

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA SPECIÁLNÍ GEODÉZIE

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Inženýrská geodézie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti detekce lokálních deformací objektu s využitím metody SFM

Possibilities of local deformation detection using SFM method

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.

PRAHA, 2020

Bc. Adam Vaněk

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Vaněk</u>	Jméno: <u>Adam</u>	Osobní číslo: <u>458636</u>
Zadávací katedra: <u>K154</u>		
Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor: <u>Geodézie a kartografie</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Možnosti detekce lokálních deformací objektu s využitím metody SFM.</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Possibilities of local deformation detection using SFM method.</u>	
Pokyny pro vypracování: Návrh a provedení laboratorního experimentu s využitím platformy. Výpočty modelů v programu Agisoft. Vyhodnocení optimálního rozlišení pro detekci lokálních deformací. Analýza efektivity počtu a umístění snímků pro detekci. Možnosti videozáznamu pro potřeby detekce.	
Seznam doporučené literatury: Urban, R.: Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů. 1. vyd. Praha: CTU. 2015. Hampacher, M. - Štroner, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 2. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>doc. Ing. Rudolf Urban, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>19.2.2020</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>18. 5. 2020</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

<u>21.2.2020</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem „Možnosti detekce lokálních deformací objektu s využitím metody SFM“ vypracoval samostatně, pouze s pomocí vedoucího diplomové práce doc. Ing. Rudolfa Urbana, Ph.D., a s použitím uvedené odborné literatury a zdrojů informací.

V Praze dne:

.....

Bc. Adam Vaněk

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Rudolfovi Urbanovi, Ph.D, dále Ing. Tomášovi Reindlovi a Bc. Zdeňku Veselému za jejich rady a pomoc při zpracování práce. Chtěl bych také poděkovat své rodině za podporu a trpělivost při mém studiu.

Abstrakt

Tématem diplomové práce je zjišťování lokálních deformací pomocí metody Structure from Motion v závislosti na volbě vzdálenosti snímkování, na kvalitě fotoaparátu a na množství pořízených snímků.

Problematika je řešena pomocí laboratorního experimentu, kdy je snímkována platforma s mnoha dílčími testovacími přípravky pro výsledné porovnání a detekci deformací.

Výsledkem této práce je zhodnocení rozlišovací schopnosti pro detekci deformací v závislosti na vzdálenosti snímkování a použité kameře. Dalším výstupem jsou tabulky s doporučením pro snímkování v UAV fotogrammetrii.

Klíčová slova

Fotogrammetrie, deformace, Structure from Motion, mračno bodů

Abstract

The topic of the thesis is the detection of local deformations by Structure from Motion method according to shooting distance, the quality of the camera and on the amount of taken images.

The problem is solved by a laboratory experiment, where platform with many partial jigs is photographed for the final comparison and detection of deformations.

The result of this work is the evaluation of the resolution for the detection of deformations depending on the shooting distance and the used camera. Another output are tables with recommendations for taking images in UAV photogrammetry.

Key words

Photogrammetry, deformation, Structure from Motion, dense cloud

Obsah

Úvod.....	9
1 Teoretické základy	11
1.1 Fotogrammetrie	11
1.1.1 Fotogrammetrické zobrazení	12
1.1.2 Prvky vnitřní orientace	13
1.1.3 Prvky vnější orientace	13
1.1.4 Projektivní (kolineární) prostorová transformace.....	14
1.1.5 Epipolární geometrie ve fotogrammetrii	15
1.2 Structure from Motion.....	21
1.2.1 Princip metody SfM	22
1.2.2 Vlivy působící na kvalitu výsledného modelu	24
1.2.3 Software pro SfM	25
2 Seznámení s experimentem	27
3 Pomůcky a vybavení	28
3.1 Testovací platforma.....	28
3.1.1 Testovací přípravek „A“ – různě hluboké zářezy.....	29
3.1.2 Testovací přípravek „B“ – různě vzdálené zářezy.....	29
3.1.3 Testovací přípravek „C“ – různě hluboké kruhové prohlubně	29
3.1.4 Testovací přípravek „D“ – různé průměry otvorů	29
3.1.5 Testovací přípravek „krychle“ – různé velikosti krychlí.....	30
3.2 Měřické vybavení.....	30
3.2.1 Trimble S6 HP.....	30
3.2.2 Canon EOS 500D	31
3.2.3 iPhone XS.....	32
3.2.4 Posuvné měřítko Somet 650 mm.....	32
3.3 Softwarové vybavení.....	33
3.3.1 GNU Gama 1.7.09-svd.....	33
3.3.2 XYZTrans v2.0.....	33
3.3.3 Agisoft Metashape Professional v. 1.5.2.7838	33
3.3.4 CloudCompare v. 2.10.3.....	33
3.3.5 Bentley MicroStation CONNECT Edition	34
3.3.6 Inkscape 0.92.4.....	34
4 Provedení experimentu.....	35
4.1 Měření a zpracování vlíčovacích bodů.....	35
4.1.1 Vyrovnání měření v GNU Gama.....	36
4.1.2 Transformace souřadnic	37

4.1.3	Porovnání vzdáleností vlíčovacích bodů	37
4.2	Snímkování.....	38
4.3	Zpracování snímků metodou SfM.....	39
4.3.1	Pořízení a zpracování videozáznamu	39
4.3.2	Výpočet řídkého mračna.....	41
4.3.3	Určení měřítka a souřadného systém.....	41
4.3.4	Výpočet hustého mračna	43
4.4	Zpracování v programu CloudCompare.....	44
5	Výsledky.....	46
5.1	Možnosti detekce deformací na testovacích přípravcích.....	46
5.1.1	Detekce deformací na přípravku „A“	47
5.1.2	Detekce deformací na přípravku „B“	49
5.1.3	Detekce deformací na přípravku „C“	51
5.1.4	Detekce deformací na přípravku „D“	53
5.1.5	Detekce deformací na přípravku „krychle“	55
5.2	Zhodnocení vlivu počtu snímků na přesnost	56
5.3	Doporučení pro snímkování deformací pomocí UAV	58
	Závěr.....	60
	Použitá literatura a internetové zdroje	62
	Seznam tabulek.....	64
	Seznam obrázků	65
	Seznam příloh.....	67

Úvod

Měření posunů a deformací objektů má velký význam pro kontrolu stálosti stavebních objektů. Pravidelným kontrolováním se zajišťuje bezpečnost a případně se vyhodnocují posuny, které lze včasné řešit. Posuny a deformace jsou způsobeny různými vlivy, mohou to být fyzikálně–mechanické vlastnosti podloží jako hmotnost stavebního objektu, velikost a tvar základů, hloubka a druh základové půdy. Vliv na posuny a přetvoření může mít také poddolování území a účinek nových staveb na stávající. Chování většiny stavebních objektů je závislé na určitých periodách, kdy na objekt působí vnější podmínky jako je teplota, vlhkost a působení slunečního záření. Periody mohou být krátkodobé v horizontu hodin nebo dnů, ale i dlouhodobé, kde lze uvažovat měsíce i roky. Je důležité provádět geodetická měření za stejných podmínek, což není vždy možné. Proto se nejčastěji volí tzv. etapové měření, kdy se posuny a přetvoření měří s danými časovými rozestupy.

Mezi využívané geodetické metody zaměření posunů a deformací patří přesná nivelace či velmi přesná nivelace, pro vědecké účely metoda zvlášť přesné nivelace. Hydrostatická nivelace využívá principu dvou spojených nádob. Trigonometrické měření, kdy se posun nebo deformace určuje na základě změn zenitových úhlů při známé délce záměry [3]. Dále se využívá polární metoda, protínání a GNSS. Nyní v době moderních technologií se využívají metody rychlého sběru velkého množství dat, kam řadíme laserové skenování a fotogrammetrické metody. Mezi běžné fotogrammetrické postupy patří časová základna a reálná základna. Výhodou této metody je zachycení okamžitého stavu během krátké doby a zároveň zachycení velkého množství bodů. Speciálním postupem fotogrammetrie je metoda Structure from Motion (SfM), kde je objekt několikrát nasnímán s překrytí a následně jsou tyto snímky zpracovány v softwaru.

Kromě geodetických metod je možné ve speciálních případech využít metodu fyzikální, kam se řadí tenzometr, který je schopen odečítat velmi malé změny.

Metoda Structure from Motion (dále jen „SfM“) má široké uplatnění pro dokumentaci 3D objektů při ochraně památek, v lékařství, a také v archeologii. Kromě těchto disciplín se SfM hodí také pro geodetická zaměření a lze ji využít pro měření posunů a deformací. Diplomová práce se bude zabývat schopnostmi detekce deformací



3D modelů vygenerovaných metodou SfM. Jako předmět měření byla zvolena testovací platforma, na které jsou čtyři přípravky vhodné k testování rozlišovací schopnosti. Deska byla nasnímána z různých vzdáleností digitální zrcadlovkou a mobilním telefonem, a také pomocí videozáznamu. Snímky byly vyhodnoceny v programu Agisoft Metashape, kde jsou výsledkem hustá mračna. Tato mračna byla porovnávána se skutečnými velikostmi testovacích přípravků a byla hodnocena jejich rozlišovací schopnost. V závěru práce byly v rámci experimentu vypočteny možnosti detekce jednotlivých deformací ze třech možných výšek snímání bezpilotním letounem (UAV).

1 Teoretické základy

Následující kapitola seznamuje se základními principy celého oboru fotogrammetrie a pojednává o metodě Structure from Motion. Metoda SfM je speciální metodou fotogrammetrie, která rekonstruuje realitu z 2D obrazu. Jedná se relativně o mladou metodu, která má ale obrovský potenciál jak v geodezii, tak v dalších oborech jako je zdravotnictví, archeologie, ochrana památek a dalších.

1.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je vědní obor, který se zabývá získáváním informací o předmětech na základě přesných obrazových dat, nejčastěji fotografického záznamu. Dříve záznam probíhal analogově, formou světlocitlivé vrstvy nebo dnes pomocí digitálních komor. Získaný obraz má rozličné přesnosti, která se odvíjí dle použitého zařízení od amatérských fotoaparátů, mobilů až po speciální měřické fotokomory. Z polohy bodů na měřických snímcích lze odvodit velikost, tvar, umístění předmětu v prostoru, vyhodnotit polohopis a výškopis.

Vícesnímková fotogrammetrie

Vícesnímková fotogrammetrie slouží pro 3D zpracování a vyžaduje vždy nejméně dva vzájemně se překrývající snímky. Z jednoho snímku lze určit pouze 2D souřadnice a pro přechod na 3D souřadnice je zapotřebí další měření – další snímek. Vyhodnocovaný předmět musí být současně na obou snímcích, aby bylo možné vypočítat jeho prostorovou 3D polohu. K vyhodnocení se používá stereoskopický vjem, který umožňuje vytvořit prostorový model předmětu měření, tato metoda se nazývá stereofotogrammetrie. Pokud se osy záběrů snímku sbíhají (konvergují), jedná se o vícesnímkové prostorové protínání. Konvergentní množinu orientovaných snímků je možno vyhodnotit pouze bodově, za předpokladu, že stejný bod lze identifikovat minimálně na dvou snímcích, technologicky se jedná o průsekovou fotogrammetrii.

Podle technologického způsobu zpracování snímků (tj. podle způsobu převodu snímkových souřadnic na prostorové souřadnice) se dělí metody zpracování na:

Analogové metody

Při této metodě se mechanicky, opticky anebo kombinací obou možností vytváří analogický stav jako při snímkování. Je využíváno složitých analogových vyhodnocovacích strojů, se kterými se lze dnes v praxi jen těžko setkat.

Analytické metody

U analytických metod dochází k převodu snímkových souřadnic do geodetického systému prostorovou transformací, která je řešena pomocí počítačů. Metoda využívá přístroje typu stereokomparátor ve spojení s počítačem. Práce probíhají na originálních snímcích a po nutných orientacích snímků jsou vypočteny transformační klíče. Vyhodnocovatel ovládá modelové souřadnice, z nichž se počítají snímkové souřadnice, zároveň jsou doloženy geodetické souřadnice snímaných bodů.

Digitální metody

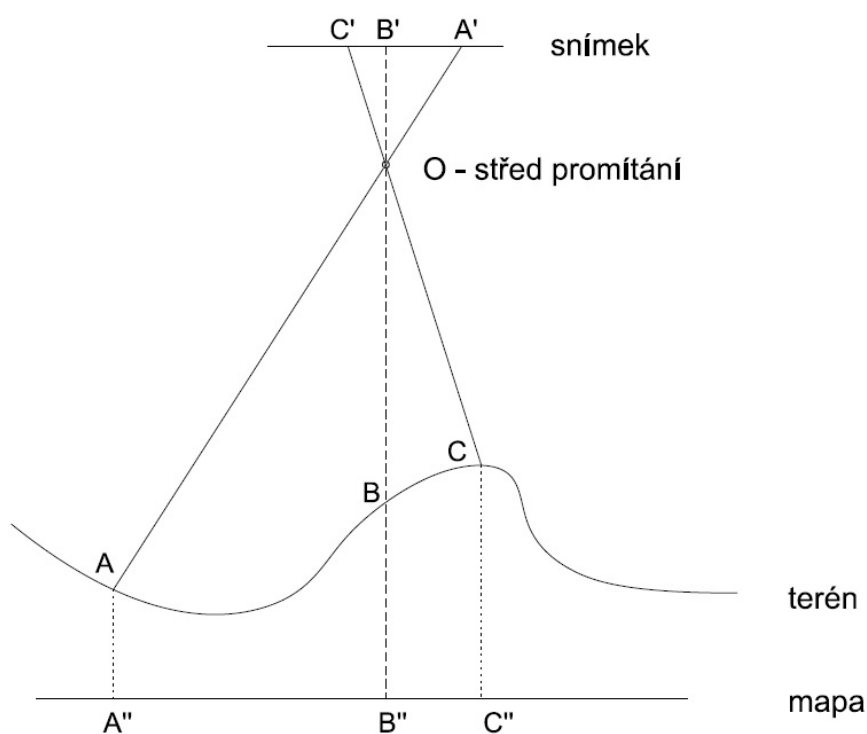
Metoda využívá digitální obraz a stejně jako u analytické metody se zde převádí snímkové souřadnice na geodetické souřadnice, za pomoci prostorové transformace. Transformace se řeší na počítači, kde se také přímo měří souřadnice. Pro stereometody musí být počítač doplněn o hardwarové doplňky umožňující stereovidění.

V této kapitole bylo čerpáno z [1].

1.1.1 Fotogrammetrické zobrazení

Základem fotogrammetrie je fotografický snímek, který vznikne středovým průmětem fotografovaného objektu. Středové promítání (Obr. 1) vychází z předpokladu fyzikálně idealizovaného objektivu – „tenká“ čočka. Praktické provedení objektivů se ale od fyzikálně ideální čočky významně liší. Objektivy jsou skládány z několika čoček a dalších optických prvků, je tedy těžké určit přesný střed promítání. Každému bodu fotografovaného předmětu odpovídá bod ve snímkové rovině. Jednoduché schéma principu středového promítání je znázorněno na Obr. 1. Paprsky vedené mezi bodem a jeho obrazem, se protínají v jediném bodě – středu promítání (O). Fotogrammetrie se snaží o převod středové projekce na projekci ortogonální tak, jak to požaduje mapové zobrazení. Pro řešení převodu mezi projekcemi je zapotřebí přesně definovat elementární

prvky středového promítání, tj. střed promítání (O). Právě střed promítání a další parametry tvoří prvky vnitřní orientace, kterým je věnována další kapitola diplomové práce.



Obr. 1: Středové promítání (vlastní zdroj)

1.1.2 Prvky vnitřní orientace

Prvky vnitřní orientace definují prostorovou polohu středu promítání vzhledem ke snímku. Prvky jsou známé z výroby anebo je lze získat laboratorním měřením.

Jedná se o:

- konstantu komory f ,
- polohu hlavního bodu H' (dx' , dy'),
- průběh radiální a tangenciální distorze.

1.1.3 Prvky vnější orientace

Prvky vnější orientace definují prostorovou polohu snímku v rámci systému geodetických souřadnic a jsou definovány pro každý snímek.

Mezi prvky vnější orientace patří:

- souřadnice středu vstupní pupily X_0, Y_0, Z_0 ,
- tři úhly stočení podél jednotlivých souřadných os.

Při neznámých prvcích vnější orientace je situace řešena ve dvou krocích:

- relativní orientace – vytvoření prostorově orientovaného stereomodelu vzájemnou orientací mezi dvěma stereosnímky,
- absolutní orientace – pootočení a posun modelu do referenčního geodetického systému.

V moderní době je prováděno svazkové vyrovnání, které využívá přímého vztahu mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi, a tím umožní provedení vnější orientace v jediném kroku.

1.1.4 Projektivní (kolineární) prostorová transformace

Metoda převodu snímkových souřadnic na geodetické, při této transformaci musí být dodržena podmínka kolinearity, která stanovuje že projekční centrum, bod v terénu a jeho obraz na snímku leží v jedné přímce. Kolineární vztah je definován takto:

$$\frac{x' - x'_0}{-f} = \frac{x - x_0}{z - z_0}, \quad \frac{y' - y'_0}{-f} = \frac{y - y_0}{z - z_0} \quad (1)$$

kde: x', y' jsou snímkové souřadnice středu promítání pravého snímku,

x'_0, y'_0 jsou snímkové souřadnice středu promítání levého snímku,

x, y, z jsou modelové souřadnice středu promítání pravého snímku,

x_0, y_0, z_0 jsou modelové souřadnice středu promítání levého snímku,

f je konstanta komory.

Přímý vztah mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi je dán vzorcem:

$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (3)$$

kde: x', y' jsou snímkové souřadnice bodu,

x'_0, y'_0 a f jsou prvky vnitřní orientace,

X_0, Y_0, Z_0 jsou prvky vnější orientace,

X, Y, Z jsou geodetické souřadnice bodu.

Kde koeficienty r_{ij} jsou prvky matice rotace R podle:

$$R = R_{X(\omega)} \times R_{Y(\varphi)} \times R_{Z(\kappa)} \quad (4)$$

$$R_{X(\omega)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

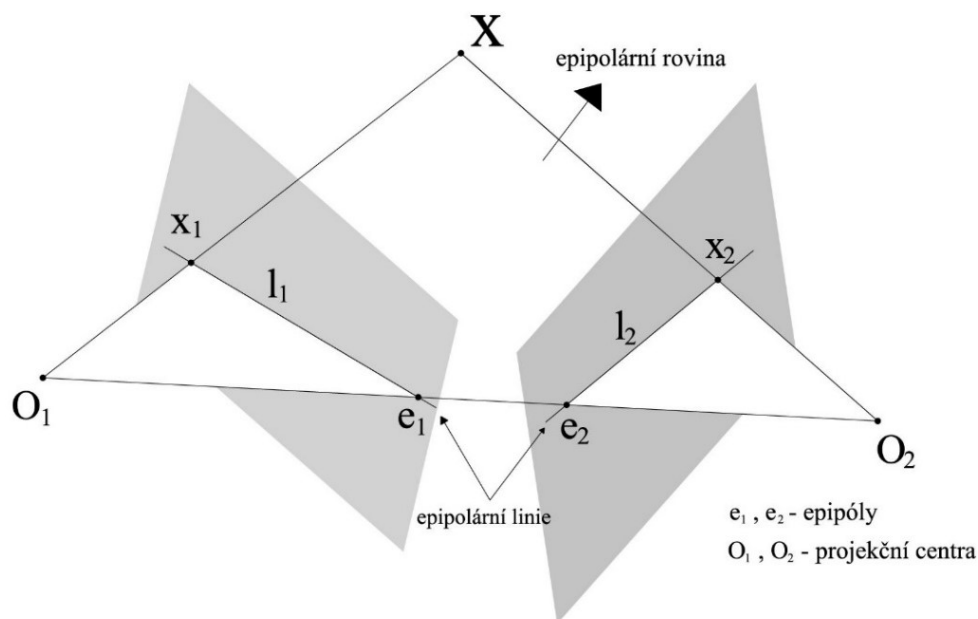
$$R_{Y(\varphi)} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R_{Z(\kappa)} = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

V této kapitole bylo čerpáno z [1] a [2].

1.1.5 Epipolární geometrie ve fotogrammetrii

Epipolární geometrie umožňuje rekonstruovat snímanou scénu v prostoru z dat na snímcích. Svě využití nachází v oblasti zpracování digitálního obrazu či počítačového vidění, kde zpravidla nejsou žádné vlíčovací body ani reálné kamery a jsou řešeny vztahy nejméně dvou snímků, které vychází z podmínky komplanarity. Tato podmínka obecně říká, že průvodiče bodu na snímané scéně jsou v jedné rovině s fotogrammetrickou základnou (Obr. 2).



Obr. 2: Podmínka komplanarity [20]

Vzájemný vztah dvou snímků bez znalosti kamer a jejich orientací je možné popsat pomocí projekce bodů z jednoho snímku na druhý snímek. Hledá se tedy vztah snímkových souřadnic stejných bodů, které můžeme nalézt na obou snímcích. Tento vztah je možné vyjádřit pomocí projekční matice, která zobrazuje plochu jednoho snímku na snímek druhý a dále tato matice obsahuje údaje o různě stočených plochách snímků či snímačů v reálném prostoru. Tato matice se nazývá fundamentální. Výpočet fundamentální matice ze dvou snímků stejné scény je základní operací v epipolární geometrii.

Základní rovnicí epipolární geometrie je:

$$x'^T \cdot F \cdot x = 0 \quad (6)$$

kde: x' je vyjádření bodu na prvním snímku v homogenních souřadnicích $x' = (x', y', 1)^T$,

x je vyjádření bodu na druhém snímku v homogenních souřadnicích $x'' = (x'', y'', 1)^T$,

F je fundamentální matice o rozměru 3x3.

Pro výpočet lze použít několik možných algoritmů, avšak ve většině publikací doporučují osmibodový algoritmus, který je nejlehčí na implementaci a dává spolehlivé

výsledky. Pro tento výpočet je nutné znát 8 dvojic bodů ve snímkových souřadnicích. Pro každý pár snímkových souřadnic (jeden bod) vznikne jedna lineární rovnice. Je-li k dispozici právě nutný počet dvojic bodů (8) je jedno řešení nulové a není možno využít klasické řešení pomocí inverzní matice. Pokud je k dispozici více dvojic bodů, řeší se soustava rovnic vyrovnáním zprostředkujících metodou nejmenších čtverců. Pro správný výpočet je nutné zajistit numerickou stabilitu výpočtu pomocí normalizace snímkových souřadnic.

Normalizaci je nutné zajistit, protože výsledky jsou závislé na souřadnicové soustavě vstupních bodů. Prvním krokem normalizace je posunutí bodů tak, aby jejich těžiště leželo v počátku souřadnicové soustavy. Je tedy nutné vypočítat průměrnou hodnotu souřadnice x a tímto průměrem zredukovat všechny hodnoty x -ových souřadnic. Stejným způsobem zredukovat souřadnici y . Postup se aplikuje také na druhý snímek.

Druhým krokem normalizace je požadavek, aby průměrná hodnota vzdálenosti bodu od počátku byla odmocnina ze dvou. Znamená to vypočítat průměrnou vzdálenost bodů od počátku, určit poměr průměrné vzdálenosti a odmocniny ze dvou a následně všechny souřadnice tímto poměrem vynásobit. Opět je postup aplikován pro každý snímek zvlášť.

Normalizací souřadnic jsou získány nová vstupní data pro výpočet fundamentální matice a tato fundamentální matice je normalizovaná. Po úspěšném výpočtu je nutné výslednou fundamentální matici odnormalizovat nejlépe pomocí normalizačních matic (pro každý snímek jedna). Velikost normalizační matice je 3×3 a značí se N .

Pro výpočet 3D souřadnic bodů je nutné znát vztah mezi body v prostoru a jejich promítnutím do roviny. Tento vztah je dán maticí fotoaparátu. V této matici je obsažena vnitřní i vnější orientace kamery. Matice fotoaparátu má rozměr 3×4 a značí se P . Maticové vyjádření vztahu bodu na snímku a v prostoru vypadá takto:

$$x = P \cdot X \quad (7)$$

kde: x je matice homogenních souřadnic bodu,

P je matice fotoaparátu.

X je matice homogenních prostorových souřadnic $X = (X, Y, Z, 1)^T$.

Pro sestavení matice fotoaparátu je tedy nutné znát vnitřní orientaci kamery neboli kalibrační matici. Tvar této matice je dán tvarem jednotlivých pixelů, které obecně nemusí být čtvercové. Matice kalibrace se značí K a její velikost je 3×3 .

Matice fotoaparátu P dále obsahuje vnější orientaci kamery, což je poloha vstupní pupily (translace) a natočení kamery (rotace). Translační matice T má rozměr 1×3 a obsahuje prostorové souřadnice vstupní pupily, rotační matice R má rozměr 3×3 a obsahuje stočení ve třech osách.

Celý vztah pro matici fotoaparátu je:

$$P = K(R|RT) \quad (8)$$

Dvojice matic fotoaparátu tedy jednoznačně určují fundamentální matici, opačně to však neplatí.

Esenciální matice je speciální případ fundamentální matice, kdy jsou známy kalibrační matice kamer. Přejít od fundamentální matice k matici esenciální je dán vztahem:

$$E = K'^T F K \quad (9)$$

kde: E je esenciální matice,

K' je kalibrační matice kamery prvního snímku,

F je fundamentální matice.

Esenciální matice má velikost 3×3 a je esenciální pouze v případě, že její dvě vlastní čísla jsou si rovná a třetí je nulové (hodnota 2). K docílení této podmínky je nutné rozložit esenciální matici singulárním rozkladem.

Epipolární geometrie je založena na předpokladu, že průvodiče bodu na snímcích k stejnému bodu v prostoru jsou v jedné rovině s fotogrammetrickou základnou. Epipóly leží právě na fotogrammetrické základně a jedná se o průsečík s rovinami snímků (snímačů). Každý snímek má svůj epipól, který obecně může být i mimo fyzické hranice zobrazovacího senzoru.

Rovnice pro výpočet epipólu $e = (e_1, e_2, e_3)$ je dána vztahem:

$$e \cdot F = 0. (e' \cdot F^T = 0) \quad (10)$$

Řešení rovnice je nulové, a je tedy nutné opět použít singulární rozklad. Epipolární přímky (epipoláry) jsou průsečnice epipolární roviny s rovinou obrazovou a jejich základní vlastností je, že libovolná epipolární přímka prochází epipólem (Obr. 2). Pro epipolární přímky a fundamentální matici pak platí vztah:

$$l = F^T \cdot x'. (l' = F \cdot x) \quad (11)$$

Podle předchozího postupu lze sestavit matice fotoaparátu, a to z prvků vnitřní a vnější orientace. V praxi, ale ve většině případů není známa vnější orientace kamer a je nutné matice fotoaparátu pro každý snímek určit z fundamentální nebo esenciální matice. Protože jsou k dispozici pouze dva snímky a vnitřní orientace, lze matici fotoaparátu na prvním snímku zvolit, pro jednoduchost tato matice vypadá takto:

$$P_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

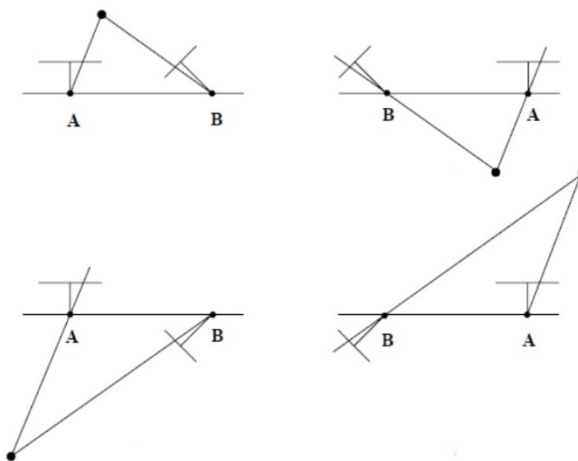
Druhou matici je nutné vyjádřit z fundamentální nebo esenciální matice. Z podmínky komplanarity je zřejmé, že poloha druhé kamery musí ležet na fotogrammetrické základně, a proto jsou využity souřadnice epipólu druhého snímku.

Druhým způsobem určení druhé matice fotoaparátu je použití normalizované esenciální matice, jelikož obsahuje přímo vnější orientaci (translaci a rotaci) bez prvků vnitřní orientace. K naší škodě matice fotoaparátu nejsou z esenciální matice dány jednoznačně. Když je první matice fotoaparátu zvolena jako P_1 , tak druhá matice fotoaparátu má obecně čtyři možná řešení.

Pro výpočet je nutné zavést pomocnou matici:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Singulárním rozkladem normalizované esenciální matice jsou dány čtyři možná řešení (Obr. 3). Pro určení správného řešení je nutné spočítat alespoň jeden bod v prostorových souřadnicích tak, aby ležel před oběma fotoaparáty.



Obr. 3: Čtyři možná řešení

1.1.5.1 Metoda Gold Standard

Metoda Gold Standard je algoritmem, který odhaduje fundamentální matici metodou maximální věrohodnosti a je založen na předpokladu, že chyby ve vstupních bodech mají Gaussovu distribuci. Práci algoritmu můžeme shrnout do několika zásadních kroků:

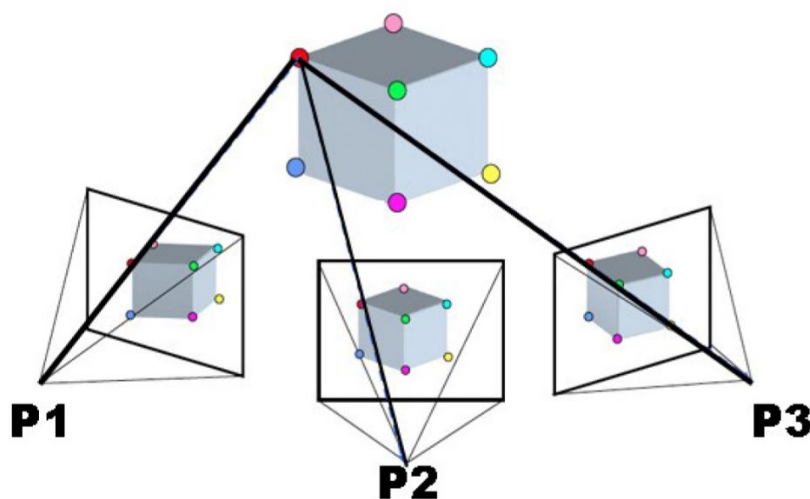
1. První odhad fundamentální matice pomocí normalizovaného osmibodového algoritmu.
2. Výpočet matice fotoaparátu P_1 a P_2 z fundamentální matice.
3. Výpočet prostorových souřadnic.
4. Vyjádření snímkových souřadnic z prostorových souřadnic a matic fotoaparátu.
5. Vyrovnání neznámých matic fotoaparátů a prostorových souřadnic bodů, kdy jsou opravy přidělovány snímkovým souřadnicím z obou snímků zároveň.

Pro využití ve fotogrammetrii, kde je známá vnitřní orientace kamery, lze v tomto případě využít esenciální matici a postup pro přímé určení translace a rotace. Následně je proveden iterační výpočet vyrovnání svazku paprsků, ale vzhledem k tomu, že nejsou

známé žádné vřícovací body, je nutné svazkové vyrovnání svázat podmínkami nebo vyrovnání udělat ve dvou krocích. V prvním kroku jsou fixovány prostorové souřadnice a vyrovnávají se pouze vnější orientace a ve druhém kroku se fixuje vnější orientace a vyrovnávají se prostorové souřadnice. Iterace je ukončena, jakmile se aposteriorní směrodatná odchylka z vyrovnání přestane měnit. Čerpáno z [2]

1.2 Structure from Motion

Structure from Motion (SfM) je fotogrammetrická zobrazovací technika pro získání trojrozměrných souřadnic z dvojrozměrných snímků, které byly pořízeny pohybujícím se nosičem. Podmínkou jsou překrývající se snímky, ale osy záběru nemusí být konvergentní ani rovnoběžné (Obr. 4), symbolem P je označena vstupní pupila. Metoda propojuje průsekovou fotogrammetrii se stereofotogrammetrií. Velkou výhodou je, že není třeba znát polohy stanovisek snímkování. Metoda není finančně náročná a umožňuje získávat 3D data ve vysokém rozlišení, kdy je možné objekt nasnímat dnes již běžným smartphonem. Oproti stereofotogrammetrii je SfM vyhodnocení ve všech parametrech přesnější, je to dáno počtem snímků, který není omezen, a do výpočtů mohou vstupovat stovky snímků. Zápornou stránkou metody mohou být vysoké výpočetní nároky a s tím související délka výpočtů, která stoupá úměrně s velikostí objektu a počtem snímků. Čerpáno z [4] a [5]



Obr. 4: Jednoduché schéma metody SfM [4]

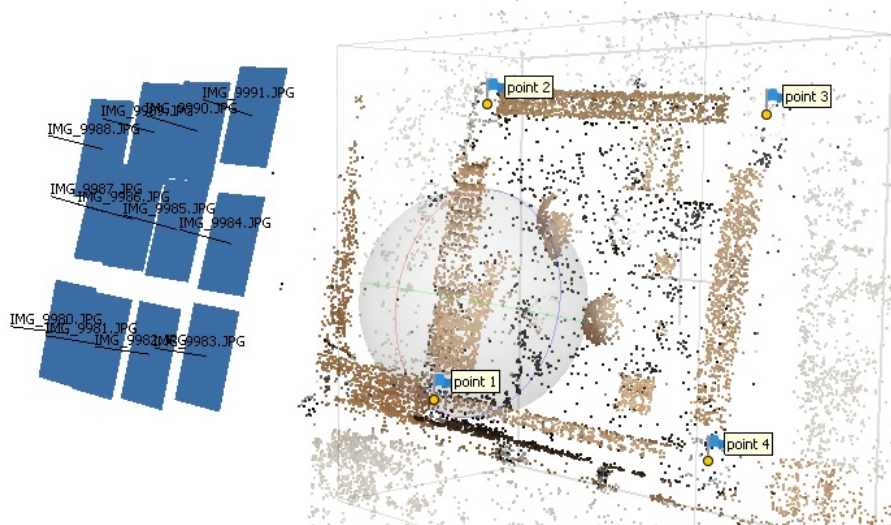
1.2.1 Princip metody SfM

Prvním krokem je nafocení mnoha snímků daného objektu (stejně scény) z různých úhlů s překrytí. Tyto snímky jsou poté načteny do vhodného software (Agisoft Metashape, Bundler, VisualSFM).

Software nejdříve provádí rozpoznání specifických bodů díky metodě SIFT (The Scale Invariant Feature Transform). To je metoda založená na vyhledávání charakteristických bodů (keypoints) z množiny snímků na základě určení lokálních extrémů v obraze. Tyto body se nacházejí nejčastěji na hranách nebo výstupcích objektu a poté dochází k odfiltrování nestabilních bodů. Nestabilní body jsou vyloučeny, jedná se o body, které nejsou dostatečně kontrastní ke svému okolí či některé body na hranách, které nejsou jednoznačné.

Bodům, které nebyly odstraněny, jsou následně vypočítány deskriptory. Deskriptory specificky charakterizují jednotlivé body ve snímku a na základě jejich charakteristik jsou vyhledány odpovídající si body na různých snímcích. Podmínkou je, že každý bod musí být nalezen alespoň třikrát, aby byl zařazen do dalšího procesu. Ze získané sady bodů jsou dále vypočteny projekční centra kamer a orientace snímků v prostoru.

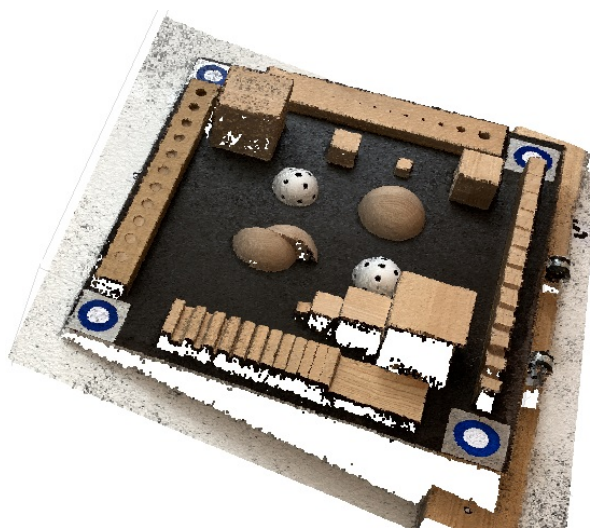
V dalším kroku jsou získány informace o epipolární geometrii všech snímků a je provedena rekonstrukce struktury (structure) v obraze a pohybu (motion) kamery pro všechny snímky najednou. Pro vytvoření této rekonstrukce se využívá sekvenční postup, kdy se počítá structure a motion mezi dvěma snímky a postupně se rozšíří na celou množinu snímků. Výsledkem algoritmu je řídké mračno (Obr. 5) a také relativní poloha všech kamer.



Obr. 5: Řídké mračno a pozice kamer v softwaru Agisoft (vlastní zdroj)

Dalším krokem je svazkové vyrovnání, ve kterém dojde k současnému vyrovnání všech parametrů, tím se myslí souřadnice bodů, pozice a rotace kamer.

Svazkové vyrovnání používá přímé vyjádření mezi snímkovými a modelovými souřadnicemi charakteristických bodů a jeho inverzní vztah. Vztah obsahuje nelineární prvky, proto se pro úpravu aplikuje Taylorův rozvoj. Nyní je již možné vytvořit husté mračno. Pro získání 3D souřadnic hustého mračna (Obr. 6) je zapotřebí další algoritmus jako je např. PMVS (Patch-based Multi-view Stereo). Tento algoritmus pracuje s malými obdélníkovými ploškami, které těsně pokrývají pozorovaný objekt. Tyto plošky algoritmus rozšiřuje do svého okolí a na závěr filtruje nesprávná propojení.



Obr. 6: Husté mračno v softwaru Agisoft (vlastní zdroj)

1.2.2 Vlivy působící na kvalitu výsledného modelu

Kvalita kamery

Jedním ze zásadních parametrů je kvalita kamery (snímače). V dnešní době se nejčastěji využívají digitální zrcadlovky a v případě dronů jsou to menší CCD čipy s vestavěnými objektivy. Rozlišení se udává v megapixelech. Zjednodušeně by se dalo říci, že čím vyšší rozlišení CCD čipu, tím vyšší rozlišení snímku. K zrcadlovce je nutné použít objektiv, ty se rozdělují na normální objektivy, teleobjektivy a rybí oka. Pro fotogrammetrické použití se nejčastěji využívají normální objektivy s pevným ohniskem, jelikož nevykazují tak velké hodnoty radiální distorze, jako je například rybí oko. Nevýhodou oproti rybímu oku je, že nedokáže na jeden záběr obsáhnout tak velké území.

Vzdálenost stanoviška snímání od objektu

Dalším významným faktorem je vzdálenost mezi stanoviškem snímání a daným objektem. Čím vzdálenější objekt, tím menší plochu na snímku bude zaujímat, což sníží rozlišovací schopnost. Při snímání pomocí bezpilotních letounů (UAV) se rozlišení snímku udává hodnotou GSD (Ground Sample Distance). Tato hodnota GSD je definována jako skutečná vzdálenost v terénu, která odpovídá velikosti jednoho pixelu na senzoru kamery. Hodnotu GSD určuje ohnisková vzdálenost kamery, výška letu a velikost jednoho obrazového prvku na senzoru.

Těmito dvěma faktory se zabývá tato diplomová práce, kde je podrobněji zkoumán vliv kvality kamery, a především vzdálenosti stanoviška snímání od objektu na možnosti detekce deformací objektu.

Textura zájmového objektu

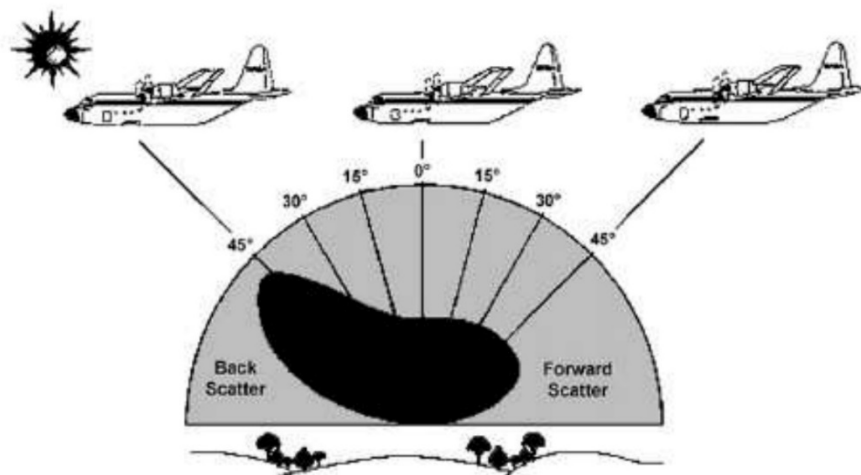
Dalším parametrem, který ovlivňuje kvalitu výsledného modelu je samotná textura objektu. SfM při generování spoléhá na různorodost scény, v níž může charakterizovat jedinečné body, podle kterých bude danou scénu vytvářet. V [14] byl zkoumán vliv textury na výsledné množství vygenerovaných bodů. Pokus byl proveden na 4 objektech: pestře barevné kalhoty, jednobarevný svetr, porcelánová socha a model chalupy se zahradou. Nejvíce bodů bylo vyhodnoceno u chalupy se zahradou. Prvenství tohoto modelu bylo dáno velkou pestrostí barev a také množstvím tvarů. Druhý největší počet bodů měli pestrobarevné kalhoty, a to i přesto, že kalhoty jsou hladké. Právě pestrost kalhot umožnila vygenerovat tak velké množství bodů. Porcelánová socha na tom

byla značně hůře, je sice tvarově různorodá, ale její hladký, lesklý a bílý povrch znesnadňuje detekci bodů. Podobně na tom byl bílý jednobarevný svetr, který sice není lesklý, ale jeho textura je jednotvárná. Nejlepší texturou pro vyhodnocení metodou SfM je tedy pestrobarevný objekt, který je prostorově hodně členitý.

Osvětlení a atmosférické podmínky

Atmosférické podmínky se týkají pouze prací, kdy je snímkováno v terénu, to samé platí také u osvětlení, které je ale také velice stěžejní při snímkování v laboratořích. Míra osvětlení je závislá jak na fázích dne, tak na ročních obdobích. V našich zeměpisných šířkách dopadá více slunečního záření v letním období, naopak v zimě je slunce nízko nad obzorem, tudíž doba i míra osvětlení je nižší. Váhu na kvalitě snímků mají také atmosférické podmínky, protože ovlivňují rozptyl dopadajícího světla, mírou světla, stíny, větrnost a srážkami.

Výsledná kvalita snímků je závislá také na směru osvětlení a úhlu dopadajícího světla. Jednoznačně se nedá říci, za jakých podmínek je nejideálnější pořizování snímků, vždy záleží, za jakým účelem jsou snímky pořízeny. Pro fotogrammetrické snímkování se jeví nejlepší doba pro snímkování, když je slunce ve stejném směru, jako je směr snímkování (Obr. 7).



Obr. 7: Odráživost slunečního záření při snímkování [20]

1.2.3 Software pro SfM

Softwary, které umožňují zpracovat snímky metodou SfM jsou placené, ale je na výběr z několika softwarů, které jsou zdarma. Jedná se například o VisualSFM,



Regard3D nebo Bundler. Výhodou těchto open source programů je jejich jednoduchost a velká míra automatizace celého postupu, což podporuje rozšiřování této metody i mezi laiky.

Mezi komerční softwary patří Pix4D, Reality Capture a Agisoft Metashape, který byl použit v této práci. Čerpáno z [6].

2 Seznámení s experimentem

Cílem práce bylo vyhodnotit několik různých případů snímkování objektu a získat mračno bodů, ze kterého bude vyhodnocována rozlišovací schopnost pro detekci lokálních deformací. V našem případě byla snímaným objektem testovací platforma s několika přípravky pro ověření rozlišovací schopnosti. Provedení experimentu bylo členěno do tří kroků.

Prvním krokem bylo zaměření vřícovacích bodů, které se nacházejí přímo na testovací platformě, pomocí robotizované totální stanice. Vřícovací body byly také kontrolně oměřeny posuvným měřítkem a, vzdálenosti mezi body byly mezi sebou porovnány.

V druhém kroku proběhlo vlastní snímkování ze třech různých vzdáleností se dvěma různými kamerami (zrcadlovka a mobilní telefon) a dále bylo cílem otestovat možnosti vyhodnocení při pořízení videozáznamu. Snímkování proběhlo v laboratoři, kde bylo demonstrováno zejména snímkování s kolmými osami záběru podobně jako při snímkování s UAV. Referenční mračno bylo jediné určeno s využitím kolmých i šikmých snímků z důvodu zajištění vysoké přesnosti.

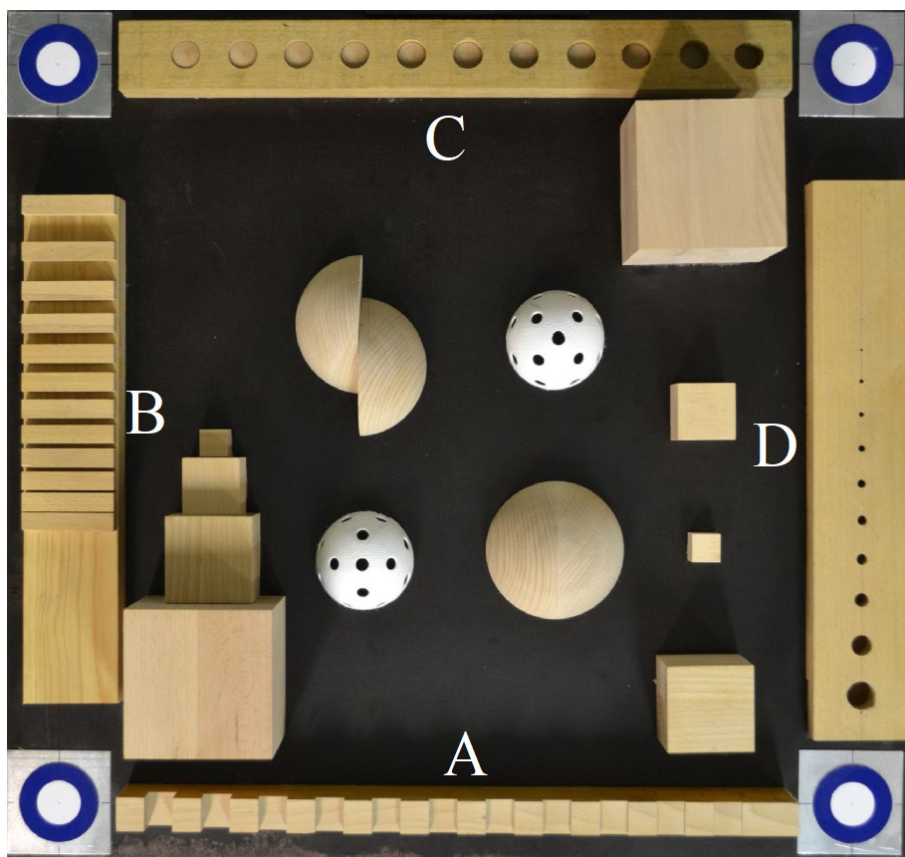
Poslední část byla věnována porovnávání hustých mračen a získávání výsledků. Nejdříve byla jednotlivá mračna porovnávána vždy s referenčním mračnem, kde výsledkem porovnání byla průměrná vzdálenost bodů mračen a jejich směrodatná odchylka. Následně byly vytvořeny řezy testovacími přípravky na platformě a ty byly porovnány s reálnými řezy. Výsledkem tohoto srovnání byly analýzy detekcí deformací. Jedním z dílčích cílů byl i test vlivu počtu snímků na úspěšnost detekce deformace.

3 Pomůcky a vybavení

V této kapitole bude podobně popsána testovací platforma. Dále měřické a softwarové vybavení, které bylo využito pro potřeby této diplomové práce.

3.1 Testovací platforma

Pro potřeby diplomové práce byla využita testovací platforma (Obr. 8), která byla již dříve vytvořena na Katedře speciální geodezie. Testovací platforma má na sobě obrazce s různými velikostmi a různou křivostí. V rozích desky jsou umístěny vlíčovací body a mezi nimi jsou umístěny čtyři přípravky sloužící k určení rozlišovací schopnosti (A, B, C, D). Byly využity také čtyři spojené krychle pro potřeby detekce hran.



Obr. 8: 3D platforma s označenými testovacími obrazci (vlastní zdroj)

3.1.1 Testovací přípravek „A“ – různě hluboké zářezy

Prvním přípravkem je dřevěná deska s vhloubenými zářezy (Obr. 9), které mají různou hloubku, ta se mění, zprava: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15 a 20 mm. Šířka prohlubně v podélném směru je vždy 24 mm a ve směru příčném 20 mm.



Obr. 9: Přípravek s různou hloubkou prohlubní (vlastní zdroj)

3.1.2 Testovací přípravek „B“ – různě vzdálené zářezy

Druhým přípravkem je dřevěná deska s různou vzdáleností zářezů od sebe (Obr. 10). Přípravek má jedenáct různé širokých mezer, které mají ortogonální půdorys, délka těchto mezer je 69 mm a všechny jsou hluboké 13 mm. Šířka se mění, zleva: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15 a 20 mm.



Obr. 10: Přípravek s různou vzdáleností zářezů (vlastní zdroj)

3.1.3 Testovací přípravek „C“ – různě hluboké kruhové prohlubně

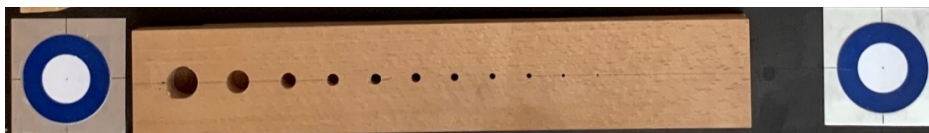
Třetí typ přípravku má kruhové otvory s rozdílnými hloubkami (Obr. 11). Prohlubně je jedenáct a průměr je u všech stejný – 20 mm. Hloubka těchto prohlubní se mění, zleva: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15 a 20 mm.



Obr. 11: Přípravek s různou hloubkou kruhových otvorů (vlastní zdroj)

3.1.4 Testovací přípravek „D“ – různé průměry otvorů

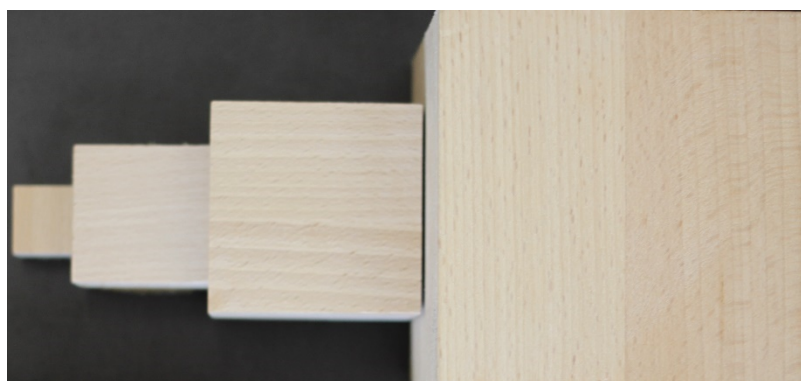
Předposlední testovaný přípravek (Obr. 12) má otvory stejně hluboké (20 mm) s rozdílem, že průměr těchto otvorů se mění, zleva: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 15 a 20 mm.



Obr. 12: Přípravek s různými průměry otvorů (vlastní zdroj)

3.1.5 Testovací přípravek „krychle“ – různé velikosti krychlí

Přípravek obsahuje čtyři krychle o hranách 20, 40, 60 a 100 mm a tvoří pyramidu (Obr. 13).



Obr. 13: Přípravek s různými velikosti krychlí (vlastní zdroj)

3.2 Měřické vybavení

Pro fotogrammetrické zaměření testovací platformy a následné vyhodnocení metodou SfM bylo použito vybavení, které bude v následujících kapitolách podrobněji popsáno. Testovací platforma byla snímkována digitální zrcadlovkou Canon EOS 500D s objektivem Canon EF 40 mm 1:2,8 STM a také mobilním telefonem Apple iPhone Xs, který je vybaven dvojicí hlavních fotoaparátů. Dále byly zaměřeny vřícovací body testovací desky prostřednictvím robotizované totální stanice Trimble S6 HP. Vzájemná vzdálenost vřícovacích bodů byla také změřena posuvným měřítkem s nadstandardním rozsahem 650 mm.

3.2.1 Trimble S6 HP

Totální stanice Trimble S6 HP (Obr. 14) je robotizovaná totální stanice s úhlovou přesností 1" (0,3 mgon). Přesnost měření délek na hranol je 1 mm + 1 ppm a přesnost při bezhranolovém měření je 2 mm + 2 ppm. Čerpáno z [8].



Obr. 14: Totální stanice Trimble S6 HP [8]

3.2.2 Canon EOS 500D

Canon EOS 500D (Obr. 15) je digitální zrcadlovka s APS-C (označení formátu obrazového snímače) velikostí CMOS snímače, která je 22,3 x 14,9 mm a rozlišením 15.1 megapixelů. APS-C jsou menší snímače oproti full frame (standardní filmové políčko) velikosti, která činí 36x24 mm. Maximální rozlišení snímku je 4752 x 3168 pixelů.

Rozsah manuálního ISO je 100 až 12 800. Snímky lze exportovat ve formátu RAW nebo JPEG. Délku expozice je možné měnit od 1/4000 do 30 vteřin. Hmotnost těla zrcadlovky je 480 gramů a rozměr je 128,8 x 97,5 x 61,9 mm.

Bajonet zrcadlovky je určen pro objektivy EF a EF-S. Pro potřeby experimentu byl využíván objektiv Canon EF 40 mm 1:2,8 STM. Čerpáno z [9].



Obr. 15: Zrcadlovka Canon EOS 500D [9]

3.2.3 iPhone XS

Jedná se o mobilní telefon vybavený dvěma hlavními fotoaparáty (Obr. 16). První fotoaparát je vybavený 1/2.55" CMOS snímacím čipem s rozlišením 12 megapixelů. Velikost čtvercového pixelu je 1,4 μm . Objektiv je širokoúhlý se světelností $f/1.8$ a ohniskovou vzdáleností 4,25 mm. Druhý fotoaparát je vybavený 1/3.4" CMOS snímačem se stejným rozlišením 12 megapixelů. Velikost čtvercového pixelu je menší a to 1,0 μm . Fotoaparát disponuje teleobjektivem s dvojnásobným optickým zoomem a světelností $f/2.4$. Snímky byly pořizovány ve formátu *.JPEG. Čerpáno z [10].



Obr. 16: Mobilní telefon iPhone XS [10]

3.2.4 Posuvné měřítko Somet 650 mm

Posuvné měřítko se stavítkem ČSN 25 1231 značky Somet (Obr. 17) má měřicí rozsah 650 mm. Délky je možno určovat s přesností na 0,02 mm. Čerpáno z [11].



Obr. 17: Posuvné měřítko Somet ČSN 25 1231 (vlastní zdroj)

3.3 Softwarové vybavení

Pro potřeby zpracování diplomové práce byly využity softwary pro geodetické vyhodnocení, pro vyrovnání souřadnic, transformace, pro fotogrammetrické zpracování a pro práci s mračny bodů. Tyto softwary budou v této kapitole podrobněji popsány.

3.3.1 GNU Gama 1.7.09-svd

GNU Gama je open source software pro vyrovnání měřických sítí, kde je nadbytečný počet měření. Do výpočtu mohou vstupovat: směry, délky, zenitové úhly, převýšení, 3D vektory a souřadnice. Čerpáno z [15].

3.3.2 XYZTrans v2.0

Tento software umožňuje výpočet transformačního klíče pro nejpoužívanější prostorové transformace – shodnostní, podobnostní a obecnou afinní a následnou transformaci dalších bodů. Software vyvinul prof. Štroner z katedry speciální geodézie. Do softwaru vstupuje textový soubor se souřadnicemi identických a transformovaných bodů. Čerpáno z [16].

3.3.3 Agisoft Metashape Professional v. 1.5.2.7838

Pro zpracování snímků metodou Structure from Motion bylo využito softwaru od společnosti Agisoft LLC (Petrohrad, Rusko). Společnost se zabývá problematikou automatického 3D modelování a mapování, založeným na technologii počítačového zobrazení a digitálního obrazu. Pro potřeby zpracování této diplomové práce byl použit produkt Metashape. Tento software umožňuje tvorbu 3D texturovaných modelů, georeferencovaných ortofotosnímků s vysokým rozlišením a detailní model terénu. Plně automatizovaný pracovní postup umožňuje zpracovávat tisíce snímků. Metashape dokáže zpracovávat také videozáznamy, bohužel starší verze (Agisoft PhotoScan) nedokáže videozáznam vyhodnotit. Je ale možné pomocí dalšího softwaru vyhodnotit snímky (frames) z videozáznamu a tyto snímky následně nahrát klasickým způsobem do softwaru Agisoft PhotoScan a dále pokračovat ve zpracování. Čerpáno z [12].

3.3.4 CloudCompare v. 2.10.3.

Pro práci s mračny bodů a jejich porovnání byl použit open source software CloudCompare v. 2.10.3. CloudCompare je software pro zpracování bodových mračen, trojúhelníkových sítí a kalibrovaných obrázků. Software vznikl spoluprací mezi Telecom ParisTech a R&D divizí EDF a práce byly odstartovány v roce 2003. Prvním účelem byla

možnost detekce změn na 3D geometrických datech, tedy především odhalit změny v bodových mračcích s vysokou hustotou pořízených např. laserovými skenery. Poté se vyvinul k obecnějšímu a pokročilejšímu softwaru pro zpracování 3D dat. Software byl vyvíjen v programovacím jazyce C++. Čerpáno z [13].

3.3.5 Bentley MicroStation CONNECT Edition

Microstation patří mezi CAD (Computer Aided Design) softwary. Umožňuje kreslení plošných výkresů, modelování objektů ve 2D i 3D, a další geometrické a grafické nástroje. Software byl použit pro vytvoření řezů testovacích přípravků. Čerpáno z [18].

3.3.6 Inkscape 0.92.4

Inkscape je open source program pro práci s vektorovou grafikou. V diplomové práci byl použit pro porovnání řezů s testovacími přípravky. Čerpáno z [19].

4 Provedení experimentu

V této kapitole je popsán postup měření dat a jejich následné zpracování pro fotogrammetrické vyhodnocení.

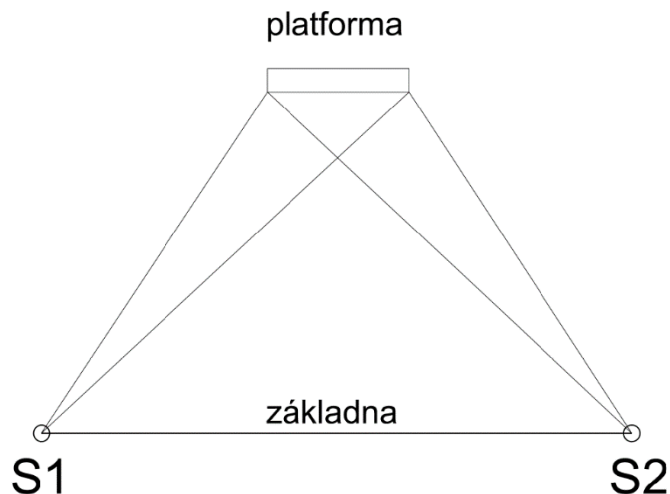
4.1 Měření a zpracování vlíčovacích bodů

Na testovací platformě byly umístěny v rozích 4 vlíčovací body, které sloužily k určení rozměru při fotogrammetrickém zpracování. Stabilizace bodů byla provedena s pomocí kovových čtvercových terčů o velikosti 6x6 cm (Obr. 18).



Obr. 18: Detail vlíčovacího bodu (vlastní zdroj)

Samotné měření vlíčovacích bodů proběhlo pomocí robotizované totální stanice Trimble S6 HP. Měření celého experimentu probíhalo v laboratorních podmínkách za stálé teploty ze dvou stanovisek, které byly vzdálené cca 2,5 m. Základna byla volena rovnoběžně s testovací platformou, kdy vzdálenost platformy od základny byla cca 2,5 m. Z každého stanoviska byl měřen vodorovný směr, zenitový úhel a délka na každý vlíčovací bod ve dvou skupinách. Na Obr. 19 je znázorněna situace měření, stanoviska jsou označena S1 a S2. Počítáno bylo v místní souřadnicové soustavě, osa X byla vložena do spojnice dvou stanovisek (základny).



Obr. 19: Situace měření vřícovacích bodů (vlastní zdroj)

4.1.1 Vyrovnání měření v GNU Gama

Zpracování proběhlo v softwaru GNU Gama. Byla použita verze 1.7.09. Naměřená data robotizovanou totální stanicí Trimble S6 HP (příloha J) byla upravena a vložena do textového souboru (příloha K). Počítáno bylo v místní souřadnicové soustavě, osa X byla vložena do spojnice dvou stanovišek (základny). Apriorní směrodatná odchylka úhlu byla 50 gonových vteřin a pro délky byla 1,5 mm.

GNU Gama byla otevřena v příkazovém řádku vyvolaném v prostředí Microsoft příkazem CMD. Po výpočtu byl automaticky exportován protokol o výpočtu (viz příloha 1). Vyrovnané souřadnice vřícovacích bodů včetně charakteristik přesnosti z vyrovnání jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Vyrovnané souřadnice vřícovacích bodů se směrodatnými odchylkami

Bod	Souřadnice [m]			Směrodatná odchylka [mm]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	1,4381	2,4918	-1,2321	0,0	0,1	0,1
2	1,4314	2,5818	-0,7000	0,0	0,2	0,0
3	0,8518	2,5607	-0,7061	0,1	0,2	0,0
4	0,8586	2,4773	-1,2383	0,1	0,1	0,1

4.1.2 Transformace souřadnic

V dalším kroku byly souřadnice transformovány do místní soustavy platformy. Tento krok byl učiněn z důvodu pozdějšího snadnějšího zpracování. Byl využit software XYZTrans v2.0. Prvním krokem bylo načtení souřadnic v textovém souboru, ve kterém byly souřadnice identických bodů a také souřadnice transformovaných bodů. V tomto případě byl transformovaným pouze jeden bod, zbylé tři body byly identické. Byla zvolena shodnostní transformace a byl vypočten transformační klíč. Nakonec kliknutím na „Transformovat“ byla provedena transformace podrobných bodů a následně byl zobrazen protokol o výpočtu. V Tab. 2 lze nalézt vstupní hodnoty souřadnic identických bodů a transformovaného bodu, ve stejné jsou také souřadnice výstupní soustavy a transformované souřadnice.

Tab. 2: Souřadnice identických bodů a transformovaného bodu

Identické body	Vstupní soustava			Výstupní soustava		
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	1,4381	2,4918	-1,2321	0,0000	0,0000	0,0000
2	1,4314	2,5818	-0,7000	0,5399	0,0000	0,0000
4	0,8586	2,4773	-1,2383	-0,0011	0,5796	0,0000
Transformovaný bod						
3	0,8518	2,5607	-0,7061	0,5376	0,5800	0,0065

4.1.3 Porovnání vzdáleností vřícovacích bodů

Pro ověření měření totální stanicí byly vzdálenosti mezi vřícovacími body změřeny také posuvným měřítkem Somet s měřícím rozsahem 65 cm. Délky úhlopříček nemohly být kontrolně určeny z důvodu krátkého rozsahu měřítka. Tyto vzdálenosti byly porovnány s vypočtenými vzdálenostmi ze souřadnic. Vzdálenosti vypočtené ze souřadnic a vzdálenosti určené posuvným měřítkem jsou porovnány v Tab. 3.

Tab. 3: Porovnání vzdáleností

Strana	Vyrovnaní [m]	Posuvné měřítko [m]	Rozdíl [mm]
1-2	0,5398	0,5397	0,1
2-3	0,5797	0,5798	0,1
3-4	0,5388	0,5789	0,1
1-4	0,5796	0,5796	0,0
Úhlopříčky			
1-3	0,7906	Nelze měřit	-
2-4	0,7928	Nelze měřit	-

Transformované souřadnice a délky určené posuvným měřítkem dále vstupovaly do softwaru Agisoft Metashape.

4.2 Snímkování

Snímkování testovací platformy proběhlo v několika etapách. Při snímkování první etapy bylo dbáno na co nejpodrobnější zachycení všech deformací. Bylo snímkováno zrcadlovkou Canon EOS 500D z blízké vzdálenosti (40-60 cm) s důrazem na velké překryty (70 %). Bylo pořízeno celkem 94 snímků v kolmém i šikmém směru. Toto podrobné zachycení deformací sloužilo pro pozdější porovnávání s dalšími snímkanými případy.

V další etapě byla snímkována testovací platforma zrcadlovkou Canon EOS 500D a také mobilním telefonem iPhone Xs. Snímkování bylo provedeno pouze ve směru kolmém na testovací platformu. Vzdálenosti snímkování jsou tři, první vzdálenost byla cca 1,35 m, druhá vzdálenost snímkování byla cca 2,8 m a poslední vzdáleností snímkování od testovací desky je cca 4,25 m. U jednotlivých případů snímkování se mění počet snímků z důvodu zajištění překrytů cca 70%. U vzdáleností 2,8 a 4,25 m jsou překryty ještě větší. Při snímkování všech etap bylo dbáno na dobré světelné podmínky v laboratoři. V neposlední řadě bylo také provedeno snímání pomocí videozáznamu ze vzdálenosti 1,35 m s následným střihem na jednotlivé snímky (kapitola 4.3.1). Na Obr. 20 jsou schematicky znázorněny vzdálenosti snímkování jednotlivými kamerami a v Tab. 4 je shrnutí počtu snímků se snímkaným rozlišením.



Obr. 20: Schéma snímkování (vlastní zdroj)

Tab. 4: Shrnutí snímkování

Kamera	Vzdálenost (cm)	Rozlišení snímku [pix]	Počet snímků
Canon 500D - ref.	60	4752 x 3168	94
Canon 500D	135	4752 x 3168	18
Canon 500D	280	4752 x 3168	16
Canon 500D	425	4752 x 3168	6
iPhone Xs	135	3024 x 3024	12
iPhone Xs	280	3024 x 3024	9
iPhone Xs	425	3024 x 3024	9
iPhone Xs - video	135	3840 x 2160	22

4.3 Zpracování snímků metodou SfM

Pro zpracování snímků metodou SfM byl zvolen software Agisoft Metashape Professional v. 1.5.2.7838.

4.3.1 Pořízení a zpracování videozáznamu

Pro potřeby porovnávání bylo pořízeno video, které umožňuje software Agisoft Metashape zpracovat.

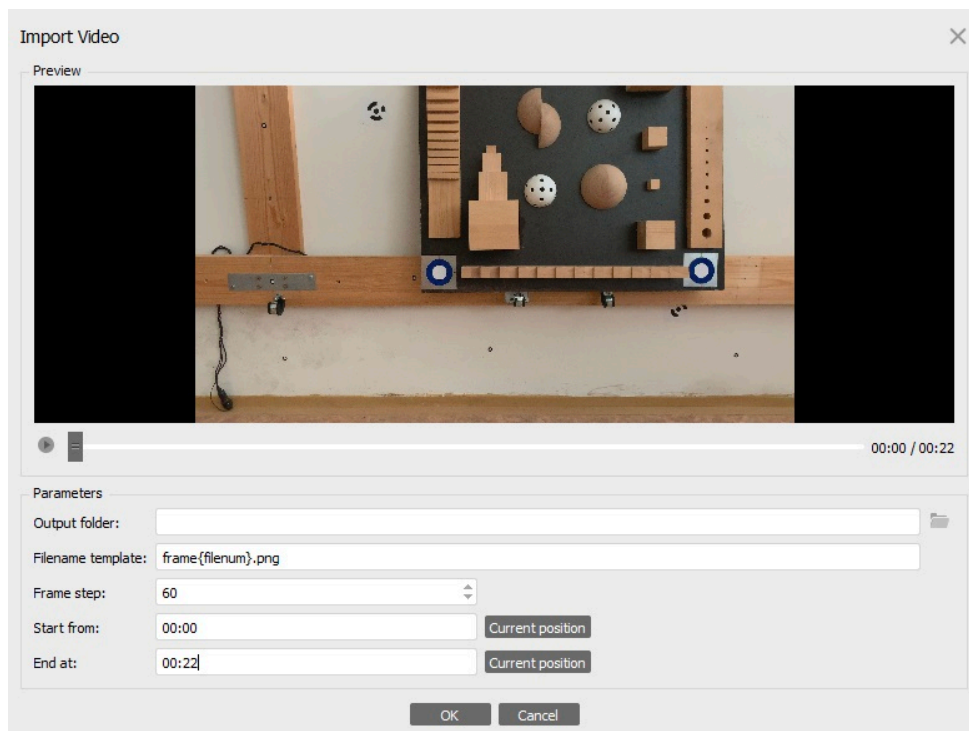
Pořízení video záznamu proběhlo stejným stylem jako snímkování, tj. z jedné vzdálenosti, pokud možno stejné a kolmo na objekt. Kamerou bylo opatrně pohybováno po obraze plochy celé platformy, aby byly zachyceny všechny části. Jako kamera byl využit mobilní telefon Apple iPhone Xs s širokoúhlým objektivem. Kvalita video záznamu byla nastavena na 4K (3840 x 2160 pixelů) při 30 snímcích za vteřinu. Délka pořízeného videa byla 22 vteřin.

Prvním krokem zpracování videozáznamu je import videa (File-Import-Import Video), je možno načíst soubory s koncovkami: .AVI, .FLV, .MOV,

.MP4 a .WMV. Často se vyskytují problémy s nahráním video záznamu, to je vyřešeno instalací příslušného balíčku s kodeky (codec pack).

V dialogovém okně „Import Video“ (Obr. 21) byly nastaveny parametry zpracování. Nejdříve byl zvolen soubor, kam se mají nahrát vytvořené snímky (frames) a v jakém formátu. Dále s jakým krokem mají být snímky uloženy. Nakonec byl definován úsek videa, ze kterého se mají snímky vytvořit.

Podrobněji byla zkoumána funkce nastavení kroku snímků. Snímky byly vyhodnocovány s krokem 1, 3, 10, 15, 30 a 60 snímků. Bohužel software nedokázal vyhodnotit všechny snímky s krokem do 30 snímků. U těchto malých kroků byl vyhodnocen výrazně nižší počet snímků, než by měl být, například krok 1 na 22 vteřinovém záznamu vyhodnotil pouze 145 snímků namísto 660 skutečných snímků. Až od kroku 30, software zachytil veškeré snímky tj. 22 snímků při pořízení videa s 30 fps (frames per second). Pro účely diplomové práce byl video záznam vyhodnocen s krokem 60.



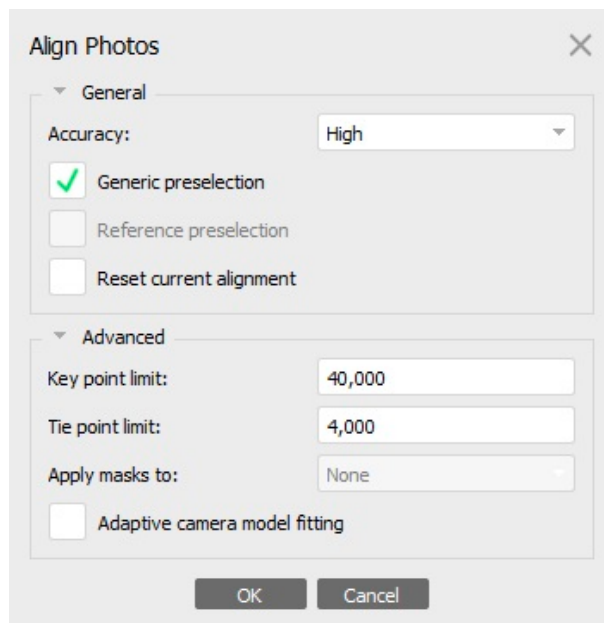
Obr. 21: Dialogové okno Import Video (vlastní zdroj)

4.3.2 Výpočet řídkého mračna

Prvním krokem k vytvoření požadovaného mračna bylo načtení snímků do příslušného adresáře (chunk). V tomto případě byly nahrány snímky ve formátu JPEG, software dokáže pracovat i s dalšími formáty, jako je TIFF, BMP a PNG.

Spuštěním funkce „Align Photos“ dojde k vyhledání klíčových bodů na snímcích, jejich vzájemnému přiřazení pomocí korelace a svazkovému vyrovnání vnitřní a vnější orientace snímků v lokálním souřadném systému.

Výsledkem je řídké mračno bodů (sparse cloud) s prvky vnitřní a vnější orientace. Dialogové okno funkce „Align Photos“ (Obr. 22) umožňuje nastavit přesnost, která byla nastavena na „High“. Dalším parametrem je „Pair preselection“, kde byla nastavena položka „Generic“. Tato možnost je volena v případě, kdy nejsou známy pozice kamer při snímání, tj. případ této diplomové práce. V podokně „Advanced“ nebyla měněna defaultní nastavení, je zde možnost měnit maximální počet klíčových bodů snímků (Key point limit) a maximální počet spojovacích bodů (Tie point limit) na snímek.



Obr. 22: Dialogové okno Align Photos (vlastní zdroj)

4.3.3 Určení měřítka a souřadného systém

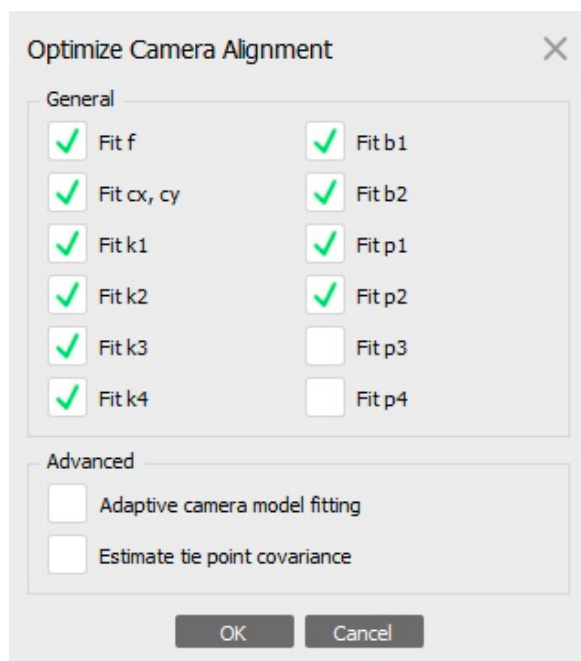
V dalším kroku bylo nutné určit měřítko a souřadný systém modelu. Nejdříve je provedena identifikace vlíčovacích bodů (markers). Jsou to body, které slouží softwaru

pro určení měřítka pomocí vzdáleností (scale bar) či přímou transformaci do souřadnicového systému a vzájemnému svazkovému vyrovnání snímků.

Byl zvolen manuální přístup, kdy jednotlivé body byly označovány na každém snímku. V panelu „Photos“ byl vybrán příslušný snímek, který byl dvojklikem zobrazen v hlavním okně. Na snímku byly vybrány vlíčovací body a bylo kliknuto na pravé tlačítko a v dialogovém okně zvolena možnost „Create marker“. Stejným postupem byly označeny i další vlíčovací body na snímku a celý postup byl zopakován i u dalších snímků.

Po identifikaci vlíčovacích bodů byly vloženy měřítka (scale bars), které daly objektu rozměr (v případě této práce byly vloženy míry získané z pomůcky Somet). Byly vybrány dva body (markers), následně poklepáno pravým tlačítkem na jeden z nich a byla vybrána možnost „Create scale bar“. V menu měřítka byla zvolena velikost (distance) každého měřítka. Celkem bylo zadáno 6 délek (4 strany a 2 úhlopříčky), které jsou uvedeny v *Tab. 3*. Jednotlivým bodům (markers) byly dány souřadnice z *Tab. 2*, které byly transformovány do matematické souřadnicové soustavy Agisoftu, kde $X = -Y$ a $Y = -X$

Byla spuštěna funkce „Optimize Camera Aligment“, kde byly zvoleny prvky vnitřní orientace, které mají být vyrovnané (Obr. 23). Mezi vyrovnávané prvky vnitřní orientace patří ohnisková vzdálenost (f), poloha hlavního snímkového bodu (c_x , c_y), koeficienty radiální distorze (k_1 - k_4), afinita a nekolmost os souřadnicových systémů (b_1 , b_2) a koeficienty tangenciální distorze (p_1 - p_4). Software navrhuje optimální řešení, proto nebyly zaškrtnuty koeficienty p_3 a p_4 .



Obr. 23: Dialogové okno *Optimize Camera Alignment* (vlastní zdroj)

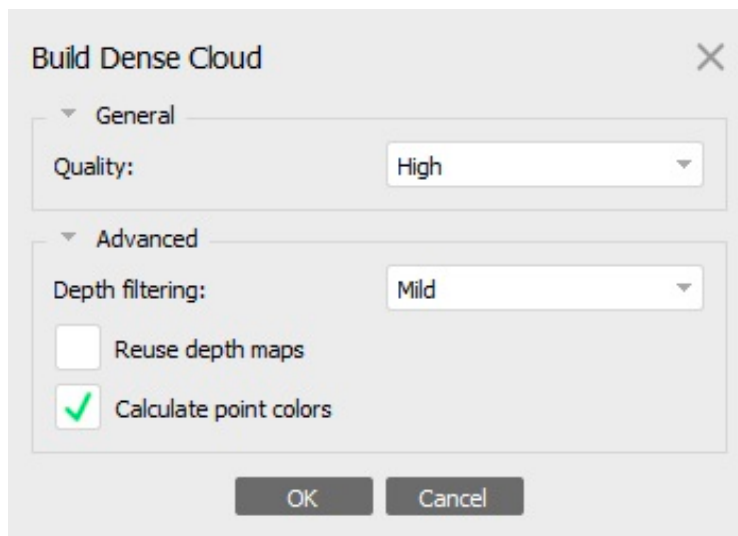
Software dopočítal po optimalizaci chyby v projekci každého vlíčovacího bodu v metrech a také v pixelech. V Tab. 5 jsou uvedeny spočtené průměrné chyby z jednotlivých snímkových případů.

Tab. 5: Shrnutí chyb na vlíčovacích bodech

Případ	Reprojection error [m]	Error vlíčovacích bodů [pix]
Canon 500D - ref.	0,00044	0,167
Canon 500D - 1. vzd	0,00049	0,074
Canon 500D - 2. vzd	0,00098	0,258
Canon 500D - 3. vzd	0,00277	0,157
iPhone Xs - 1. vzd	0,00064	0,304
iPhone Xs - 2. vzd	0,00152	0,505
iPhone Xs - 3. vzd	0,01167	0,949
iPhone Xs - video	0,00032	0,152

4.3.4 Výpočet hustého mračna

Vytvoření hustého mračna bodů (dense cloud) bylo provedeno pomocí funkce „Build Dense Cloud“. V této fázi bylo generováno husté mračno bodů, kdy byly programem vypočítány informace o hloubce obrazu všech snímků, které mají být sloučeny do jednoho mračna bodů. Tato část umožňuje nastavit dva parametry (Obr. 24).



Obr. 24: Dialogové okno Build Dense Cloud (vlastní zdroj)

Prvním parametrem byla kvalita „Quality“. Na výběr dává z pěti možností: Lowest, Low, Medium, High a Ultra High. Bylo zvoleno nastavení „high“, které pracuje s nativním rozlišením snímků. S rostoucí kvalitou hustého mračna roste také doba zpracování. Druhým parametrem byla hloubka filtrování (Depth Filtering), jde o možnost volby mezi metodami filtrace mračna a odlehlých bodů. Na výběr bylo z několika možností: Disabled, Mild, Moderate a Aggressive. Pro komplexní scénu s velkou četností malých detailů nebo netexturovaných povrchů je obecně doporučeno výrobcem softwaru zvolit metodu „Mild“, která byla použita i v případě zpracování diplomové práce. Metoda „Aggressive“ je používána pro modelování scén bez drobných detailů. „Moderate“ nabízí kompromis mezi těmito metodami a možnost „Disabled“ filtraci zakazuje.

Nakonec byly vytvořeny reporty vypočtených modelů (Generate Report), reporty jsou součástí příloženého DVD ve složce reporty.

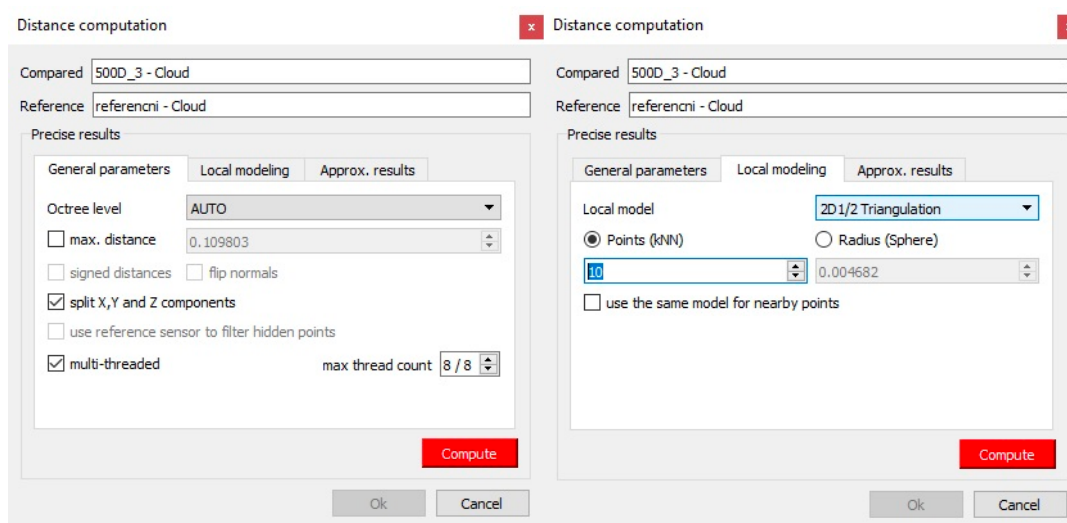
4.4 Zpracování v programu CloudCompare

Nejdříve byla importována mračna bodů vypočtená v Agisoft Metashape, která byla vhodně ořezána, aby zachycovala pouze zájmový objekt. Všechna porovnávaná mračna byla ve stejném souřadném systému a nebylo je tedy nutné nijak dále transformovat. V Tab. 6 jsou uvedeny počty bodů hustých mračen po ořezání, jsou to tedy pouze body testovací platformy. V tabulce jsou dále maximální úhly protnutí snímkování, jednotlivé úhly byly vypočteny ze souřadnic středu testovací platformy a ze souřadnic středu vstupní pupily snímku, který byl pořízen pod největším úhlem protnutí.

Tab. 6: Počet bodů hustých mračen modelů a maximální úhly protnutí

Kamera	Vzdálenost (cm)	Počet bodů	Max. úhel protnutí [gon]
Canon 500D - ref.	60	46 809 446	53
Canon 500D	135	6 019 168	13
Canon 500D	280	1 854 027	16
Canon 500D	425	906 109	10
iPhone Xs	135	1 414 199	6
iPhone Xs	280	380 277	4
iPhone Xs	425	237 046	3
iPhone Xs - video	135	1 509 097	14

Porovnání vždy dvou mračen bylo provedeno funkcí „Compute cloud/cloud distance“, kde v prvním kroku bylo zvoleno referenční a porovnávané mračno. V dialogovém okně „Distance computation“ (Obr. 25) byly nastaveny nejdříve základní parametry, ty zůstaly defaultně, jen výpočet byl rozdělen na určování odchylek v osách X, Y a Z. V podokně „Local modeling“ byla zvolena možnost 2D1/2 Delaunayova triangulace, kde bylo zvoleno 10 sousedních bodů, k tzv. nejbližšímu sousedovi. Porovnávána byla vždy mračna jednotlivých testovaných přípravků.



Obr. 25: Dialogové okno Compute cloud/cloud distance (vlastní zdroj)

Když byly vzdálenosti mezi mračny dopočteny, byla výsledná mračna porovnávána na základě souřadnice Z. Vypočteny byly statistické parametry normálního rozdělení pro vzdálenosti v ose Z, kterými jsou průměrná vzdálenost a směrodatná odchylka, které jsou dále uvedeny v tabulkách ve výsledcích.

5 Výsledky

V této kapitole bude testována rozlišovací schopnost jednotlivých konfigurací snímkování. Nejdříve v kapitole 5.1 je rozebrána rozlišovací schopnost po jednotlivých přípravcích v pořadí:

- 1) porovnání testovacího přípravku „A“,
- 2) porovnání testovacího přípravku „B“,
- 3) porovnání testovacího přípravku „C“,
- 4) porovnání testovacího přípravku „D“,
- 5) porovnání testovacího přípravku „krychle“.

Hodnocení probíhalo na základě řezu vedeného jednotlivými testovacími přípravky. V každém řezu lze vidět, a tedy i hodnotit rozlišovací schopnost použité konfigurace snímkování. Bylo provedeno ústní hodnocení podle vizuálního rozpoznání rozlišovací schopnosti dané konfigurace. Hodnocení bylo dále doplněno tabulkami, ve kterých jsou uvedeny hodnoty průměrných vzdáleností v ose Z referenčního a porovnávaného mračna.

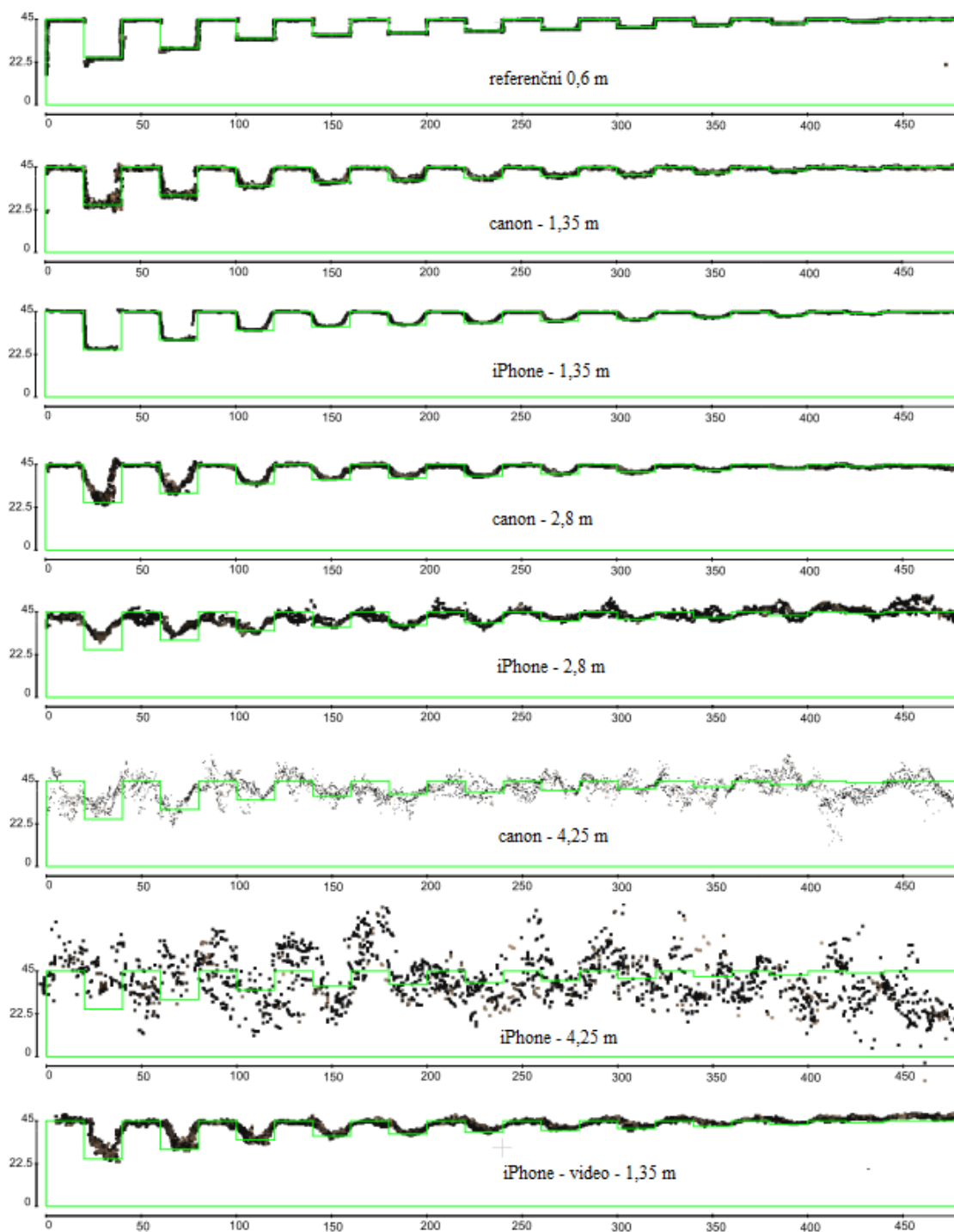
V druhé části výsledků byla testována funkce „Reduce overlap“, která používá do výpočtu hustého mračna pouze nezbytný počet snímků pro vyhodnocení. Touto funkcí byla simulována efektivita počtu snímků. „Reduce overlap“, která vždy počet snímků sníží a předpoklad byl, že by se měla tedy zhoršit také rozlišovací schopnost.

V poslední části byly výsledky detekcí přepočteny do třech možných výšek letu bezpilotního letounu – UAV.

5.1 Možnosti detekce deformací na testovacích přípravcích

Testování rozlišovací schopnosti bylo provedeno po jednotlivých přípravcích, kdy byly porovnány jednotlivé případy s referenčním mračnem. Pro tyto potřeby byl definován pojem *detekce* deformace, což znamená rozpoznání prohlubně či mezery tak, že lze prohlubeň nebo mezeru identifikovat a body mračna se vyskytují alespoň ve 2/3 hloubky prohlubně či mezery.

5.1.1 Detekce deformací na přípravku „A“



Obr. 26: Detekce deformací na přípravku „A“ (vlastní zdroj)

Na Obr. 26 je porovnání jednotlivých případů testovacího přípravku „A“, který má různě hluboké zářezy čtvercového tvaru. U referenčního mračka, byly detekovány všechny prohlubně. Stále vysoká míra detekce je také u případů, kdy vzdálenost

snímkování byla 1,35 m dostatečná pro detekci i nejmenších prohlubní. U případů snímkovaných ze vzdálenosti 2,8 m bylo možné detekovat velké množství prohlubní, ale hrany již nebyly tak ostré. K výraznějšímu zhoršení došlo u snímkování mobilním telefonem ze vzdálenosti 2,8 m, kde spolehlivě bylo možné detekovat pouze tři největší prohlubně. U digitální zrcadlovky ani u mobilního telefonu při snímkování z poslední vzdálenosti nebylo možné spolehlivě detekovat žádnou prohlubeň. Poslední případ byl vyhodnocen z videozáznamu, který byl pořízen ze vzdálenosti 1,35 m na mobilní telefon. Měl by být podobný vyhodnocení telefonem z první vzdálenosti, kde oproti videozáznamu byly pořízeny snímky. Detekce u videozáznamu je horší a bylo možné detekovat pouze první polovinu prohlubní. Shrnutí detekcí prohlubní je uvedeno v Tab. 7. V Tab. 8 jsou shrnuty odchylky v ose Z referenčního mračna od jednotlivých porovnávaných mračen. Nahodilost výsledků udává směrodatná odchylka.

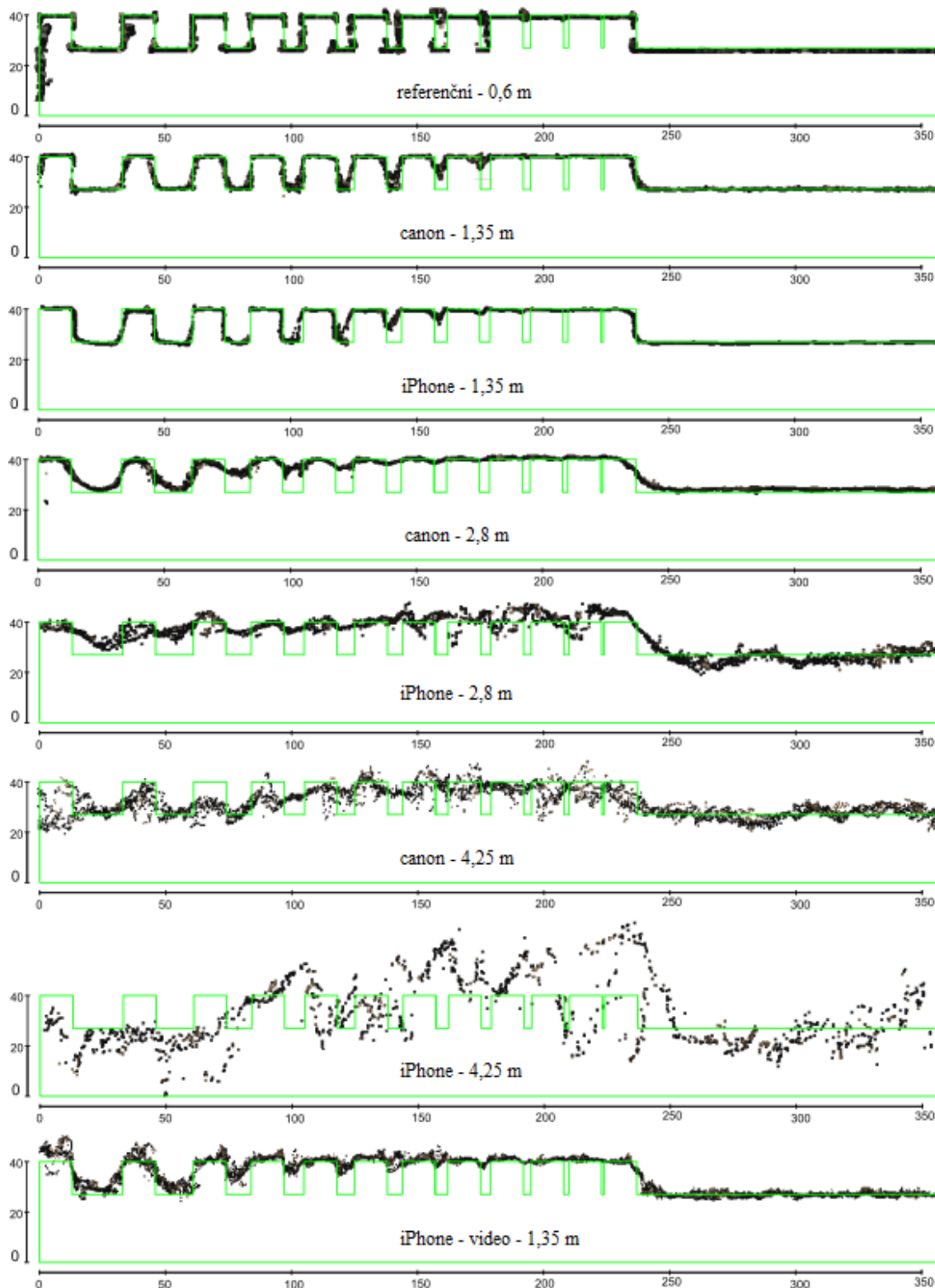
Tab. 7: Shrnutí detekcí na přípravku „A“

Kamera	Vzdálenost [cm]	Ground resolution	Nejmenší detekovaná prohlubeň [mm]	Počet pixelů na deformaci
Canon 500D - ref	60	0,068	1	14,7
Canon 500D	135	0,170	1	5,9
iPhone Xs	135	0,327	1	3,1
Canon 500D	280	0,333	1	3,0
iPhone Xs	280	0,762	3	3,9
Canon 500D	425	0,610	-	-
iPhone Xs	425	1,030	-	-
iPhone Xs - video	135	0,370	3	8,1

Tab. 8: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou

Porovnání odchylek vzorku "A"			
Kamera	Vzdálenost (cm)	Průměrná odchylka (mm)	Sm. Odchylka (mm)
Canon 500D	135	0,5	4,1
Canon 500D	280	1,0	4,2
Canon 500D	425	0,0	5,3
iPhone Xs	135	0,1	4,5
iPhone Xs	280	0,5	5,5
iPhone Xs	425	20,2	15,8
iPhone Xs - video	135	0,5	4,4

5.1.2 Detekce deformací na přípravku „B“



Obr. 27: Detekce deformací na přípravku „B“ (vlastní zdroj)

U testovacího přípravku „B“ (Obr. 27) docházelo k rozpoznávání různě širokých mezer. Bylo rozpoznáno 7 z celkových 11 mezer. Poslední rozlišitelná byla mezera o velikosti 5 mm. I vzhledem k vysoké podrobnosti snímkování nebyly identifikovatelné mezery o velikostech nižších než 5 mm u referenčního mračna bodů. Při vzdálenosti snímkování 1,35 m bylo detekováno 5 mezer v případě zrcadlovky, u telefonu to byly 4 mezery. Poslední mezery byly detekovány ze vzdálenosti 2,8 m při snímkování zrcadlovkou, konkrétně mezery o velikosti 15 a 20 mm. V případě mobilního telefonu nebyly mezery rozpoznány. Ze vzdálenosti 4,25 m nebyly detekovány žádné mezery v případě zrcadlovky ani z mobilního telefonu. Posledním případem bylo vyhodnocení z videozáznamu. Jako u přechozího přípravku bylo detekováno méně mezer, detekovány byly pouze dvě největší mezery. Shrnutí detekcí mezer je uvedeno v Tab. 9. V Tab. 10 jsou shrnuty odchylky v ose Z referenčního mračna od jednotlivých porovnávaných mračen.

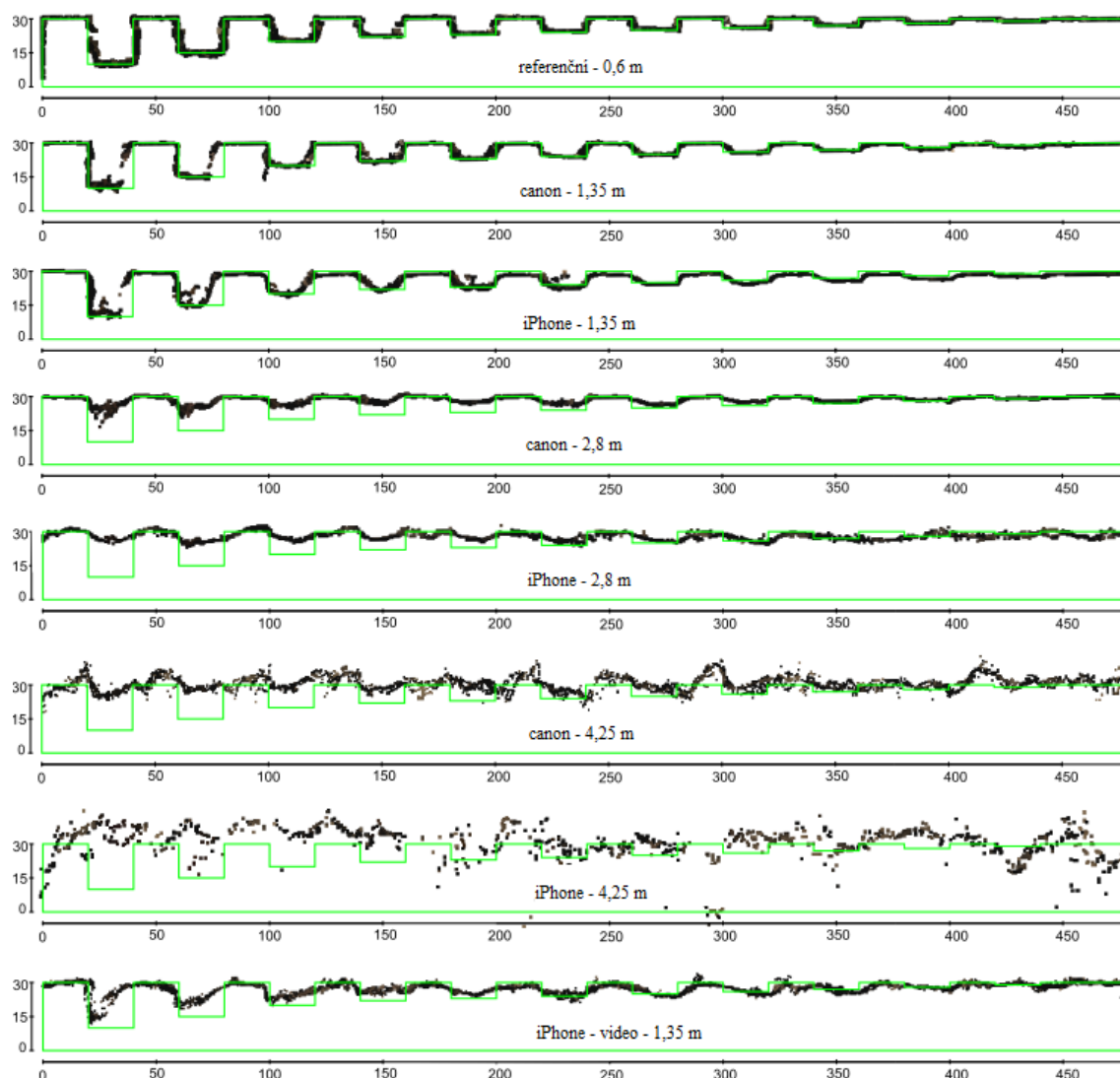
Tab. 9: Shrnutí detekcí na přípravku „B“

Kamera	Vzdálenost [cm]	Ground resolution	Nejmenší detekovaná mezera [mm]	Počet pixelů na deformaci
Canon 500D - ref	60	0,068	4	58,8
Canon 500D	135	0,170	7	41,2
iPhone Xs	135	0,327	8	24,5
Canon 500D	280	0,333	15	45,0
iPhone Xs	280	0,762	-	-
Canon 500D	425	0,610	-	-
iPhone Xs	425	1,030	-	-
iPhone Xs - video	135	0,370	15	40,5

Tab. 10: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou

Porovnání odchylek vzorku "B"			
Kamera	Vzdálenost (cm)	Průměrná odchylka (mm)	Sm. Odchylka (mm)
Canon 500D	135	0,9	6,0
Canon 500D	280	2,6	7,7
Canon 500D	425	0,1	5,7
iPhone Xs	135	1,2	7,1
iPhone Xs	280	0,2	7,2
iPhone Xs	425	7,7	12,8
iPhone Xs - video	135	1,8	7,5

5.1.3 Detekce deformací na přípravku „C“



Obr. 28: Detekce deformací na přípravku „C“ (vlastní zdroj)

Na testovacím přípravku „C“ (Obr. 28) byla rozpoznávána rozlišovací schopnost různě hlubokých kruhových otvorů. V případě referenčního modelu bylo snadno rozpoznáno všech 11 kruhových otvorů. U případů snímkaných ze vzdálenosti 1,35 m bylo detekováno všech 11 otvorů. Při snímkování ze vzdálenosti 2,8 m již otvory dle definice detekovány nebyly ani u jednoho z fotoaparátů. Dle očekávání u poslední vzdálenosti – 4,25 m nebyly detekovány žádné otvory. Z videozáznamu nebylo možné mračno vyhodnotit, ale bylo možné detekovat tři největší otvory – 20, 15 a 10 mm. Shrnutí detekcí prohlubní je uvedeno v tabulce (Tab. 11). V Tab. 12 jsou shrnuty

odchyly v ose Z referenčního mračna od jednotlivých porovnávaných mračen. Nahodilost výsledků udává směrodatná odchylna.

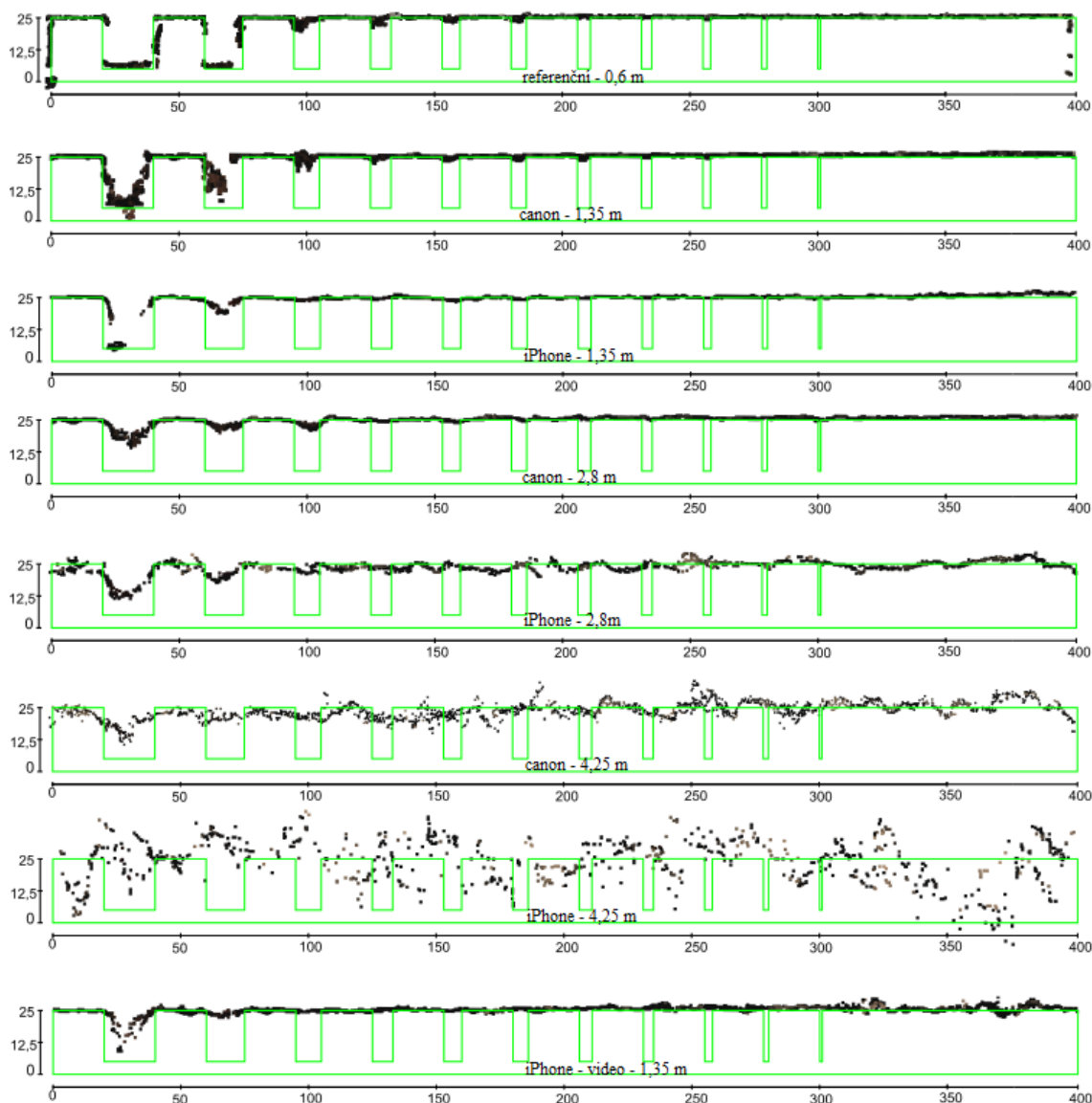
Tab. 11: Shrnutí detekcí na přípravku „C“

Kamera	Vzdálenost [cm]	Ground resolution	Nejmenší detekovaná prohlubeň [mm]	Počet pixelů na deformaci
Canon 500D - ref	60	0,068	1	14,7
Canon 500D	135	0,170	1	5,9
iPhone Xs	135	0,327	1	3,1
Canon 500D	280	0,333	-	-
iPhone Xs	280	0,762	-	-
Canon 500D	480	0,610	-	-
iPhone Xs	480	1,030	-	-
iPhone Xs - video	135	0,370	10	27,0

Tab. 12: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou

Porovnání odchylek vzorku "C"			
Kamera	Vzdálenost (cm)	Průměrná odchylka (mm)	Sm. Odchylka (mm)
Canon 500D	135	0,4	4,8
Canon 500D	280	0,6	6,1
Canon 500D	425	3,2	2,6
iPhone Xs	135	0,0	5,9
iPhone Xs	280	0,6	5,4
iPhone Xs	425	0,4	7,9
iPhone Xs - video	135	0,1	6,4

5.1.4 Detekce deformací na přípravku „D“



Obr. 29: Detekce deformací na přípravku „D“ (vlastní zdroj)

Poslední testovací přípravek „D“ (Obr. 29) byl určen k rozpoznání kruhových otvorů s různými průměry. Při stejné hloubce všech otvorů, byly rozpoznány pouze dva průměry: 20 a 15 mm v případě referenčního mračka bodů. Při snímkování ze vzdálenosti 1,35 m byl u obou případů detekován pouze největší kruhový otvor. Bohužel ze vzdáleností 2,8 a 4,25 m nebyly detekovány ani největší otvory, stejně tomu bylo i u videozáznamu, kde nebyly detekovány žádné otvory. Shrnutí detekcí otvorů je uvedeno v tabulce (Tab. 13). V Tab. 14 jsou shrnuty odchylky v ose Z referenčního

mračna od jednotlivých porovnávaných mračen pro tento testovaný přípravek. Nahodilost výsledků udává směrodatná odchylka.

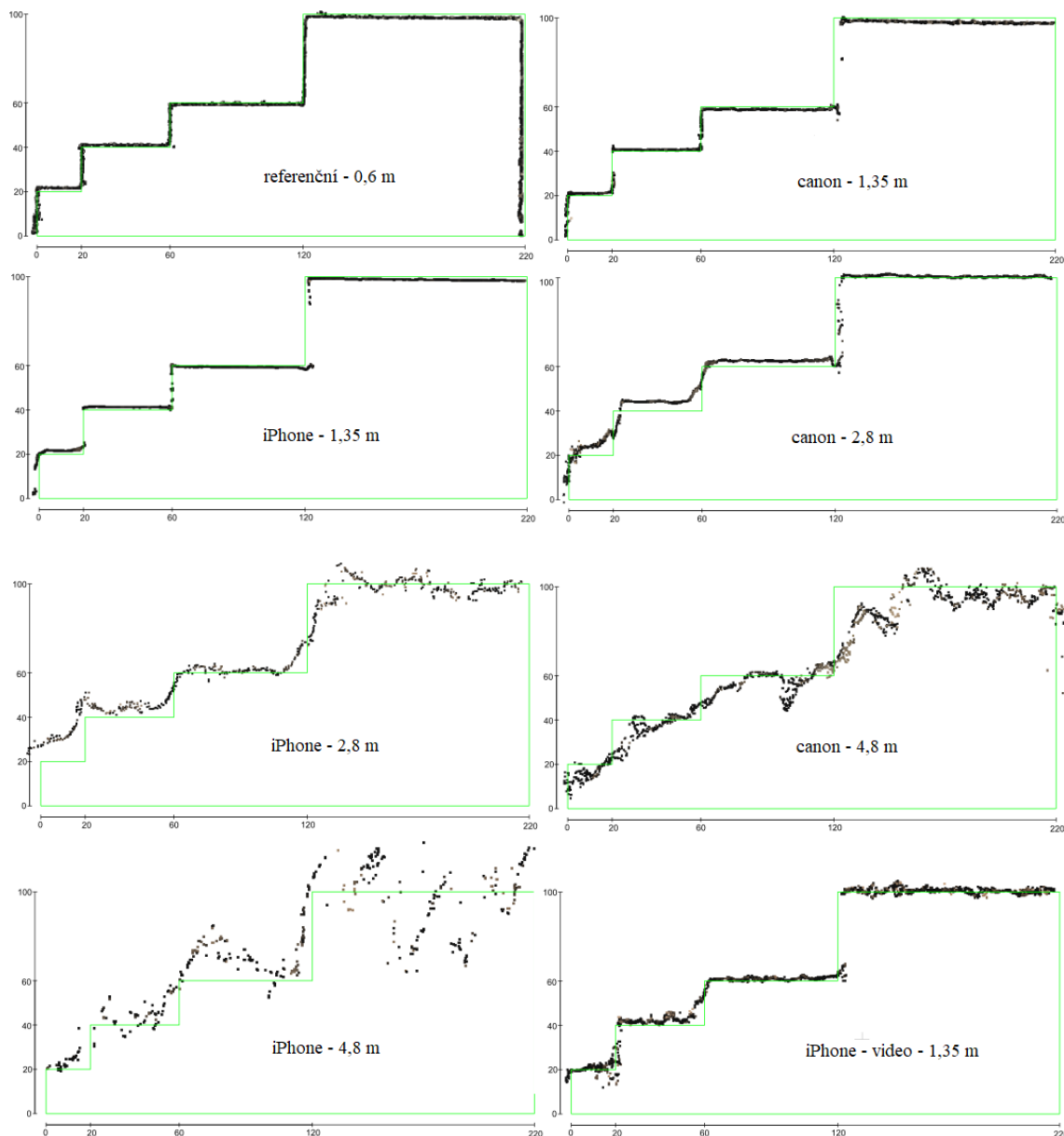
Tab. 13: Shrnutí detekcí na přípravku „D“

Kamera	Vzdálenost [cm]	Ground resolution	Nejmenší detekovaný otvor [mm]	Počet pixelů na deformaci
Canon 500D - ref	60	0,068	15	220,6
Canon 500D	135	0,170	20	117,6
iPhone Xs	135	0,327	20	61,2
Canon 500D	280	0,333	-	-
iPhone Xs	280	0,762	-	-
Canon 500D	425	0,610	-	-
iPhone Xs	425	1,030	-	-
iPhone Xs - video	135	0,370	-	-

Tab. 14: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou

Porovnání odchylek vzorku "D"			
Kamera	Vzdálenost (cm)	Průměrná odchylka (mm)	Sm. Odchylka (mm)
Canon 500D	135	0,7	2,8
Canon 500D	280	0,6	2,4
Canon 500D	425	1,6	5,4
iPhone Xs	135	0,1	3,3
iPhone Xs	280	0,9	3,4
iPhone Xs	425	4,3	9,2
iPhone Xs - video	135	1,1	3,2

5.1.5 Detekce deformací na přípravku „krychle“



Obr. 30: Detekce deformací na přípravku „krychle“ (vlastní zdroj)

Čtyři spojené krychle o velikostech 20, 40, 60 a 100 mm (Obr. 30) byly předmětem zkoumání spíše pro dvě vzdálenější stanoviska snímání. Na referenčním mračnu byly spolehlivě zachyceny veškeré hrany krychlí, podobně tomu bylo u případů, které jsou snímány ze vzdálenosti 1,35 m. Došlo pouze ke zhoršení na přechodu krychlí o hranách 20 a 40 mm. Mračno zachycené digitální zrcadlovkou snímkané ze vzdálenosti 2,8 m je na tom výrazně lépe než mračno snímkané mobilním telefonem ze stejné vzdálenosti. Přechody mezi krychlemi lze stále detekovat. Mračna vyhodnocená

ze snímků ze vzdálenosti 4,25 m obsahují velké množství šumu a nelze detekovat jednotlivé přechody. U videozáznamu jsou jednotlivé hrany detekovány, ale řez mračnem obsahuje mnohem více šumu oproti snímkování mobilním telefonem ze stejné vzdálenosti. V Tab. 15 jsou shrnuty odchylky v ose Z referenčního mračna od jednotlivých porovnávaných mračen pro tento testovaný přípravek. Nahodilost výsledků udává směrodatná odchylka.

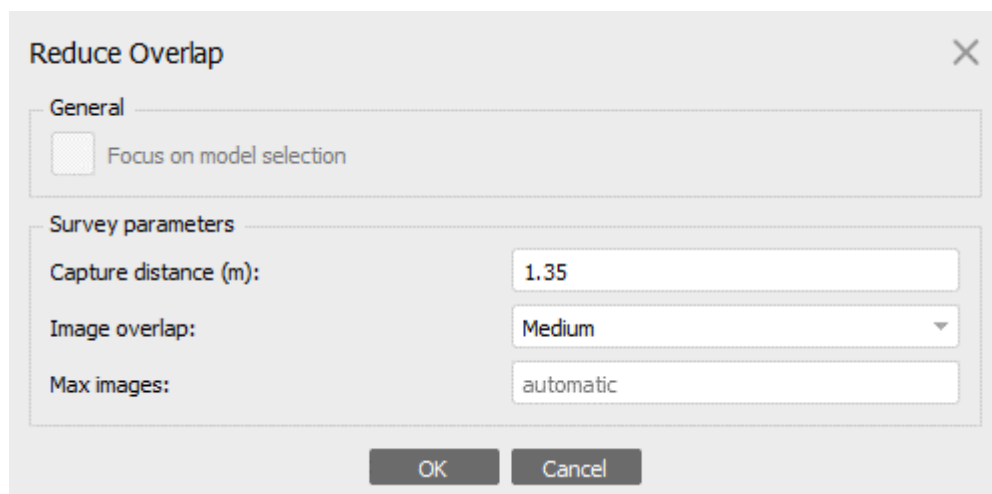
Tab. 15: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou

Porovnání odchylek vzorku "krychle"			
Kamera	Vzdálenost (cm)	Průměrná odchylka (mm)	Sm. Odchylka (mm)
Canon 500D	135	0,4	5,7
Canon 500D	280	1,2	6,4
Canon 500D	425	1,3	10,0
iPhone Xs	135	0,2	8,3
iPhone Xs	280	2,6	10,0
iPhone Xs	425	6,4	16,8
iPhone Xs - video	135	0,4	5,8

5.2 Zhodnocení vlivu počtu snímků na přesnost

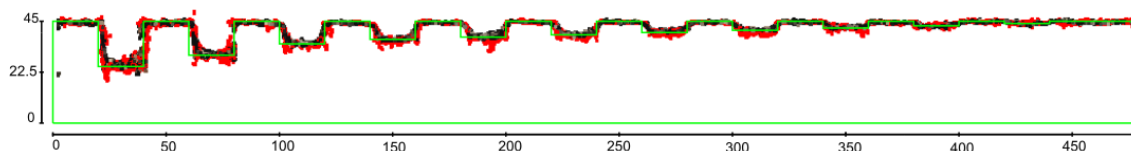
Pro potřeby této analýzy bylo využito funkce „Reduce overlap“ v softwaru Agisoft Metashape. Tato funkce vyhodnocuje potřebné snímky a odstraní redundantní snímky. Je užitečná v případě projektu, kde je pořízeno velké množství snímků s velkými překryty či několikanásobnému snímání, které se běžně využívá v křížové strategii náletu pomocí UAV.

Pro spuštění funkce bylo potřeba mít vytvořené řídké mračno a následně vytvořit 3D model (Build Mesh). Následně v dialogovém okně „Reduce Overlap“ (Obr. 31) bylo provedeno nastavení. Prvním parametrem byla volba vzdálenosti snímkování, která je upřednostňována pro další zpracování. V našem případě byly snímky pořizované z přibližně stejné vzdálenosti, není třeba se tedy tomuto parametru věnovat. Dalším parametrem byla „Image overlap“, která určuje, na kolika snímcích by měl být každý bod. Hodnota byla ponechána na „Medium“. Po vytvoření hustého mračna byly porovnány řezy jednotlivými přípravky před redukcí a po redukcí snímků v programu CloudCompare.

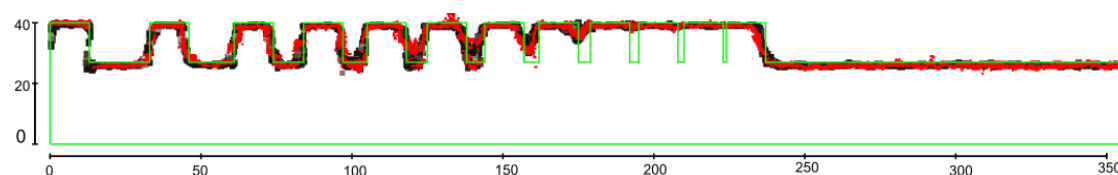


Obr. 31: Dialogové okno „Reduce Overlap“ (vlastní zdroj)

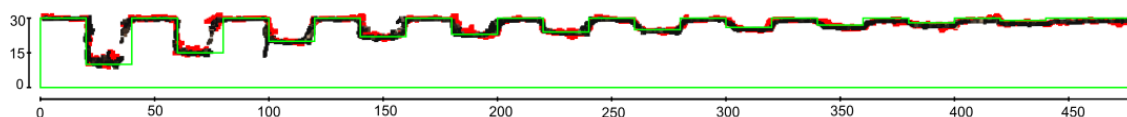
Do výpočtu vstupovalo 18 snímků a funkce vyhodnotila 7 snímků jako nadbytečných. V následujících obrázcích (Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34, Obr. 35 a Obr. 36) jsou porovnávány řezy mračny bodů. Červeně je mračno bodů vyhodnocené po redukci snímků, tj. z 11 snímků. Tato redukce tedy významně neovlivnila schopnost detekce deformací.



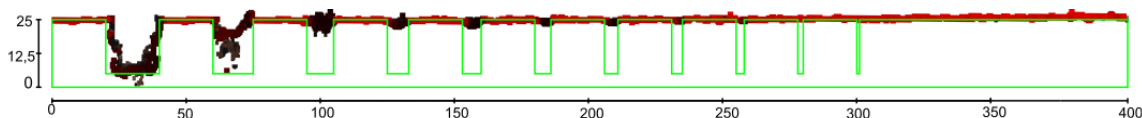
Obr. 32: Porovnání detekce přípravku „A“ (vlastní zdroj)



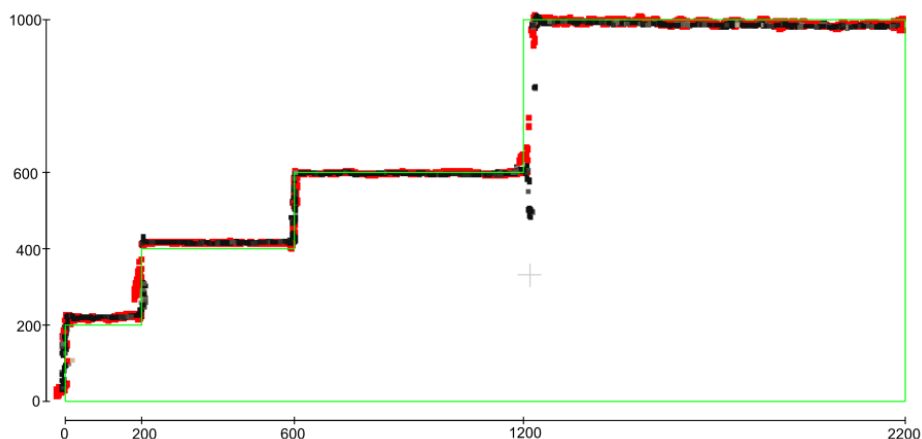
Obr. 33: Porovnání detekce přípravku „B“ (vlastní zdroj)



Obr. 34: Porovnání detekce přípravku „C“ (vlastní zdroj)



Obr. 35: Porovnání detekce přípravku „D“ (vlastní zdroj)



Obr. 36: Porovnání detekce přípravku „krychle“ (vlastní zdroj)

5.3 Doporučení pro snímkování deformací pomocí UAV

V poslední kapitole je shrnuta detekce deformací a výsledky jsou implementovány do reálné UAV fotogrammetrie. Výsledky získané na jednotlivých přípravcích testovací desky byly v rámci experimentu přepočteny do třech možných výšek letu UAV. Byly sestaveny tabulky, které se liší v nesené kameře. V prvním případě je snímkováno digitální zrcadlovkou (Tab. 16), v druhém případě je to kamera mobilního telefonu (Tab. 17), která simuluje CCD kameru běžného dronu a v posledním případě je to videozáznam pořízený na mobilní telefon (Tab. 18).

Tab. 16: Možnosti detekce při snímkování digitální zrcadlovkou

Výška letu [m]	Detekovatelná			
	Hloubka prohlubně [mm]	Šířka mezery [mm]	Kulatá prohlubeň [mm]	Kulatá mezera [mm]
10	3,6	53,6	7,4	148,1
30	10,7	160,7	22,2	444,4
100	35,7	535,7	74,1	1481,5

Tab. 17: Možnosti detekce při snímkování běžnou kamerou dronu

Výška letu [m]	Detekovatelná			
	Hloubka prohlubně [mm]	Šířka mezery [mm]	Kulatá prohlubeň [mm]	Kulatá mezera [mm]
10	10,7	59,3	7,4	148,1
30	32,1	177,8	22,2	444,4
100	107,1	592,6	74,1	1481,5

Tab. 18: Možnosti detekce při pořízení videozáznamu běžnou kamerou dronu

Výška letu [m]	Detekovatelná			
	Hloubka prohlubně [mm]	Šířka mezery [mm]	Kulatá prohlubeň [mm]	Kulatá mezera [mm]
10	22,2	111,1	74,1	Nedetkováno
30	66,7	333,3	222,2	Nedetkováno
100	222,2	1111,1	740,7	Nedetkováno

Závěr

Cílem diplomové práce bylo testování metody Structure from Motion pro detekci posunů a deformací v geodézii a vydat obecné doporučení pro pořizování snímků při zpracování touto fotogrammetrickou metodou. Tato doporučení jsou určena pro aplikaci ve fotogrammetrii, kde jsou snímky pořizovány bezpilotními letouny (UAV). Při tomto snímkování jsou osy záběru většinou kolmé na objekt, proto námi testovaná platforma byla snímkována vždy kolmo. Pro potřeby referenčního mračna bylo snímkováno také šikmo, aby byla přesnost tohoto mračna co možná největší.

Pro testování metody SfM byla zvolena testovací platforma, která byla již dříve vyrobena na katedře speciální geodézie. Na desce byly zaměřeny vřícovací body robotizovanou totální stanicí Trimble S6 HP a deska byla nasnímána z několika vzdáleností digitální zrcadlovkou a mobilním telefonem. Souřadnice vřícovacích bodů byly následně vyrovnány v softwaru GNU Gama. Získané snímky byly zpracovány v softwaru Agisoft Metashape. Výsledkem tohoto zpracování bylo celkem 8 hustých mračen bodů, které byly dále porovnávány v softwaru CloudCompare. Porovnány byly také řezy hustých mračen jednotlivými testovacími přípravky se skutečnými řezy, u kterých byla hodnocena rozlišovací schopnost

V první části byla porovnána hustá mračna bodů po jednotlivých testovacích přípravcích. Porovnávalo bylo vždy referenční mračno bodů s testovaným mračnem, zkoumány byly především rozdíly ve vertikálním směru, tedy v ose Z. Byly vypočteny hodnoty normálního rozdělení, a tím je průměrná hodnota vzdálenosti mračen a její směrodatná odchylka. Při porovnání třech vzdáleností snímkování dosahovala nejpřesnějších výsledků nejkratší vzdálenost snímkování. U srovnání digitální zrcadlovky a mobilního telefonu byly nejlepší výsledky docíleny zrcadlovkou.

V druhé části byla hodnocena úspěšnost zachycení mezer a prohlubní na jednotlivých testovacích přípravcích. Nejvíce prohlubní bylo detekováno s obdélníkovým průřezem a o něco méně byly detekovány prohlubně s kruhovým průřezem. Horší výsledky dosahovaly mezery obdélníkového tvaru. Nejhůře byly detekovatelné kruhové otvory. V případě referenčního mračna byly detekovány pouze dva největší otvory. Jsou-li srovnány výsledky ze zrcadlovky a mobilního telefonu, lepší výsledky dosahovala s detekcemi zrcadlovka, která měla cca 2x až 3x větší maximální úhly protnutí snímků.

Dále byl hodnocen vliv počtu snímků na detekci deformací. Hodnocen byl případ snímkování platformy ze vzdálenosti 1,35 m digitální zrcadlovkou Canon 500D. Počet snímků byl zredukován funkcí „Reduce overlap“. Z původních 18 snímků bylo použito pouze 11. Závěrem porovnání těchto dvou vyhodnocení je fakt, že nezáleží na počtu snímků, ale přesných výsledků je docíleno především velkými překryty jednotlivých snímků.

Jako poslední byla testována možnost pořízení videozáznamu pro potřeby detekce deformací. Novější softwary společnosti Agisoft jsou schopny videozáznamy vyhodnotit. Software si videozáznam nejdříve převede na jednotlivé snímky a poté dochází ke klasickému zpracování snímků. Tato funkce byla testována, ale software nedokáže zachytit všechny snímky, a je tedy potřeba v nastavení vždy vyzkoušet několik možností nastavení počtu vyhodnocených snímků. Vyhodnocené mračno z videozáznamu mělo menší přesnost než snímkové mračno pořízené ze stejné vzdálenosti. Jednoznačně lze doporučit upřednostnění pořízení snímků než videozáznamu.

Na základě schopnosti detekcí deformací bylo vytvořeno doporučení pro snímkování bezpilotními letouny, výsledky jsou uspořádány podle třech výšek letů a podle použité kamery. Přidán je také případ s videozáznamem. Možnosti detekce deformací byly testovány na laboratorním experimentu, bylo by vhodné dále provést experiment v reálném měřítku za pomoci bezpilotního letounu.

Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 1. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6
- [2] URBAN, Rudolf. Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05786-5.
- [3] Syllabus 11. přednášky z inženýrské geodézie (měření posunů a přetvoření) [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z:
http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie_geoinformatika/inge/Syllabus_IG_11.pdf
- [4] Structure from Motion. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. 2020 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion
- [5] Structure from Motion (SfM) - Approaches and Applications [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/327630010_Structure_from_Motion_SfM_-_Approaches_and_Applications
- [6] 2020 Best Photogrammetry Software (Some are Free) [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-photogrammetry-software/>
- [7] ŠEDINA, Jaroslav. Porovnání 3D skenovacích metod s mračnem bodů, vytvořeným obrazovou korelací v digitální fotogrammetrii. Praha, 2012. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta stavební
- [8] Datasheet - Trimble S6 - English [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z:
<https://community.trimble.com/docs/DOC-1726>
- [9] Canon EOS 500D. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Canon_EOS_500D
- [10] Apple iPhone XS [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z:
https://www.gsmarena.com/apple_iphone_xs-9318.php
- [11] Posuvné měřítko se stavítkem 400 CSN 251231 SOMET [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://eshop.pragokovo.cz/posuvne-meritko-se-stavitkem-400-csn-251231-somet-eanS+-+409123161230.php>

-
- [12] Features Agisoft Metashape [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z:
<https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>
- [13] CloudCompare [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare>
- [14] HOLLSTEN, F.: The effect of image quality on the reconstruction of 3D geometry from photographs [online]. Master's thesis. AALTO UNIVERSITY. Helsinki. 120 p. [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z:
https://pdfs.semanticscholar.org/e594/443224a8de436291436580dd65df22c56210.pdf?_ga=2.147087231.931518010.1588243443-825923862.1588243443
- [15] GNU Gama manual [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z:
<https://www.gnu.org/software/gama/manual/gama.pdf>
- [16] Projekt XYZTrans [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z:
<http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/XYZTrans/index.html>
- [17] ABER, J. S. et al. (2010): Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications. 1 Edition, Elsevier Science
- [18] Connect edition microstation [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z:
<https://www.bentley.com/cs/perspectives-and-viewpoints/topics/campaign/connect-edition-microstation>
- [19] Inkscape overview [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z:
<https://inkscape.org/cs/about/overview/>
- [20] ŠIMÍČEK, Martin. Implementace metody Structure from Motion do UAV fotogrammetrie. Olomouc, 2014. Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta

Seznam tabulek

Tab. 1: Vyrovnané souřadnice vřícovacích bodů se směrodatnými odchylkami	36
Tab. 2: Souřadnice identických bodů a transformovaného bodu	37
Tab. 3: Porovnání vzdáleností.....	38
Tab. 4: Shrnutí snímkování	39
Tab. 5: Shrnutí chyb na vřícovacích bodech	43
Tab. 6: Počet bodů hustých mračen modelů a maximální úhly protnutí.....	45
Tab. 7: Shrnutí detekcí na přípravku „A“	48
Tab. 8: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou	48
Tab. 9: Shrnutí detekcí na přípravku „B“	50
Tab. 10: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou	50
Tab. 11: Shrnutí detekcí na přípravku „C“	52
Tab. 12: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou	52
Tab. 13: Shrnutí detekcí na přípravku „D“	54
Tab. 14: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou	54
Tab. 15: Průměrná vzdálenost od referenčního mračna se směrodatnou odchylkou	56
Tab. 16: Možnosti detekce při snímkování digitální zrcadlovkou	58
Tab. 17: Možnosti detekce při snímkování běžnou kamerou dronu	59
Tab. 18: Možnosti detekce při pořízení videozáznamu běžnou kamerou dronu.....	59

Seznam obrázků

Obr. 1: Středové promítání.....	13
Obr. 2: Podmínka komplanarity.....	16
Obr. 3: Čtyři možná řešení.....	20
Obr. 4: Jednoduché schéma metody SfM.....	21
Obr. 5: Řídké mračno a pozice kamer v softwaru Agisoft.....	23
Obr. 6: Husté mračno v softwaru Agisoft.....	23
Obr. 7: Odrazivost slunečního záření při snímkování.....	25
Obr. 8: 3D platforma s označenými testovacími obrazy.....	28
Obr. 9: Přípravek s různou hloubkou prohlubní.....	29
Obr. 10: Přípravek s různou vzdáleností zářezů.....	29
Obr. 11: Přípravek s různou hloubkou kruhových otvorů.....	29
Obr. 12: Přípravek s různými průměry otvorů.....	30
Obr. 13: Přípravek s různými velikosti krychlí.....	30
Obr. 14: Totální stanice Trimble S6 HP.....	31
Obr. 15: Zrcadlovka Canon EOS 500D.....	31
Obr. 16: Mobilní telefon iPhone XS.....	32
Obr. 17: Posuvné měřítko Somet ČSN 25 1231.....	32
Obr. 18: Detail vřícovacího bodu.....	35
Obr. 19: Situace měření vřícovacích bodů.....	36
Obr. 20: Schéma snímkování.....	39
Obr. 21: Dialogové okno Import Video.....	40
Obr. 22: Dialogové okno Align Photos.....	41
Obr. 23: Dialogové okno Optimize Camera Aligment.....	43
Obr. 24: Dialogové okno Build Dense Cloud.....	44
Obr. 25: Dialogové okno Compute cloud/cloud distance.....	45
Obr. 26: Detekce deformací na přípravku „A“.....	47
Obr. 27: Detekce deformací na přípravku „B“.....	49
Obr. 28: Detekce deformací na přípravku „C“.....	51
Obr. 29: Detekce deformací na přípravku „D“.....	53
Obr. 30: Detekce deformací na přípravku „krychle“.....	55
Obr. 31: Dialogové okno „Reduce Overlap“.....	57
Obr. 32: Porovnání detekce přípravku „A“.....	57
Obr. 33: Porovnání detekce přípravku „B“.....	57
Obr. 34: Porovnání detekce přípravku „C“.....	57



Obr. 35: Porovnání detekce přípravku „D“	58
Obr. 36: Porovnání detekce přípravku „krychle“	58

Seznam příloh

Analogové přílohy:

Příloha 1 Výstup ze softwaru GNU Gama

Příloha 2 Protokol ze softwaru XYZTrans

Přílohy na přiložených DVD:

DVD 1

- **A_Projekt_Canon_referenci**
 - Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení ze zrcadlovky Canon 500D
 - Projekt_canon_referenci.files
 - Projekt_canon_referenci.psx
 - Canon_referenci_snimky
- **B_Projekt_Canon_1**
 - Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení ze zrcadlovky Canon 500D snímkové z první vzdálenosti
 - Projekt_canon_1.files
 - Projekt_canon_1.psx
 - Canon_1_vzdalenost_snimky
- **C_Projekt_Canon_2**
 - Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení ze zrcadlovky Canon 500D snímkové z druhé vzdálenosti
 - Projekt_canon_2.files
 - Projekt_canon_2.psx
 - Canon_2_vzdalenost_snimky

- **D_Projekt_Canon_3**

- Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení ze zrcadlovky Canon 500D snímkané ze třetí vzdálenosti
 - Projekt_canon_3.files
 - Projekt_canon_3.psx
 - Canon_3_vzdalenost_snimky

- **E_Projekt_Canon_1_reduced**

- Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení ze zrcadlovky Canon 500D snímkané z první vzdálenosti po redukci snímků
 - Projekt_canon_1_reduced.files
 - Projekt_canon_1_reduced.psx
 - Canon_1_vzdalenost_snimky_reduced

- **F_Projekt_iPhone_1**

- Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení z telefonu iPhone Xs snímkané z první vzdálenosti
 - Projekt_iPhone_1.files
 - Projekt_iPhone_1.psx
 - iPhone_1_vzdalenost_snimky

DVD 2

- **G_Projekt_iPhone_2**

- Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení z telefonu iPhone Xs snímkané z druhé vzdálenosti
 - Projekt_iPhone_2.files
 - Projekt_iPhone_2.psx
 - iPhone_2_vzdalenost_snimky

- **H_Projekt_iPhone_3**

- Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použité snímky pro vyhodnocení z telefonu iPhone Xs snímkané ze třetí vzdálenosti

- Projekt_iPhone_3.files
- Projekt_iPhone_3.psx
- iPhone_3_vzdalenost_snimky

- **CH_Projekt_iPhone_video**

- Adresář obsahuje projekt ze softwaru Agisoft Metashape a použitý videozáznam pro vyhodnocení z telefonu iPhone Xs

- Projekt_iPhone_video.files
- Projekt_iPhone_video.psx
- iPhone_video

- **I_Reporty**

- Adresář obsahuje reporty jednotlivých projektů ze softwaru Agisoft Metashape

- Report_Canon_referencni.pdf
- Report_Canon_1.pdf
- Report_Canon_2.pdf
- Report_Canon_3.pdf
- Report_Canon_1_reduced.pdf
- Report_iPhone_1.pdf
- Report_iPhone_2.pdf
- Report_iPhone_3.pdf
- Report_iPhone_video.pdf

- **J_Měřená data totální stanicí** – surová data z totální stanice Trimble S6

- **K_Gama_vstup.txt** – vstupní soubor do softwaru GNU Gama



- **L_XYZTrans_vstup.txt** – výstupní soubor do softwaru XYZTrans
- **M_adam-vanek-dp-2020.pdf**

**Příloha 1: Výstup ze softwaru GNU Gama**

Vyrovnání místní geodetické sítě verze: 1.7.09-svd / win32-msvc

<http://www.gnu.org/software/gama/>

Přibližné souřadnice

souřadnice	xyz	xy	z
dané :	2	0	0
vypočtené :	4	0	0

celkem : 6 0 0

měření : 30

Popis sítě

analýza

Základní parametry vyrovnání

Souřadnice	xyz	xy	z
Vyrovnané :	6	0	0
Opěrné * :	6	0	0
Pevné :	0	0	0

Celkem : 6 0 0

Počet směrů : 10 Počet osnov : 2

Počet délek : 10

Zenitové úhly : 10

Celkem pozorování : 30

Počet rovnic oprav : 30 Počet neznámých : 20

Počet nadbyt. pozorování : 14 Defekt sítě : 4

m0 apriorní : 1.00

m0' aposteriorní: 1.18 [pvv] : 3.96603e+001

Při statistické analýze se pracuje

- s apriorní jednotkovou střední chybou 1.00

- s konfidenční pravděpodobností 95 %

Vyrovnané souřadnice



i	bod	přibližná hodnota	korekce [m]	vyrovnaná hodnota	stř.ch. [mm]	konf.i. [mm]
1						
6	X *	1.43799	0.00009	1.43808	0.0	0.1
7	Y *	2.49200	-0.00024	2.49176	0.1	0.3
16	Z *	-1.23247	0.00041	-1.23206	0.1	0.2
2						
8	X *	1.43148	-0.00007	1.43141	0.0	0.1
9	Y *	2.58187	-0.00005	2.58182	0.2	0.3
17	Z *	-0.70005	0.00004	-0.70001	0.0	0.0
3						
10	X *	0.85186	-0.00005	0.85182	0.1	0.1
11	Y *	2.56054	0.00014	2.56068	0.2	0.3
18	Z *	-0.70605	-0.00002	-0.70607	0.0	0.0
4						
12	X *	0.85858	0.00000	0.85858	0.1	0.1
13	Y *	2.47719	0.00011	2.47730	0.1	0.3
19	Z *	-1.23829	0.00004	-1.23825	0.1	0.2
4001						
2	X *	2.58320	-0.00006	2.58314	0.2	0.5
3	Y *	0.00000	0.00005	0.00005	0.3	0.6
14	Z *	0.00590	-0.00011	0.00579	0.1	0.2
4002						
4	X *	0.00000	0.00008	0.00008	0.2	0.4
5	Y *	0.00000	-0.00002	-0.00002	0.3	0.6
15	Z *	0.00000	-0.00037	-0.00037	0.1	0.2

Vyrovnané orientační posuny

i	stanovisko	přibližná hodn. [g]	korekce [g]	vyrovnaná hodn. [g]	stř.ch. [cc]	konf.i. [cc]
1	4001	199.936000	0.003377	199.939377	10.1	19.7
20	4002	399.924600	0.001715	399.926315	9.7	18.9

Střední chyby a parametry elips chyb

bod	mp	mxy	střed. el. chyb	konfid. el. chyb	g
===== [mm] == [mm] ===== a [mm] b alfa[g] ===== a' [mm] b' =====					



1	0.1	0.1	0.1	0.0	81.8	0.4	0.0	3.9
2	0.2	0.1	0.2	0.0	83.9	0.4	0.0	1.4
3	0.2	0.1	0.2	0.0	122.8	0.4	0.0	0.4
4	0.1	0.1	0.1	0.0	124.6	0.4	0.0	1.0
4001	0.4	0.3	0.4	0.0	144.2	0.9	0.1	0.2
4002	0.4	0.2	0.3	0.0	61.2	0.9	0.1	0.7

Maximální střední polohová chyba je 0.4 mm na bodě 4001

Průměrná polohová chyba je 0.2 mm

Vyrovnaná pozorování

i	stanovisko	cíl	měřená hodnota	vyrovnaná [m g]	stř.ch. [mm cc]	konf.i. ==
1	4001	4002 směr	0.064000	0.062317	18.7	36.6
2		1 směr	327.483900	327.483971	5.0	9.7
3		2 směr	326.773800	326.773692	5.0	9.8
4		3 směr	337.909400	337.909340	5.0	9.8
5		4 směr	338.776100	338.776302	4.9	9.7
6		4002 zenit	100.138600	100.151776	5.8	11.4
7		1 zenit	126.993800	126.994215	4.0	7.8
8		2 zenit	115.576700	115.575630	4.1	8.0
9		3 zenit	114.410600	114.410154	3.9	7.6
10		4 zenit	124.886900	124.887718	3.9	7.7
11		4002 délka	2.58320	2.58306	0.4	0.9
12		1 délka	2.74340	2.74221	0.5	0.9
13		2 délka	2.82740	2.82701	0.5	0.9
14		3 délka	3.09130	3.09100	0.5	1.0
15		4 délka	3.01890	3.01842	0.5	1.0
16	4002	4001 směr	0.075400	0.075379	5.0	9.8
17		1 směr	66.752200	66.752295	5.0	9.7
18		2 směr	67.848000	67.847859	5.0	9.8
19		3 směr	79.631400	79.631366	5.0	9.8
20		4 směr	78.836500	78.836601	5.0	9.8
21		4001 zenit	99.846800	99.848224	5.8	11.4
22		1 zenit	125.752800	125.752372	3.9	7.7
23		2 zenit	114.813600	114.814711	4.0	7.9
24		3 zenit	116.282800	116.283195	4.1	8.1
25		4 zenit	128.082800	128.082058	4.2	8.1
26		4001 délka	2.58350	2.58306	0.4	0.9



27	1 délka	2.87620	2.87694	0.5	1.0
28	2 délka	2.95150	2.95204	0.5	1.0
29	3 délka	2.69780	2.69864	0.5	0.9
30	4 délka	2.62100	2.62185	0.4	0.9

Opravy a analýza pozorování

i	stanovisko	cíl	f[%]	v	v'	e-mer.	e-vyr.
				[mm cc]		[mm cc]	===
1	4001	4002 směr	6.7	-16.827	2.3 k	-129.2	-112.3
2		1 směr	0.5 s	0.710	1.4		
3		2 směr	0.2 s	-1.078	3.5 k	-278.7	-277.7
4		3 směr	0.4 s	-0.604	1.3		
5		4 směr	1.1 s	2.023	2.7 k	89.5	87.5
6		4002 zenit	80.6	131.757	4.5 mk	136.9	5.1
7		1 zenit	20.2	4.150	1.4	11.4	7.3
8		2 zenit	18.3	-10.701	3.7 k	-32.3	-21.6
9		3 zenit	22.7	-4.463	1.4	-11.1	-6.6
10		4 zenit	21.1	8.176	2.7 k	21.7	13.5
11		4002 délka	70.5	-0.143	0.1	-0.2	-0.0
12		1 délka	69.0	-1.186	0.8	-1.3	-0.1
13		2 délka	68.1	-0.387	0.3	-0.4	-0.0
14		3 délka	65.1	-0.297	0.2	-0.3	-0.0
15		4 délka	65.9	-0.478	0.3	-0.5	-0.1
16	4002	4001 směr	0.3 s	-0.207	0.5		
17		1 směr	0.9 s	0.950	1.4		
18		2 směr	0.3 s	-1.406	3.6 k	-228.2	-226.7
19		3 směr	0.1 s	-0.344	1.4		
20		4 směr	0.3 s	1.007	2.6 k	166.2	165.2
21		4001 zenit	88.4	14.243	0.3	14.4	0.2
22		1 zenit	21.6	-4.280	1.4	-11.1	-6.8
23		2 zenit	19.8	11.109	3.7 k	31.1	20.0
24		3 zenit	17.3	3.953	1.4	12.5	8.5
25		4 zenit	17.0	-7.425	2.7 k	-23.9	-16.5
26		4001 délka	70.5	-0.443	0.3	-0.5	-0.0
27		1 délka	67.5	0.739	0.5	0.8	0.1
28		2 délka	66.6	0.544	0.4	0.6	0.1
29		3 délka	69.3	0.835	0.6	0.9	0.1



30		4 délka	70.2	0.853	0.6	0.9	0.1
Odhlehlá pozorování							

i	stanovisko	cíl	f[%]	v	v'	e-mer.	e-vyr.
				[mm cc]	[mm cc]		==
6	4001	4002 zenit	80.6	131.757	4.5 mk	136.9	5.1
23	4002	2 zenit	19.8	11.109	3.7 k	31.1	20.0
8	4001	2 zenit	18.3	-10.701	3.7 k	-32.3	-21.6
18	4002	2 směr	0.3 s	-1.406	3.6 k	-228.2	-226.7
3	4001	2 směr	0.2 s	-1.078	3.5 k	-278.7	-277.7
5		4 směr	1.1 s	2.023	2.7 k	89.5	87.5
10		4 zenit	21.1	8.176	2.7 k	21.7	13.5
25	4002	4 zenit	17.0	-7.425	2.7 k	-23.9	-16.5
20		4 směr	0.3 s	1.007	2.6 k	166.2	165.2
1	4001	4002 směr	6.7	-16.827	2.3 k	-129.2	-112.3

Ověření normálního rozdělení homogenizovaných oprav

=====

Test Kolmogorov-Smirnov : 22.1 %

Číslo podmíněnosti : 1.5e+003

**Příloha 2: Protokol ze softwaru XYZTrans**

Program XYZTrans v 2.0, Protokol o výpočtu.

Shodnostní Podobnostní transformace

Použité identické body :

1,2,4

Transformační klíč :

Matice Rotace :

-0,0123989967081772 0,166759914386372 0,98591956864365
-0,999661403315 -0,0246253318139531 -0,00840664947483063
0,022876704373 -0,985689973565169 0,167008779440264

Vektor Translace :

0,817165554172

1,488576218066

2,629014804719

Měřítko v jednotlivých osách (x,y,z):

1,000000000000

1,000000000000

1,000000000000

Střední chyba jednotková: 0,00009906

Transformace podrobných bodů :

(C.B. X Y Z)

3,0 0,537568 0,579972 0,006520