

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

Katedra prostorových věd

# **Vliv geometrických distorzí optických systémů na přesnost a kvalitu 3D modelu zájmového objektu**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Komárek, Ph.D.

Vypracoval: Jiří Doležel

2021

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Doležel

Krajinářství  
Územní technická a správní služba

Název práce

**Vliv geometrických distorzí optických systémů na přesnost a kvalitu 3D modelu zájmového objektu**

Název anglicky

**The influence of geometric distortions of optical systems on the accuracy and quality of 3D models of the object of interest**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je určit vliv geometrických distorzí optických systémů na přesnost a kvalitu prostorových modelů vytvořených metodou Structure from Motion. Cílem práce je porovnání různých optických systémů, stanovení míry geometrických distorzí a určení geometrické přesnosti a kvality modelů v porovnání s laserovým skenováním zájmového objektu.

### Metodika

Autor pořídí několik sad fotografií zájmového objektu s využitím různých fotoaparátů či optických systémů. Z pořízených sad snímků autor vytvoří bodová mračna za pomoci stereofotogrammetrických nástrojů a ta porovná s bodovým mračnem laserového skenování. Autor vyhodnotí geometrickou přesnost a kvalitu bodových mračen a stanoví tak míru závislosti geometrických distorzí optických systémů na kvalitu výsledného modelu zájmového objektu.

**Doporučený rozsah práce**

30-40 stran

**Klíčová slova**

Fotogrammetrie, Distorze, Structure-from-Motion, 3D modelování

---

**Doporučené zdroje informací**

- Griffiths, D., & Burningham, H. (2019). Comparison of pre-and self-calibrated camera calibration models for UAS-derived nadir imagery for a SfM application. *Progress in physical geography: earth and environment*, 43(2), 215-235.
- Ingwer, P., Gassen, F., Püst, S., Duhn, M., Schällicke, M., Müller, K., ... & Creutzburg, R. (2015, March). Practical usefulness of structure from motion (SfM) point clouds obtained from different consumer cameras. In *Mobile Devices and Multimedia: Enabling Technologies, Algorithms, and Applications 2015* (Vol. 9411, p. 941102). International Society for Optics and Photonics.
- Ruggles, S., Clark, J., Franke, K. W., Wolfe, D., Reimschiessel, B., Martin, R. A., ... & Hedengren, J. D. (2016). Comparison of SfM computer vision point clouds of a landslide derived from multiple small UAV platforms and sensors to a TLS-based model. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 4(4), 246-265.
- Skarlatos, D., & Kiparissi, S. (2012). Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Zhao, J., Zhao, D., & Zhang, Z. (2013). Calibration and correction of lens distortion for two-dimensional digital speckle correlation measurement. *Optik*, 124(23), 6042-6047.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2020/21 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Jan Komárek, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 20. 3. 2021

**doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2021

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2021

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vliv geometrických distorzí optických systémů na přesnost a kvalitu 3D modelu zájmového objektu, vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V.....dne.....

.....  
(podpis autora práce)

### **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Komárkovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc při tvorbě bakalářské práce a za jeho čas, který této práci věnoval.

Zároveň bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za jejich podporu.

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem geometrické nedokonalosti čoček na kvalitu 3D modelů, při použití metody Structure-from-Motion. Software využívá fotografie objektu z různých úhlů k vytvoření bodů, pomocí přiřazujících algoritmů, které vyhledají stejné objekty zájmu, v různých fotografiích. Software následně pomocí triangulace vypočítá vzdálenost od objektu, pozici fotoaparátu a umístí body do tzv. bodového mračka. Protože je metoda ovlivněna kvalitou fotografií, je tak zákonitě ovlivněna kvalitou použité optiky. Ztěžujícím faktorem při sběru fotek je výskyt optických chyb, jako je optická distorze neboli zkreslení obrazu. Distorze je změřena pomocí metody kalibrace čočky, použitím několika fotografií tzv. kalibračního cíle – objektu se známými rozměry, na rovném podkladu. Kalibrační software na základě posunu stejných bodů v různých fotografiích určí míru zakřivení v podobě distorzních koeficientů. Jaký vliv má distorze optik na kvalitu a přesnost fotogrammetrických modelů? Modely vytvořené pomocí různých optických systémů jsou porovnány s výsledky laserového měření, které jsou v branné jako přesná reference. Na základě rozdílu vzdáleností bodů jednotlivých modelů je určen dopad distorze na přesnost bodových mraček. U optik s vyšší mírou optického zkreslení je prokázána nejnižší přesnost vytvořených modelů. Počet bodů v rozsahu nejmenší naměřené vzdálenosti od bodového mračka reference (0 až 8 cm), klesl z 34,1% na 21,43% od nejpřesnějšího modelu, k nejméně přesnému bodovému mračku. Vzrůst radiální distorze o 2,24% tak snížil počet bodů dosahujících nejvyšší přesnosti o 12,67%. Přestože existuje řada publikací zkoumající kvalitu fotogrammetrických metod, nenašel jsem studii řešící dopad geometrické distorze na přesnost. Tato studie by tak mohla rozšířit znalosti o vlivu optického zkreslení na kvalitu metody Structure-from-Motion.

Klíčová slova: Fotogrammetrie, Distorze, Structure-from-Motion, 3D modelování

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the influence of geometric distortions in optical systems, caused by geometrical imperfections of lenses, on the quality and accuracy of 3D models, created by Structure from motion technique. Software uses images of the object, taken from different angles, to generate keypoints thanks to recognition algorithms, which determine matches of objects in the scene. The software calculates the distance from the object and estimates position of the camera, after which the software uses the key points to generate a point cloud. Because Structure from motion is influenced by the quality of images, it is affected by the quality of used lens. Optical aberrations like geometrical distortion increase the difficulty of surface reconstruction when using photogrammetric techniques. Optical distortion is measured based on lens calibration techniques, using multiple pictures of calibration target (checker board pattern with known distances of individual squares). Calibration software generates a net of matching key points and based on the change of their positions calculates distortion coefficients for radial and tangential distortion. How does optical distortion affect the accuracy of photogrammetric models? 3D models which are created using different optical systems are compared to a point cloud created by terrestrial laser scan (TLS), which is used as an accurate reference. Based on the distance of individual points between created models and laser scan, I determined the influence of geometric distortion on the accuracy of point clouds. Models created using optical systems with higher distortion levels proved to be least accurate. The number of points in the most accurate point range (0 to 8 cm), decreased from 34,1% to 21,43% between the most accurate model and the least accurate point cloud. The increase of radial distortion by 2,24% decreased the number of most accurate points by 12,67%. Although there are many publications studying the quality of photogrammetric methods, I didnt find one that determines the influence of distortion on the accuracy of models. This study could provide information about the the impact of optical distortion, on the accuracy of Structure-from-Motion method.

Keywords: Photogrammetry, Distortion, Structure-from-Motion, 3D modeling

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	9
<b>2</b>	<b>Cíle Bakalářské práce</b> .....	11
<b>3</b>	<b>Literární rešerše</b> .....	12
<b>3.1</b>	<b>Fotogrammetrie</b> .....	12
3.1.1	Metoda structure from motion.....	13
3.1.2	Základy structure from motion.....	13
3.1.3	Rekonstrukce scény ve 3D prostoru .....	14
<b>3.2</b>	<b>Distorze</b> .....	15
3.2.1	Typy radiální distorze .....	16
3.2.2	Pudingový efekt.....	18
3.2.3	Tangenciální distorze.....	18
3.2.4	Výpočet distorze.....	19
3.2.5	Kalibrace fotoaparátu.....	20
<b>3.3</b>	<b>Laserové skenování</b> .....	20
3.3.1	Povrchová rekonstrukce.....	22
<b>4</b>	<b>Metodika</b> .....	23
<b>4.1</b>	<b>Materiály a metody</b> .....	23
4.1.1	Vytvoření fotografií .....	23
4.1.2	Kalibrace vnitřních parametrů optiky .....	24
4.1.3	Tvorba bodových mračen.....	25
4.1.4	Srovnání bodových mračen s referencí.....	25
<b>5</b>	<b>Výsledky práce</b> .....	26
<b>6</b>	<b>Diskuse</b> .....	36
<b>7</b>	<b>Závěr a přínos práce</b> .....	37
<b>8</b>	<b>Přehled literatury a použitých zdrojů</b> .....	38



# 1 Úvod

V posledních letech došlo k velkému rozvoji technologií v oblasti terénního mapování. Mnoho modelovacích technik bylo zdokonaleno a převedeno do hardwarové formy. Díky tomu metody, které v minulosti vyžadovaly velmi drahé technologie, lze dnes využít mnohem levněji. Technologický pokrok je tlačěn vpřed nejen oblastmi jako je medicína, nebo vývoj automatizace, ale v dnešní době jsou různé technologie zdokonalovány zároveň díky zábavnímu sektoru. Bez vývoje vlivem zábavního průmyslu, by nebylo možné dosáhnout kvality dnešních fotoaparátů (Ingwer a kol. 2015). Sledování kamery, slučování dvou obrazových vrstev, nasvětlení fotografie, pohybový záběr, simulace ohně, kouře a podobně je pár příkladů, jak zábavní průmysl ovlivnil technologie počítačového vidění.

Pokles ceny fotoaparátů a zdokonalení jejich kvality dnes zvyšuje poptávku na vyšší kvalitu modelů. Jedním způsobem, jak dosáhnout kvalitních a přesných modelů je využití LiDAR (Light Detection and Ranging), nebo TLS (terrestrial laser scanning) skenerů. Skenery dosahují vysokých přesností. Nevýhoda podobných zařízení spočívá v nutnosti stabilního uzemnění, což v určitých oblastech není možné, z důvodu výšky nebo nebezpečí pro operátora. Možným řešením je využití fotogrammetrických metod jako je Structure from motion. Metoda není náročná na použitou techniku, a proto levnější (Brasington a kol. 2012). Structure from motion je založená na získávání rozměrů scény z fotografií, použitím souboru snímků s vysokým překryvem, z různých úhlů a vzdáleností. Protože metoda postrádá reálné měřítko, jsou při průzkumu terénu často využívány značky k získání měřítka, a tak vyšší přesnosti modelu, což však pokládá otázku, jak přesné jsou modely vytvořené pomocí Structure from motion a je metoda srovnatelná s ostatními metodami modelování? Protože je metoda založena na získávání rozměrů z fotografií, můžeme vytvořit předpoklad, že výsledný model je ovlivněn kvalitou fotografií, a tedy i kvalitou fotoaparátu.

Kvalita fotografií je určena různými faktory. Vnější faktory jako je nasvětlení, počasí apod. nelze v otevřeném prostředí ovlivnit, zatímco vnitřní faktory jako je rozlišení fotografie a kvalita použitého systému jsou zpravidla přizpůsobitelné požadavkům na kvalitu výsledků. Jedním z vnitřních faktorů je kvalita čočky fotoaparátu. U čoček může dojít k optickým chybám, jako je např. optická distorze. Téměř všechny čočky standartních fotoaparátů vykazují určitou míru distorze, a tak zkreslují rozměry scény. V dnešní době je možné sestavit optické systémy tak, aby byl výskyt distorze odstraněn, použitím dvou čoček opačných distorzí, ale cena takových systému by byla pravděpodobně příliš vysoká pro běžné použití, a proto se distorze zpravidla řeší formou korekce v digitální podobě, určením distorzních koeficientů.

Míru distorze optických systémů lze určit pomocí kalibračních technik jako např. Zhangova kalibrační metoda (Zhang, 1999). Metoda určí míru zkreslení obrazu na základě posunu stejných bodů zájmu v různých fotografiích a vypočítá distorzní koeficienty pro radiální a tangenciální distorzi. Výskyt distorze tak pokládá otázku, jaký vliv má rozměrové zkreslení na přesnost modelů fotogrammetrických metod?

V práci jsou představena bodová mračna budovy MCEV II, Fakulty životního prostředí, České zemědělské univerzity v Praze, vytvořená pomocí metody Structure-from-motion. Bodová mračna jsou vytvořena použitím různých optických systémů. U jednotlivých optik jsou určeny koeficienty, představující míru radiální a tangenciální distorze, kalibrační čočky (Jianmin a kol. 2018). Jednotlivé modely jsou následně porovnány s modelem budovy, vytvořeném pozemní laserovou stanicí, a na základě rozdílů vzdáleností jednotlivých bodů uvnitř bodového mračna od jejich protějšků uvnitř reference, je určen dopad geometrické distorze na přesnost 3D modelů.

## **2 Cíle Bakalářské práce**

Cílem bakalářské práce je určit vliv geometrické distorze optických systémů na přesnost 3D modelů vytvořených metodou Structure-from-motion. Cílem je pořídit několik souborů fotografií zájmového objektu, použitím různých optik a určit vlastnosti distorze optických systémů, použitých k tvorbě modelů. Z jednotlivých souborů vytvoří zhuštěná bodová mračna, představující troj rozměrný model objektu. Na základě distorzních koeficientů je určen dopad prostorového zkreslení optik na kvalitu a přesnost modelu, srovnáním s výsledky laserového skenování, představující přesnou referenci.

### 3 Literární rešerše

V posledních letech došlo v modelování ke značnému pokroku, který silně ovlivnil digitální výškové modelování a analýzu terénu. Rozvoj výpočetní techniky urychlil zpracování dat při tvorbě modelů. Topografický výzkum nabral v posledních letech vyšší rychlost díky nové generaci získávání dat. Letecké fotogrammetrie a obzvláště pozemní laserové skenování (Lohani, Mason, 2001) a fotogrammetrie měkkých kopií (Lane a kol. 2000) nastartovaly revoluci v oblasti kvality modelů, vylepšením jejich prostorového rozsahu, rozlišení a přesnosti.

Přestože vývoj technologií se zrychluje, získání kvalitních dat z nedostupných lokací zůstává poměrně náročný. Ve vysokohorských oblastech špatné pokrytí signálu a strmost svahů ztěžuje sběr dat pomocí GPS, nebo automatických měřících stanic. Další metody jako pozemní laserové skenování může být ztíženo finančními nároky, způsobem přemístění měřící stanice, nebo přívodem energie. Použití leteckého sběru dat je silně závislé na počasí, zejména větrné situaci a výskytu mraků, které mohou být silně nepředvídatelné. Řešení by mohlo být ve využití satelitních snímků, avšak jejich kvalita je příliš hrubá ve srovnání s pozemními technikami (Brasington a kol. 2012).

#### 3.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie se zabývá měřením vzdáleností a objektu z fotografických snímků. Průzkum terénu z leteckých fotografií je využíván už od 30. let 20. století (Colomina a Molina, 2014). Od 90. let začaly letecké metody mapování nahrazovat laserové metody měření, jako Light Detection and Ranging (Lidar) a Radio detection and ranging (Radar). Pro menší oblasti (10-100m) zpopularizovali pozemní laserové skenery (TLS) díky vysoké přesnosti. Od svého vzniku v posledních deseti letech se automatizovaná letecká a pozemní digitální fotogrammetrie stala důležitým nástrojem pro tvorbu troj rozměrných krajinných modelů. Vývoj triangulace bodů z fotografií a algoritmů zaměřených na získávání informací z obrazu krajiny, silně zvýšily kvalitu dat získaných z překrývajících se fotografií.

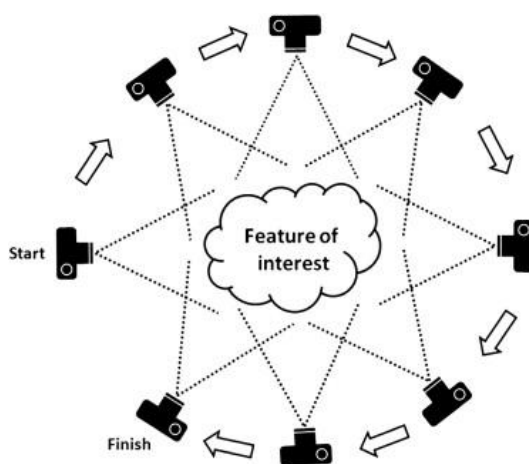
Podobně zlepšení zrcadlových fotoaparátů po stránce jak kvality, tak ceny rozšířilo možnosti fotogrammetrie a tím podpořilo tvorbu modelů při povrchovém průzkumu. Díky tomu došlo ke zlepšení mapování břehů řek, eroze roklí nebo průzkum změny povrchu ledovců. Digitální fotogrammetrie se také dá využít při výzkumu geologických problémů jako je analýza stability svahů (Brasington a kol. 2012).

Fotogrammetrické metody vytváří modely z fotografií na základě bodů zájmu vytvořených pomocí softwaru uvnitř scény. Modely tak mají formu bodového mračka. Rozměry a vzdálenosti bodů jsou určeny relativně k sobě, a proto je třeba jednotlivé body umístěné do 3D prostoru, spojit s reálným koordinačním systémem, použitím skutečného měřítka. K určení reálných rozměrů se v terénu často využívají topografické značky známých vzdáleností.

### 3.1.1 Metoda structure from motion

Structure from motion je nízkonákladová metoda tvorby 3D modelů, z navzájem se překrývajících fotografií (Eltner, Sofia, 2020). Její výhoda oproti konvenčním fotogrammetrickým metodám spočívá v automatizaci výpočtu pozice a orientace fotoaparátu. Tyto faktory jsou vyřešené společně díky automatické identifikaci společných bodů zájmu, získaných ze souboru navzájem se překrývajících fotek. Tato metoda funguje nejlépe v situaci, kde lze pořídit fotky se značným překryvem, kolem objektu ze všech směrů (Snavely, 2011).

Metoda byla vyvinuta v 90. letech, a to díky vývoji počítačového vidění (Spetsakis, Aloimonos, 1991) a automaticky přiřazujících algoritmů. Byla zpopularizována díky vývoji softwaru zpracovávajících bodová mračna. Tyto nástroje mohou na základě poskytnutých fotografií vygenerovat potřebné informace k vytvoření troj rozměrného bodového mračna, reprezentující model objektu.



Obrázek 1: Pozice aparátu kolem objektu (Brasington a kol. 2012)

### 3.1.2 Základy structure from motion

K vytvoření troj rozměrného bodového mračna použitím tradičních fotogrammetrických metod, je třeba znát pozici fotoaparátu, nebo vzdálenosti série bodů ve fotografii. Metoda Structure from motion takové požadavky nemá. Pozice aparátu je vytvořena automaticky pomocí triangulace společných bodů, sledovaných z mnoha překrývajících fotografií (Snavely, 2011).

Hlavní problém metody spočívá v umístění bodů do trojrozměrného prostoru z obrazů pořízených z různých úhlů, kolem objektu. Základní krok k vyřešení tohoto problému je rozpoznání společných bodů zájmu v jednotlivých obrazech, které lze použít k vzájemnému propojení. Častým řešením jsou systémy rozpoznávající objekty, jako algoritmy SIFT (Scale Invariant Feature Transform), nebo RANSAC (Random Sample Consensus). Systém vybere jednotlivé objekty v obraze a porovná je

s databází známých objektů, využitím algoritmu nejbližšího souseda (Lowe, 2004). Pozice bodů je nejvíce ovlivněna třemi faktory: 1. Souřadnicemi bodů v trojrozměrném prostoru, 2. Relativním pohybem mezi kamerou a scénou, 3. Vnitřní geometrií aparátu. Algoritmy jako SIFT pracují se čtyřmi odchylky podobnosti – 2 překlady, rotace a měřítko (přiblížení) objektů zájmu, pomocí simulace oddáleného obrazu a normalizace překladu a rotace (Booysen a kol. 2021).

SIFT rozpozná objekty zájmu v jednotlivých fotografiích a vygeneruje síť bodů kolem každého bodu zájmu v obrazu. Identifikace zájmových oblastí z různých fotografií není ovlivněna měřítkem scény a natočením. Body zájmu, nebo „klíčové body“ jsou automaticky vygenerovány použitím měřítek a pozice ze všech fotografií, vytvořením popisu vlastností, vypočítaným pomocí transformace sklonu obrazů do reprezentace, která není náchylná na rozdíly nasvětlení a orientace (Lowe, 2004). Tyto popisy jsou dostatečně rozdílné ke spárování při práci ve velkých datasetech. Počet vygenerovaných bodů je silně ovlivněn rozlišením pořízené fotografie, a to tak že čím vyšší rozlišení, tím více bodů algoritmus vytvoří uvnitř trojrozměrného pole, za delší dobu výpočtu. Kvalitu ovlivňuje i vliv přírodních faktorů, jako je osvětlení nebo odraz oken. Při silném nasvícení dojde k výskytu ostrých stínů, což může klamat algoritmus při rozpoznávání bodů zájmu. U fotoaparátů se slabou světelností objektivu, může dojít k zaměření nasvícené oblasti a vysokém kontrastu mezi zbytkem scény, a tak ztrátě klíčových bodů. Podobně tak odraz oken, ten lze vyřešit použitím polarizačních filtrů. Další z matoucích faktorů může být výskyt nežádoucích objektů uvnitř scény, jako např. automobily, lidi nebo stromy. Při generování bodů lze dosáhnout optimálních výsledků, použitím masky pro požadovanou oblast v jednotlivých fotografiích.

Kvůli různorodosti jednotlivých objektů určených k modelování po stránce materiálu, nasvícení, nebo kontrastu, nelze přesně určit minimální počet fotografií, k úspěšné tvorbě modelu. K rozpoznání společného bodu z překrývajících obrazů jsou potřeba alespoň 3 sousední fotografie, avšak využití co možná nejvíce fotek přináší optimální výsledky při rozpoznávání shody bodů.

Metoda structure from motion není náročná na techniku fotoaparátu. Lze využít zařízení od kompaktních digitálních, přes zrcadlové, po mobilní telefony. Největším požadavkem jsou dobře nasvícené fotografie objektů zájmu. Přestože kvalita fotek je lepší při použití dražších zrcadlových aparátů, obrazy s vysokým rozlišením (nad 12 megapixelů), bude s velkou pravděpodobností třeba konvertovat, díky čemuž dojde ke ztrátě detailů fotky, aby nedošlo k příliš dlouhé době zpracování. Při tvorbě modelů ve vzdálených oblastech je třeba brát ohled na odolnost zařízení — vydrž baterie a výkon při vystavení extrémním teplotám (Brasington a kol. 2012).

### 3.1.3 Rekonstrukce scény ve 3D prostoru

Sledováním klíčových bodů a rozřazením podle vlastností software vytvoří řídké bodové mračno. Software jako je Agisoft metashape, vypočítá předpokládanou pozici

fotoaparátu a vybere společné body ze sousedících fotografií, k tvorbě řídkého bodového mračna. Klíčové body jsou z mnoha fotek vybrány pomocí algoritmů nejbližšího souseda (Arya a kol. 1998) a Random Sample Consensus (RANSAC) (Fischler a Bolles, 1987). Algoritmy vytváří cesty sledující jednotlivé klíčové body. Cesty vyžadují minimálně dva klíčové body ze tří překrývajících fotek, k rekonstrukci bodového mračna. Body, které nesplňují tyto požadavky jsou automaticky zahozeny (Snavely a kol. 2006). Pomocí této metody, nežádoucí objekty jako jsou lidé pohybující se před objektem, jsou automaticky vyřazeny z datasetu, před samotnou rekonstrukcí scény ve 3D prostoru. Podobně tak pohybující se objekty, které jsme nechtěně zachytili ve fotce jako např. letadla. V takovém případě, přestože stejné body budou z fotografií identifikovány, nebudou vhodné pro použití při rekonstrukci, protože jejich pozice relativně k ostatním klíčovým bodům se neustále mění, díky čemu jsou automaticky vyfiltrovány (Furukawa a Ponce, 2007).

Umístění klíčových bodů je závislé na orientaci fotoaparátu, která je vytvořena pomocí změny podobnosti, při minimalizaci chyb použitím nelienární regrese. Následně jsou vytvořeny předpokládané 3D pozice bodů, použitím triangulace a jsou umístěné do relativního koordinačního systému. Plná automatizace procesu od výběrů klíčových bodů, k přesné rekonstrukci rozměrů scény je hlavní výhodou metody structure from motion proti tradičním fotogrammetrickým metodám (Brasington a kol. 2012).

### **3.2 Distorze**

Vlivem nepřesného sestavení optického systému mohou vzniknout dva hlavní typy rozměrového zkreslení a to: radiální a tangenciální distorze. Radiální distorze je symetrický posun bodů v obrazu směrem ke středu, nebo k hranám obrazu. Lidský zrak je poměrně citlivý na optickou distorzi, více než 1,5 % je možné poznat lidským okem. (Liu a kol. 2021).

Geometrická distorze je optická vada, způsobená rozměrovou nedokonalostí čoček. Neovlivňuje kvalitu obrazu po stránce rozlišení, nebo barvy, ale zkresluje tvar a velikost objektu na fotce. Geometrická distorze může být dvojího charakteru – perspektivní a optická. Perspektivní distorze je způsobená pozicí fotoaparátu relativně k objektu. Fotogrammetrie využívá perspektivní distorze k získání informace o prostorových souřadnicích z dvou rozměrných obrazů. Faktory ovlivňující distorzi lze rozdělit na vnitřní a vnější. Vnější faktory jako: prostředí – čas dne ovlivňuje nasvícení, počasí – vlhkost objektivu a objektů, fyzický stav čočky – poškození, zaprášení, umístění fotoaparátu – výška, úhel, vzdálenost. K vnitřním faktorům patří: model fotoaparátu – některé typy fotoaparátů mají zabudovanou korekci distorze, vliv čočky – u objektivů se statickou ohniskovou vzdáleností lze kalibrovat aparát, aby provedl korekci distorze, zatímco u čoček s pohyblivým ohniskem je korekce složitější. Zpravidla se míra distorze odvíjí od ohniskové vzdálenosti. Fotky pořízené pomocí různých ohniskových vzdáleností, mohou být různě zkreslené. Ve fotografii

je známo 6 hlavních typů distorze: soudková, podušková, vlnová (kombinovaná), rektilineární, rozostření objektivu a pudingový efekt (Seckiner a kol. 2018).

Distorzi je možné změřit porovnáním skutečných rozměrů objektu a zkreslených rozměrů na fotografii, díky tomu lze vyjádřit míru distorze v procentech jako relativní změnu úhlopříčky objektu.

$$D = \frac{y_r - y_i}{y_i} * 100$$

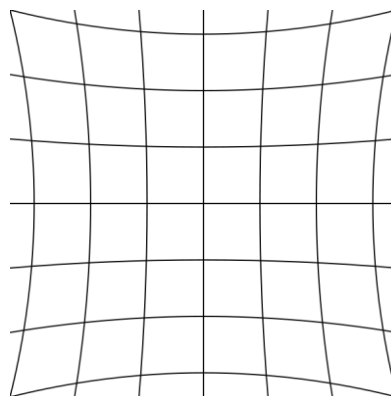
$y_r$  je reálná (zkreslená) vzdálenost úhlopříčky,  $y_i$  je ideální (nezkreslená) vzdálenost úhlopříčky. Tento vztah platí pouze v případě, že zkreslení je symetrické, v případě kombinace distorzí je určení dopadu nepředvídatelné a určuje se vztahem popsáním níže (Liu a kol. 2021).

### 3.2.1 Typy radiální distorze

Typy radiální distorze jsou: podušková (pozitivní) distorze, ta nastává, pokud zvětšení obrazu roste od středu k okraji, a soudková (negativní) distorze, která se vyznačuje zvětšením obrazu od okrajů ke středu fotografie. U některých čoček může dojít ke kombinaci soudkové a poduškové distorze. V takovém případě je zkreslený obraz zaoblený ve středu fotografie směrem od středu a u hran je zaoblený ke středu. Distorze má vliv nejen na zakřivení objektu, ale i jeho velikost, u soudkové distorze bude obraz zmenšený, relativně k nezkreslené fotografii, zatímco u poduškové distorze bude objekt ve fotografii zvětšený (Qinglong a kol. 2018).

Podušková distorze se vyznačuje zaoblením hran zkresleného obrazu směrem ke středu.

U Poduškové distorze je míra **D > 0**



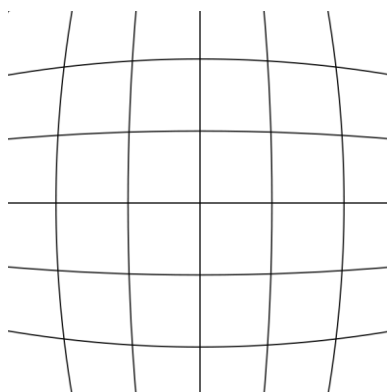
Obrázek 2: Podušková distorze (dostupné online z <http://www.drewgrayphoto.com/learn/distortion101>)

Soudková distorze je nejběžnější typ zkreslení u standartních fotoaparátů, při použití krátkých ohniskových vzdáleností. Vyznačuje se zkreslením hran směrem od středu.



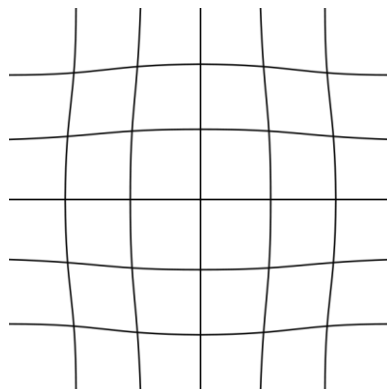
Zkreslené obrazy tak připomínají tvar sudu. Většina spotřebitelských optik vytváří soudkovou distorzi, která je často řešena korekcí fotoaparát. Rybí oko je typ širokoúhlé čočky s vysokým úhlem zorného pole (zpravidla nad  $180^\circ$ ), specifický pro své kulovité zobrazení a soudkovou distorzi. Tento typ čoček byl vyvinut pro výzkum mraků v meteorologii, díky vysokému úhlu záběru. Protože soudková distorze je opak poduškové distorze možným řešením je použití dvou čoček, jedné s poduškovou distorzi a jedné se soudkovou distorzi. Při nastavení správných vzdáleností bude distorze jedné čočky opravena distorzi druhé čočky.

U soudkové distorze je míra  $D < 0$



Obrázek 3: Soudková distorze (dostupné online z <http://www.drewgrayphoto.com/learn/distortion101>)

Vlnová (kombinovaná) distorze je typ zkreslení, kde hrany obrazu jsou zkreslené jedním typem distorze, zatímco střed je ovlivněn jiným typem. Tím dochází k nesymetrickému chování distorze. Na rozdíl od soudkové a poduškové distorze, u kterých má funkce kvadratický charakter, je funkce vlnové distorze kvartického charakteru. Jde o poměrně složitou distorzi po stránce korekce, kvůli své nesymetrické podobě. U takového typu zkreslení existuje bod lomu, ve kterém dochází ke změně typu zakřivení (Seckiner a kol. 2018).



Obrázek 4: Kombinovaná distorze (dostupné online z <http://www.drewgrayphoto.com/learn/distortion101>)

Další typy distorze mohou být:

Rektilineární distorze — jde o typ zkreslení kde je zachovaná rovnost čar a úhel objektů ale dochází ke zkreslení jejich velikostí. Nejznámějším příkladem je Mercatorovo zobrazení mapy světa, kde jsou objekty u krajů mapy značně větší, než objekty blíž ke středu (Nawrat a Kus, 2013).

### 3.2.2 Pudingový efekt

Pudingový efekt (anglicky rolling shutter effect) je typ geometrické distorze, způsobený pohybem mezi objektem a aparátem, při pořizování fotografie. U dnešních fotoaparátů se používají dva hlavní typy sensorů, complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) sensor a charge-couple device (CCD) sensor. Menší cena a spotřeba baterie tvoří CMOS sensor běžnější volbou pro standardní spotřebitelské fotoaparáty, proti CCD sensorům. Většina CCD sensorů je vybavena globální závěrkou, zatímco sensory CMOS využívají pohyblivou závěrku, u kterých se vyskytuje distorze pudingového efektu. Tento typ aparátu provádí expozici snímku po liniích od vrchní hrany fotografie, po spodní, a následně vytvoří výsledný obraz. V takovém případě může nastat problém, kde za čas, než aparát provede expozici vrchní a spodní úrovně, dojde ke změně scény, a tak zkreslení obrazu. Většina algoritmů metody Structure-from-Motion předpokládá okamžitou expozici snímků a všech linií najednou (Meingas a kol. 2005). Z toho důvodu je třeba vzít v potaz výskyt tohoto typu zkreslení, při pořizování fotografií z vozidel nebo pomocí UAV systémů.

Většina UAV systémů je vybavená fotoaparáty s pohyblivou závěrkou. Letecká fotogrammetrie se vyznačuje pohybem sensoru při pořizování fotografií, proto jsou modely často ovlivněné pudingovým efektem. Bez správného zpracování, pudingový efekt může silně ovlivnit výsledky fotogrammetrické rekonstrukce (Zhou a kol. 2020).

Existuje více způsobů řešení pudingového efektu při tvorbě modelů pomocí Structure from motion, přesto je distorze pudingovým efektem stále otevřený problém. Způsoby řešení jsou například: 3D rekonstrukce použitím stereo soustavy aparátů, úprava svazků, metoda relativní pozice a zhuštěné párování. Všechny metody jsou však založené na rozpoznání a spárování společných bodů. Při použití RS fotoaparátů, rovné části scény mohou být vyobrazeny jako křivky, podle různých kinematických modelů. Pokud jsou správně určeny parametry, křivka představující rovnou čáru v 3D prostoru, představuje informaci o pohybu fotoaparátu. Lao a kol. představují metodu průzkumu pudingového efektu získáním informace o rychlosti fotoaparátu z jednotlivých křivek, k sestavení konzistentních kinematických modelů a tvorbě přesnějších 3D modelů (Lao a kol. 2018).

### 3.2.3 Tangenciální distorze

Tangenciální distorze je typ zkreslení obrazu, ke kterému dochází v případě, že sensor fotoaparátu neleží ve stejné rovině jako čočka. Zkreslení se projevuje posunem

hlavního bodu (středu) fotografie. U přístrojů s nevyměnitelnými čočkami, jako jsou čočky mobilních telefonů a standartních spotřebitelských fotoaparátů, je vliv tangenciální distorze specifický pro daný typ fotoaparátu. Pro přístroje, kde lze vyměnit čočku je vliv distorze určený podle použité čočky, v takovém případě často bývá nutná korekce pro konkrétní velikost sensoru fotoaparátu. Vliv tangenciální distorze bývá na rozměry scény zpravidla zanedbatelný, oproti vlivu radiální distorze. Při použití fotoaparátu běžným uživatelem lze tak její dopad, ve většině případů opominout. Při rekonstrukci scény ve 3D prostoru, kde je vyžadována vysoká přesnost, je třeba vzít ohled na možnost odchylky, vyjádřenou pomocí koeficientů tangenciální distorze popsanych níže (Hugemann 2010).

### 3.2.4 Výpočet distorze

Ke korekci radiální a tangenciální distorze se nejčastěji používají dva modely, Brownův model a Zhangův model (Qinglong a kol. 2018).

Brown-Conrady model je definován změnou souřadnic bodů nezkresleného obrazu do zkreslených souřadnic. Distorzi lze vyjádřit změnou pixelů obrazu, v případě že známe originální rozměry scény. Použitím katrézské soustavy souřadnic lze  $(x, y)$  definovat jako souřadnice nezkreslených bodů,  $(x_{rad}, y_{rad})$  jako souřadnice bodů ovlivněné radiální distorzí a  $(x_{tan}, y_{tan})$  souřadnice bodů ovlivněné tangenciální distorzí.

Pro radiální distorzi lze vyjádřit zkreslení jako:

$$x_{rad} = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6)$$

$$y_{rad} = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6)$$

Pro tangenciální distorzi platí vztah:

$$x_{tan} = x(P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy)$$

$$y_{tan} = y(P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy)$$

$$r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$$

$x_c$  a  $y_c$  jsou koordinace středu distorze (hlavního bodu)

$K_n$  jsou radiální koeficienty čočky

$P_n$  jsou tangenciální koeficienty čočky

$$\Delta x = x_{rad} + x_{tan}$$

$$\Delta y = y_{rad} + y_{tan}$$

Často je brán ohled pouze na radiální distorzi druhého řádu, v takovém případě model vypadá následovně (Darwish a kol. 2019):

$$x_{rad} = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4)$$

$$y_{rad} = y(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4)$$

Soudková distorze je zpravidla modelována se zápornou hodnotou  $K_1$  a podušková distorze s kladnou hodnotou  $K_1$  (Stankiewicz a kol. 2018).

### 3.2.5 Kalibrace fotoaparátu

Kalibrace fotoaparátu je nezbytná pro získání přesnějších výsledků, při 3D rekonstrukci prostoru. Kalibrační metody určují vztah mezi pixelem na dvou rozměrné fotografii (v koordinačním systému fotoaparátu) ovlivněných distorzí a rovinou v troj rozměrném prostoru (v reálném koordinačním systému), ve kterém se bod skutečně nachází. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, aby bylo možné určit míru distorze a provést korekci, je nutné určit vnitřní parametry fotoaparátu. V dnešní době existuje řada algoritmů, užitečných pro různé situace.

Tsai (1987) navrhl kalibraci založenou na vzdálenosti 3D bodů kalibračního modelu, určením stálého vzoru. Zhang (1999) navrhl přizpůsobivou kalibrační techniku, použitím 2D cíle, alespoň ze dvou různých úhlů. Jeho technika je populární při měření, které vyžaduje vysokou přesnost (Zhou a kol. 2012). Podle Zhanga (1999) a Heikkila se Silvenem (1997) lze parametry určit pomocí mřížky s regulérním vzorem tzv. kalibračního cíle, vyfoceného z různých úhlů. Kalibrační cíl je zpravidla šachovnicový vzor se známými a konstantními rozměry čtverců.

Software použitý pro kalibraci rozpozná rohy čtverců šachovnice, určí střed, orientaci cíle a označí společná místa pomocí bodů. Evaluační algoritmus spočítá vnitřní parametry (ohniskovou vzdálenost, hlavní bod a parametry distorze), vnější parametry (překladačový vektor a matice rotace) a možnou chybu kalibračních parametrů, způsobenou odchylkou bodů od pozice modelu. K výpočtu všech kalibračních parametrů zpravidla stačí osm fotek z různých úhlů (Zhao a kol. 2013), ovšem čím více fotografií tím přesnějších výsledků lze dosáhnout.

Existují dva běžné způsoby vytvoření modelu aparátu při použití metody Structure from motion. První způsob je před-kalibrace, uživatel určí vnitřní rozměry a model distorze fotoaparátu před samotným srovnáním svazků procesu Structure-from-Motion. V některých případech, zejména u dražších fotoaparátů kalibraci provede výrobce, protože lze předpokládat konstantní charakter vnitřní geometrie aparátu, pokud nedojde k silnému poškození (Birmingham a Griffiths, 2018). Druhý způsob lze popsat jako samo-kalibrace. U této metody je kalibrace vnitřních parametrů provedena při samotném seřazení svazků. Výhoda tohoto způsobu kalibrace spočívá v určení parametrů použitím stejného měřítka jako sběr dat. Pro efektivní kalibraci lze porovnat tento způsob kalibrace s kalibrací rovné šachovnice, kde platí že posun bodů je pouze na ose x a ose y.

## 3.3 Laserové skenování

Trojrozměrné pozemní skenování je poměrně nová, přesto revoluční technika tvorby modelů. Od svého vzniku laserové skenery vedly k velkému množství publikací, kde byly porovnávány metody modelování z měření vzdáleností a fotogrammetrické

metody. Mnoho výzkumů řešilo otázku, zda metody jsou konkurenční, nebo komplementární. Baltsavias (1999) provedl porovnání manuální fotogrammetrie a laserového skenu. Hlavní nevýhodou byla slabá míra automatizace modelování pomocí fotogrammetrických metod na základě toho bylo laserové skenování vybráno jako lepší metoda pro většinu případů, přesto bylo dokázáno, že oba způsoby modelování dosahují dostačujících výsledků, ale ani jedna metoda nelze využít ve všech situacích (Skarlatos a Kiparissi, 2012).

Laserové skenery jsou zařízení, které automaticky sbírají prostorové koordinace velkého množství bodů za krátký časový úsek. Laserové skenování dosahuje zpravidla přesnosti od 2 do 50 mm, na jednotlivých bodech (Olsen a kol. 2010). Největší výhoda laserového skenování spočívá v možnosti dosažení vysoké hustoty bodů, uvnitř bodového mračna. Aby bylo možné analyzovat charakter a tvar skenovaného objektu, je nutné konvertovat data rozmístěných bodů do troj rozměrného prostoru, použitím povrchové rekonstrukce. Z výsledků rekonstrukce je možné vytvořit 2D profily, pro práci v regulérních GIS, nebo CAD balíčcích.

Technika k měření využívá diodu, která vysílá puls laserového paprsku na skenovaný objekt. Koordinace paprsku se stále mění pomocí zrcadla uvnitř zařízení, které určuje výšku a úhel dopadu. Laserový paprsek se od skenovaného objektu odrazí a část světla se vrací zpět do přijímače. Skener měří s vysokou přesností čas, za který se paprsek vrátil do zařízení. Díky znalosti rychlosti světla, vzdálenosti objektu od zařízení a azimutu s úhlem paprsku, lze vypočítat pozici každého bodu odkud se paprsek vrátil zpět do přijímače. Výsledkem sběru je digitální soubor dat v podobě zhuštěného bodového mračna, kde je každý bod reprezentován v trojrozměrném koordinačním systému, s vlastními koordinacemi, X, Y, a Z, relativně k pozici skeneru a intenzitě odrazu paprsku.

Nová generace skenerů zároveň sbírá informace o barvě odražených paprsků a zbarvuje body použitím RGB barev, což značně pomáhá s rozpoznáním bodů a prací s řídkým bodovým mračnem v hrubé podobě. Velké a komplexní objekty lze měřit z různých pozic. Většina programů pro zpracování bodových mračen, dovoluje spojit data z různých pozic do jednoho bodového mračna, což dovoluje průzkum zastíněných míst, kterých nebylo možné dosáhnout z předchozí pozice skeneru. Za ideálních podmínek lze skenovat objekty na vzdálenost až 200 metrů, ale v reálném světě je obvyklé využití od 50 do 100 metrů. Měřicí metoda dosahuje, v porovnání s ostatními metodami, vysoké rychlosti sběru dat. U novějších modelů je možné vytvořit sken v radiu 360° do 4 minut. Skener lze umístit na běžný stativ a propojit s notebookem, který ovládá pohyb paprsku a zaznamenává výsledky měření. Základní princip měřících zařízení je stejný, ale kvalita vygenerovaných dat se může lišit po stránce rozlišení, přesnosti, rychlosti nebo odklonění paprsku, a to podle modelů a výrobce.

Jako u ostatních měřících metod, jsou u laserového skenování vedlejší faktory, které mají vliv na kvalitu výsledků měření. Vysoká reflektivita povrchu ovlivňuje množství světla, které se vrací do přijímače, nežádoucí objekty mohou stínit objekt (to však lze vyřešit skenem z jiné pozice která dokáže zastíněné místo změřit). Další komplikací

může být cena zařízení, výkon techniky při vystavení extrémním teplotám, nebo přístup ke zdroji napájení (Slob, Hack, 2004).

### 3.3.1 Povrchová rekonstrukce

Samotné vyobrazení bodů uvnitř bodového mračna poskytuje poměrně dobrou prostorovou perspektivu naskenovaného objektu. Ovšem aby bylo možné analyzovat charakter a tvar naskenovaného povrchu, je nutné konvertovat neobvykle rozmístěná data bodů, do informace troj rozměrného povrchu. Z toho důvodu byl vyvinut software, který využívá vizualizační algoritmy k rekonstrukci 3D povrchu. Programy nachází uplatnění jak ve výzkumu designu a vyobrazení v oblasti medicíny, tak i v trojrozměrném geologickém modelování. U geologického modelování je zpravidla cílem vytvořit model velké plochy (s použitím malého měřítka), z limitovaných dat a geofyzikálních profilů, zatímco v případě povrchové rekonstrukce bodových mračen jde o vytvoření poměrně malého trojrozměrného povrchu (při použití velkého měřítka).

Algoritmy povrchové rekonstrukce lze rozdělit na Polygonální a Parametrické. Příklad polygonálního způsobu tvorby je 3D Delaunayho triangulace, která vytváří různé, trojúhelníkové oblasti na základě lineární interpolace mezi body v trojrozměrném prostoru. Příklady parametrické tvorby jsou buď NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) nebo rychlé RBF (Radial Basis Functions), které využívají parametrické funkce k definování povrchové oblasti. Parametrické techniky vytváří přirozenější povrchy, a tak přesnější reprezentaci, zpravidla pro oblasti, kde chybí data, zato vyžaduje silnější výpočetní techniku a trvá déle než polygonální interpolační techniky (Cowan a kol. 2002).

Vytvořený povrch lze zobrazit pomocí řady vizualizačních technik. Hlavním cílem je vytvořit objekt z různých stran a úhlů, pro interaktivní zobrazení uživatelem. Různé techniky nasvícení lze použít ke zvýraznění tvarů objektu a detail povrchu jako např. hrubost. Uživateli zpravidla nestačí pouhé zobrazení objektu, ale často bývá zájem o použití a analýzu dat v různém softwarovém prostředí. Z vytvořeného, trojrozměrného povrchu lze generovat 2D profily nebo soubor vrstevnic. Podobné informace lze použít v regulérních GIS nebo CAD systémech, pro podrobnější analýzu (Slob, Hack, 2004).

## 4 Metodika

### 4.1 Materiály a metody

Postup práce lze rozdělit do 4 fází, a to:

1. Pořízení fotografií objektu
2. Kalibrace vnitřních parametrů
3. Tvorba bodových mračen metodou Structure from motion
4. Porovnání mračen s výsledky pozemní laserové měřicí stanice

#### 4.1.1 Vytvoření fotografií

K vytvoření trojrozměrných bodových mračen, reprezentující trojrozměrné modely, bylo třeba objekt, konkrétně budovu MCEVII, Fakulty životního prostředí v areálu České zemědělské univerzity v Praze nafotit z různých pozic kolem budovy, jak na horizontální, tak na vertikální úrovni, v rámci možností. K dosažení vyšší různorodosti výsledků byla vytvořena různá bodová mračna, pomocí použití různých optik.

K pořízení fotografií byly použity následující přístroje:

DSLR fotoaparát Canon EOS 100D s rozlišením 18Mpx v kombinaci s objektivem Canon EF-S 17-55mm, světelnost objektivu je  $f/2.8$

Díky nastavitelnosti objektivu bylo možné vytvořit dva modely s různou ohniskovou vzdáleností, konkrétně 17mm a 20mm, a porovnat dopad změny na míru distorze.

DSLR fotoaparát Canon EOS 100D v kombinaci s objektivem Canon EF-S 18-55mm, světelnost objektivu je  $f/3.5-5.6$ , (pro použité ohnisko 18mm platí světelnost 3.5)

Digitální fotoaparát Samsung S760 s rozlišením 7.2Mpx a rozpětím objektivu 6,3 do 18,9mm

Vlastnosti fotografií jsou následující:

Tabulka 1: Typ aparátu a jejich vlastnosti

Typ aparátu	Objektiv	Ohnisková vzdálenost	Rozlišení	Formát
Canon EOS 100D	Canon EF-S 17-55mm	17mm	5184x3456	RAW
Canon EOS 100D		20mm	5184x3456	RAW
Canon EOS 100D	Canon EF-S 18-55mm	18mm	5184x3456	RAW
Samsung S760	-	6,3mm	3072x2304	JPG

Pomocí následujících optik byly vytvořeny soubory fotografií použité pro tvorbu modelů A-D.

- **Model A** – Canon EOS 100D v kombinaci s objektivem Canon EF-S 17-55mm, ohnisková vzdálenost 17mm
- **Model B** – Canon EOS 100D v kombinaci s objektivem Canon EF-S 17-55mm, ohnisková vzdálenost 20mm
- **Model C** – Canon EOS 100D v kombinaci s objektivem Canon EF-S 18-55mm, ohnisková vzdálenost 18mm
- **Model D** – Samsung S760, ohnisková vzdálenost 6mm

Více informací o jednotlivých modelech lze najít v tabulce 2.

Čas tvorby byl určen podle generace modelu na notebooku Lenovo ideapad 320 (pomocí procesoru Intel® Core™ i5-8250U CPU @ 1.60GHz a grafických karet Intel® UHD Graphics 620 a NVIDIA GeForce MX150). Tabulka 3 obsahuje vypočtené koeficienty distorze, použitím souboru fotografií šachovnice zpracovaných softwarem Agisoft lens.

*Tabulka 2 Výsledky tvorby modelů softwarem Agisoft metashape*

Konkrétní model	Počet vložených fotografií	Počet použitých fotografií	Čas tvorby	Počet bodů
<i>Model A</i>	679	667	4h 47min	29 877 521
<i>Model B</i>	552	552	3h 52min	36 188 105
<i>Model C</i>	534	497	3h 39min	19 133 265
<i>Model D</i>	755	751	2h 14min	7 094 483

#### 4.1.2 Kalibrace vnitřních parametrů optiky

Aby bylo možné určit dopad distorze na přesnost modelů, je třeba znát vliv distorze jednotlivých optik na jednotlivé fotografie. K určení míry rozměrového zkreslení byl vyfocen kalibrační cíl: šachovnice s identickými rozměry čtverců na rovném podkladu. Díky rovnosti povrchu kalibračního cíle, lze pominout prostorové koordinace hloubky. Šachovnice byla vyfocena z různých úhlů a v různých pozicích ve scéně, pomocí každé optiky, použité k tvorbě modelů. Cíl byl vyfocen ze vzdálenosti 50 cm, s použitím stativu, ze stejné pozice a pohybu kalibračního cíle. K získání fotografií z různých úhlů byl kalibrační cíl natáčen a posouván, zatímco fotoaparát zůstal ve stálé pozici. Celkem bylo pořízeno kolem 30 fotografií pro jednotlivou optiku (celkem 115 fotografií pro všechny použité optiky).

K výpočtu vnitřních parametrů fotoaparátů byl použit program Agisoft lens. Software na několika fotografiích vytvořil síť společných bodů a podle změny vzdáleností



jednotlivých čtverců, měřené v pixelech, vypočítal vnitřní parametry fotoaparátu, včetně distorzních koeficientů pro radiální a tangenciální distorzi.

### 4.1.3 Tvorba bodových mračen

Postup tvorby bodových mračen:

1. Nahrání jednotlivých setů fotografií do softwaru Agisoft Metashape.
2. Pomocí funkce align images byly fotografie seřazeny. Software obrazy prozkoumal a vytvořil body, podle zájmových oblastí scény.  
Přesnost – Vysoká (ovlivňuje do jaké míry software  
Počet vytvořených bodů – 40 000 (počet bodů které software vytvoří z jednotlivých fotografií)  
Počet spárovaných bodů – 40 000 (počet bodů které software spáruje s body sousedních fotografií)  
Software prozkoumal vytvořené body a postupně je porovnal k získání párů ze sousedících fotografií. Zároveň software vypočítal předpokládané pozice (umístění, úhel) fotoaparátu. Poté na základě shody a pozice aparátu umístil body do trojrozměrného prostoru a vytvořil řídké bodové mračno (angl. sparse point cloud).
3. Funkcí build dense cloud software vytvořil zhuštěné bodové mračno  
Přesnost – střední (u nastavení vyšší přesnosti docházelo k selhání techniky a dlouhé předpokládané době výpočtu v řádech dnů)  
Hloubková filtrace bodů – Agresivní (ovlivňuje do jaké míry je software tolerantní při hloubkové filtraci)  
Po vytvoření zhuštěného bodového mračna jsem proved hrubé manuální čištění k vyřazení oblastí, které ztlačně nepatří k modelu budovy.
4. K exportu bodového mračna byla využita funkce Export points, která exportovala zhuštěné bodové mračno ve formátu .ply, který lze použít pro práci s modelem požitím programu cloud compare a srovnání s bodovým mračnem vytvořeným použitím pozemního laserového skeneru.
5. Nastavení měřítka – Pomocí rozměrů objektů získaných v terénu bylo nastaveno měřítko bodového mračna a tím došlo k přiřazení reálných dimenzí bodům.

Jednotlivé kroky byly provedeny pro všechny optiky samostatně.

### 4.1.4 Srovnání bodových mračen s referencí

K porovnání bodových mračen byl použit software Cloud compare. Modely byly nahrány do softwaru cloud compare. U bodového mračna laserové stanice byly funkce segment vybrány a oříznuty zájmové oblasti z důvodu velikosti mračna (kolem 234 milionů bodů). Použitá technika nestačila nárokům projektu takové velikosti a docházelo k selhání. Pomocí segmentace došlo k zmenšení počtu bodů, u přední strany

budovy bylo vybráno 79 milionu bodů. Aby bylo porovnání mračen možné, bylo třeba bodová mračna přiblížit tak aby došlo k překryvu.

Pro překryv byla využita funkce align clouds. Na jednotlivých bodových mračnách byly manuálně vybrány body, pomocí kterých software bodová mračna překryje a sloučí měřítko. Kvalita překryvu je vyjádřena hodnotou RMSE (Root mean square error) uvedenou v následující tabulce.

Tabulka 3 – Hodnoty RMSE při překrývání modelů.

Typ modelu	Model A	Model B	Model C	Model D
RMSE	0,125507	0,06	0,138644	0,155653

Po dosažení přijatelného překryvu byla mračna očištěna o tzv. hluk (části modelu, které nepatří k zájmové oblasti). Pro porovnání vzdáleností mračen byla použita funkce compute cloud distance. Software vybere jednotlivé body a pomocí metody nejbližšího souseda vypočte vzdálenost bodů. Jako reference byl vybrán model laserového skeneru a po vypočtení průměrných vzdáleností byla pro modely vybrána maximální vzdálenost zkoumaných bodů na 0.7 implicitních jednotek (1 implicitní jednotka = 1 metr pro konkrétní modely), pro dostatečné pokrytí úrovní vzdálenosti.

## 5 Výsledky práce

Výsledky kalibrace vnitřních parametrů fotoaparátu, včetně možné odchylky (odchylka je určena systematickou chybou softwaru). Koeficienty byly určeny softwarem Agisoft lens. Optiky použité pro kalibraci jsou určeny podle Konkrétních modelů, popsaných výše.

Tabulka 4 Výsledky měření distorze u jednotlivých optik

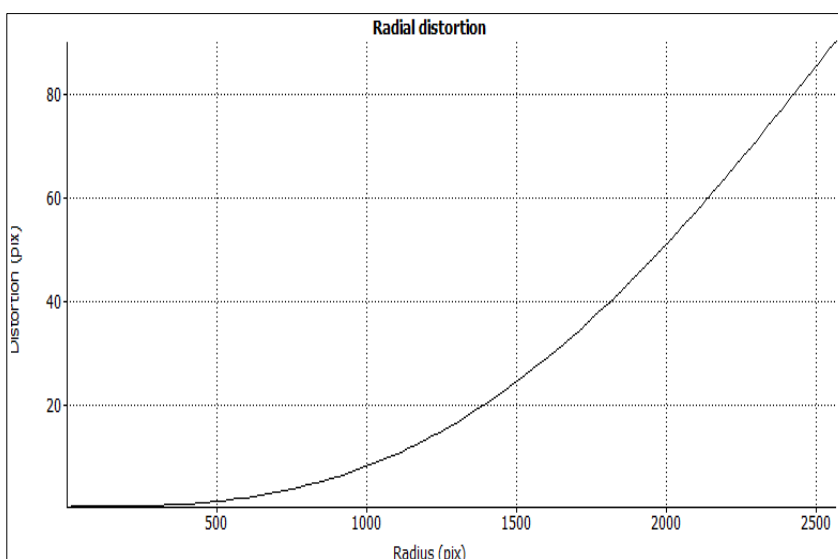
Konkrétní model	Koeficienty radiální distorze			Koeficienty tangenciální distorze	
	K1	K2	K3	P1	P2
Model A	-0.129697 +- 0.000665051	0.134332 +- 0.00381714	-0.109205 +- 0.00641601	0.000312076 +- 0.0000360114	0.000781838 +- 0.0000567176
Model B	-0.0901114 +- 0.000836556	0.185823 +- 0.00644484	-0.154217 +- 0.01454	0.000348577 +- 0.0000392906	0.00151095 +- 0.000064065
Model C	-0.163879 +- 0.000788762	0.162032 +- 0.00524619	-0.0489092 +- 0.0103487	-0.00109319 +- 0.0000407533	0.000376983 +- 0.0000584999
Model D	-0.207385 +- 0.00246019	0.164737 +- 0.0307545	0.408572 +- 0.108237	-0.000683346 +- 0.00006985	-0.00155376 +- 0.0000933113

Grafy níže vyjadřují zkreslení obrazu od hlavního bodu fotografie k okraji, získané z kalibrace optiky pomocí softwaru Agisoft lens.

Vlevo měří radiální distorze, vpravo měří tangenciální distorze. Osa X představuje radius v pixelech, úměrný vzdálenosti od hlavního bodu ke kraji fotografie (zpravidla půlka rozlišení s přihlédnutím k posunu středu vlivem tangenciální distorze) a osa Y představuje míru distorze obrazu měřené v pixelech. Nižší rozlišení modelu D určuje menší škálu pixelů na ose X.

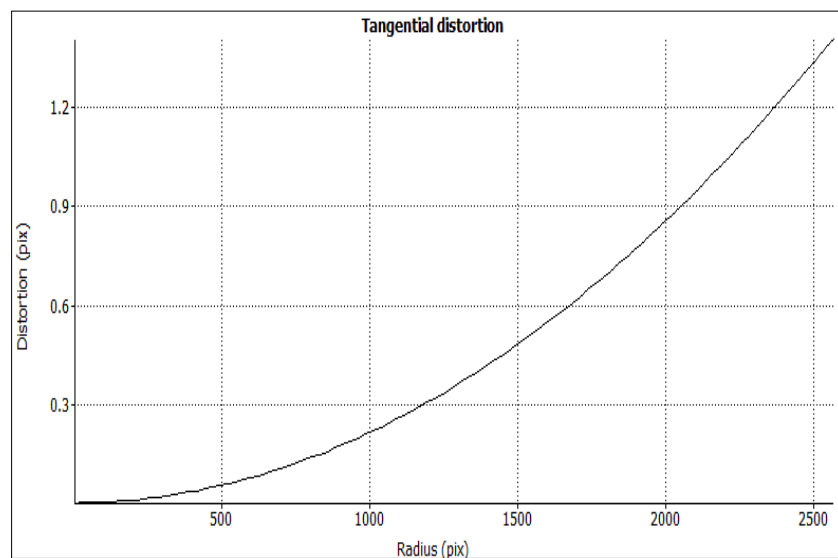
## Model A

Graf 1 – Míra radiální distorze modelu A



Míra radiálního zkreslení objektivu Canon EF-S, ohniskové vzdálenosti 17mm dosahovala hodnot kolem 85 pixelů. V procentech je míra zkreslení 3,27%.

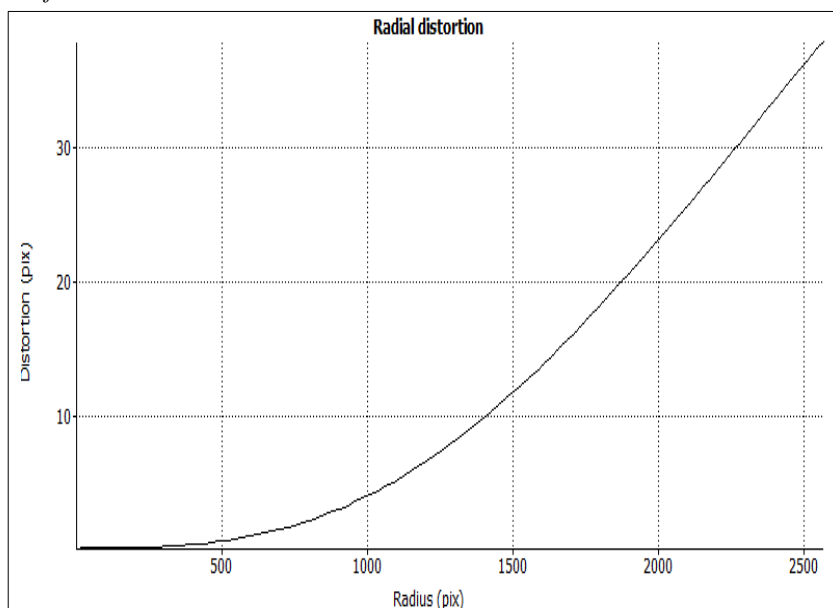
Graf 2 - Míra tangenciální distorze modelu A



Tangenciální distorze objektivu Canon EF-S při použití ohniskové vzdálenosti 17mm. Zkreslení dosahovalo hodnot kolem 1,3 pixelů u kraje fotografie. Přepočtem na procenta dosahovala hodnot 0,05%.

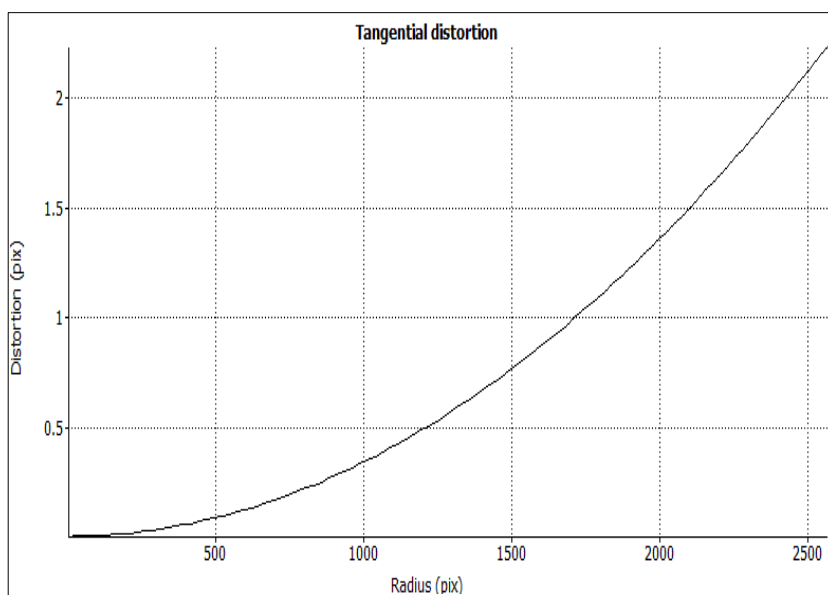
## Model B

Graf 3 - Míra radiální distorze modelu B



Radiální zkreslení objektivu Canon EF-S použitím ohniskové vzdálenosti 20mm. Konkrétní optika dosahovala nejmenší míry radiálního zkreslení, a to kolem 37 pixelů u kraje fotografie. V procentech lze distorzi vyjádřit hodnotou 1,42%.

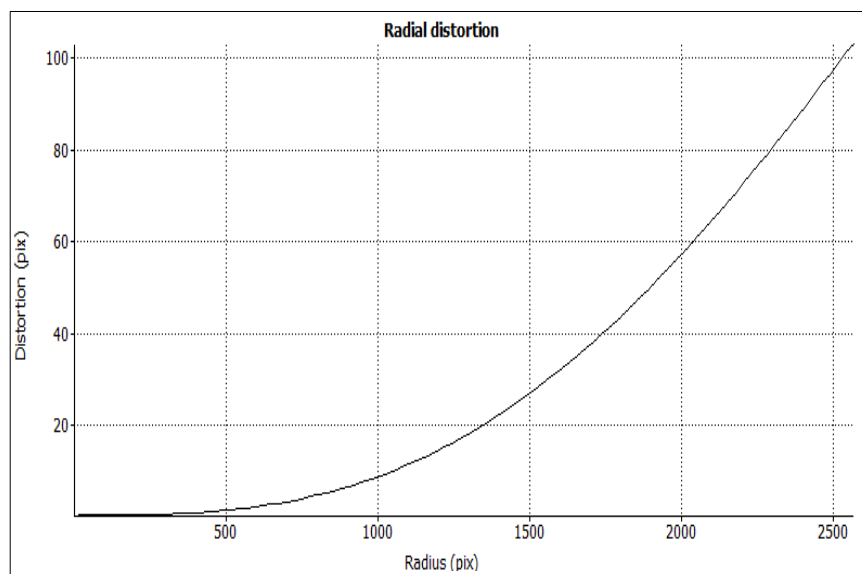
Graf 4 - Míra tangenciální distorze modelu B



Tangenciální distorze objektivu Canon EF-S, ohniskové vzdálenosti 20mm. Konkrétní optika dosahovala nejvyšších hodnot při srovnání tangenciálních distorzí všech modelů. Hodnota přesahovala zkreslení o 2,1 pixelů, v procentech 0,081%.

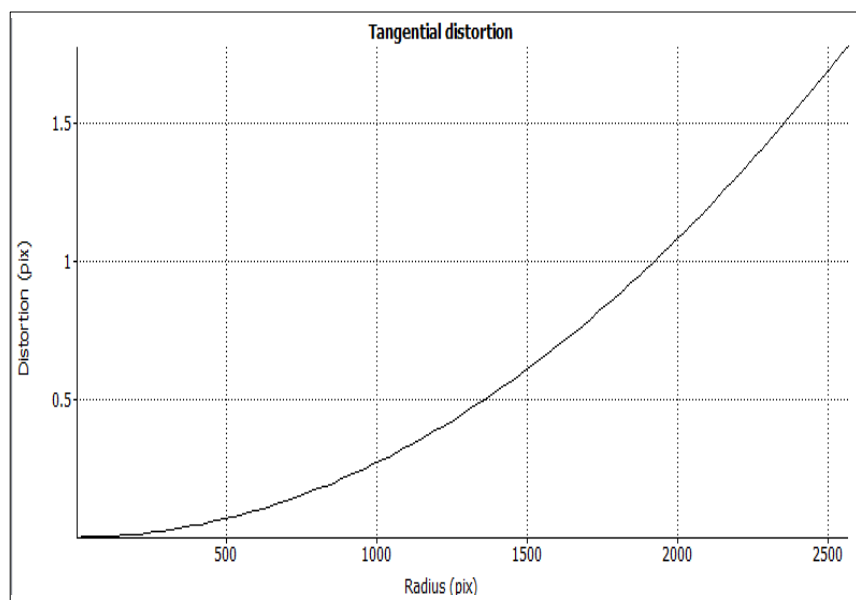
## Model C

Graf 5 - Míra radiální distorze modelu C



Radiální zkreslení objektivu Canon EF-S při použití ohniskové vzdálenosti 18mm, použité k tvorbě modelu C. Zkreslení tohoto typu optiky dosahovalo nejvyšších naměřených hodnot. Kraje fotografie byly zkreslené kolem 95 pixelů. V procentech je míra zkreslení 3,66%, jde o velmi silnou míru distorze.

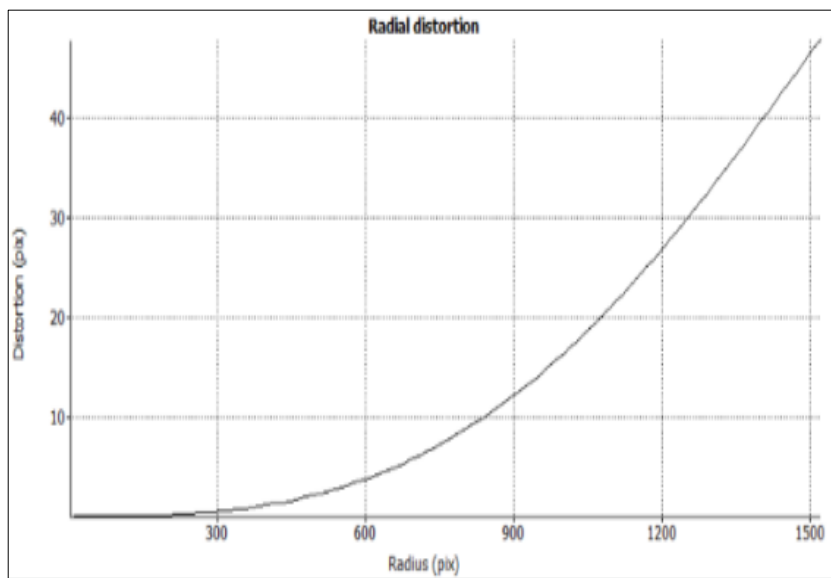
Graf 6 – Míra tangenciální distorze modelu C



Tangenciální distorze objektivu Canon EF-S, ohniskové vzdálenosti 18mm, dosahovala hodnot zkreslení kolem 1,7 pixelů. Při přepočtu na procenta celkového rozlišení je vliv tangenciální distorze 0,065%.

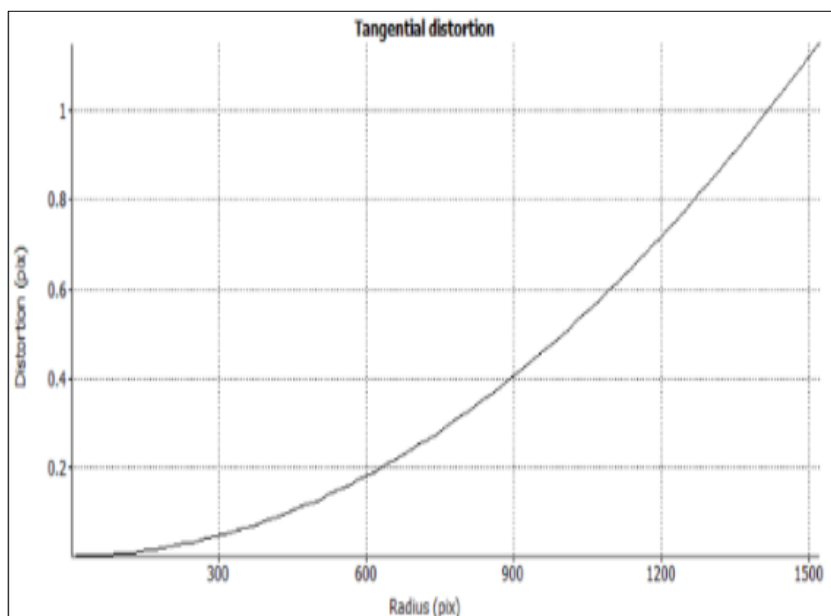
## Model D

Graf 7 - Míra radiální distorze modelu D



Radiální zkreslení fotoaparátu Samsung S760 při použití ohniskové vzdálenosti 6,3mm dosahovalo druhé nejnížší hodnoty. Kraje fotografie byly zkresleny o 45 pixelů. Při přepočtu na procenta je míra zkreslení 2,92%. Protože model D byl vytvořen z fotografií nižšího rozlišení, jsou hodnoty osy x nižší v porovnání s předchozími grafy.

Graf 8 – Míra tangenciální distorze modelu D



Tangenciální distorze optiky, použité k tvorbě modelu D dosahovala hodnot kolem 1,1 pixelů. V přepočtu na procenta, 0,071%.

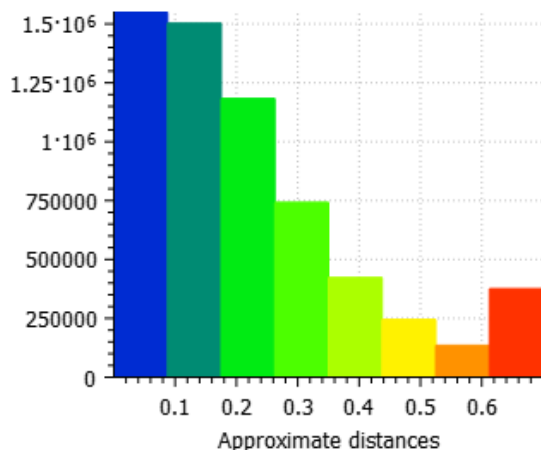
Kalibrací optik byly získány distorzní koeficienty (tabulka 4) a grafické zobrazení míry distorze jednotlivých optických systémů (grafy 1-8). Jak lze z grafů radiální a tangenciální distorze vyčíst, dopad radiální distorze byl ve všech případech silnější než dopad tangenciální distorze.

Míra distorze byla nejmenší u Modelu B — kolem 37 pixelů rádiu fotografie, použitím různých optických vzdáleností, stejného objektivu jako u modelu A. Hodnota distorze fotografií u Modelu D byla druhá nejmenší — kolem 45 pixelů rádiu, při použití nejlevnějšího fotoaparátu. Distorze Modelu A dosahovala hodnot kolem 85 pixelů a model C byl nejvíce ovlivněn zkreslením obrazu, dosahující hodnot zkreslení kolem 95 pixelů v radiu. Vliv tangenciální distorze byl velmi slabý u všech kalibrovaných optik – rozsah posunu byl od 1 do 2 pixelů.

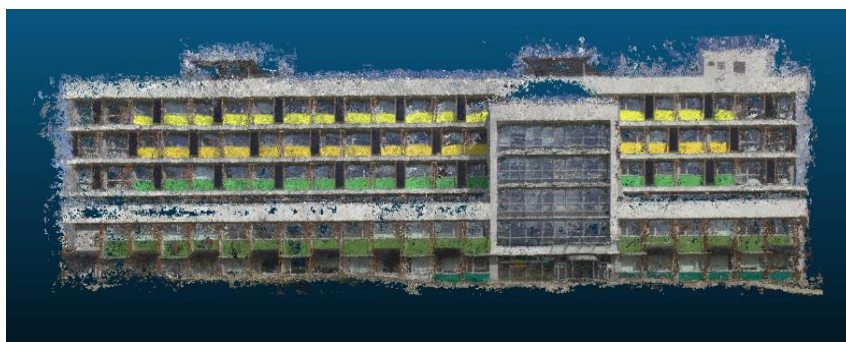
Výsledky porovnání bodových mračen v softwaru Cloud compare. Osa Y vyjadřuje počet bodů a osa X vyjadřuje vzdálenost bodů od jejich protějšků uvnitř bodového mračka laserového skenu v implicitních jednotkách, ve kterých software pracuje. Pro představu 1 implicitní jednotka = 1 metr u konkrétních modelů.

## Model A

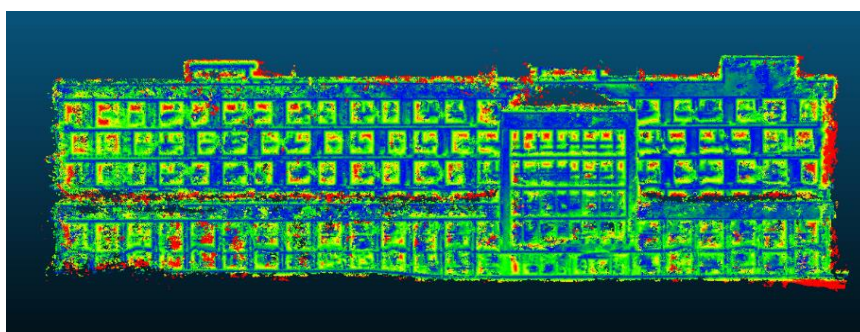
Graf 9 – vzdálenosti všech porovnávaných bodů modelu A od reference



Graf vyjadřuje vzdálenosti bodů modelu A od bodového mračka reference. Celkový počet porovnaných bodů je 5 994 351. Graf 9 odkazuje na obrázek 6 který vyobrazuje rozdíly vzdáleností, jednotlivých částí modelu.



Obrázek 5 – Model A

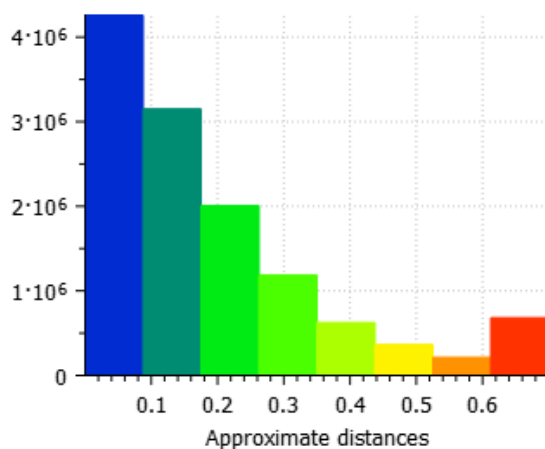


Obrázek 6 – Vzdálenosti modelu A podle grafu 9

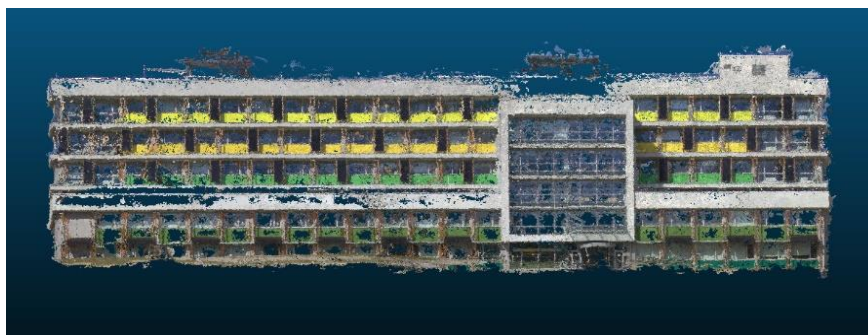


## Model B

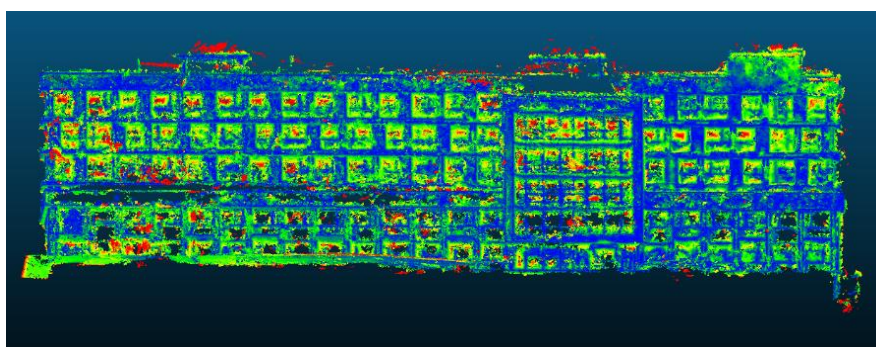
Graf 10 — vzdálenosti všech porovnávaných bodů modelu B od reference



Graf vyjadřuje vzdálenosti bodů modelu B od reference. Celkový počet porovnaných bodů je 12 487 719. Graf 10 odkazuje na obrázek 8 kde lze vidět vzdálenosti bodů od reference na jednotlivých částech modelu. Bodové mračno modelu B bylo ve srovnání s ostatními modely nejvíce podobné laserovému skenu po stránce vzdáleností bodů a přesnosti.



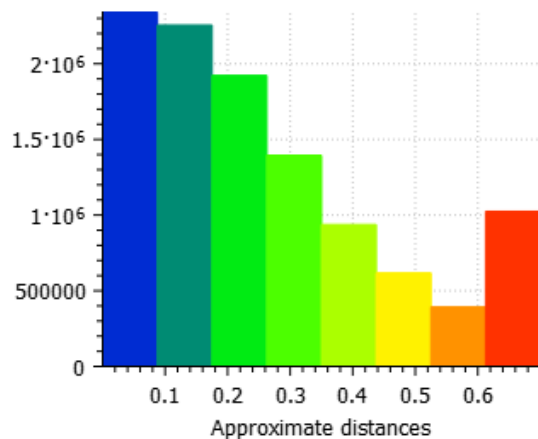
Obrázek 7 – Model B



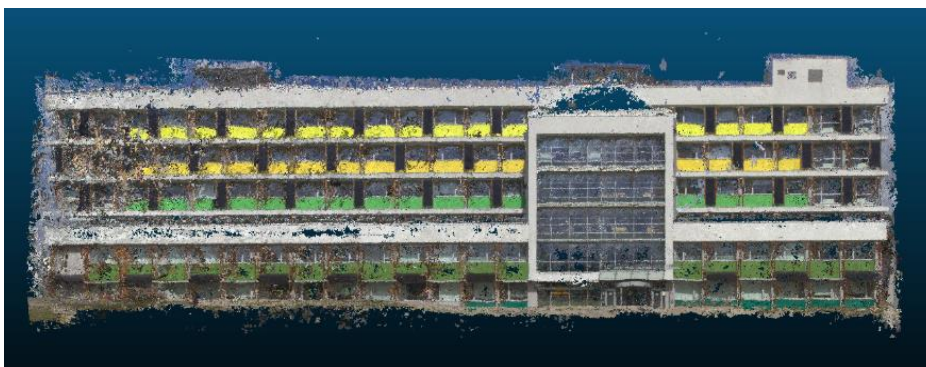
Obrázek 8 – Vzdálenosti modelu B podle grafu 10

## Model C

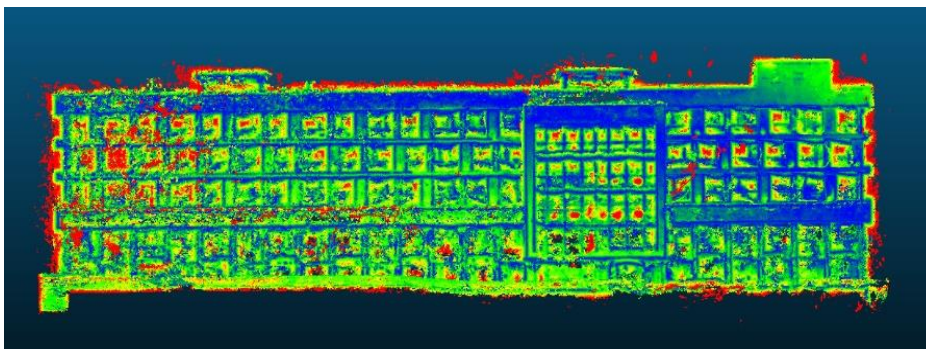
Graf 11 — vzdálenosti všech porovnávaných bodů modelu C od reference



Graf vyjadřuje vzdálenosti bodů modelu C od reference. Celkový počet porovnaných bodů je 10 885 518. Graf 11 odkazuje na obrázek 10 kde lze vidět vzdálenosti bodů od reference na jednotlivých částech modelu. Model C obsahoval nejvíce bodů přesahujících vzdálenosti nad 61 cm.



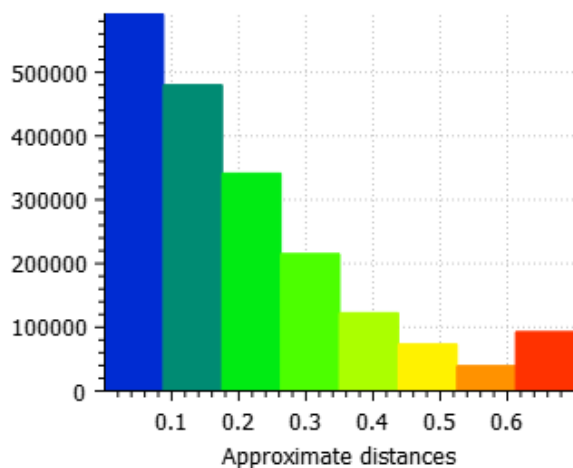
Obrázek 9 – Model C



Obrázek 10 – Vzdálenosti modelu C podle grafu 11

## Model D

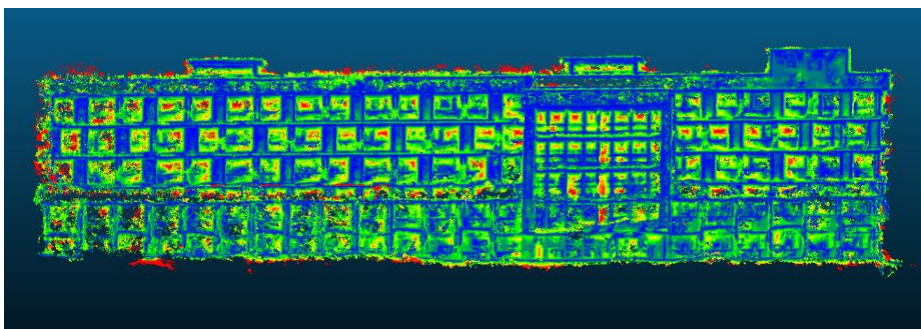
Graf 12 — vzdálenosti všech porovnávaných bodů modelu D od referencie



Graf vyjadřuje vzdálenosti bodů modelu D od referencie. Celkový počet porovnaných bodů je 1 953 231. Vlivem použitého rozlišení obsahoval model D nejméně bodů uvnitř bodového mračka. Graf 12 odkazuje na obrázek 12, kde lze vidět vzdálenosti bodů od referencie na jednotlivých částech modelu.



Obrázek 11 – Model D



Obrázek 12 – Vzdálenosti modelu D podle grafu 12

Tabulka vyjadřuje procentuální poměr celkového počtu porovnaných bodů podle grafů 9-12. Nejpřesnějších výsledků dosahoval model B u kterého byla změřena nejmenší míra radiální distorze, naopak nejhorších výsledků dosahoval model C s nejvyšší naměřenou mírou distorze.

Tabulka 5 — Rozdělení bodů podle grafů 9-12 v poměru s porovnanými body

Konkrétní model	Procentuální poměr celkového počtu porovnaných bodů (%)							
<i>Model A</i>	25,65	24,97	19,65	12,25	6,9	3,92	2,09	4,53
<i>Model B</i>	34,1	25,23	16,07	9,49	4,99	2,92	1,71	5,46
<i>Model C</i>	21,43	20,68	17,66	12,8	8,58	5,64	3,59	9,58
<i>Model D</i>	30,24	24,52	17,42	10,99	6,26	3,75	2,01	4,77

Výsledky porovnání vzdáleností bodů byly ve stejném pořadí jako výsledky kalibrace optik. Nejvyšší přesnosti dosahoval model B vzdálenosti bodů dosahovaly přesnosti od 0cm do 25cm u 75,4% všech vytvořených bodů, zatímco model C dosahoval stejné přesnosti pouze u 59,77% bodů uvnitř bodového mračna. Díky rozdílu výsledků modelu B a modelu A, které byly vytvořené pomocí stejného objektivu při použití různých ohniskových vzdáleností, lze vidět závislost kvality optiky s pohyblivým ohniskem a kvality modelu na použité ohniskové vzdálenosti.

## 6 Diskuse

Kalibrace jednotlivých optik byla provedena celkem ze 115 fotografií použitím Zhangovy metody (Zhang, 2000). Účelem použití více snímků bylo dosažení přesnějších výsledků. Výsledná míra distorze se pohybovala v rozmezí od 37 pixelů radiu u modelu B, do téměř 100 pixelů radiu u modelu D. Při porovnání vytvořené odchylky a počtu fotografií použitých při kalibraci nelze určit, zda má počet snímků vliv na přesnost výsledků kalibrace. Při výpočtu distorzních parametrů modelu D bylo použito nejvíce fotografií a kalibrace dosahovala nejvyšší odchylky koeficientů.

Jianmin a kol. (2018) nabízí metodu zvýšení kvality fotografií po stránce radiální distorze. K získání informace o distorzi v podobě modelů však nebyla provedena korekce fotografií, na základě vnitřních parametrů fotoaparátu, před vytvořením modelů. Faktory jako jsou nasvícení, materiál nebo rozlišení fotografie ovlivňují počet klíčových bodů vytvořených pomocí softwaru (Brasington a kol. 2012). Nasvícení mělo silný dopad na zhuštění vytvořených modelů. Z toho důvodu byly fotografie některých částí budovy pořizovány v různou denní dobu. Všechny fotografie byly pořizené použitím fotoaparátů ze země, proto určité části budovy jako např. podlaha balkónů, nebo střecha, postrádaly zastoupení ve výsledku modelování. Řešením tohoto problému by mohlo být využití dronů, pořizujících snímky ze vzduchu.

V procesu tvorby modelů software umístil body na klíčové objekty. U vyšších distorzí, jsou objekty na okrajích fotografie zkreslené, a tak může dojít k vytvoření bodů ve zkreslené podobě, podobné chování lze spatřit u modelu C v obrázku 10. Vlnění okenic lze spatřit pouhým okem. U vysokých distorzí dochází zároveň ke zmatení rozpoznávacích algoritmů. Protože tyto algoritmy vybírají body na základě shody ze sousedních fotografií, v případě, kdy je objekt silně zkreslený, může dojít k vyřazení bodů z výsledného mračna, a tím ovlivnění hustoty bodů. Místa bez dostatečného překryvu mohou tak být zakřivena a obsahovat díry ve výsledku modelování.

Pro práci s modelem laserového skeneru v originální velikosti byl můj hardware nedostačující. Z toho důvodu jsem byl nucen k porovnání model oříznout. Pro budoucí studie bych doporučil práci s výpočetní technikou vyššího výkonu. Model laseru dosahoval vysoké přesnosti a hustoty bodů, přesto však objekty s vysokou reflektivitou (např. okna) nebyly vymodelované, což je jedna z nevýhod laserových skenů. Řešením by mohla být Fawzyho hybridní metoda, spojující laserové skenování a fotogrammetrii k dosažení přesnějších výsledků modelu (Fawzy, 2019).

Při porovnání vzdáleností byly modely silně ovlivněné distorzí. Přesnost bodů vzdálenosti od 0 do 8 cm klesla z 34,1% u nejpřesnějšího modelu, na pouhých 21,43% u nejméně přesného modelu. Počet bodů dosahujících vzdáleností nad 60cm se vlivem distorze zvyšoval a u modelu C dosáhl nejvyšších hodnot 9,58%, přestože byla bodová mračna očištěna o přebytečný hluk. Zajímavých výsledků dosahovalo měření modelu D. Přestože distorze modelu D dosahovala 2,92% objektivu tato hodnota je ovlivněna použitým rozlišením, zkreslení pixelů nabývalo hodnot kolem 45 pixelů u kraje fotografie. Přesností se tak modelu D umístil na druhém místě.

## **7 Závěr a přínos práce**

Geometrická distorze byla prokázána jako rušivý faktor při tvorbě modelů metodou Structure-from-Motion. Z výsledků je jasné že použitím méně kvalitní optiky je přesnost modelu silně ovlivněna. Zároveň bylo určena různorodost výsledků pohyblivých objektivů, na základě použité ohniskové vzdálenosti. K dosažení vyšší přesnosti u pohyblivých objektivů se nabízí řešení kalibrace čočky použitím různých ohnisek a určení nejvhodnějšího přiblížení k samotné tvorbě modelu. Přestože nebyly fotografie upravené po stránce optického zkreslení, dosahoval model B přesnosti do 26 cm u 75,4% porovnaných bodů. U všech modelů byla naměřena vysoká vzdálenost uvnitř oken objektu, protože tyto body neměly zastoupení v mračnu reference. Studie prokázala vliv optického zkreslení na kvalitu modelu. U méně kvalitních optik po stránce distorze byla určena nutnost korekce fotografií, před vytvořením modelu, k dosažení přijatelné přesnosti výsledků.

Přestože existuje řada studií, zkoumajících přesnosti fotogrammetrických metod a bylo silně předpokládáno zhoršení výsledků měření vlivem distorze, nebyla nalezena studie zkoumající míru dopadu zkreslení na výsledné modely. Tato studie by tak mohla pomoci při překonání mezer ve znalostech dopadu geometrické distorze na přesnost fotogrammetrických modelů.



## 8 Přehled literatury a použitých zdrojů

Burningham, H., Griffiths, D., 2019: Comparison of pre-and self-calibrated camera calibration models for UAS-derived nadir imagery for a SfM application. *Progress in physical geography: earth and environment* 43(2). 215-235.

Arno, F., Creutzburg, R., Duhn, M., Gassen, F., Hasche E., Ingwer, P., Müller, K., Püst, S., Rettig, J., Ruhm, H., Schällicke, M., 2015: Practical usefulness of structure from motion (SfM) point clouds obtained from different consumer cameras. In *Mobile Devices and Multimedia: Enabling Technologies, Algorithms, and Applications 2015* (Vol. 9411, p. 941102). International Society for Optics and Photonics.

Clark, J., Franke, K., Hedengren, J., Martin, R., Okeson, T., Reimschiessel, B., Ruggles, S., Wolfe, D., 2016: Comparison of SfM computer vision point clouds of a landslide derived from multiple small UAV platforms and sensors to a TLS-based model. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 4(4). 246-265.

Kiparissi, S., Skarlatos, D., 2012: Comparison of laser scanning, photogrammetry and SFM-MVS pipeline applied in structures and artificial surfaces. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* I-3. 299-304.

Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., Reynolds, J., Westoby, M., 2012: 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179. 300-314.

Zhang, Z., Zhao, D., Zhao, J., & 2013: Calibration and correction of lens distortion for two-dimensional digital speckle correlation measurement. *Optik* 124(23). 6042-6047.

Jianmin, J., Kwok-Wai, H., Qinglong, Ch., 2018: Deep learning based image Super-resolution for nonlinear lens distortions. *Neurocomputing* 275. 969-982.

Colomina, I., Molina, P., 2014: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92. 79-97.

Crowell, M., James, T., Lane, S., 2003: Application of Digital Photogrammetry to Complex Topography for Geomorphological Research. *The Photogrammetric record* 16(95). 793-821.

Lohani, B., Mason, D., 2001: Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 56(2). 100-120.

Aloimonos, J., Spetsakis, M., 1991: A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision* 6. 245-255.

Snaveley, K., 2011: Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications* 3.

Eltner, A., Sofia, G., 2020: Structure from motion photogrammetric technique. In: Tarolli, P., Mudd, S. (eds.): *Developments in Earth Surface Processes* 23. Elseiver. 1-24.

- Seitz, S., Snavely, N., Szeliski, R., 2006: Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics* 25(3). 835-846.
- Bolles, R., Fischler, M., 1981: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM* 24(6). 381-395.
- Lowe, D., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60. 91-110.
- Booyesen, R., Gloaguen, R., Lorenz, S., Zimmermann, R., Nex, P., 2021: Geological Remote Sensing. In: Elias, S., Alderton, D. (eds.): *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*. Academic Press. 301-314.
- Arya, S., Mount, D., Netanyahu, N., Silverman, R., Wu, A., 1998: An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching fixed dimensions. *Journal of the ACM* 45(6). 891-923.
- Furukawa, Y., Ponce, J., 2010: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32(8). 1362-1376.
- Nawrat, A., Kus, Z., 2013: *Vision Based Systems for UAV Applications. Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing, Switzerland.
- Chen, H., Cheng, D., Gu, L., Hou, Q., Liu, Y., Wang, Q., Wang, Y., Yang, T., 2021: Optical distortion correction considering radial and tangential distortion rates defined by optical design. *Results in Optics* 3(100072).
- Tsai, R., 1987: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3(4). 323-344.
- Chang, B., Hutchinson, T., Kuester, F., Olsen, M., 2010: Terrestrial Laser Scanning-Based Structural Damage Assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering* 24(3).
- Hack R., Slob S., 2004: 3D Terrestrial Laser Scanning as a New Field Measurement and Monitoring Technique. In: Azzam R., Charlier R., Hack R. (eds.): *Engineering geology for infrastructure planning in Europe*. Springer, Berlin. 179-189.
- Domański M., Lafruit G., Stankiewicz O., 2018: Multiview video: Acquisition, processing, compression, and virtual view rendering. In: Chellappa R., Theodoridis S. (eds.): *Academic Press Library in Signal Processing, Volume 6: Image and Video Processing and Analysis and Computer Vision*. Academic Press. 3-74.
- Bolsee, Q., Darwish, W., Munteanu, A., 2019: Plenoptic camera calibration based on microlens distortion modelling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 158. 146-154.
- Hugemann, W., 2010: *Correcting Lens Distortions in Digital Photographs*.



Ait-Aider, O., Araujo, H., Lao, Y., 2018: Robustified Structure from Motion with rolling-shutter camera using straightness constraint. *Pattern Recognition Letters* 111. 1-8.

Daakir, M., Pierrot-Deseilligny, M., Rupnik, E., Zhou, Y., 2020: A two-step approach for the correction of rolling shutter distortion in UAV photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 160. 51-66.

Geyer, Ch., Meingast, M., Sastry, S., 2005: Geometric Models of Rolling-Shutter Cameras. *ArXiv*, abs/cs/0503076.

Zhang, Z., 1999: Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision* 1. 666-673.

Heikkila, J., Silven, O., 1997: A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 1106-1112.

Baltsavias, E., 1999: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54. 199-214.

Beatson, R., Cowan, J., Fright, W., Mclennan, T., Mitchell, T., 2002: Rapid geological modelling. *International Symposium, Kaloorlie*. 23-25.

Fawzy, H., 2019: 3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy. *Alexandria Engineering Journal* 58(4). 1191-1204.

Mallet, X., Maynard, P., Meuwly, D., Roux, C., Seckiner, D., 2018: Forensic image analysis – CCTV distortion and artefacts. *Forensic Science International* 285. 77-85.

Liu, X., Bu, L., Bu, F., Huo, H., 2021: Concentric circle grids for camera calibration with considering lens distortion. *Optics and Lasers in Engineering* 140. 106527.

Cui, Y., Gao, H., Wang, Y., Zhou, F., 2013: Line-based camera calibration with lens distortion correction from a single image. *Optics and Lasers in Engineering* 51(12). 1332-1343.

Obrázky typů distorze dostupné online z

<<http://www.drewgrayphoto.com/learn/distortion101>>