parametry kamer jsou uvedeny v tabulkách 4 až 7 v jednotkách pixel.

Rozlišení	4056 (H)	3040 (V)	[pix]
Velikost senzoru	6.287(H)	4.712 (V)	[mm]
Velikost pixelu na senzoru	0.00155	0.00155	[mm]

Tabulka 3 – Parametry kamery dané výrobcem

Výstupní parametry z kalibrace pro první kameru:

f	2525.26274	cx	17.2059
k1	-0.394587	cy	46.8728
k2	0.223363	p1	-2.94832e-05
k3	-0.0926647	p2	0.000160457
k4	0.01752	b1	0.000160457
		b2	8.31073

Tabulka 4 – Výstupní parametry první kamery [pix]

Výstupní parametry z kalibrace pro druhou kameru:

f	2519.45837	cx	10.0396
k1	-0.395587	cy	18.1141
k2	0.226001	p1	-1.07541e-05
k3	-0.0951969	p2	-3.61009e-05
k4	0.0183728	b1	-11.2274
		b2	0.847261

Tabulka 5 – Výstupní parametry druhé kamery [pix]

Výstupní parametry z kalibrace pro třetí kameru:

f	2551.0958	cx	3.65007
k1	-0.40238	cy	49.5005
k2	0.240654	p1	0.000173897
k3	-0.107046	p2	-0.000141943
k4	0.0215241	b1	-35.6998
		b2	-2.93727

Tabulka 6 – Výstupní parametry třetí kamery [pix]

Výstupní parametry z kalibrace pro čtvrtou kameru:

f	2451.23385	cx	-2.50924
k1	-0.391707	cy	64.9722
k2	0.217486	p1	0.000151517
k3	-0.0879441	p2	-0.000125016
k4	0.0162329	b1	25.6826
		b2	0.498223

Tabulka 7 – Výstupní parametry čtvrté kamery [pix]

Dále byly přepočítány ohniskové vzdálenosti jednotlivých kamer z pixelů na milimetry.

Kamera	f [pix]	f [mm]
První kamera	2525.26274	3.91
Druhá kamera	2519.46837	3.91
Třetí kamera	2551.09580	3.95
Čtvrtá kamera	2451.23385	3.80

Tabulka 8 – Ohniskové vzdálenosti kamer

4.2.6. Shrnutí kalibrace

Kalibrace pomocí vlíčovacích bodů je výhodnější z důvodu možnosti rozmístění vlíčovacích bodů do prostoru. Rozmístění bodů do prostoru kalibrace pomocí šachovnice neumožňuje, proto se využívá jen pro zjištění přibližných hodnot, které nelze považovat za dostačující. Z tohoto důvodu byla použita kalibrace pomocí vlíčovacích bodů pro všechny čtyři kamery Raspberry se čtyřmi širokoúhlými objektivy.

Vzhledem k proměnlivé ohniskové vzdálenosti objektivů nelze považovat výsledné parametry z jedné kamery jako závazné pro zbylé tři kamery. Proto musely být kamery kalibrovány zvlášť a při následném zpracování budou muset být pro každou kameru uvažovány jiné parametry. Z tohoto důvodu bude nutné při zpracování rozdělit snímky podle kamer, ze kterých budou nasnímány.

Po kalibraci kamer byl vytvořen zkušební 3D model části místnosti, kde byly rozmístěny kódové značky použité při kalibraci kamer.

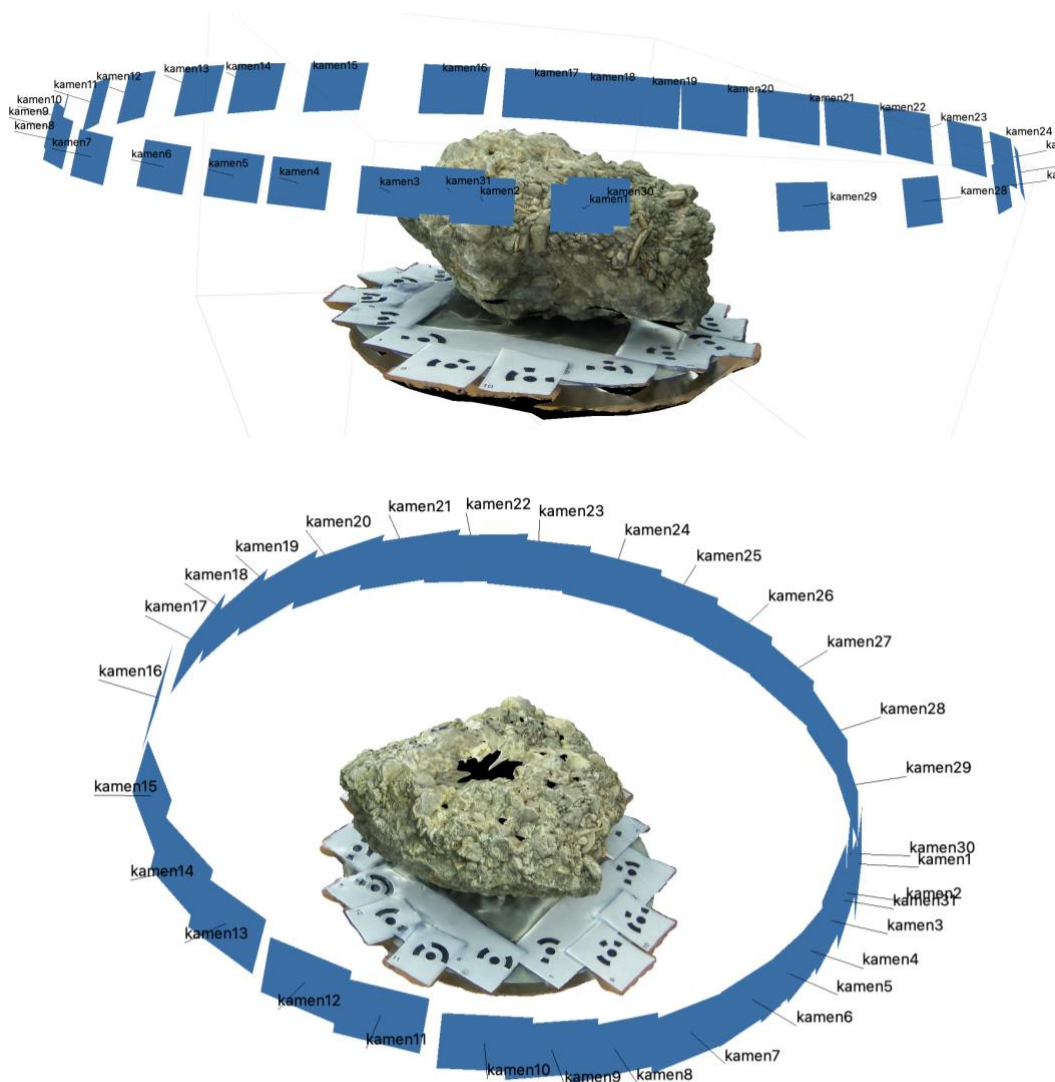


Obr. 19 – Experimentální 3D model z kalibrace kamery

4.3. Tvorba 3D modelu

Prvním cílem bylo porovnání 3D modelu malého objektu (kamene) vytvořeného pomocí kamery Raspberry Pi HQ a kamery mobilního telefonu Apple iPhone 12 mini.

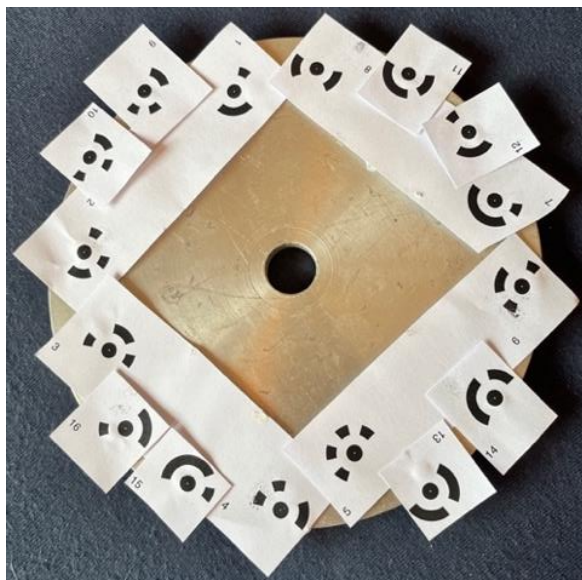
Jako zkušební 3D model byl vybrán menší objekt, v našem případě kámen. Nejprve byl 3D model vytvořen ze snímků z kamery mobilního telefonu a poté jednou kamerou Raspberry. Oba modely byly vyhotoveny v programu Agisoft Metashape Pro. Při tvorbě 3D modelu byla využita metoda obrazové korelace. Snímky byly pořízeny tak, aby byl mezi nimi zajištěn dostatečný překryt (viz Obr. 20). Kamera byla v obou případech na pevném stanovisku a kovová deska spolu s kamenem byla umístěna na točný stativ z důvodu zajištění konstantní vzdálenosti mezi kamerou a objektem.



Obr. 20 – Ukázka polohy stanovisek při fotografování

4.3.1. Tvorba 3D modelu kamerou Raspberry Pi HQ

Nejprve byla vybrána kovová deska, na kterou bylo umístěno šestnáct kódových značek, které byly generovány programem Agisoft Metashape Pro (viz Obr. 21).



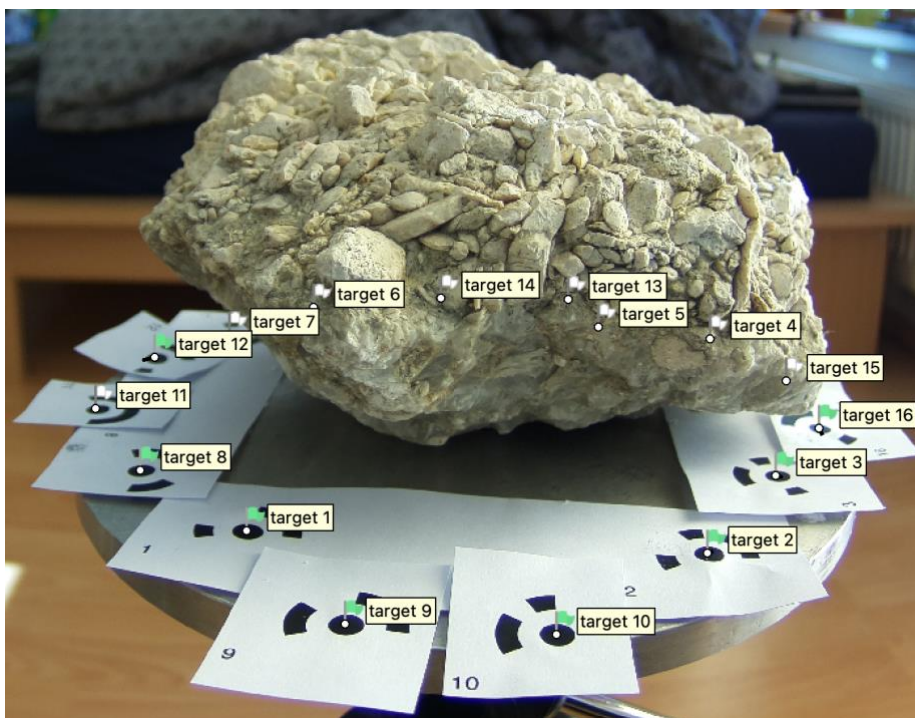
Obr. 21 – Kovová deska s kódovými značkami

Dalším krokem bylo umístění kamene na tuto desku tak, aby byly kódové značky viditelné. Měřítka mezi kódovými značkami je naznačeno v obrázku 24. Následně byl objekt nasnímán ze všech stran z důvodu překrytu mezi jednotlivými snímky. Celkem bylo pořízeno 31 fotografií.



Obr. 22 – Objekt na kovové desce

Do programu bylo načteno 31 snímků, které byly pomocí funkce ALIGN PHOTOS seřazeny. Poté byly detekovány kódové značky pomocí funkce DETECT MARKERS, která rozpozná generované body a přiřadí jim dané číslo (viz Obr. 23). Následovalo zadání oměrných měř mezi těmito body z důvodu zamezení deformace modelu a možnosti posouzení kvality (viz Obr. 24).

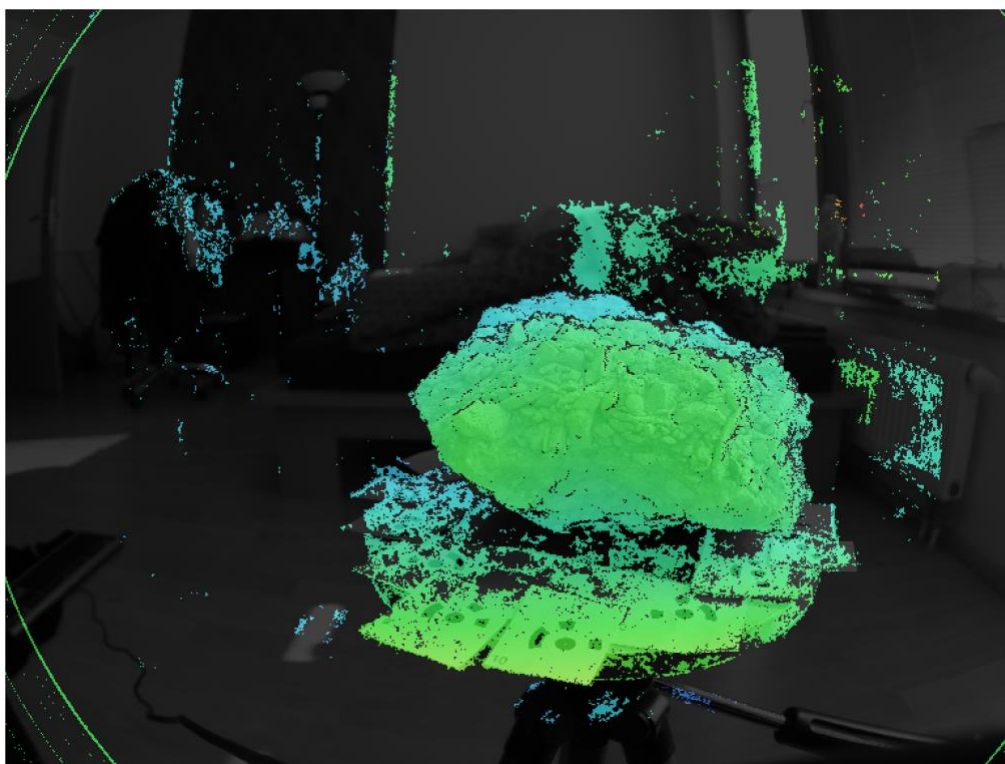


Obr. 23 – Ukázka detekce kódových značek

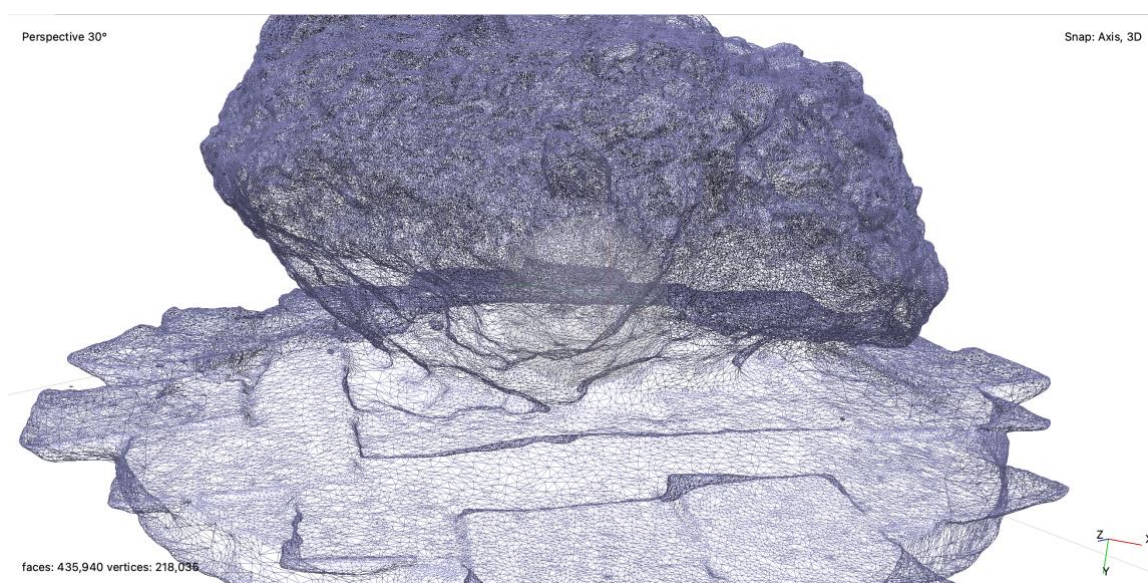
Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
✓ target 1_target 2	0.075000	0.001000	-0.000207
✓ target 3_target 4	0.075000	0.001000	0.000153
✓ target 5_target 6	0.075000	0.001000	-0.000159
✓ target 7_target 8	0.075000	0.001000	-0.000246
✓ target 9_target 10	0.030000	0.001000	-0.000265
✓ target 11_target 12	0.028000	0.001000	0.000734
✓ target 13_target 14	0.035000	0.001000	0.000163
✓ target 15_target 16	0.026000	0.001000	0.000578
Total Error			
Control scale bars			0.000375
Check scale bars			

Obr. 24 – Kontrola měřítka a umístění bodů

Pomocí funkce GRADUAL SELECTION -> IMAGE COUNT byly nalezeny body, které byly zachyceny pouze na jednom snímku, tudíž pro výpočet nebudou dále použity. Funkcí BUILD MESH byla vytvořena hloubková mapa, která je rastrem vyznačujícím informaci o vzdálenosti objektu od fotoaparátu (viz Obr. 25), a polygonová síť, která na základě informací z hloubkové mapy dopočítává mezilehlé body mezi spojovacími body (viz Obr. 26).



Obr. 25 – Ukázka hloubkové mapy



Obr. 26 – Ukázka polygonové sítě

Následoval výpočet textury modelu funkcí BUILD TEXTURE technikou DIFFUSE MAP, která pomocí pixelových informací ze snímků generuje obrazovou informaci modelu. Tímto způsobem byl vypočítán výsledný 3D model kamene (viz Obr. 27).



Obr. 27 – Výsledný 3D model z kamery Raspberry

4.3.2. Tvorba 3D modelu kamerou mobilního telefonu

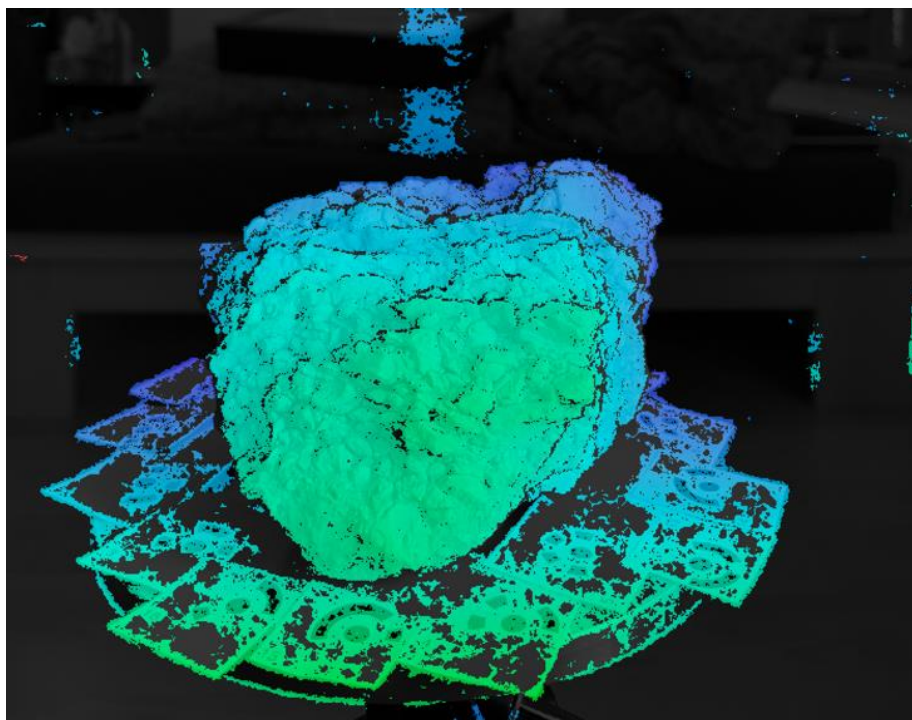
Pro bakalářskou práci byla vybrána kamera mobilního telefonu Apple iPhone 12 mini, kterou byl objekt nasnímán. Z těchto snímků byl vytvořen 3D model. Tento 3D model byl porovnán s modelem nasnímaným kamerou Raspberry Pi HQ. Celkem bylo pořízeno 27 fotografií, které byly následně importovány do programu Agisoft Metashape Pro.

Pomocí funkce ALIGN PHOTOS byly fotografie seřazeny. Funkcí DETECT MARKERS byly detekovány kódové značky generované programem Agisoft Metashape Pro. Ke spojnicím mezi body byly přiřazeny oměrné míry. Tyto míry slouží k přiřazení měřítka a zamezení deformace modelu.

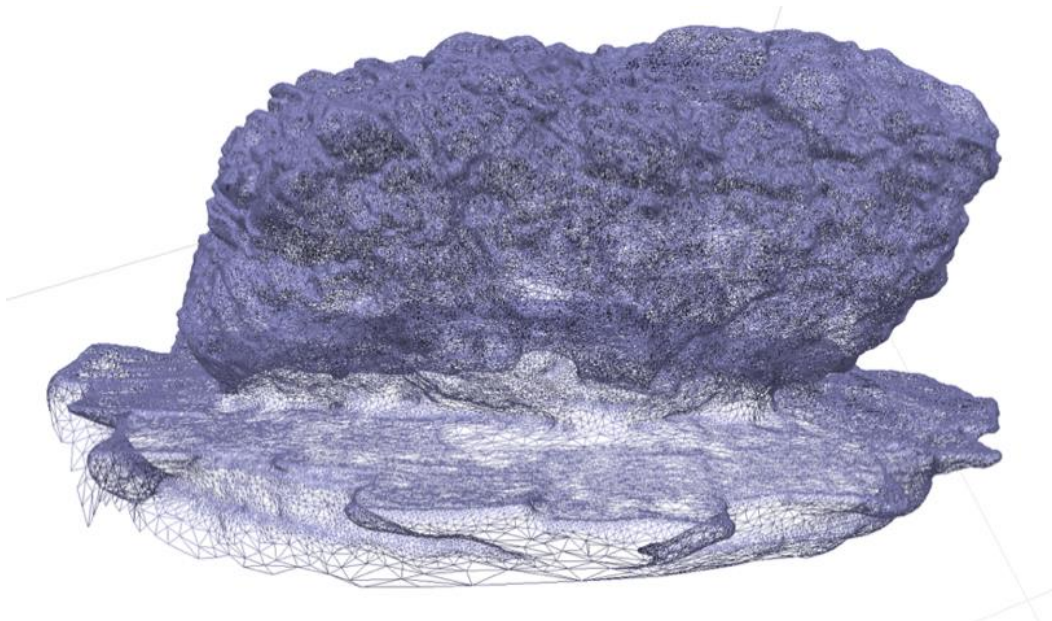
Scale Bars	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)
✓ target 1_target 2	0.075000	0.001000	-0.000100
✓ target 3_target 4	0.075000	0.001000	-0.000020
✓ target 5_target 6	0.075000	0.001000	-0.000147
✓ target 7_target 8	0.075000	0.001000	-0.000126
✓ target 9_target 10	0.030000	0.001000	-0.000212
✓ target 11_target 12	0.028000	0.001000	0.000884
✓ target 13_target 14	0.035000	0.001000	0.000031
✓ target 15_target 16	0.026000	0.001000	0.000414
Total Error			
Control scale bars			0.000362
Check scale bars			

Obr. 28 – Kontrola měřítka a umístění bodů při tvorbě modelu mobilním telefonem

Funkcí GRADUAL SELECTION -> IMAGE COUNT byly nalezeny body, které jsou na snímcích zachyceni pouze jednou, a proto nejsou ve výpočtu dále použity. Následovala tvorba hloubkové mapy pomocí funkce BUILD MESH (viz Obr. 29) a poté následovalo vytvoření polygonové sítě (viz Obr. 30).



Obr. 29 – Ukázka hloubkové mapy při tvorbě modelu mobilním telefonem



Obr. 30 – Ukázka polygonové sítě při tvorbě modelu mobilním telefonem

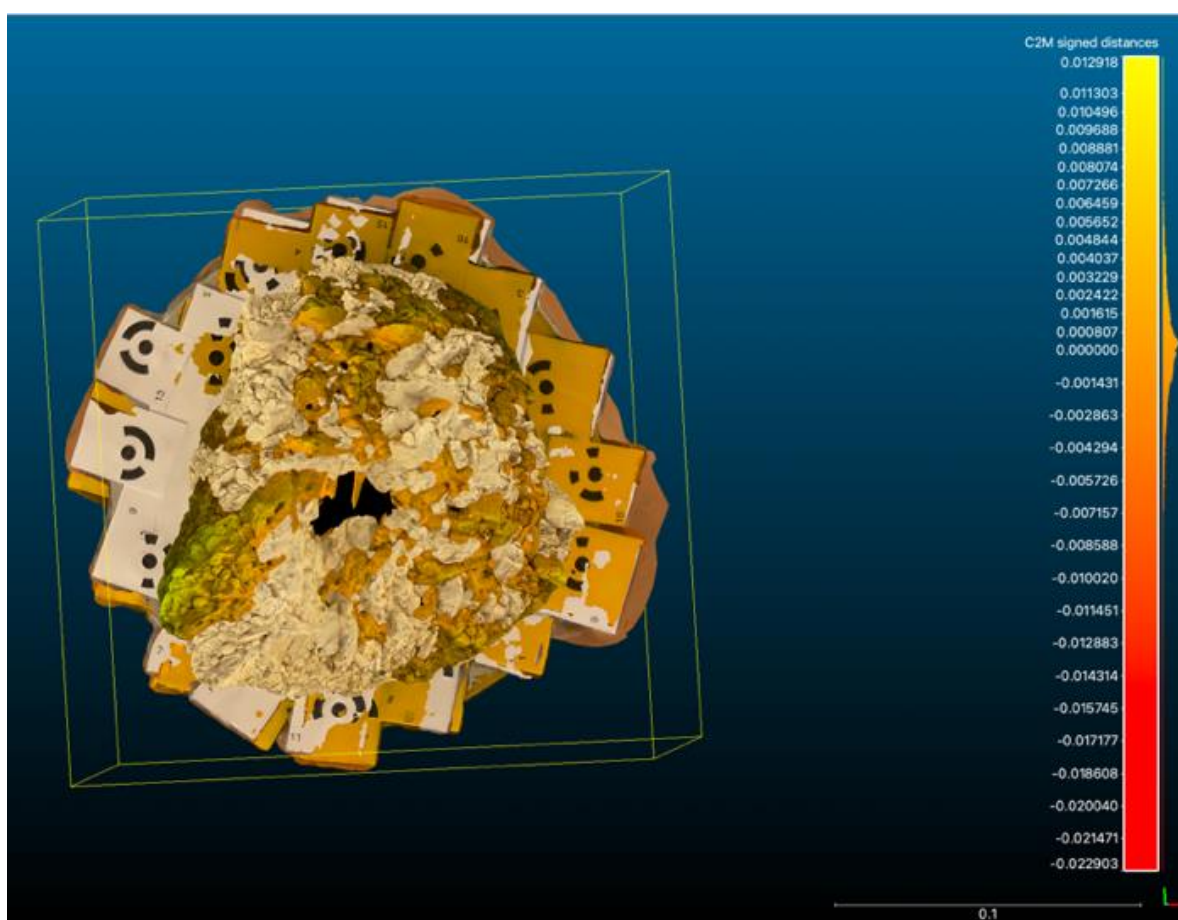
Dále byla generována textura modelu funkcí BUILD TEXTURE technikou DIFFUSE MAP. Tímto byl vypočítán výsledný 3D model kamene vyhotovený z fotografií pořízených mobilním telefonem Apple iPhone 12 mini (viz Obr. 31).



Obr. 31 – Výsledný 3D model z mobilního telefonu

4.3.3. Porovnání 3D modelů

Pro porovnání modelů byl použit software CloudCompare v2.11.1. Nejprve byly modely exportovány ve formátu *.obj z programu Agisoft Metashape Pro. Následovalo načtení těchto modelů do softwaru CloudCompare. Pomocí funkce FINELY REGISTERS ALREADY (ROUGHLY) ALIGNED ENTITIES (CLOUDS OR MESHES) byly automaticky registrovány dvě polygonové sítě. Došlo zde k přesné translaci a rotaci modelů. Funkcí COMPUTE CLOUD/ MESH DISTANCE byly vypočítány vzdálenosti mezi polygonovými sítěmi obou modelů, které ukazují, jak si modely odpovídají (viz Obr. 32). Hodnoty uvedené v barevné škále jsou uvedeny v jednotkách metrů.



Obr. 32 – Výsledné porovnání modelů kamene

4.4. Porovnání přesnosti

Cílem této části bakalářské práce bylo porovnání přesnosti souřadnic bodů měřených polární metodou a souřadnic bodů vyhodnocených fotogrammetricky.

Tato část bakalářské práce bude zaměřena na snímkování objektu z malé základny snímkování, což je v rozporu s metodikou pro fotogrammetrické měření při využití metody Structure from Motion. V tomto případě bylo snímkováno z pevných stanovisek, v podobě pilířů, v laboratoři geodézie katedry geomatiky. Určované body byly rozmístěny na stěnách laboratoře.

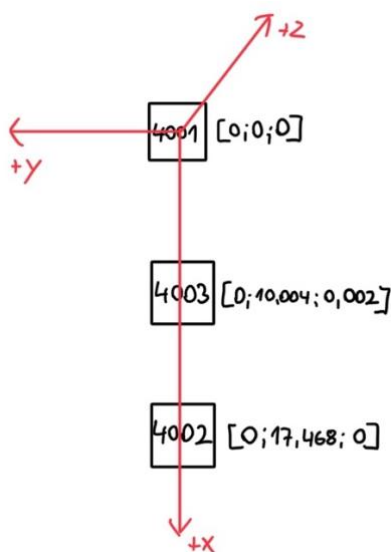
4.4.1. Geodetické měření

Po všech stěnách laboratoře byly rozmístěny kódové značky, které byly generovány z programu Agisoft Metashape Pro. Následně byly tyto body polárně zaměřeny ze tří pevných stanovisek, které se nachází v laboratoři, totální stanicí Leica TCR307 vč.724018. Na každém stanovisku byla provedena nucená centrace a horizontace totální stanice a následně byly měřeny směry a délky na viditelné kódové značky.



Obr. 33 – Totální stanice Leica TCR307

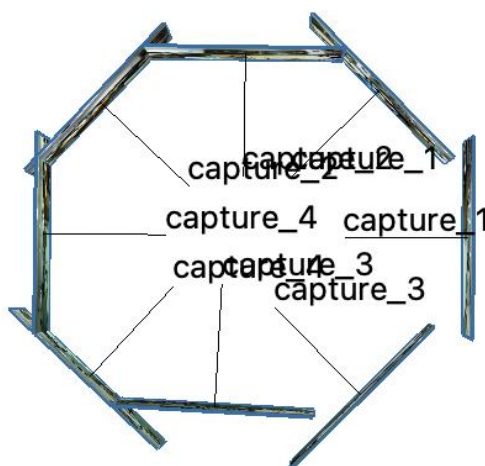
Zápisník měření byl importován ve formátu MAPA2 do programu Groma v.12. Prostorové souřadnice bodů byly vypočteny polární metodou dávkou ze stanovišek č. 4001– 4003 v místním souřadnicovém systému.



Obr. 34 – Náčrt měřické sítě stanovišek a definice souřadnicového systému

4.4.2. Fotogrammetrické vyhodnocení

Přístroj byl nucenou centrací stabilizován na jednotlivých pilířích. Následně byly pořízeny snímky v jedné poloze kamer. Poté byly kamery potočeny a znovu nasnímány fotografie pro zajištění dostatečného překrytu (viz Obr. 35). Tento postup byl opakován celkem na deseti pilířích a bylo pořízeno 80 snímků.



Obr. 35 – Schéma kamer na jednom z pilířů

4.4.3. Zpracování dat

Do programu Agisoft Metashape Pro bylo importováno 80 pořízených snímků. Prvním krokem bylo seskupení snímků podle kamer, ze kterých byly snímky pořízeny. U každé kamery byly nastaveny jednotlivé parametry kalibrace. Typ kamery byl nastaven na FISHEYE z důvodu použití širokoúhlého objektivu. Dále byla nastavena vypočtená velikost pixelu na senzoru a ohnisková vzdálenost v milimetrech, která byla získána z kalibrace kamer.

Pomocí funkce ALIGN PHOTOS byly snímky seřazeny. Následoval import vypočtených souřadnic bodů z totální stanice ve formátu *.txt. Po umístění všech bodů na snímcích bylo znovu provedeno seřazení snímků funkcí ALIGN PHOTOS. OPTIMIZE CAMERAS umožnilo následné svazkové vyrovnání, které upraví parametry kamery podle lokalizace bodů na snímcích.

Posledním krokem byl export referencí vlčovací bodů. Jedná se o výstup obsahující číslo bodu, prostorové souřadnice získané geodetickým měřením, prostorové souřadnice vypočtené programem Agisoft Metashape Pro a rozdíly mezi geodetickými a vypočtenými souřadnicemi. Tyto rozdíly vyjadřují přesnost fotogrammetrického vyhodnocení snímků vůči geodetickému měření (viz Tab. 9 až 11).

	Geodetické měření [m]	Fotogrammetrické vyhodnocení [m]	Rozdíly souřadnic [m]
Číslo bodu	X	X	dX
1	2,4397	2,4449	0,0052
2	-2,8190	-2,8168	0,0022
3	2,4471	2,4450	-0,0021
4	-0,8782	-0,8883	-0,0101
5	2,4373	2,4412	0,0039
6	0,8489	0,8528	0,0039
7	2,4199	2,4234	0,0035
8	-2,8422	-2,8439	-0,0017
10	-0,2567	-0,2615	-0,0048
11	-1,4956	-1,4794	0,0162
12	2,2528	2,2578	0,0050
13	-3,1493	-3,1498	-0,0005
14	2,2507	2,2557	0,0050
15	-2,7834	-2,7836	-0,0002
16	2,0925	2,0969	0,0044
17	0,0992	0,1011	0,0019
18	1,8421	1,8534	0,0113
19	-0,2691	-0,2718	-0,0027
20	-2,8344	-2,8347	-0,0003
21	1,8468	1,8525	0,0057
22	-2,7970	-2,7944	0,0026
23	2,4608	2,4648	0,0040
24	-2,7871	-2,7891	-0,0020
25	-2,8134	-2,8148	-0,0014
26	2,4365	2,4395	0,0030
27	-1,4967	-1,4941	0,0026
28	-2,8091	-2,8053	0,0038
29	-3,1491	-3,1477	0,0014
30	1,7071	1,7165	0,0094
63	-0,8259	-0,8247	0,0012
64	2,4388	2,4411	0,0023
66	-2,8120	-2,8109	0,0011
67	-3,1501	-3,1471	0,0030
68	-3,1488	-3,1510	-0,0022
69	-1,0262	-1,0203	0,0059
70	2,4237	2,4262	0,0025
73	0,6275	0,6244	-0,0031
74	2,4619	2,4684	0,0065
76	0,0196	0,0216	0,0020
77	-2,8419	-2,8447	-0,0028

Tabulka 9 – Ukázka referencí vřícovacích bodů v souřadnici X

	Geodetické měření [m]	Fotogrammetrické vyhodnocení [m]	Rozdíly souřadnic [m]
Číslo bodu	Y	Y	dY
1	1,9077	1,9054	-0,0023
2	2,0490	2,0481	-0,0009
3	-3,5285	-3,5288	-0,0003
4	-4,4960	-4,4927	0,0033
5	-0,8088	-0,8068	0,0020
6	-4,4752	-4,4725	0,0027
7	-2,1379	-2,1347	0,0032
8	-2,7661	-2,7691	-0,0030
10	-4,4736	-4,4763	-0,0027
11	14,7950	14,7770	-0,0180
12	4,0953	4,0940	-0,0013
13	15,7740	15,7637	-0,0103
14	5,9410	5,9489	0,0079
15	6,0009	6,0087	0,0078
16	7,6374	7,6299	-0,0075
17	20,7585	20,7585	0,0000
18	8,9547	8,9507	-0,0040
19	20,6215	20,6212	-0,0003
20	-1,1794	-1,1793	0,0001
21	19,5056	19,5000	-0,0056
22	4,2227	4,2262	0,0035
23	17,5729	17,5673	-0,0056
24	7,7908	7,7838	-0,0070
25	14,0731	14,0747	0,0016
26	0,5278	0,5309	0,0031
27	14,6562	14,6582	0,0020
28	11,2374	11,2335	-0,0039
29	18,0749	18,0694	-0,0055
30	10,5457	10,5439	-0,0018
63	20,6206	20,6219	0,0013
64	-1,5756	-1,5704	0,0052
66	14,3507	14,3519	0,0012
67	16,6444	16,6373	-0,0071
68	19,0835	19,0802	-0,0033
69	14,6644	14,6648	0,0004
70	-2,1442	-2,1412	0,0030
73	20,6151	20,6149	-0,0002
74	16,6166	16,6130	-0,0036
76	-4,4750	-4,4768	-0,0018
77	-2,7735	-2,7703	0,0032

Tabulka 10 – Ukázka referencí vřícovacích bodů v souřadnici Y

	Geodetické měření [m]	Fotogrammetrické vyhodnocení [m]	Rozdíly souřadnic [m]
Číslo bodu	Z	Z	dZ
1	1,1552	1,1557	0,0005
2	0,4994	0,5040	0,0046
3	0,7868	0,7892	0,0024
4	1,3692	1,3638	-0,0054
5	1,2263	1,2251	-0,0012
6	0,1810	0,1782	-0,0028
7	0,8128	0,8110	-0,0018
8	1,0638	1,0609	-0,0029
10	1,0344	1,0258	-0,0086
11	0,7082	0,7086	0,0004
12	0,8321	0,8329	0,0008
13	0,7485	0,7432	-0,0053
14	0,7367	0,7406	0,0039
15	0,9497	0,9497	0,0000
16	0,6595	0,6634	0,0039
17	0,5562	0,5549	-0,0013
18	0,6319	0,6373	0,0054
19	1,1138	1,1134	-0,0004
20	0,4837	0,4854	0,0017
21	0,9922	0,9941	0,0019
22	0,5314	0,5336	0,0022
23	0,7042	0,7070	0,0028
24	0,4447	0,4428	-0,0019
25	1,1320	1,1393	0,0073
26	1,0519	1,0508	-0,0011
27	0,7366	0,7443	0,0077
28	1,0207	1,0241	0,0034
29	0,7205	0,7121	-0,0084
30	0,6764	0,6873	0,0109
63	0,8933	0,8892	-0,0041
64	1,0115	1,0147	0,0032
66	1,0108	1,0158	0,0050
67	0,8184	0,8118	-0,0066
68	1,1319	1,1301	-0,0018
69	0,7351	0,7437	0,0086
70	0,6570	0,6589	0,0019
73	1,1401	1,1406	0,0005
74	0,9563	0,9609	0,0046
76	0,9019	0,8975	-0,0044
77	0,7761	0,7747	-0,0014

Tabulka 11 – Ukázka referencí vličovacích bodů v souřadnici Z

Z rozdílů mezi souřadnicemi byly vypočteny směrodatné odchyly souřadnic X, Y, Z (viz Tab. 12).

Směrodatná odchylna X [m]	Směrodatná odchylna Y [m]	Směrodatná odchylna Z [m]
0,0039	0,0046	0,0039

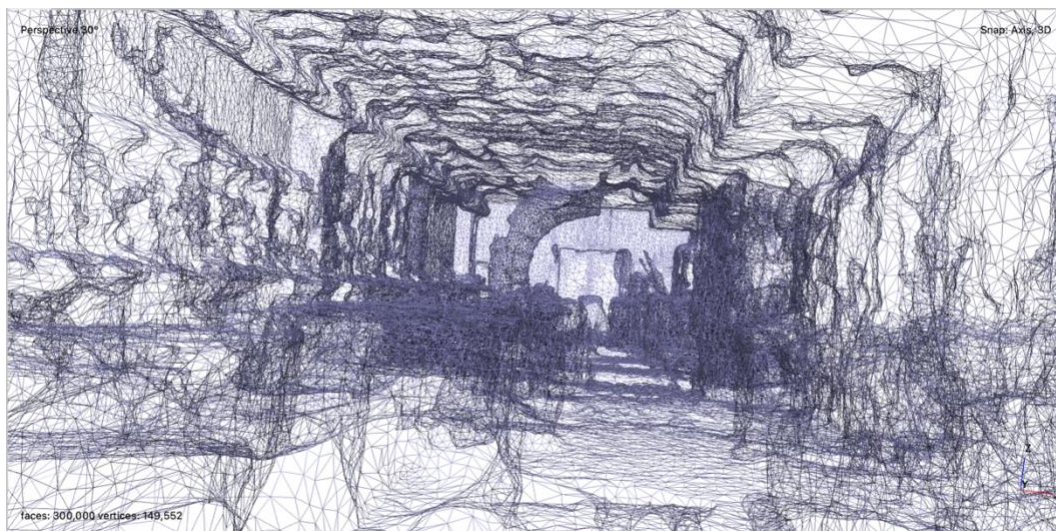
Tabulka 12 – Směrodatné odchyly v souřadnicích X, Y, Z

Z těchto směrodatných odchylek byla vypočtena polohová chyba a střední souřadnicová chyba (viz Tab. 13).

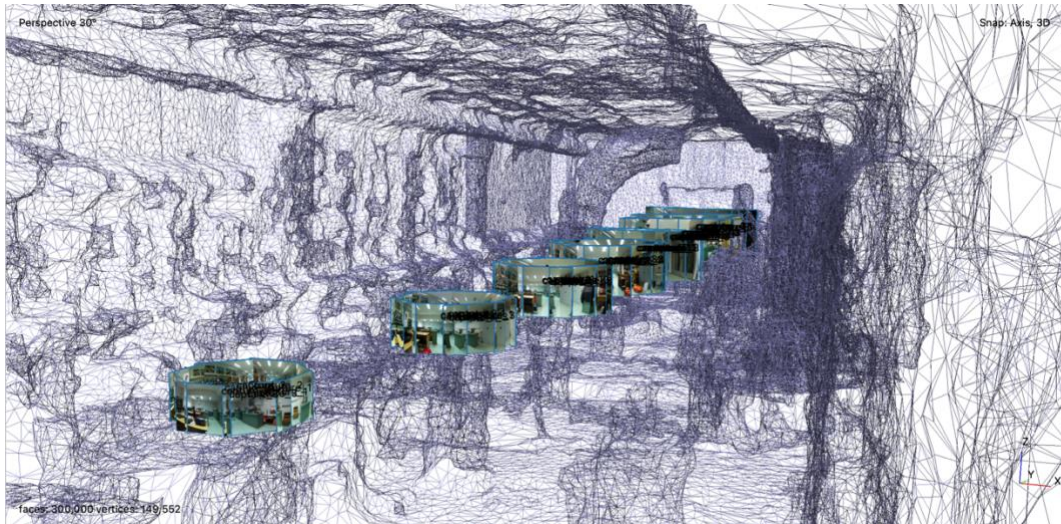
Střední souřadnicová chyba [m]	Polohová chyba [m]
0,0042	0,0072

Tabulka 13 – Střední souřadnicová chyba a polohová chyba

Nad rámec cíle bakalářské práce byl vytvořen 3D model laboratoře. Jedná se již o snadné dva kroky, které vyžadují pouze další výpočetní čas. Prvním krokem bylo vytvoření hloubkové mapy a polygonové sítě a druhým krokem bylo vytvoření textury modelu.



Obr. 36 – Výsledný model laboratoře ukázka 1



Obr. 37 – Výsledný model laboratoře ukázka 2



Obr. 38 – Výsledný model laboratoře ukázka 3



Obr. 39 – Výsledný model laboratoře ukázka 4

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo sestavení a posouzení využitelnosti mapovacího zařízení se čtyřmi kamerami Raspberry a se čtyřmi širokoúhlými objektivy Arducam. V úvodní části byly popsány základy fotogrammetrie a byly představeny jednotlivé komponenty, ze kterých bylo experimentální mapovací zařízení sestaveno. V další části práce byla provedena zkušební kalibrace kamery mobilního telefonu a následná kalibrace kamer Raspberry Pi HQ.

Po kalibraci následovala tvorba 3D modelu malého objektu. Objekt byl nejprve nasnímán jednou z kamer Raspberry a poté byl ten samý objekt nasnímán kamerou mobilního telefonu. Z těchto snímků byly vytvořeny dva 3D modely v programu Agisoft Metashape Pro, které byly následně porovnány v programu CloudCompare. Z porovnání lze usoudit, že použitá kamera poskytuje dostatečně kvalitní výsledky v řádech milimetrů na krátké vzdálenosti a menší objekty.

Dalším postupem bylo použití sestaveného experimentálního mapovacího zařízení se všemi čtyřmi kamerami Raspberry a širokoúhlými objektivy Arducam. Použití přístroje bylo realizováno v laboratoři geodézie na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Nejprve byly po laboratoři rozmístěny vlíčovací body v podobě kódových značek, které byly vzápětí zaměřeny totální stanicí polární metodou. Po zaměření následoval výpočet souřadnic těchto vlíčovacích bodů v místním souřadnicovém systému v programu Groma. Jelikož jsou po laboratoři rozmístěny pevné pilíře, byly tudíž pro tuto bakalářskou práci využity jako pevná stanoviště pro snímkování. Na každém pilíři bylo stabilizováno zařízení, kamery byly natočeny kolmo na stěny laboratoře a bylo provedeno snímkování. Následně byly kamery natočeny o 45° a znovu bylo provedeno snímkování. Tímto byl zajištěn dostatečný překryt mezi snímky. Tento postup snímkování se opakoval celkem na 10 pilířích. Bylo provedeno fotogrammetrické vyhodnocení ze všech těchto snímků v programu Agisoft Metashape Pro. Cílem bylo porovnání souřadnic bodů získaných geodetickým měřením a fotogrammetrickým vyhodnocením. Při porovnání souřadnic bylo zjištěno, že polohová chyba je 7,2 mm a střední souřadnicová chyba je 4,2 mm. Z tohoto zjištění lze konstatovat, že je zařízení z hlediska dosažené přesnosti v budoucnu využitelné. Nad rámec cíle bakalářské práce byl vytvořen 3D model laboratoře.

6 Doslov

Již při prohlížení snímků si lze povšimnout velké distorze na okraji snímků. Z tohoto důvodu by bylo vhodnější použít objektivy, které nejsou širokoúhlé. Tento faktor lze zanedbat při pořízení většího počtu snímků na každém stanovišti. Dále bylo zjištěno, že je důležité zajistit kvalitní světelné podmínky při snímání.

Pro další využití mapovacího zařízení by bylo vhodné zajistit plnou mobilitu zařízení. Dosud je nutné mít stále připojené periferie a externí zdroj napájení, které nejsou pevnou součástí přístroje. Po vyřešení nedostatků by toto zařízení mohlo být v budoucnu využitelné v praxi, ale také jako součást výuky fotogrammetrie na Fakultě stavební ČVUT v Praze.

Fotogrammetrie je pro mě velmi zajímavým oborem, nicméně z důvodu pouze jednoho vyučovaného kurzu Fotogrammetrie v bakalářském studiu, jsem narážela na problémy s vyhodnocením snímků v programu Agisoft Metashape Pro.

Toto téma jsem si vybrala z důvodu mého zájmu o obor fotogrammetrie a z důvodu zajímavé spolupráce při sestavení experimentálního mapovacího zařízení. Při této práci jsem se naučila ovládat mapovací zařízení, pořizovat s ním snímky a následně tyto snímky využít k tvorbě 3D modelu.

Seznam použité literatury

[1] GIS user: beyond the map [online]. Spatial media, 2014 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://gisuser.com/2014/10/trimble-integrates-its-v10-imaging-rover-with-r-series-gnss-receivers/>

[2] Leica Geosystems [online]. Leica Geosystems, 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/fr-be/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus-backpack>

[3] Fotogrammetrie 10. 2. přep. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02649-3.

[4] Snímkové orientace a vztahy mezi souřadnicovými soustavami. Is.muni.cz [online]. Brno: Masarykova univerzita [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2006/Z8101/um/Fotogrammetrie_5.pdf

[5] HODAČ, Jindřich. Metoda obrazové korelace: teorie [online]. Fsv ČVUT v Praze [cit.2022-04-19]. Dostupné z <https://slideplayer.cz/slide/4171295/> . Elektronická prezentace pro účely výuky. České vysoké učení technické v Praze.

[6] HODÍK, Štěpán. VÝVOJ NÍZKONÁKLADOVÉHO GNSS ZAŘÍZENÍ [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/83537>. Diplomová práce. Fakulta stavební ČVUT.

[7] https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry_Pi_HQ_Camera_Product_Brief.pdf

[8] Agisoft LLC. *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition* [online]. Ver. 1.5. 2019, [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf. Manuál k programu Agisoft Metashape Pro v.1.5.

Seznam obrázků

- Obr. 1 – Přístroj Trimble V10 Imaging Rover ^[1]
- Obr. 2 – Přístroj Leica Pegasus Backpack ^[2]
- Obr. 3 – Prvky vnitřní orientace ^[4]
- Obr. 4 – Prvky vnější orientace ^[4]
- Obr. 5 – Prvky vnitřní a vnější orientace pro pozemní fotogrammetrii ^[3]
- Obr. 6 – Prvky vnitřní a vnější orientace pro leteckou fotogrammetrii ^[3]
- Obr. 7 – Sestavené zařízení
- Obr. 8 – Chipset Raspberry Pi 4 Model B
- Obr. 9 – Multi Camera Board V2.2
- Obr. 10 – Širokoúhlý objektiv Aducam
- Obr. 11 – Kamera Raspberry Pi HQ
- Obr. 12 – Ukázka záběru a překrytu kamer
- Obr. 13 – Prostředí Agisoft Metashape Professional v. 1.8.1
- Obr. 14 – Kalibrační deska (šachovnice)
- Obr. 15 – Dialogové okno pro generování vřícovacích bodů
- Obr. 16 – Ukázka kódových značek generovaných programem Agisoft Metashape Pro
- Obr. 17 – Ukázka detekování kódových značek v programu Agisoft Metashape Pro
- Obr. 18 – Výstupní parametry z kalibrace kamery
- Obr. 19 – Experimentální 3D model z kalibrace kamery
- Obr. 20 – Ukázka polohy stanovisek při fotografování
- Obr. 21 – Kovová deska s kódovými značkami
- Obr. 22 – Objekt na kovové desce
- Obr. 23 – Ukázka detekce kódových značek
- Obr. 24 – Kontrola měřítka a umístění bodů
- Obr. 25 – Ukázka hloubkové mapy
- Obr. 26 – Ukázka polygonové sítě
- Obr. 27 – Výsledný 3D model z kamery Raspberry
- Obr. 28 – Kontrola měřítka a umístění bodů při tvorbě modelu mobilním telefonem
- Obr. 29 – Ukázka hloubkové mapy při tvorbě modelu mobilním telefonem
- Obr. 30 – Ukázka polygonové sítě při tvorbě modelu mobilním telefonem
- Obr. 31 – Výsledný 3D model z mobilního telefonu
- Obr. 32 – Výsledné porovnání modelů kamene
- Obr. 33 – Totální stanice Leica TCR307
- Obr. 34 – Náčrt měřické sítě stanovisek a definice souřadnicového systému
- Obr. 35 – Schéma kamer na jednom z pilířů
- Obr. 36 – Výsledný model laboratoře ukázka 1
- Obr. 37 – Výsledný model laboratoře ukázka 2
- Obr. 38 – Výsledný model laboratoře ukázka 3
- Obr. 39 – Výsledný model laboratoře ukázka 4

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Výstupní parametry kalibrace pomocí šachovnice [pix]

Tabulka 2 – Výstupní parametry kalibrace pomocí vřícovacích bodů [pix]

Tabulka 3 – Parametry kamery dané výrobcem

Tabulka 4 – Výstupní parametry první kamery [pix]

Tabulka 5 – Výstupní parametry druhé kamery [pix]

Tabulka 6 – Výstupní parametry třetí kamery [pix]

Tabulka 7 – Výstupní parametry čtvrté kamery [pix]

Tabulka 8 – Ohniskové vzdálenosti kamer

Tabulka 9 – Ukázka referencí vřícovacích bodů v souřadnici X

Tabulka 10 – Ukázka referencí vřícovacích bodů v souřadnici Y

Tabulka 11 – Ukázka referencí vřícovacích bodů v souřadnici Z

Tabulka 12 – Směrodatné odchylky v souřadnicích X, Y, Z

Tabulka 13 – Střední souřadnicová chyba a polohová chyba

Seznam elektronických příloh

Elektronické přílohy jsou uloženy na SD kartě přiložené k tištěné verzi bakalářské práce.

Příloha 1 – 3D model kamene snímáný kamerou Raspberry Pi HQ

Příloha 2 – 3D model kamene snímáný mobilním telefonem

*Příloha 3 – Reference vřícovacích bodů z programu Agisoft Metashape Pro ve formátu *.txt*

Příloha 4 – Souřadnicové rozdíly mezi polárně zaměřenými body a vypočtenými body

Příloha 5 – Výpočet směrodatných odchylek souřadnic X, Y, Z