



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# TEORETICKÁ A SKUTEČNÁ PŘESNOST MĚŘENÍ FOTOGRAMMETRICKÉHO SYSTÉMU TRITOP

THE THEORETICAL AND ACTUAL MEASUREMENT ACCURACY OF TRITOP PHOTOGRAMMETRY  
SYSTEM

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Klus

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.

BRNO 2018



## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Patrik Klus**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Teoretická a skutečná přesnost měření fotogrammetrického systému Tritop**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Fotogrammetrický systém Tritop slouží k přesnému měření polohy kruhových referenčních značek, které se aplikují na povrch objektu. Přesnost měření ovlivňuje řada faktorů: rozlišení fotoaparátu, velikost měřeného objektu, kvalita a počet referenčních značek, jejich rozmístění ve scéně, volba měřicích pozic, nebo okolní podmínky měření. Uživatel může využít několik teoretických vztahů k predikci přesnosti měření. Práce se zabývá otázkou, jak přesně vystihují teoretické vztahy skutečnou přesnost, jakou roli hrají podmínky měření, a zda je možné predikci přesnosti měření zlepšit.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

#### **Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem práce je statisticky vyhodnotit vlivy vybraných faktorů na přesnost fotogrammetrického měření a ověřit přesnost teoretických predikčních vztahů.

Dílčí cíle diplomové práce:

- popsat parametry ovlivňující přesnost měření a navrhnout testy pro ověření vlivu vybraných parametrů,
- provést měření a statistické vyhodnocení výsledků,
- vyhodnotit přesnost existujících teoretických predikčních vztahů,
- rozšířit informace o volbě parametru Sigma ("image accuracy"), který vstupuje do teoretického vztahu od společnosti GOM.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.  
Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).  
Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:  
[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

LUHMANN, Thomas, et al. Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-184995-057-2.

Photogrammetry V7.5 SR1: Manual Basic. Braunschweig, Germany: GOM mbH Mittelweg 7-8 D-38106, 2012.

Photogrammetry V7.5 SR1: Manual Advanced. Braunschweig, Germany: GOM mbH Mittelweg 7-8 D-38106, 2012.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 27. 10. 2017



v z. Hartl  
prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

v z. Kato  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

---

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce zkoumá vliv vybraných faktorů na přesnost fotogrammetrického systému Tritop a ověřuje platnost teoretických predikčních vztahů. Primární pozornost je věnována faktorům, jež může inspektor snadno ovlivnit – jedná se o počet pořízených fotografií, vzdálenost měřeného objektu, počet měřítkových tyčí a kódovaných značek. Dále jsou v práci popsány experimenty zkoumající vliv automatizace měření a využití externího barevného filtru. Objektem měření bylo 7 měřítkových tyčí, umístěných na přípravku tvaru krychle (podle normy VDI/VDE 2634). Odchytky měření byly získány dvěma způsoby - díky měřítkovým tyčím byly známy referenční hodnoty, od kterých byla odečítána změřená data. Druhou metodou bylo získání nepřesnosti měření ze softwaru Tritop Professional. Provedeným výzkumem bylo zjištěno, že největší vliv na přesnost systému Tritop má vzdálenost měřeného objektu a počet pořízených fotografií. Přesnost byla také ovlivněna počtem kódovaných značek, či použitím externího zeleného filtru. Naměřená data byla srovnána s teoretickými predikčními vztahy. Výsledky ukázaly, že vztah definovaný společností GOM vykazuje vyšší než 96% predikční přesnost. Tento vztah je však závislý na vstupním parametru „Image accuracy“ pro jehož volbu jsou v této práci vypracována doporučení. Výsledky této práce mohou sloužit k přesnější predikci nejistot měření a k optimalizaci metodiky měření systémem TRITOP.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Fotogrammetrie, přesnost měření, GOM, Tritop, přejímací testy.

---

## **ABSTRACT**

This diploma thesis examines the impact of selected factors on the measurement accuracy of Tritop photogrammetry system and verifies the validity of theoretical predictive formulas. Primary attention is given to factors that are easily influenced by the inspector - namely number of captured images, shooting distance, number of scale bars and number of coded targets. In addition, experiments dealing with the measurement automation and the use of external color filter are also described in this thesis. Seven scale bars placed on a jig of cube shape were subject of the measurements (according to VDI/VDE 2634 standard). Two approaches were used in order to obtain measurement deviations – reference values, from which the measured data were subtracted to obtain deviations, were known due to the use of scale bars. Second approach consisted in evaluation of deviations from software Tritop Professional. The results showed that the number of photographs and shooting distance have the greatest impact on measurement accuracy of Tritop system. The accuracy was also influenced by number of coded targets in the scene or by use of the external green filter. Measured data were compared to the values obtained from predictive formulas. The results showed that the formula defined by the GOM company has a prediction accuracy of more than 96 %. However the formula is dependent on the input parameter called “Image accuracy” for which the value recommendations are made in this work. The results of this work can help predict measurement uncertainties more precisely and optimize the measurement methodology of Tritop photogrammetry system.

## **KEY WORDS**

Photogrammetry, measurement accuracy, GOM, Tritop, acceptance tests.

---



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KLUS, P. *Teoretická a skutečná přesnost měření fotogrammetrického systému Tritop*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aneta Zatočilová, Ph.D.

---

---



---

## **PODĚKOVÁNÍ**

---

Tímto děkuji Ing. Anetě Zatočilové Ph.D. za její odborné vedení a cenné rady při vypracování této diplomové práce. Dále děkuji své rodině a přátelům, kteří mi byli oporou během celého studia.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

---

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci Teoretická a skutečná přesnost měření fotogrammetrického systému Tritop vypracoval samostatně za pomoci odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 18. května 2018

.....  
Vlastnoruční podpis autora

---



**OBSAH**

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>14</b>
2.1 Fotogrammetrický systém TRITOP .....	14
2.2 Princip fotogrammetrie.....	14
2.4 Základní matematický princip .....	15
2.4.1 Souřadné systémy .....	16
2.4.2 Vnitřní parametry orientace.....	16
2.4.3 Vnější parametry orientace .....	17
2.4.4 Odvození kolineárních rovnic .....	19
2.5 Algoritmus „bundle adjustment“ .....	20
2.5.1 Princip algoritmu .....	21
2.5.2 Metoda nejmenších čtverců pro bundle adjustment .....	22
2.5.3 Kalibrace.....	23
2.5.4 Systémy využívající algoritmus bundle adjustment .....	24
2.6 Acceptance testy .....	25
2.7 Faktory ovlivňující přesnost fotogrammetrického měření .....	26
2.7.1 Fotogrammetrická metoda a její vliv na přesnost měření.....	27
2.7.2 Vliv snímače .....	28
2.7.3 Vliv použitého fotoaparátu .....	29
2.7.4 Vliv kalibračního modelu .....	29
2.7.5 Vliv barevného spektra.....	30
2.7.6 Vliv konvergentního úhlu mezi snímky .....	31
2.7.7 Vliv redundantních snímků .....	33
2.7.8 Vliv scény, osvětlení a jasu .....	35
2.8 Teoretická přesnost systému TRITOP.....	35
2.8.1 Přesnost deklarovaná výrobcem .....	35
2.8.2 Experimentální ověření teoretické přesnosti systému Tritop .....	36
2.8.3 Přesnost fotogrammetrického systému v závislosti na více faktorech .....	36
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE .....</b>	<b>39</b>
3.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše .....	39
3.1.1 Systém TRITOP .....	39
3.1.2 Faktory ovlivňující přesnost fotogrammetrie .....	39
3.1.3 Vztahy predikující přesnost.....	40
3.2 Podstata a cíle diplomové práce .....	40
<b>4 MATERIÁL A METODY .....</b>	<b>41</b>
4.1 Použitý hardware a software .....	41
4.1.1 Fotoaparát .....	41
4.1.2 Referenční značky .....	42
4.1.3 Certifikované kalibrační tyče.....	43
4.1.4 Rotační stůl.....	44
4.1.5 Software Tritop professional a GOM Inspect .....	44
4.2 Objekt měření .....	44
4.3 Popis provedených experimentů.....	46
4.3.1 Vliv počtu pořízených fotografií .....	46
4.3.2 Vliv snímací vzdálenosti .....	47
4.3.3 Vliv počtu použitých kódovaných značek.....	48

---

4.3.4	Vliv počtu kalibračních tyčí.....	49
4.3.5	Test opakovatelnosti měření.....	49
4.3.6	Vliv barevného filtru.....	50
4.4	Způsob vyhodnocení získaných údajů.....	51
4.4.1	Parametry vyhodnocené softwarem.....	51
4.4.2	Parametr vyhodnocen manuálně.....	53
4.4.3	Statistická analýza výsledků.....	54
4.4.4	Použité grafy.....	55
4.4.5	Hodnocení experimentů a využití získaných dat.....	56
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY.....</b>	<b>57</b>
5.1	Statistické zhodnocení dat získaných z měřítkových tyčí.....	57
5.1.1	Test normality.....	57
5.1.2	Vyhodnocení systematické a náhodné chyby.....	59
5.2	Vliv vybraných faktorů na přesnost fotogrammetrického měření.....	60
5.2.1	Analýza odchylek měření v závislosti na vzdálenosti od objektu.....	60
5.2.2	Analýza odchylek měření v závislosti na počtu fotografií.....	63
5.2.3	Analýza odchylek měření v závislosti na počtu vázacích bodů.....	65
5.2.4	Analýza odchylek měření v závislosti na počtu měřítkových tyčí.....	67
5.2.5	Test opakovatelnosti měření.....	70
5.2.6	Vliv barevného filtru.....	72
5.3	Přesnost predikčních vztahů.....	73
5.3.1	Predikční vztahy závislé na více faktorech.....	73
5.3.2	Hodnoty $\sigma$ ze získaných měření.....	76
5.3.3	Predikční vztahy závislé na jediném faktoru.....	77
<b>6</b>	<b>DISKUZE.....</b>	<b>79</b>
6.1	Statistická analýza výsledků.....	79
6.2	Vliv snímací vzdálenosti.....	79
6.3	Vliv počtu fotografií.....	79
6.4	Vliv počtu kódovaných značek.....	80
6.5	Vliv počtu měřítkových tyčí.....	80
6.6	Vliv automatizace měření.....	80
6.7	Vliv barevného filtru.....	80
6.8	Přesnost predikčních vztahů.....	81
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>82</b>
	Konkrétní výsledky, které odpovídají stanoveným cílům práce:.....	83
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>84</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>	<b>87</b>
9.1	Seznam použitých zkratk.....	87
9.2	Seznam použitých symbolů.....	87
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....</b>	<b>88</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>90</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>91</b>

## 1 ÚVOD

Fotogrammetrie je vědní obor, zabývající se zpracováním informací o objektech měření získaných pomocí fotografických snímků. Pojem vychází ze spojení tří latinských slov: první je photos, znamenající světlo. Druhé je gramma, znamenající psát a třetí slovo metron se dá přeložit jako měření [1].

Fotogrammetrické měřicí systémy se ve strojírenství začaly ve velké míře používat již na počátku 90. let. Poslední dobou se počet jejich aplikací strmě zvyšuje a to zejména v oblasti automobilového průmyslu, kde nahrazují práci nepřenosných kontaktních CMM systémů.

Pro fotogrammetrické systémy je charakteristický trend zvyšování jejich přesnosti. Existuje však mnoho faktorů, které mají dopad na kvalitu měření těchto systémů. Patří mezi ně například rozlišení fotoaparátu, volba měřících pozic, či okolní podmínky prostředí. Jednotlivé faktory se také negativně podílejí na možnosti predikce chyb měření. Tato diplomová práce zkoumá vlivy faktorů ovlivňujících přesnost fotogrammetrického systému Tritop a statisticky je analyzuje. Práce se dále zaměřuje na analýzu platnosti několika predikčních vztahů definujících přesnost měření, zejména pak na vztah od společnosti GOM, který doposud nebyl žádnou nezávislou literaturou otestován.



Obr. 1-1 Kontrola kvality pomocí fotogrammetrie [2]

## 2 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Fotogrammetrický systém TRITOP

Systém Tritop je průmyslový, bezkontaktní optický měřicí systém, který se využívá v oblasti kontroly kvality a deformačních analýz.

Při měření systémem TRITOP je nejprve zkoumaný objekt označen referenčními značkami (obr. 2-1). Dále se vytvoří série fotografií objektu z různých pozic v prostoru. Pomocí digitálních snímků pak software Tritop Professional vypočítá pozice fotoaparátu pro jednotlivé snímky a 3D souřadnice měřených bodů na objektu - výsledkem měření je mračno bodů umístěné v globálním souřadném systému.

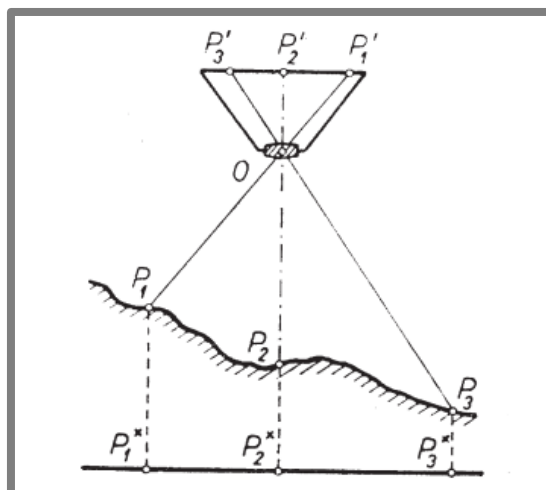


Obr. 2-1 Referenční značky na zkoumaném objektu [4]

Tritop spadá do oblasti blízké fotogrammetrie – vzdálenost mezi fotoaparátem a objektem pozorování je od 1 do 30 metrů [3].

### 2.2 Princip fotogrammetrie

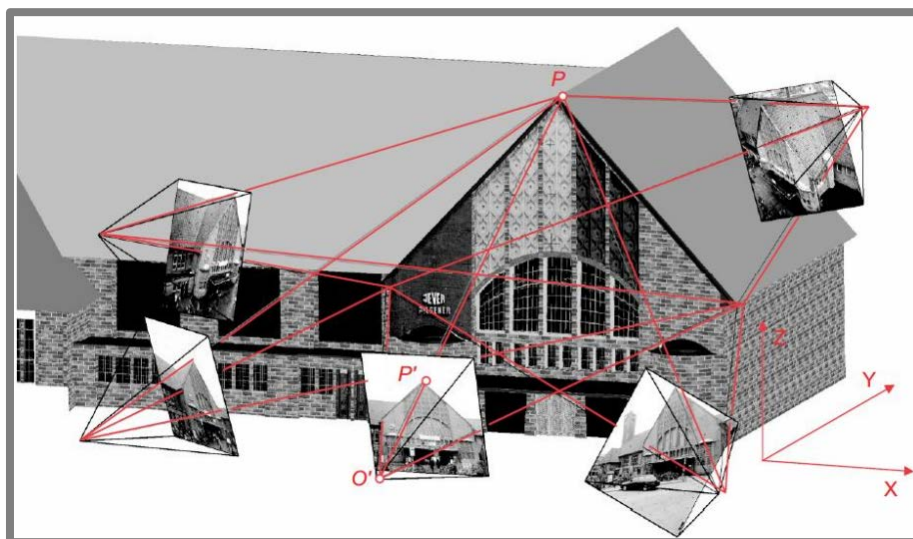
Princip fungování fotogrammetrických systémů vychází z faktu, že fotografický snímek je centrální projekcí pozorovaného objektu. Střed promítání se nachází uvnitř objektivu fotoaparátu a označuje se jako ohnisko. Pozorovanou obrazovou rovinou je v případě digitálních fotoaparátů snímač CCD nebo CMOS. Paprsky světla se odrážejí od pozorovaného objektu, procházejí ohniskem a dopadají na snímač – vytvářejí perspektivní obraz objektu [5]. Na obrázku 2-2 je schéma fotoaparátu snímajícího povrch předmětu. Body  $P_1$ ,  $P_2$  a  $P_3$  jsou promítnuty do roviny snímače fotoaparátu, kde jsou označeny jako  $P_1'$ ,  $P_2'$ ,  $P_3'$ .



Obr. 2-2 Centrální projekce [5]

Z jedné fotografie však nelze získat informaci o hloubce scény, systém Tritop proto pracuje s vícesnímkovou konfigurací. Pro určení prostorových souřadnic bodů objektu je zapotřebí minimálně dvou fotografií, které jsou vůči sobě různě orientovány.

Na obrázku 2-3 je konkrétní sledovaný bod objektu dán bodem  $P$ . Tento bod, promítnutý do roviny fotografie (snímače), je definován bodem  $P'$  a středem promítání je  $O'$ . Přímkou, jež jsou vedené body  $O'$  a  $P'$  na různých fotografiích, v prostoru tvoří průsečík, jež definuje polohu sledovaného bodu  $P$  [6]. Velké množství takto určených bodů se nazývá mračno bodů.



Obr. 2-3 Princip fotogrammetrického měření [6]

## 2.4 Základní matematický princip

2.4

V této kapitole bude uveden základní matematický princip blízké fotogrammetrie - definice souřadných systémů, rozbor vnitřních a vnějších parametrů orientace, odvození kolineárních rovnic.

### 2.4.1 Souřadné systémy

K pochopení matematických principů fotogrammetrie je nutné nejprve definovat tři základní souřadné systémy:

- Globální souřadný systém (souřadný systém objektu) – Trojrozměrný s osami  $X, Y, Z$ . Je určen geometrií objektu.
- Souřadný systém fotoaparátu – Trojrozměrný, tvořený osami  $x', y', z'$ . Má počátek ve středu promítání  $O'$ . Osa  $z'$  je totožná s optickou osou fotoaparátu a osy  $x'$  a  $y'$  jsou rovnoběžné s hranami snímku.
- Souřadný systém snímku – dvourozměrný s označením  $x'', y''$ . Je daný středem matice zobrazovacího snímače.

### 2.4.2 Vnitřní parametry orientace

Jedná se o parametry, které definují vnitřní geometrii fotoaparátu. Identifikace jejich přesné polohy je důležitá, protože nám dává informaci o rozdílu mezi skutečnou optickou soustavou fotoaparátu a idealizovaným matematickým modelem. Této informace se využívá pro redukci chyb vzniklých na fotografii – řeší se pomocí kalibrace. Mezi vnitřní parametry orientace patří:

- Hlavní snímkový bod  $H'$  (principal point) – průsečík roviny snímku s paprskem, jež je kolmý na rovinu snímku a prochází středem promítání. Jedná se o matematicko-fyzikální počátek systému snímkových souřadnic, značený  $x''_0, y''_0$  [7].
- Konstanta komory  $c'$  (principal distance) - vzdálenost hlavního snímkového bodu od středu promítání (ohniska objektivu) v obrazovém prostoru [8].
- Konstanty funkce popisující zobrazovací chybu – zahrnuje zejména korekční parametry zkreslení obrazu  $\Delta x'', \Delta y''$  [9]

Hlavní snímkový bod je vztažen k souřadnému systému snímku a jeho poloha neleží v samotném středu snímku, ale je mírně posunutá v závislosti na vnitřní geometrii optické soustavy fotoaparátu. Závisí na poloze středu promítání. Pokud jsou známy vnitřní parametry orientace, pak je možné matematicky popsat vzdálenost mezi středem promítání a konkrétním sledovaným bodem snímku. Tato vzdálenost se označuje vektorem  $x''$  a je dána následujícím vztahem [9]:

$$x' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' - x'_0 - \Delta x' \\ y' - y'_0 - \Delta y' \\ -c' \end{bmatrix} \quad (1)$$

kde:

$x', y'$	(-)	jsou souřadnice obrazového bodu snímku P'
$x'_0, y'_0$	(-)	souřadnice středu zobrazení H'
$\Delta x', \Delta y'$	(-)	korekční parametry zkreslení obrazu
$c'$	(-)	konstanta komory

Radiální distorze (zkreslení obrazu) je podle [13] posun bodů snímku v radiálním směru od hlavního snímkového bodu o hodnotu  $r'$ , jež je způsobený souhrnem geometrických nepřesností objektivu. Velikost odchylky se mění s radiální vzdáleností od středu objektivu. Matematicky se radiální distorze vyjadřuje následně [6]:

$$\Delta x'_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'}; \quad \Delta y'_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \quad (2)$$

kde:

$r'$	(mm)	je vzdálenost obrazového bodu od hlavního snímkového bodu
$\Delta r'_{rad}$	(-)	zvolená distorzní křivka

Distorzní křivka je obvykle modelována pomocí polynomické funkce s koeficienty  $K_1$  až  $K_n$  ve tvaru [6]:

$$\Delta r'_{rad} = K_1 r'^3 + K_2 r'^5 + K_3 r'^7 + \dots \quad (3)$$

### 2.4.3 Vnější parametry orientace

2.4.3

Vnější parametry orientace určují polohu fotoaparátu vůči objektu při pořizování snímku. Tato poloha je určena šesti parametry – tři parametry posuvů ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) jsou souřadnice středu promítání vůči souřadnému systému objektu a tři parametry natočení ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) jsou úhly natočení souřadného systému fotoaparátu vůči souřadnému systému objektu [9]. Parametry vnější a vnitřní orientace jsou zobrazeny na obrázku 2-4.



Rotační matice  $R$  je dána vztahem:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\kappa - \sin\varphi \sin\omega \sin\kappa & -\sin\varphi \cos\omega & \cos\varphi \sin\kappa + \sin\varphi \sin\omega \cos\kappa \\ \sin\varphi \cos\kappa + \cos\varphi \sin\omega \sin\kappa & \cos\varphi \cos\omega & \sin\varphi \sin\kappa - \cos\varphi \sin\omega \cos\kappa \\ -\cos\omega \sin\kappa & \sin\omega & \cos\omega \cos\kappa \end{bmatrix} \quad (5)$$

kde:

- $\omega$  (°) je natočení kolem osy  $x'$
- $\kappa$  (°) natočení kolem osy  $y'$
- $\varphi$  (°) natočení kolem osy  $z'$

Pro zjednodušení zadávání jsou jednotlivé buňky matice substituovány písmenem  $r$ , rotační matice má poté tvar:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

#### 2.4.4 Odvození kolineárních rovnic

2.4.4

---

Kolineární rovnice tvoří základ procesu bundle adjustment, pro jejich odvození je nutné nejprve definovat vektor směřující ze středu promítání do konkrétního bodu objektu. Tento vektor se označuje  $X^*$  (viz. Obr. 2-6) a je dán vztahem [9]:

$$X^* = mR x' \quad (7)$$

kde:

- $m$  (-) je faktor měřítka
- $R$  (-) rotační matice
- $x'$  (-) vektor směřující ze středu promítání do obrazového bodu  $P'$

Projekce obrazového bodu do odpovídajícího bodu objektu je poté dána rovnicí [9]:

$$X = X_0 + mR x' \quad (8)$$

Přidáním hlavního snímkového bodu  $(x'_0, y'_0)$  a uvedením korekčních parametrů obrazové distorze  $\Delta x'$ , jsou souřadnice snímku dány vztahem [9]:

$$\begin{bmatrix} x' - x'_0 - \Delta x'_0 \\ y' - y'_0 - \Delta y'_0 \\ z' \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Podělením první a druhé rovnice rovnicí třetí dojde k eliminaci faktoru měřítka  $m$  a vznikne konečná podoba kolineárních rovnic [9]:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y' &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (10)$$

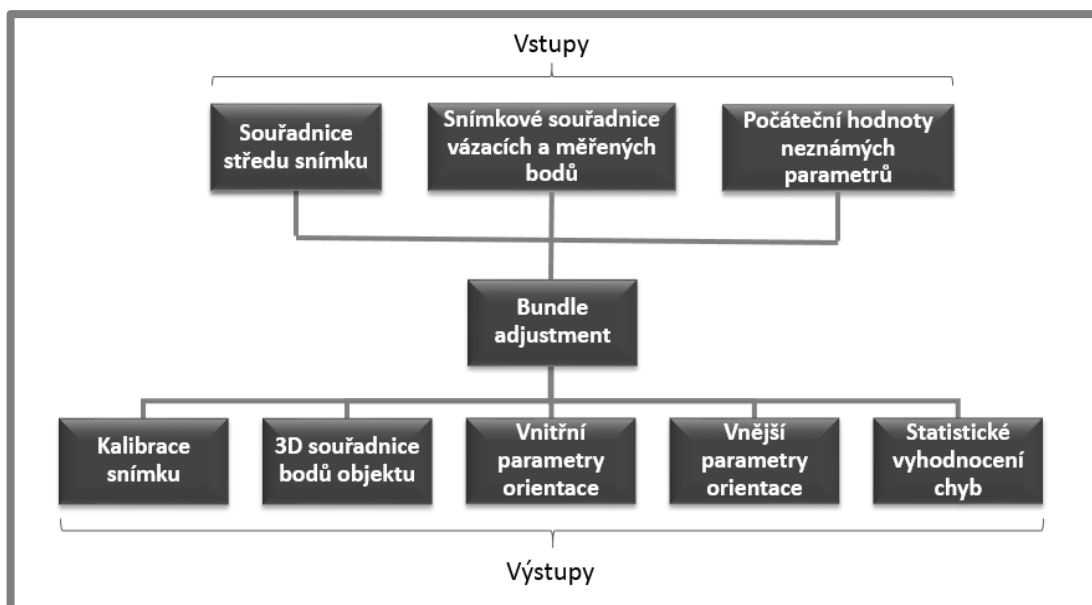
Tyto rovnice popisují transformaci souřadnic snímku  $(x', y')$  do odpovídajících prostorových souřadnic objektu  $(X, Y, Z)$ , jako funkci vnitřních a vnějších parametrů orientace [8].

Vizuálně si lze kolineární rovnice představit jako přímky (paprsky) z obrázku 2-3, v jejichž průsečíku leží hledaný bod.

## 2.5 Algoritmus „bundle adjustment“

Systém Tritop pracuje s vícesnímkovou konfigurací, která je vyhodnocována na základě algoritmu bundle block adjustment (zkráceně bundle adjustment, český ekvivalent je blokové vyrovnání paprskových svazků [12]). Podstatou tohoto algoritmu je stanovení prvků vnější orientace série snímků se současným určením prostorových souřadnic všech zobrazených bodů. Výpočet probíhá na základě kolineárních rovnic (viz kapitola 2.4.4) iterační metodou, kdy jsou na počátku určeny přibližné hodnoty neznámých parametrů, které se v následujících iteracích dále zpřesňují.

Vstupními daty procesu jsou souřadnice středu snímku, souřadnice referenčních značek (v případě systému Tritop se jedná o kódované a nekódované značky), a zmiňované počáteční hodnoty neznámých parametrů (patří mezi ně parametry vnější orientace), jsou vypočteny na základě údajů o měřítku snímku, konstantě kamery [11]. Schéma vstupů a výstupů algoritmu je na obrázku 2-5.

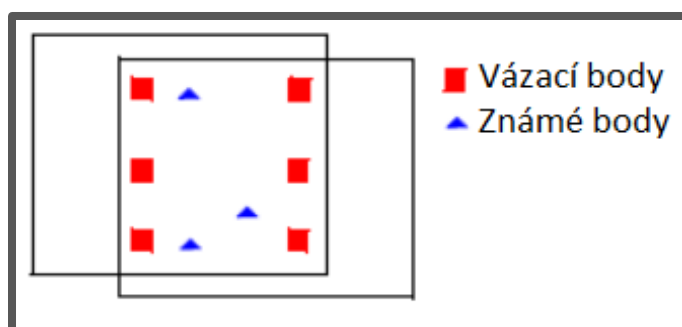


Obr. 2-5 Vstupy a výstupy algoritmu bundle adjustment [9]

### 2.5.1 Princip algoritmu

2.5.1

Následující příklad se dvěma fotografiemi slouží k pochopení základního principu algoritmu bundle adjustment. Na obrázku 2-6 jsou zobrazeny dvě překrývající se fotografie, na nichž jsou vázací body (červené čtverce). Tyto body se používají k propojení jednotlivých snímků mezi sebou a k určení orientace snímků v prostoru (v případě systému Tritop jsou vázací body kódované značky). Dále se na obrázku vyskytují modré trojúhelníky – body, jejichž přesnou polohu známe (u systému Tritop lze za známé body považovat již vypočtené souřadnice bodů nebo body na měřítkových tyčích).



Obr. 2-6 Definování bodů pro fotogrammetrické měření [10]

Obecně jsou každému známému bodu na fotografii přiřazeny snímkové souřadnice  $x'$  a  $y'$ . Lze tedy vytvořit dvě kolineární rovnice, jež reprezentují vztah mezi bodem na objektu a bodem v rovině snímku. V našem příkladu se však známé body nachází na dvou překrývajících se fotografiích. Z tohoto důvodu lze pro každý bod vytvořit čtyři rovnice kolinearity – dvě pro snímek nalevo a dvě pro snímek vpravo. Pro známé body na obou fotografiích se takto celkově vytvoří dvanáct kolineárních rovnic. Dále se na snímcích objevuje šest vázacích bodů, jejich prostorové souřadnice jsou neznámé, určeny jsou pro ně pouze snímkové souřadnice  $x'$ ,  $y'$ . Pro vázací body se

vytvoří 24 rovnic kolinearit. Celkově se pro konfiguraci bodů na snímcích v příkladu vytvoří 36 kolineárních rovnic. Tyto rovnice reprezentují známé parametry.

Následně jsou určovány neznámé parametry. Počet neznámých parametrů v uvedeném příkladu je 30, jedná se o:

- Šest neznámých parametrů vnější orientace pro obrázek vlevo.
- Šest neznámých parametrů vnější orientace pro obrázek vpravo.
- Prostorové souřadnice vázacích bodů - pro 6 bodů se jedná o 18 neznámých parametrů.

Kvalita výstupu algoritmu bundle adjustment je závislá na kvalitě vstupních dat a na přeürčení soustav rovnic (počtu stupňů volnosti) [10]. Počet stupňů volnosti se vypočítá za pomoci odečtení počtu neznámých parametrů od počtu známých. Výsledný počet stupňů volnosti v popisovaném příkladu je 6.

Po sestavení kolineárních rovnic dochází k jejich řešení na základě nelineární metody nejmenších čtverců.

---

### 2.5.2 Metoda nejmenších čtverců pro bundle adjustment

Metoda nejmenších čtverců je matematicko-statistická metoda pro aproximaci řešení přeürčených soustav rovnic. V případě algoritmu bundle adjustment se metoda nejmenších čtverců používá pro [10]:

- Odhad nebo zpřesnění parametrů vyjadřujících vnější orientaci.
- Odhad prostorových souřadnic X, Y, Z, spjatých s vázacími body.
- Odhad nebo zpřesnění parametrů vnitřní orientace.
- Minimalizování chyb.

U metody nejmenších čtverců se řešení získává postupně pomocí iterací. Iterace jsou zastaveny v momentě, kdy jsou odchylky vypočtených hodnot od vstupních dat minimální (například odchylky od vstupních dat z měřítkových tyčí).

Zjednodušeně lze řešení algoritmu metodou nejmenších čtverců maticově vyjádřit vztahem [10]:

$$A_m X_m = L_m + V_m \quad (11)$$

kde:

$A_m$	(-)	matice obsahující parciální derivace funkčního modelu (Jacobiho)
$X_m$	(-)	matice obsahující korekce neznámých parametrů vnější orientace
$L_m$	(-)	matice se vstupními parametry (souřadnice snímků a známých bodů)
$V_m$	(-)	je matice obsahující odchylky snímkových souřadnic

Jednotlivé matice jsou přímo propojeny s funkčním modelem založeným na rovnicích kolinearit. Matice A je tvořena parciálními derivacemi funkčního modelu. Matice L

je získaná nahrazováním počátečních hodnot získaných z funkčního modelu výsledky stanovenými novou iterací.

Pro optimalizaci řešení nelineární metody nejmenších čtverců se využívají různé numerické algoritmy, patří mezi ně metoda gradient descent (klesání podle gradientu), Newton-Raphsonova metoda, Gauss-Newtonova metoda a Levenberg-Marquardtova metoda. Nejpoužívanější a neúčinnější metoda z výše jmenovaných je Levenberg-Marquardtova [14].

### 2.5.3 Kalibrace

2.5.3

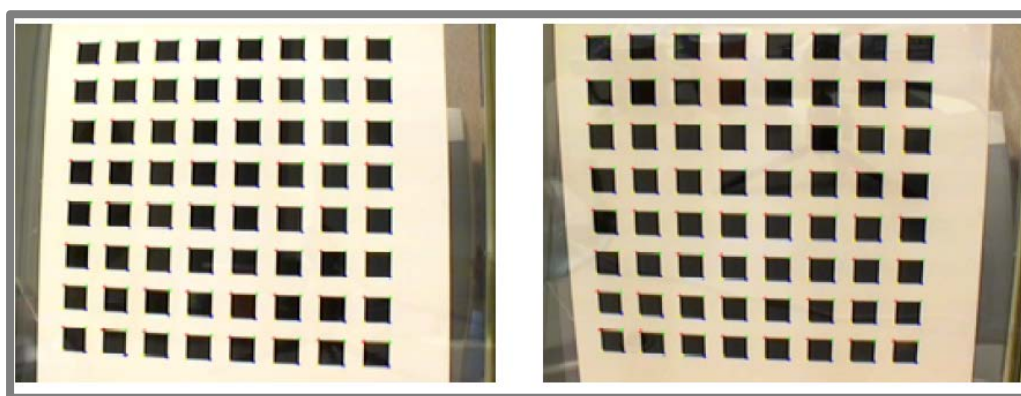
---

Přesnost matematického modelu je degradována vlivem zobrazovacích chyb, které jsou tvořeny zejména distorzi čoček objektivu (viz kapitola 2.4.2). K potlačení těchto chyb slouží proces zvaný kalibrace. Kalibrace může být součástí algoritmu bundle adjustment. Úkolem tohoto procesu je korekce souřadnic snímku  $x'$ ,  $y'$ , přičemž dojde k určení parametrů vnitřní orientace. Existuje velké množství kalibračních algoritmů, lze je rozdělit do tří základních kategorií [15]:

- Laboratorní kalibrace
- Kalibrace pomocí testovacího pole
- Samokalibrace

Laboratorní kalibrace má smysl pouze u měřičských fotoaparátů, které mají objektivy s pevným ohniskem a minimálním zkreslením. Vnitřní orientace je určována pomocí goniometru nebo kolimátoru, v němž je měřen směr nebo úhel obrazových paprsků. Laboratorní kalibraci nemůže běžně provádět vlastník fotoaparátu, proto se v oblasti blízké fotogrammetrie často nevyskytuje [15].

Kalibrace pomocí testovacího pole je častější, principem je snímkování testovacího pole z několika stanovisek. Testovací pole mohou tvořit body o známých souřadnicích, nebo jsou známy vzdálenosti mezi několika body testovacího pole. Nejčastěji se jedná o šachovnicové pole (viz obr. 2-7). [15]



Obr. 2-7 Šachovnicové pole určené ke kalibraci [15]

Samokalibrace se v oblasti blízké fotogrammetrie vyskytuje nejčastěji. Jedná se o způsob kalibrace, kdy jsou snímky používané pro kalibraci využity i pro vlastní vyhodnocení měřeného objektu. Také tato metoda využívá testovací pole, v tomto případě jsou však jednotlivé body testovacího pole náhodně rozmístěny v prostoru a jejich poloha vůči sobě není známá [15].

Samokalibrace se využívá i u systému Tritop. Provádí se tak, že se do oblasti měřeného objektu umístí velké množství kódovaných značek, což jsou ve své podstatě body testovacího pole, a pořídí se čtyři snímky z jednoho stanoviště, které jsou vůči sobě pootočené o 90°. Touto metodou dojde k definici počáteční hodnoty radiálního zkreslení a zároveň se fotografie využijí k vyhodnocení měření. Finální parametry vnější orientace jsou poté určeny algoritmem bundle adjustment.

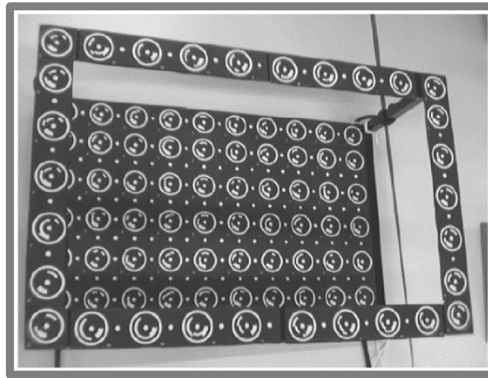
Matematický model kolineárních rovnic zohledňující korekční parametry z kalibrace je dán vztahy [9]:

$$\begin{aligned}x' &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\y' &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'\end{aligned}\quad (12)$$

#### 2.5.4 Systémy využívající algoritmus bundle adjustment

Kromě systému Tritop existuje řada dalších systémů, jež využívá v oblasti blízké fotogrammetrie algoritmus bundle adjustment. Jedná se například o PhotoModeler, Australis, IGP-ETHZ, V-STARS a další.

**F. Remondino** [16] ve své práci srovnal přesnost některých systémů na bázi algoritmu bundle adjustment. Pro vyhodnocení rozdílů mezi jednotlivými softwary autor snímal 3D testovací pole zobrazené na obrázku 2-8. Používal při tom běžný fotoaparát SONY DSC F828 s rozlišením 8 megapixelů.



Obr. 2-8 Testovací pole [16]

Výsledky experimentu jsou zobrazeny v tabulce 2-1.

Tab. 2-1 Srovnání přesností softwarů využívajících algoritmu bundle adjustment [16]

Software/algoritmus	Střední kvadratická odchylka bodů na fotografii ( $x'$ , $y'$ ) ( $\mu\text{m}$ )	Střední kvadratická odchylka bodů objektu ( $X$ , $Y$ , $Z$ ) (mm)
PhotoModeler	0,36	0,01/0,01/0,02
Australis	0,29	0,01/0,01/0,02
IGP-ETHZ	0,30	0,01/0,01/0,02

Střední kvadratická odchylka bodů snímku dává informaci o tom, jak přesná je kalibrace jednotlivých softwarů. Ačkoliv se tato hodnota u jednotlivých softwarů liší, podstatnější z hlediska hodnocení jsou souřadnice výsledného objektu X, Y, Z. Všechny testované softwary využívající bundle adjustment měly výslednou odchylku určení jednotlivých souřadnic objektu shodnou.

### 2.6 Acceptance testy

2.6

---

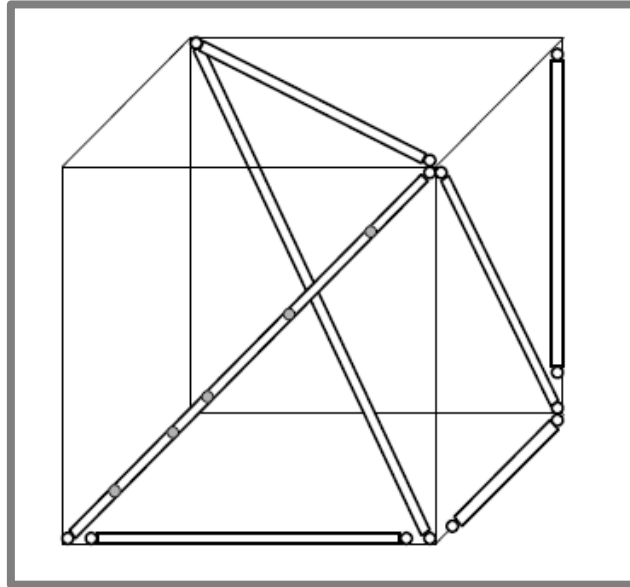
Acceptance testy (přejímací testy) umožňují certifikaci optických měřicích systémů podle německé normy VDI/VDE 2634 part 1 – 3. Slouží k ověření, zda systém pracuje správně v rozmezí odchylek předepsaných výrobcem. Důvodem k certifikaci zařízení a k opakování testu je, že časem může dojít u optického měřicího přístroje k degradaci. Konkrétně dochází k poškození snímače (znečištění, prachové usazeniny, mrtvé pixely), mechanickému poškození čoček objektivu, změna vnitřní geometrie objektivu, poškození mechanismu zaostřování. Velké společnosti využívají acceptance testů k certifikaci svých měřicích zařízení.

Způsobem provedení acceptance testu se ve svém článku zabýval **Wendt** [17]. Článek test popisuje podle normy VDI/VDE 2634 part 1. Tato norma je zaměřená na systémy založené na bodovém snímání, což je typické pro pasivní fotogrammetrii. U acceptance testů se měří normalizovaný kvádr (obr. 2-9) přibližně o objemu  $2 \times 2 \times 1,5$  m libovolným počtem fotografií. Předmětem měření jsou kalibrované tyče. Tyto tyče slouží k individuální kontrole vzdáleností. Na každé tyči je měřeno 5 různých vzdáleností, přičemž alespoň jedna vzdálenost musí mít rozměr  $2/3$  prostorové uhlopříčky tělesa. Cílem testu je zjistit parametr zvaný chyba měření délky, který je definován jako maximální získaná odchylka ze všech měřených délek vůči jejich nominální hodnotě.



Obr. 2-9 Testovací krychle pro acceptance test [18]

Na přípravek musí být umístěny vázací body (neslouží k měření vzdáleností) – v případě systému Tritop jsou použity kódované značky. Kvádr dále obsahuje minimálně 7 měřených tyčí umístěných tak, aby jimi byly reprezentovány všechny hlavní souřadnicové osy. Rozmístění měřených tyčí je zobrazeno na obrázku 2-10.



Obr. 2-10 Rozmístění měřených tyčí [17]

---

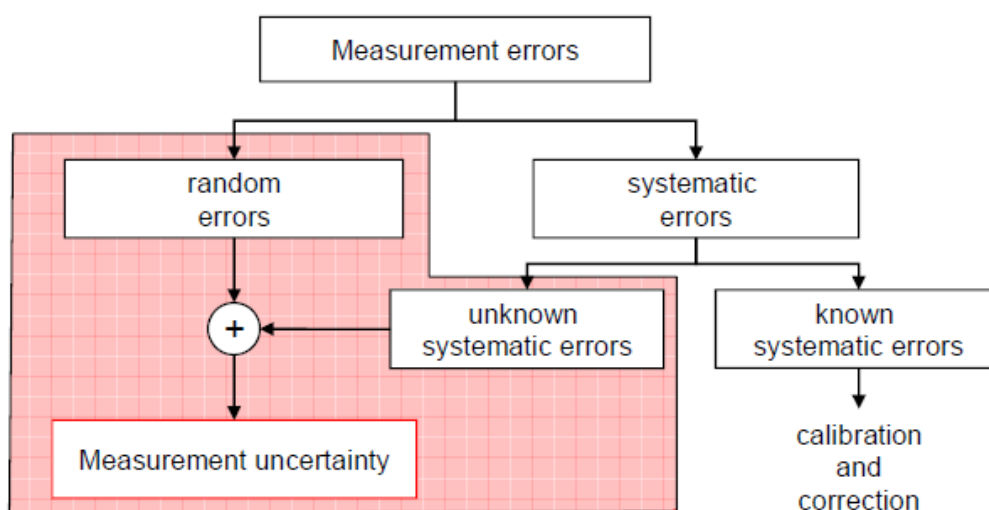
### 2.7 Faktory ovlivňující přesnost fotogrammetrického měření

Faktory ovlivňující fotogrammetrické měření popsal ve své práci **Luhmann** [18]. Jmenovitě se jedná o tyto faktory:

- Fotogrammetrická metoda
- Kvalita fotografického snímače (rozlišení, šum)
- Typ fotoaparátu (běžné fotoaparáty, měřické kamery)
- Velikost snímaného objektu
- Vzdálenost měřeného objektu
- Kalibrační model
- Konfigurace snímků (rozložení snímku ve scéně)
- Podmínky prostředí (osvětlení, vlhkost, přítomnost vibrací, prašnost)
- Tvar, stabilita snímaného objektu
- Přítomnost unikátních prvků (vázací body, měřítkové tyče apod.)
- Matematický model vyhodnocující výsledné 3D souřadnice

Jednotlivé faktory ovlivňují výslednou nejistotu měření daného systému. Chyby, které v průběhu měření vznikají, se dělí na náhodné a systematické. Náhodné chyby mají nepravidelný charakter s tendencí vzájemné kompenzace, jsou zpravidla malé a jejich přesná příčina není známá. Systematické chyby mají za stejných podmínek stálou

hodnotu a lze je určit (obr. 2-11). Některé systematické chyby jsou redukovány kalibrací fotoaparátu – distorze objektivu.



Obr. 2-11 Rozdělení chyb vznikajících při fotogrammetrickém měření [18]

Následující kapitoly se věnují podrobnějšímu popisu výše uvedených faktorů vstupujících do fotogrammetrického měření.

### 2.7.1 Fotogrammetrická metoda a její vliv na přesnost měření

2.7.1

Každý fotogrammetrický systém pracující s více snímky v oblasti blízké fotogrammetrie potřebuje pro vyhodnocení měření tzv. vázací body. Jedná se o body, které je možné identifikovat na dvou a více fotografiích a slouží k propojení snímků mezi sebou. U fotogrammetrických metod zvaných FBM – feature-based matching a SfM – structure from motion jsou jako vázací body používány tvarové prvky scény - hrany, rohy, spoje, pruhy, kulové tvary apod. V případě systému Tritop jsou vázacími body tzv. kódované značky. Jedná se o značky nesoucí unikátní několikabitový kód, jenž slouží k rozlišení jednotlivých značek od sebe. Na každé fotografii musí být identifikováno alespoň 5 kódovaných značek, jinak nedojde k vyhodnocení měření pro daný snímek [4]. Tritop dále pracuje s nekódovanými značkami, kterými se označují body zájmu – místa, která chceme měřit. Vzhledem ke kruhové geometrii značek je software schopen přesně zaznamenat jejich prostorovou polohu [26].

Vlivem přesnosti dvou fotogrammetrických metod se ve své práci zabýval **Fraser** [19]. Autor na základě experimentu srovnal metodu využívající kódované značky s metodou FBM. Objektem měření bylo křídlo Boeingu 787 (obr. 2-12). Použitý fotoaparát byl Nikon D200, celkově bylo pořízeno 11 fotografií v každém experimentu. Na objekt bylo umístěno 22 kódovaných značek. Výsledky měření jsou v tabulce 2-2.



Obr. 2-12 Měření křídla Boeingu [19]

Tab. 2-2 Výsledky měření křídla

Metoda	S referenčními značkami	Bez značek (FBM)
Počet prostorových bodů	200	490
Chyba $\sigma_x$ (horizontální směr)	0,11 mm	0,21 mm
Chyba $\sigma_y$ (vertikální směr)	0,08 mm	0,42 mm
Chyba $\sigma_z$ (hloubka)	0,14 mm	0,20 mm
Celková chyba $\sigma_{xyz}$	0,12 mm	0,30 mm

Z výsledných hodnot vyplývá, že fotogrammetrická metoda měření s kódovanými značkami je přesnější. Autor taktéž zdůrazňuje, že u FBM metod často dochází k detekci bodů, které nejsou potřebné k výpočtu. Naopak body, které mohou být důležité, tato metoda nemusí označit.

Příčina přesnějšího měření u metody s kódovanými značkami spočívá v kruhové geometrii značky. Při promítání kruhu do perspektivní roviny fotografie se z kruhu stává elipsa (pokud není perspektivní rovina kolmá k ose kruhu). Pro elipsu (i pro kružnici) je charakteristické jednoznačné matematické vyjádření, proto může dojít k přesnému určení středu značky na více fotografiích [26]. Naproti tomu u metody SfM nebo FBM jsou vázací body různé geometrické rysy ve scéně, jejichž tvar nemá přesné matematické vyjádření, nemůže být proto definován jednoznačný střed těchto rysů na fotografiích, čímž dochází k zhoršení přesnosti měření.

### 2.7.2 Vliv snímače

Velmi výrazný vliv na přesnost fotogrammetrického měření má snímač (senzor) fotoaparátu – konkrétně počet a velikost jednotlivých pixelů senzoru. Počet a velikost pixelů totiž přímo ovlivňují minimální rozměr, který je fotogrammetrický systém schopen rozpoznat. Tento rozměr je teoreticky dán vzdáleností, jež ve scéně pokrývají středy dvou sousedících pixelů snímače (Point spacing distance).

Existuje obecně známý matematický vztah pro výpočet vzdálenosti středů dvou pixelů ve scéně v závislosti na rozměru pixelu snímače (sensor pixel size), velikosti

měřené oblasti (size of the measured area) a aktivní velikosti snímače (active sensor size) [20]:

$$\text{Point spacing distance} = \frac{\text{sensor pixel size} \times \text{size of the measured area}}{\text{active sensor size}} \quad (13)$$

Tento vztah udává poměr mezi měřenou oblastí a velikostí čipu. Přináší tak základní představu o teoretické přesnosti měření – čím menší má tento poměr hodnotu, tím přesnější je měření. Ze vztahu jasně vyplývá, že teoretická přesnost měření vzrůstá s velikostí aktivní části senzoru (tedy s vyšším počtem pixelů) a narůstá také se snižující se rozměrovou velikostí jednotlivých pixelů senzoru. Poslední faktor vstupující do vztahu je velikost měřené oblasti – tento faktor je závislý na vzdálenosti snímače od měřeného objektu. S vyšší vzdáleností roste i rozměr měřené plochy a klesá přesnost měření.

Výše uvedený vztah (13) lze dále využít pro výpočet pokrytí referenčních značek pixely. Tento údaj je důležitý a měl by být zkontrolován před začátkem každého měření systémem Tritop, protože pro správnou detekci referenčních značek je potřeba průměr značky pokrýt minimálně deseti pixely. Pokud je pokrytá menším počtem pixelů, může dojít ke špatnému určení její polohy, nebo ji systém nemusí vůbec detekovat [4]. Z tohoto důvodu je potřeba volit vhodnou velikost značky vzhledem ke vzdálenosti.

### 2.7.3 Vliv použitého fotoaparátu

---

2.7.3

Přesnost měření výrazně závisí i na použitém fotoaparátu. Obecně i fotoaparáty s vyšším rozlišením mohou vykazovat horší výsledky měření, než fotoaparáty s nižším rozlišením. Touto problematikou se ve své práci zabýval **Chandler** [21].

U fotoaparátu je zásadní jeho opticko-mechanická konstrukce – zejména kvalitní objektiv s pevným ohniskem. Kvalitním objektivem je myšlen takový, který minimálně zkresluje obraz v radiálním směru. Přestože existují matematické kalibrační algoritmy pro potlačení radiálního zkreslení, nikdy není toto zkreslení potlačeno úplně.

Přesnější měření je vždy dosaženo s použitím fotoaparátu s monochromatickým snímačem. U barevných fotoaparátů se totiž vyskytuje bayerova maska, která umožňuje vznik barevné fotografie. Bayerova maska však snižuje počet aktivních pixelů na 1/3.

### 2.7.4 Vliv kalibračního modelu

---

2.7.4

**Feng** [22] ve své práci experimentálně srovnal dvě známé a používané kalibrační metody, které se využívají v oblasti fotogrammetrie. Jedná se o kalibrační algoritmy, které vytvořil Zhang a Tsai.

Tsai kalibrační algoritmus patří do kategorie kalibrací pomocí testovacího pole. Zajímavostí je, že tento algoritmus nijak neupravuje vnitřní parametry fotoaparátu - zapíše se do něj hodnoty vnitřních parametrů dodávané výrobcem.

Zhangova metoda leží na pomezí mezi kalibrací pomocí testovacího pole a samokalibrací.

Autor článku pro srovnání obou metod použil CCD kameru Sony Icx-285. Rozlišení fotografií je 812x854 pixelů. Snímaným objektem byla v obou případech rovinná kalibrační deska, která obsahovala 9x7 čtverců. Každý čtverec měl rozměr 10 x 10 mm v horizontálním a vertikálním směru. Výsledky testování jsou zobrazeny v tabulce 2-4.

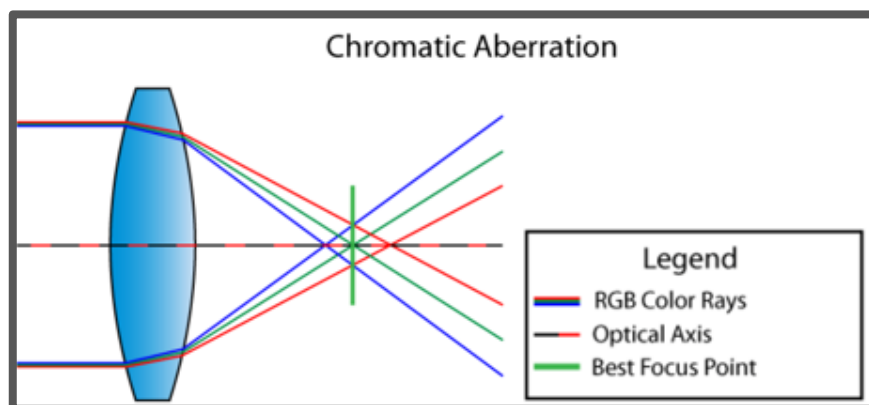
Tab. 2-3 Porovnání Zhang a Tsai kalibrační metody [22]

Metoda	Zhang	Tsai
Součet odchylek v ose X (mm)	6,821	7,729
Součet odchylek v ose Y (mm)	7,125	8,563
Potřebný výpočetní čas (s)	89,407	23,047

Srovnání dvou výše uvedených algoritmů dokazuje, že přesnost a rychlost vyhodnocení měření fotogrammetrickým systémem závisí na použité kalibrační metodě.

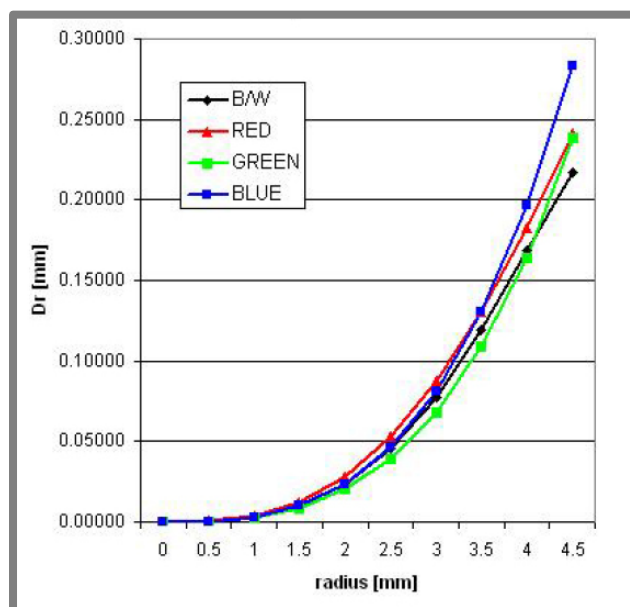
### 2.7.5 Vliv barevného spektra

**F. Remondino** [16] ve své práci zjišťoval vliv barevného spektra na velikost radiální distorze u běžného fotoaparátu. Autor vycházel z faktu, že ohnisko čočky nemá pro všechna barevná spektra stejnou polohu (viz obr. 2-13). Tento jev se nazývá chromatická aberace. Výsledná radiální distorze čoček objektivu je pak také závislá na barevném spektru.



Obr. 2-13 Schéma chromatické aberace [23]

Během testování došel autor k závěru, že nejmenší radiální distorzi vykazuje zelené spektrum, zatímco modré spektrum vykazuje největší distorzi (rozdíl dosahoval okolo 10 pixelů na krajích snímáče). Pro aplikace vyžadující přesné fotogrammetrické měření je potřeba brát na takovýto rozdíl zřetel. Autor doporučuje řešit tento problém užitím externího barevného filtru. Velikost distorze vztažená k jednotlivým barevným kanálům je zobrazena na obr. 2-14.

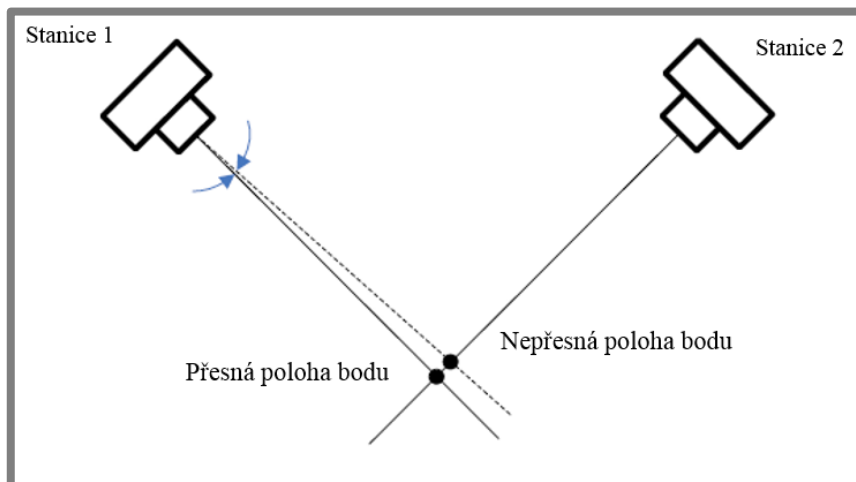


Obr. 2-14 Míra radiální distorze v závislosti na barevném kanálu [16]

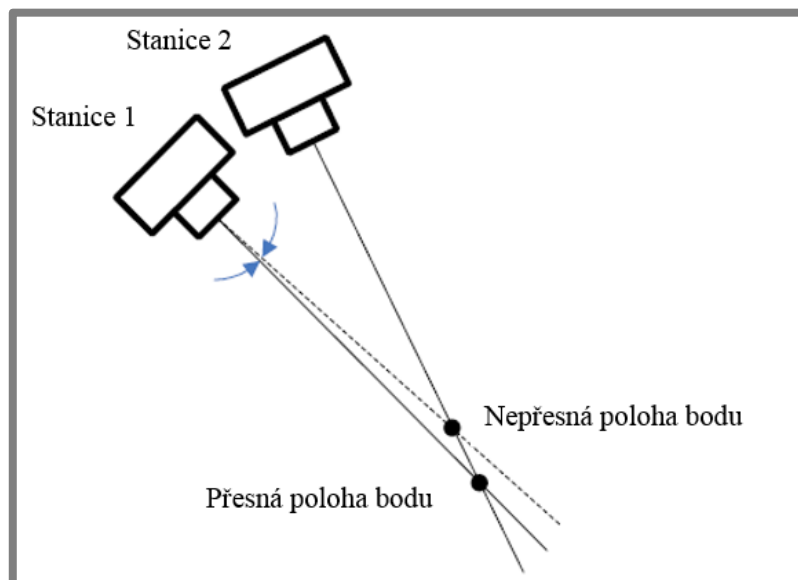
### 2.7.6 Vliv konvergentního úhlu mezi snímky

2.7.6

Fotogrammetrie vyžaduje focení cíle z různých úhlů, aby došlo k rekonstrukci celého prostorového objektu. Dopadem různých hodnot úhlů při pořizování fotografií se zabýval **Dai** [24]. Autor v článku zmiňuje, že čím blíže se konvergentní úhel mezi pořizovanými fotografiemi blíží 90 °, tím více roste přesnost měření. Během zjišťování přesné pozice bodu z fotografie, nebo při určování natočení fotoaparátu vůči objektu totiž vznikají drobné chyby, které se mohou výrazněji projevit, pokud se úhel mezi pořizovanými fotografiemi zmenšuje. Tuto chybu popisují obrázky 2-15 a 2-16. V obou případech má měřicí stanice 1 stejnou pozici a stejnou chybu měření, avšak měřicí stanice 2 je na obou obrázcích v jiných polohách. Výsledkem je, že výsledná změřená pozice bodu v prvním obrázku 2-15 má menší chybu, než na obrázku 2-16.

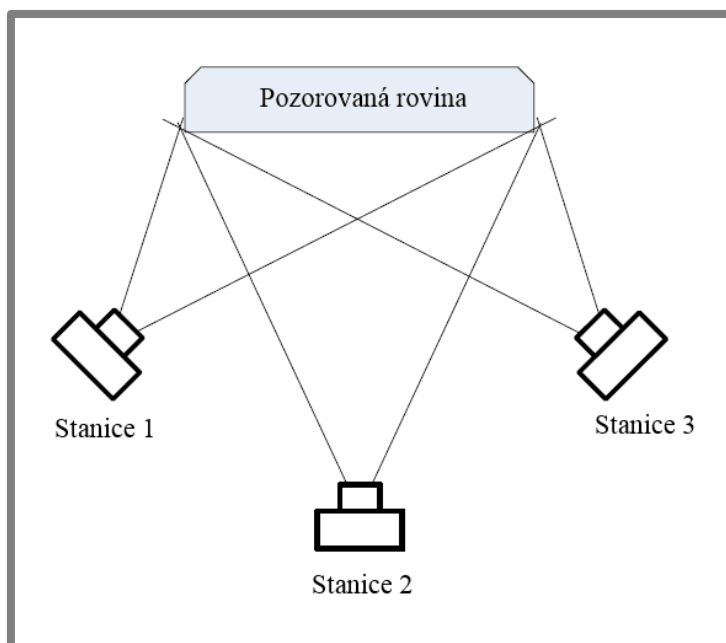


Obr. 2-15 Správná pozice fotoaparátu [24]



Obr. 2-16 Špatná pozice fotoaparátu [24]

Autor dále v článku zmiňuje, že pro rekonstrukci bodu v prostoru je vhodné použít více než dvě fotografie. Pokud je totiž na jedné fotografii špatně určena pozice bodu, další fotografie mohou tuto chybu potlačit. Pro fotografování roviny doporučuje použít tři fotografie, jejichž natočení vůči sobě není  $90^\circ$ , avšak každá fotografie pokrývá celý povrch roviny (obr. 2-17).



Obr. 2-17 Doporučené rozložení stanic při snímání roviny [24]

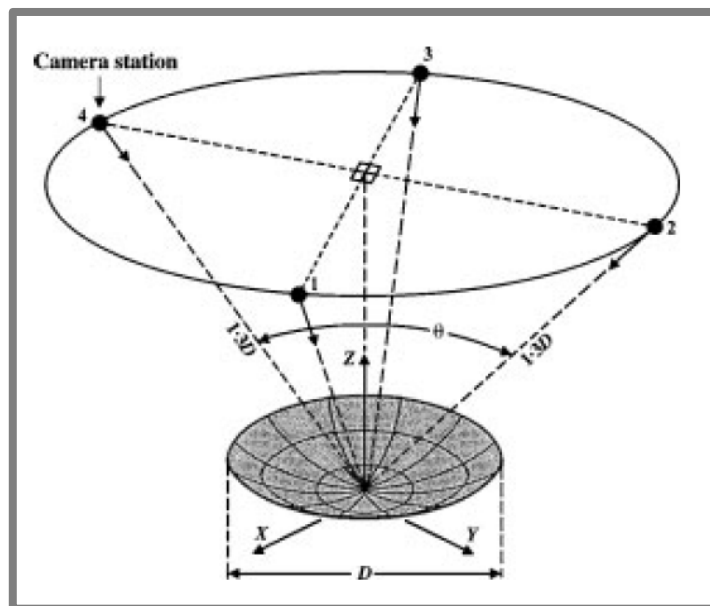
### 2.7.7 Vliv redundantních snímků

2.7.7

Z předchozích poznatků je známo, že bod se dá v prostoru určit pomocí dvou fotografií, avšak další přidání fotografií mohou přinést zpřesnění měření. Fraser [25] se ve své práci zabýval vlivem množství fotografií na přesnost fotogrammetrického měření.

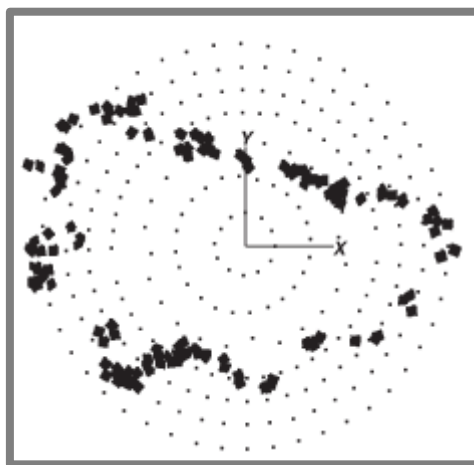
Cílem autora v článku bylo změřit rádiový teleskop Hobart. Pro měření musela být dodržena směrodatná odchylka bodů 0,065 mm, což odpovídá 1/400000 průměru reflektoru. Měření teleskopu probíhalo s použitím fotoaparátu INCA4, jehož ohnisková vzdálenost je 18 mm. Pro vyhodnocení měření byl použit systém V-STARs, který spadá do kategorie měření s kódovanými značkami.

Ideální konfigurace měření je zobrazena na obrázku 2-18 - fotoaparát snímá teleskop v pravidelné kruhové dráze, úhel  $\theta$  závisí na zakřivení reflektoru, pohybuje se mezi 60 – 100 ° - tyto úhly jsou zohledněné v koeficientu  $q$  v predikčním vztahu (viz kapitola 2.8.3). Minimálně se pořídí čtyři snímky podle pozic 1-4 na obrázku.



Obr. 2-18 Konfigurace pro měření rádiového teleskopu [25]

V případě reálného měření byl však autor omezen manipulovatelností jeřábu, na němž byla umístěná měřicí stanice. Úhel  $\theta$  v případě jeho měření byl pouze  $50^\circ$  a objekt nebyl snímán v pravidelné kruhové dráze (viz obr. 2-19, černé čtverce označují polohy měřicí stanice při měření).



Obr. 2-19 Pozice fotoaparátu při měření teleskopu [25]

Vzhledem k těmto komplikacím bylo jedinou možností autora pro dodržení minimální odchylky využít tzv. „hyper redundance“ – pořídit velké množství snímků měření. Celkově bylo pořízeno 435 snímků a byly snímány tři polohy teleskopu (vertikální, náklon o  $45^\circ$  a horizontální směr). Díky velkému počtu snímků pracoval proces bundle adjustment s obrovským množstvím stupňů volnosti, jež umožnily detekovat hrubé chyby měření. Na každém snímku byly detekovány průměrně čtyři body, jež vnášely do měření hrubou chybu, a byly proto z měření odstraněny. Výsledná průměrná odchylka měření byla díky redundantním snímkům 0,034 mm, podmínka maximální chyby tak byla splněna.

### 2.7.8 Vliv scény, osvětlení a jasu

2.7.8

Fotogrammetrické měření je do značné míry ovlivňováno i přítomným osvětlením. Vlivem okolního osvětlení na přesnost fotogrammetrického měření se ve své práci experimentálně zabýval **Golvarvar** [27]. Autor v článku snímal stavební cihlu a podpůrný sloup umístěný jak v interiéru, tak i ve venkovním prostředí. Pro vyhodnocení měření použil metodu FBM a software Leica Geosystems. Z výsledků měření vyplynulo, že sloup i stavební cihla byla přesněji změřena v interiéru při použití umělého osvětlení. Ačkoliv byly experimenty prováděné v exteriéru pořízeny za slunečného počasí, vykazovaly oproti experimentům z interiéru o 4 % větší nepřesnosti měření.

Obecně je podle [4] v oblasti blízké fotogrammetrie žádoucí, aby byl cíl měření světlý, zatímco pozadí objektu tmavé (v praxi se toho docílí použitím blesku). Potlačení světlosti pozadí z fotografie usnadňuje softwaru nalézt a identifikovat jednotlivé referenční značky. Blesk však na lesklých površích může vytvořit odraz, který systém vyhodnotí jako novou referenční značku (obr. 2-20). Takto vytvořená značka bude mít špatně určené prostorové souřadnice polohy a zhorší teoretickou přesnost měření vyhodnocenou softwarem [4].



Obr. 2-20 Odraz blesku na světlém povrchu z různých pozic, u pozice 2 systém může omylem považovat odraz za referenční značku [4].

Nepřesnosti při identifikaci a určování polohy jednotlivých značek způsobují i příliš světlé nebo tmavé snímky. V současné verzi softwaru Tritop Professional (verze 7 a vyšší) však tyto snímky automaticky detekuje, upozorní na ně a nepoužije je pro výpočet.

## 2.8 Teoretická přesnost systému TRITOP

2.8

### 2.8.1 Přesnost deklarovaná výrobcem

2.8.1

Teoretická přesnost systému Tritop deklarovaná výrobcem je dána vztahem:

$$MPE = \pm \left( 5 + \frac{L}{50} \right) \quad (14)$$

kde

L (mm) je měřená délka  
MPE (μm) maximální přípustná odchylka měření

Výsledná hodnota vypočtená ze vztahu je udávána v mikrometrech. Tento vztah zohledňuje pouze měřenou délku, nepočítá s dalšími faktory vstupujícími do měření.

---

### 2.8.2 Experimentální ověření teoretické přesnosti systému Tritop

Experimentálním ověřením přesnosti systému Tritop se ve své práci zabýval **Grzelka** [23]. Objektem měření byly certifikované blokové kalibry třídy K o délkových rozměrech 20 až 500 mm. Autor provedl měření měrek v souladu s normou VDI/VDE 2634 a ISO 10360 a došel k závěru, že výsledná přesnost měření se mírně liší od deklarované teoretické přesnosti předepsané výrobcem. Na základě jeho experimentu byla odchylka měření dána vztahem:

$$MPE = \pm(4 + \frac{L}{100}) \quad (15)$$

kde

L (mm) je měřená délka  
MPE (μm) maximální přípustná odchylka měření

Autor tedy došel k závěru, že skutečná přesnost systému je lepší než jak ji deklaruje výrobce. Zároveň podotknul, že kalibry měly v případě jeho měření maximální délku 500 mm, aby potvrdil své závěry, bude třeba vytvořit další studii, jež bude zkoumat kalibrované bloky větších rozměrů – 1000 a 2000 mm.

---

### 2.8.3 Přesnost fotogrammetrického systému v závislosti na více faktorech

Společnost GOM vydala teoretický vztah, který predikuje přesnost měření systému v závislosti na více faktorech – ohniskové vzdálenosti fotoaparátu, vzdálenosti od objektu a parametru  $\sigma$  (image accuracy). Vztah má tvar:

$$\sigma_c = \left(\frac{d}{f}\right) * \sigma \quad (16)$$

kde:

$\sigma_c$  (mm) je odchylka referenčních bodů  
 $\sigma$  (mm) přesnost snímku (image accuracy)  
d (mm) vzdálenost objektu  
f (mm) ohnisková vzdálenost

Parametr  $\sigma$  je získán vynásobením parametru „průměrná odchylka bodů obrazu“ velikostí jednoho pixelu (velikostí jeho jedné strany v mm, nikoliv celé plochy). Zmíněný parametr „průměrná odchylka bodů snímku“ je pro účely predikce přesnosti volen uživatelem – na základě jeho zkušeností. Přesná hodnota tohoto parametru je zobrazena v softwaru Tritop na konci měření. Doposud nebyla vytvořena nezávislá literatura, která by ověřila přesnost a funkčnost tohoto vztahu v praxi.

Další vztah predikující přesnost fotogrammetrického systému v závislosti na vícero faktorech ve své práci popsal **Fraser** [25]. Autor popisuje zjednodušený vztah pro výpočet směrodatné odchylky souřadnic bodu, který mimo jiné závisí na počtu použitých fotografií:

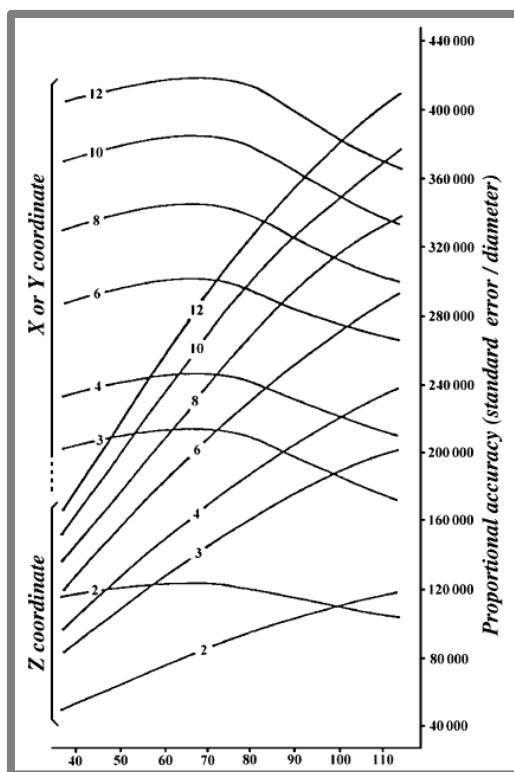
$$\sigma_c = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} * \left(\frac{d}{f}\right) * q \quad (17)$$

kde:

$\sigma_c$	(mm)	je směrodatná odchylka souřadnic bodů objektu
$\sigma$	( $\mu\text{m}$ )	průměrná odchylka obrazových bodů
$k$	(-)	počet použitých fotografií
$d$	(m)	vzdálenost objektu
$f$	(mm)	ohnisková vzdálenost
$q$	(-)	empirický faktor (v rozmezí 0,5 – 0,7)

Empirický faktor závisí na konvergentním úhlu, hodnoty 0,5 – 0,7 odpovídají středním až vysokým konvergentním úhlům (60 ° – 100 °). Poloha konvergentního úhlu mezi fotografiemi je popsána v obrázku 2-18 (úhlem  $\theta$ ) v kapitole 2.7.7.

Článek také obsahuje grafické znázornění závislosti mezi konvergentními úhly, počty pořízených fotografií a přesnosti měření vztážené k vypočteným souřadnicím objektu X, Y a Z (obr. 2-21). Tato závislost vychází z předchozích měření rádiových teleskopů, které autor provedl.



**Obr. 2-21** Přesnost měření v závislosti na počtech fotografií a konvergentních úhlech vztážené k vypočteným souřadnicím objektu X, Y, Z [25]

Svislá osa obrázku 2-22 označuje proporční přesnost měření (chyba měření / průměr měřeného objektu) vztaženou k vypočteným souřadnicím objektu X, Y, Z. Vodorovná osa popisuje konvergentní úhly. Čísla u jednotlivých křivek grafu představují počet pořízených fotografií.

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

---

**3**

Teoretickou přesnost měření systému Tritop definovala společnost GOM vztahem (16). Obecná platnost a přesnost tohoto vztahu však není dokázána žádným nezávislým měřením. Hlavní motivací pro řešení této diplomové práce bylo vytvořit měření, která ověří přesnost tohoto vztahu v praktických aplikacích. Nejdříve však bylo nutné provést rešerši z oblasti faktorů, jež vstupují do fotogrammetrického měření a vyselektovat z nich ty, jež se dají snadno ovlivnit.

#### 3.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

---

3.1

##### 3.1.1 Systém TRITOP

---

3.1.1

Systém TRITOP využívá pro zpracování snímků proces zvaný bundle adjustment. Tento proces v sobě zahrnuje současné nalezení vnitřních a vnějších parametrů orientace a provedení samokalibrace. Matematický model bundle adjustment je založený na rovnicích kolinearity. Tyto rovnice vytvářejí přeuročenu soustavu, kterou systém řeší optimalizovanou metodou nejmenších čtverců. Vstupy, které ovlivňují proces přeuročení soustav rovnic jsou počet vázacích bodů (kódovaných značek) a počet fotografií. Vzhledem k tomuto faktu bylo obsahem diplomové práce vytvořit sérii měření, které zohledňují počty pořízených fotografií a počty kódovaných značek umístěných ve scéně.

Pro práci se systémem TRITOP je nutné podle [4] dodržet následující pravidla: objekt je potřeba zachytit s alespoň pěti kódovanými referenčními značkami, jinak dojde ke špatnému určení orientace fotografie v prostoru. Značky musí být snímány z dostatečné blízkosti, pokud nebude průměr nekódované referenční značky alespoň deset pixelů, nebude možné jí softwarem identifikovat. Každá nekódovaná značka musí být zachycena na třech a více snímcích.

##### 3.1.2 Faktory ovlivňující přesnost fotogrammetrie

---

3.1.2

Největší vliv na přesnost fotogrammetrického měření má počet a velikost pixelů senzoru, avšak nemusí se jednat o pravidlo. Experiment v článku [21] dokazuje, že velmi závisí i na celkové opticko-mechanické konstrukci fotoaparátu.

Kvalitu měření lze dále zlepšit použitím různých kalibračních algoritmů [22]. Kalibrační algoritmy pracují hlavně s potlačením vlivu distorze objektivu. Distorze se mírně liší i v závislosti na barevném spektru, dá se ovlivnit použitím monochromatické fotografie nebo barevným filtrem. [16]

Vhodnou volbou konvergentních úhlů mezi snímky lze docílit kvalitnějších výsledků. Čím více se blížíme konvergentnímu úhlu  $90^\circ$  mezi dvěma fotografiemi, tím menší vlivy chyb se podepíší na výsledném měření [24]. Další faktor, který je třeba zohlednit je množství použitých fotografií. Se vzrůstajícím počtem pořízených fotografií z různých úhlů narůstá přesnost [25]. Při měření je tedy potřeba brát zřetel na oba faktory zároveň, protože při zvyšování počtu fotografií budou klesat konvergentní úhly mezi fotografiemi a naopak.

Vliv na výsledky měření má i použitá fotogrammetrická metoda. Metoda využívající referenční značky vykazuje oproti metodě FBM přesnější měření [19].

Pokud je autorovi známo, dosud bylo publikováno jen málo studií zabývajících se vnějšími vlivy prostředí (osvětlení, jas, teplota) na přesnost fotogrammetrického systému. Na základě článku [27] by mělo být dosaženo přesnějších výsledků za umělého osvětlení v interiéru.

Z výše zmíněných faktorů, vstupujících do fotogrammetrického měření, byly pro analýzu vybrány ty, které jsou lehce ovlivnitelné – tj. změna scény, vliv barevného filtru, počet použitých fotografií.

---

### 3.1.3 Vztahy predikující přesnost

Společnost GOM dává k dispozici uživatelům fotogrammetrických systému predikční vztah (16), který přibližně určuje nejistotu měření daného systému. Tento vztah však zohledňuje jen dva faktory vstupující do měření – vzdálenost od objektu a ohniskovou vzdálenost. C. Fraser ve svém článku popsal predikční vztah pro fotogrametrii (17), který v sobě navíc zahrnuje parametry počtu pořízených snímků a konvergentních úhlů. Z tohoto důvodu byly oba vztahy v této diplomové práci podrobeny analýze z hlediska predikční přesnosti.

---

## 3.2 Podstata a cíle diplomové práce

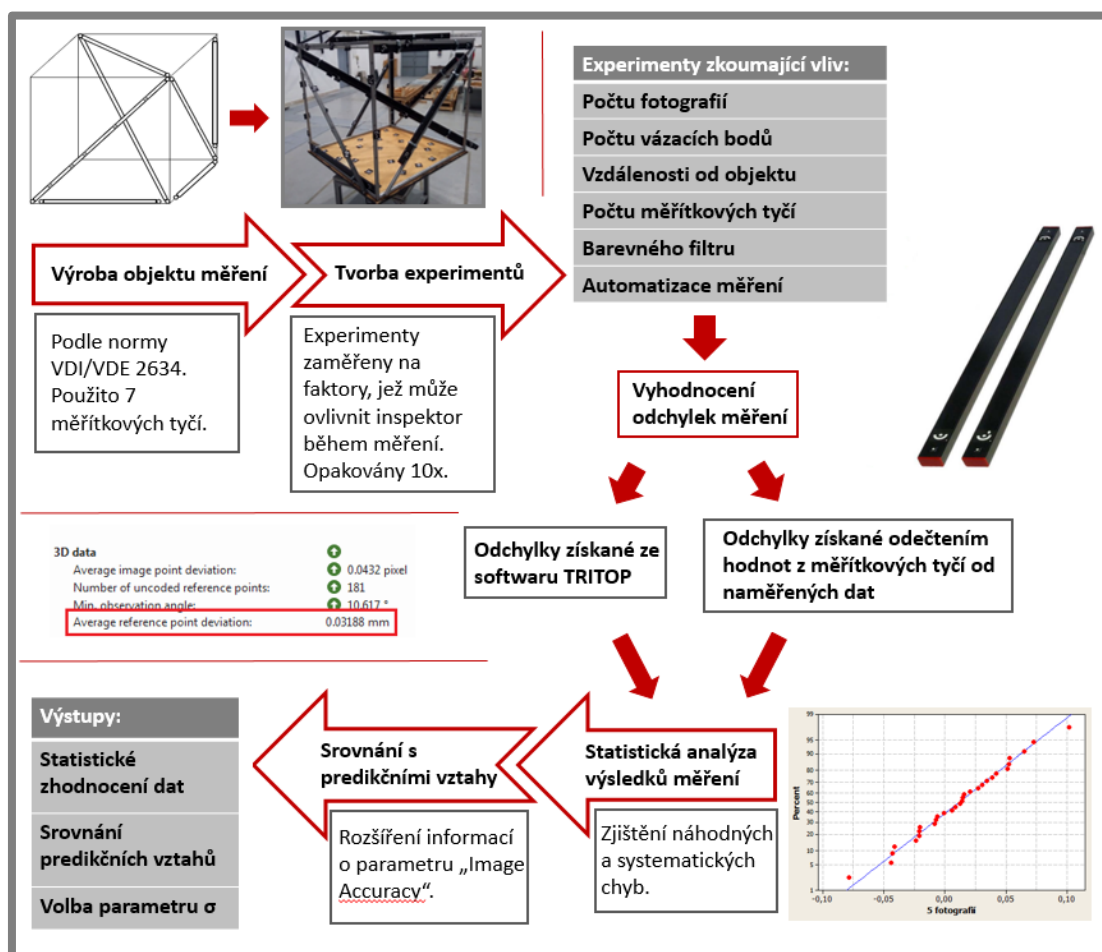
Hlavním cílem práce je statisticky vyhodnotit vlivy vybraných faktorů na přesnost fotogrammetrického měření a ověřit přesnost teoretických predikčních vztahů.

Dílní cíle diplomové práce:

- popsat vlivy ovlivňující přesnost měření a navrhnout testy pro ověření vlivu vybraných parametrů,
- provést měření a statistické vyhodnocení výsledků,
- vyhodnotit přesnost existujících teoretických predikčních vztahů,
- rozšířit informace o volbě parametru Sigma ("Image accuracy"), který vstupuje do teoretického vztahu od společnosti GOM.

## 4 MATERIÁL A METODY

V této kapitole je nejprve popsán z hlediska hardwarové a softwarové výbavy systém Tritop, který byl použit pro uskutečnění experimentů. Dále je popsána konstrukce přípravku, jež umožnila provádět experimentální měření. V poslední části je zmíněn popis experimentů a podmínky jednotlivých testů včetně způsobu, jakým byly experimenty vyhodnoceny. Schéma postupu řešení je zobrazeno na obrázku 4-1.



Obr. 4-1 Schéma postupu řešení

### 4.1 Použitý hardware a software

4.1

#### 4.1.1 Fotoaparát

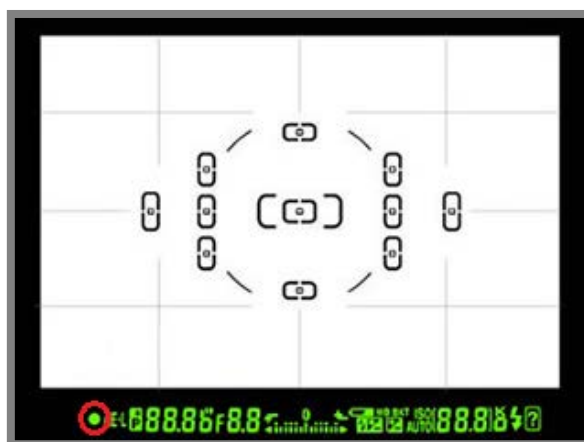
4.1.1

Systém Tritop nabízí dva typy fotoaparátu, které lze použít pro fotogrammetrické měření. Jedná se o fotoaparát Nikon D300s (viz. Obr. 4.1) a Canon EOS 1Ds. Nikon D300s se používá pro měření menších až středně velkých předmětů, zatímco Canon EOS nachází uplatnění při měření rozměrných objektů. Pro experimentální měření v této diplomové práci byl použit Nikon D300s. Základní parametry fotoaparátu tohoto fotoaparátu jsou uvedeny v tabulce 4-1.

Tab. 4-1 parametry fotoaparátu Nikon D300s

<b>Typ snímače</b>	CMOS
<b>Rozlišení snímku (pix)</b>	4288 x 2848
<b>Velikost snímače (mm)</b>	23,6 x 15,8
<b>Velikost jednoho pixelu (μm)</b>	5,5

Nikon D300s je fotoaparát s pevnou ohniskovou vzdáleností – při provádění měření se ohnisko objektivu ručně seřizuje tak, aby odpovídalo vzdálenosti měřeného objektu. Kontrola optimálního seřízení ohniskové vzdálenosti se provádí v hledáčku fotoaparátu. Při namáčknutí spouště začne svítit zelená kontrolka indikátoru zaostření, pokud je ohnisková vzdálenost vzhledem ke sledovanému objektu nastavena správně. Poloha indikátoru zaostření je zřejmá z obrázku 4-2, kde je označena červeným kruhem.



Obr. 4-2 Pohled do hledáčku fotoaparátu Nikon D300s [34].

K hardwarovému vybavení systému Tritop dále patří paměťové médium pro přenos dat z fotoaparátu do PC. Pro komunikaci s počítačem je však také možné fotoaparát propojit s rozhraním Wi-Fi, což umožní uživateli on-line kontrolu měření během provádění experimentu.

#### 4.1.2 Referenční značky

Fotogrammetrický systém Tritop má k dispozici dva druhy referenčních značek – kódované a nekódované.

Kódované značky slouží k získání informace o orientaci snímače v prostoru a k propojení obrazu mezi jednotlivými snímky. Obsahují patnácti bitový kruhový kód, který každé značce zajišťuje jedinečné identifikační číslo. Rozsah identifikačních čísel je od 0 do 428 [GOM tutorial]. Tyto značky lze umístit do měřené oblasti samostatně, nebo ve formě tzv. orientačních křížů. Orientační kříže obsahují celkově devět kódovaných značek a slouží k určení souřadného systému objektu nebo k rychlé přípravě scény pro měření (viz obr. 4-3 vpravo). Na každé fotografii by mělo být pozorováno alespoň 5 kódovaných značek.

Nekódované značky se využívají k měření vzdáleností – 3D souřadnice těchto bodů jsou základním výstupem měření. Jedná se o bílé kruhy na černém pozadí, jejichž

velikost lze přizpůsobit danému měření (průměr od 6 do 10 mm – závisí na velikosti měřené scény). Příklad nekódovaných značek je zobrazen na obrázku 4-3 vlevo.



Obr. 4-3 Nekódované značky (vlevo), kódované značky (uprostřed) a orientační kříž (vpravo).

### 4.1.3 Certifikované kalibrační tyče

4.1.3

Tritop využívá pro získání reálného měřítka fotografie kalibrační tyče. Jedná se buďto o tyče z karbonu nebo invaru (viz obr. 4-4). Materiál tyčí je volen tak, aby měl co nejnižší koeficient teplotní délkové roztažnosti. V rámci řešení diplomové práce byly využity karbonové tyče o velikostech 1 a 2 metry.

Na tyčích jsou umístěny dvě kódované a dvě nekódované značky. Kódované značky slouží k identifikaci jednotlivých tyčí. Nekódované značky udávají vzdálenost, která je certifikovaně změřená přesnějším měřicím systémem, než je systém Tritop. Údaje o přesné vzdálenosti nekódovaných značek jsou uvedeny na zadní straně tyče. Tyto informace slouží k porovnání naměřených hodnot systémem Tritop s přesnými hodnotami. V rámci řešení diplomové práce byly přesné informace o vzdálenosti z karbonových tyčí využity.



Obr. 4-4 Invarové kalibrační tyče (vlevo) a karbonové kalibrační tyče (vpravo).

### 4.1.4 Rotační stůl

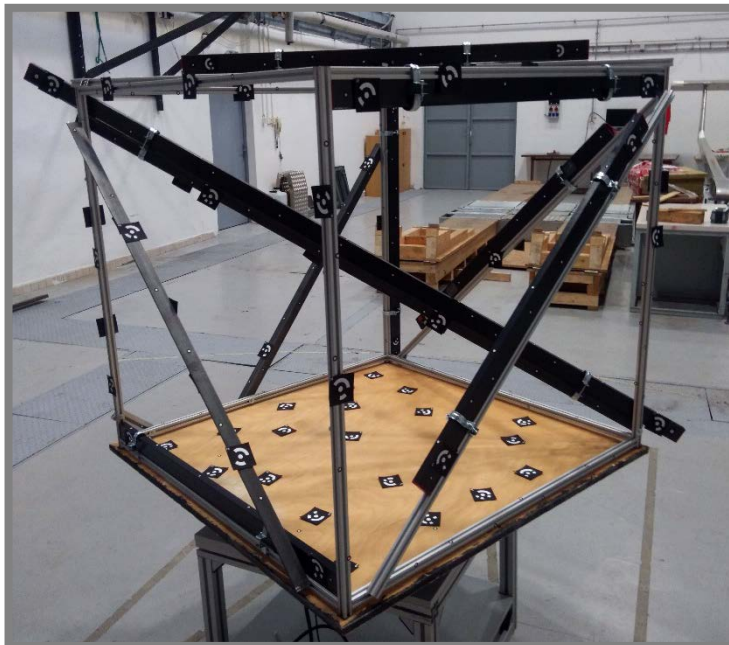
Rotační stůl umožňuje otočit objekt o stanovený úhel, díky tomu jsou fotografie ve výsledném měření rovnoměrně rozloženy. Řídící jednotka rotačního stolu je propojená s počítačem. Se stolem lze otáčet zadáním hodnot úhlů v softwaru ATOS, nebo použitím řídicího joysticku, jež je součástí vybavení rotačního stolu.

### 4.1.5 Software Tritop professional a GOM Inspect

Fotografie pořízené během měření jsou převáděny do softwaru Tritop Professional, který na základě algoritmu bundle adjustment vyhodnotí výsledné 3D souřadnice měřených bodů. Tento software je součástí celého fotogrammetrického systému Tritop, dá se tedy využívat jen s použitím licenčního klíče. Společnost GOM však poskytuje i volně dostupný software GOM Inspect, který umožňuje mimo jiné i práci s vyhodnocenými měřeními ze softwaru Tritop Professional. V rámci řešení diplomové práce byly oba softwary aktivně využívány.

## 4.2 Objekt měření

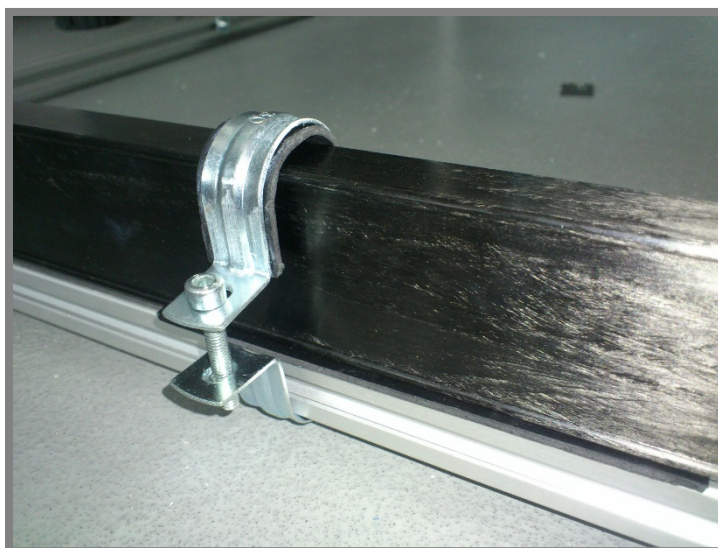
Jako objekt měření byly pro účely této práce zvoleny kalibrované karbonové tyče o velikostech 1 a 2 metry (viz kapitola 4.1.3). Rozmístění a počet měřených tyčí vychází z normy VDI/VDE 2634 part 1, která definuje přijímací testy (acceptance tests) pro fotogrammetrické systémy (viz kapitola 2.2). Minimální počet měřených tyčí je podle normy 7 a v prostoru jsou rozmístěny v sedmi rozličných směrech. Celkový měřený objem je normou doporučený na 2 x 2 x 1,5 m. Vzhledem k délkám použitých karbonových tyčí a s ohledem na malý rozměr rotačního vzorku byl měřený objem snížen na 1 x 1 x 1 m, což norma dovoluje. Pro umístění tyčí v různých směrech o daném měřeném objemu byl zkonstruován přípravek z hliníkových profilů. Hotový přípravek včetně rozmístění karbonových tyčí a referenčních značek je zobrazen na obrázku 4-5.



**Obr. 4-5** Objekt měření

Tři karbonové tyče o velikosti 1 m byly umístěny na hranách konstrukce, aby reprezentovaly osy X, Y a Z, další tři metrové tyče se umístily do plošných úhlopříček konstrukce. Poslední tyč o velikosti 2 metry byla upnuta do prostorové úhlopříčky krychlové konstrukce.

Uchycení tyčí ke konstrukci bylo řešeno pomocí hliníkových objímek, jež se utáhly šroubovými spoji. Objímky byly vystlány pryží, aby se drahé karbonové tyče během utahování mechanicky nepoškodily. Upnutí karbonové tyče je zobrazeno na obr. 4-6.



**Obr. 4-6** Upnutí karbonové tyče pomocí dvoubodové objímky

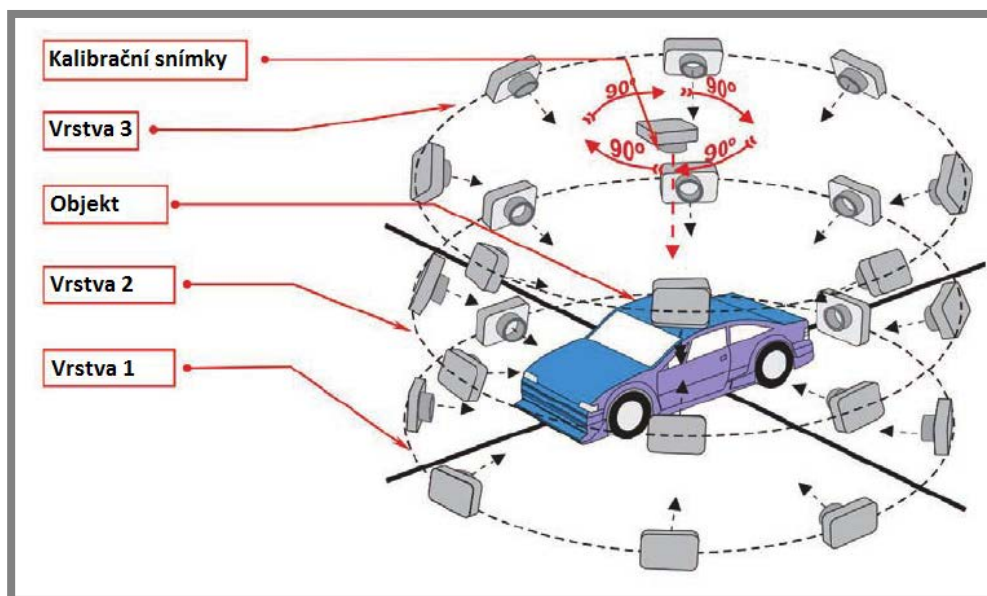
### 4.3 Popis provedených experimentů

Experimenty v této diplomové práci byly zaměřeny na zkoumání vnějších vlivů, jež vstupují do fotogrammetrického měření. Experimenty byly soustředěny převážně na vlivy, jež může přímo ovlivnit inspektor během měření. Konkrétně se jedná o vliv počtu pořízených fotografií, vzdálenosti od měřeného objektu, počtu použitých kódovaných značek, počtu použitých měřítkových tyčí, mechanizace měření pomocí rotačního stolku a stativu, použití barevného filtru, vliv změny scény.

Veškeré experimenty byly provedeny v hale při stabilních teplotních i světelných podmínkách okolí. Údaje o teplotě okolí byly u každého měření zaevidovány do softwaru Tritop Professional, který na jejich základě přepočítá teplotní dilataci bodů na měřítkových tyčích. I když je teplotní dilatace těchto bodů minimální, projevuje se na celkové přesnosti měření.

#### 4.3.1 Vliv počtu pořízených fotografií

Při standardním měření, které vychází z manuálu pro používání systému Tritop [2], je objekt měřen v kruhových drahách a pořízeno je celkově 28 fotografií. Fotografie jsou snímány ve třech výškových vrstvách, přičemž v každé vrstvě je zachyceno celkově 8 fotografií. Na počátku či na konci měření se pořídí čtyři kalibrační fotografie, které jsou snímány z jedné pozice a jsou vůči sobě pootočený o  $90^\circ$  (viz obr. 4-7).



Obr. 4-7 Standardní konfigurace měření se systémem Tritop [2]

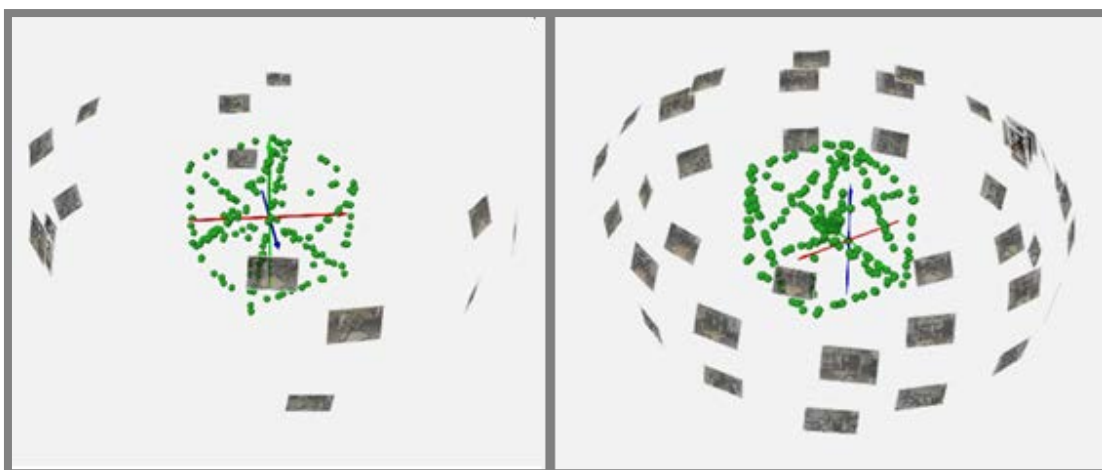
V rámci řešení diplomové práce bylo provedeno pět sérií experimentů zkoumajících vliv počtu pořízených fotografií na přesnost fotogrammetrického systému. Experimenty vycházely ze standardního měření - byly rovněž provedeny ve třech výškových vrstvách, lišil se však počet fotografií vztahený na jednu vrstvu. V prvním experimentu byly pořízeny čtyři fotografie v každé vrstvě (celkově 16

fotografií), druhý zahrnoval pět fotografií ve vrstvě (celkově 19 fotografií), třetí šest fotografií na vrstvu (celkově 22 fotografií). Obsahem čtvrtého experimentu bylo vytvořit standardní měření, tedy 8 fotografií na vrstvu, v pátém experimentu byl pak počet fotografií ve vrstvě navýšen na 12 (celkově 40 fotografií). Další parametry experimentu jsou uvedeny v tabulce 4-2.

Tab. 4-2 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu fotografií

<b>Vzdálenost (m)</b>	2
<b>Počet fotografií</b>	16; 19; 22; 28; 40
<b>Počet kódovaných značek</b>	67
<b>Počet měřítkových tyčí</b>	2
<b>Okolní teplota</b>	18 °C
<b>Stativ</b>	ne
<b>Opakováno</b>	10 x

Na obrázku 4-8 je zobrazen rozdíl prostorového uspořádání fotografií ve scéně mezi prvním a pátým měřením.



Obr. 4-8 Prostorové uspořádání fotografií v prvním měření (vlevo) a v pátém měření (vpravo)

### 4.3.2 Vliv vzdálenosti měřeného objektu

4.3.2

Obvykle je měření prováděno v takové vzdálenosti, aby byl objekt na fotografii viděn celý. V případě sestaveného přípravku byla optimální vzdálenost od měřicí stanice 2 metry. V rámci experimentu vyhodnocujícího vliv závislosti vzdálenosti objektu na přesnost fotogrammetrického systému bylo vytvořeno pět sérií měření, během kterých byl objekt postupně snímán ve vzdálenostech 1,5; 2; 2,5; 3 a 3,5 metrů, což odpovídá pokrytí průměru referenčních značek počty 19; 15; 12; 10 a 9 pixelů. Nastavení dalších podmínek měření jsou uvedena v tabulce 4-3.

Tab. 4-3 Parametry experimentu zkoumající vliv vzdálenosti

<b>Vzdálenost [m]</b>	1,5; 2; 2,5; 3; 3,5
<b>Počet fotografií</b>	28
<b>Počet kódovaných značek</b>	67
<b>Počet měřítkových tyčí</b>	2
<b>Okolní teplota</b>	18°C
<b>Stativ</b>	ne
<b>Opakováno</b>	10 x

Při provádění experimentu se snímací vzdálenosti 1,5 m byla měřicí stanice příliš blízko objektu, krychle proto nebyla na fotografii vidět celá. Z toho důvodu byl ve spodní vrstvě fotoaparát zaměřen na spodní hranu krychle, v prostřední vrstvě mířil inspektor do středu krychle a v horní vrstvě byla snímána horní hrana krychle.

### 4.3.3 Vliv počtu použitých kódovaných značek

Při řešení tohoto experimentu bylo vytvořeno celkově pět sérií měření, které zkoumaly vliv počtu kódovaných značek ve scéně na přesnost fotogrammetrického systému. První experiment byl pořízen s 31 kódovanými značkami na objektu, průměrně pak na každé fotografii bylo vidět 10 značek. Druhý experiment zahrnoval použití 46 kódovaných značek (průměrně 14 značek na fotografii). Ve třetím experimentu byl počet značek navýšen na 67 (průměrně 19 značek na fotografii). Ve čtvrtém experimentu bylo použito 84 kódovaných značek ve scéně (průměrně 28 značek ve fotografii) a v pátém experimentu byl použit maximální počet dostupných značek - 100 (průměrně 34 značek ve fotografii). Další parametry experimentu jsou uvedeny v tabulce 4-4.

Tab. 4-4 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu fotografií

<b>Vzdálenost (m)</b>	2
<b>Počet fotografií</b>	28
<b>Počet kódovaných značek</b>	31; 46; 67; 84; 100
<b>Počet měřítkových tyčí</b>	2
<b>Okolní teplota</b>	18 °C
<b>Stativ</b>	ne
<b>Opakováno</b>	10 x

Srovnání rozdílů v počtu kódovaných značek mezi prvním a pátým měřením je zobrazeno na obrázku 4-9.



Obr. 4-9 Konfigurace kódovaných značek pro první měření (vlevo) a pro páté měření (vpravo)

#### 4.3.4 Vliv počtu kalibračních tyčí

4.3.4

Při standardním měření fotogrammetrickým systémem Tritop se do scény umístí dvě kalibrační tyče, které určují měřítko objektu. Tyče by neměly být položeny hned vedle sebe, často se vůči sobě orientují kolmo. Informace o vzdálenosti dvou bodů, umístěných na kalibračních tyčích, jsou inspektorem zapsány do softwaru Tritop Professional a systém je využívá při výpočtu výsledného měřítka měření.

V rámci řešení diplomové práce byla vytvořena série experimentů, která zkoumala vliv počtu kalibračních tyčí ve scéně na přesnost měření. Celkově bylo vytvořeno 6 měření zkoumajících tento faktor. První experiment byl proveden s použitím dvou kalibračních tyčí, při každém dalším experimentu vzrůstal počet použitých tyčí až na konečný součet sedmi měřítkových tyčí ve scéně. Podmínky experimentu jsou uvedeny v tabulce 4-5.

Tab. 4-5 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu kalibračních tyčí

<b>Vzdálenost (m)</b>	2
<b>Počet fotografií</b>	28
<b>Počet kódovaných značek</b>	67
<b>Počet měřítkových tyčí</b>	2; 3; 4; 5; 6; 7
<b>Okolní teplota</b>	18 °C
<b>Stativ</b>	ne
<b>Opakováno</b>	1 x

#### 4.3.5 Test opakovatelnosti měření

4.3.5

Při experimentu s opakovatelností měření byl využit stativ pro stabilizaci fotoaparátu a rotační stolek, který umožnil automatické otáčení přípravku o stanovený úhel v daném časovém intervalu (viz obr. 4-10). Tato konfigurace umožnila zajistit shodné

konvergentní úhly mezi fotografiemi v jednotlivých vrstvách a zároveň dodržet přesnou vzdálenost měřicí stanice od přípravku, která v tomto měření činila 2 metry.



Obr. 4-10 Měření s rotačním stolkem a stativem

Důvodem pro uskutečnění experimentu byla otázka, zda mechanická stabilizace fotoaparátu a přesně dodržené vzdálenosti mezi snímky přinesou zlepšení opakovatelnosti měření, popřípadě zpřesnění celého výsledku měření. Další podmínky experimentu jsou uvedeny v tabulce 4-6.

Tab. 4-6 Parametry experimentu zkoumající opakovatelnost měření

<b>Vzdálenost (m)</b>	2
<b>Počet fotografií</b>	28
<b>Počet kódovaných značek</b>	67
<b>Počet měřítkových tyčí</b>	2
<b>Okolní teplota</b>	18 °C
<b>Stativ</b>	Ano
<b>Opakováno</b>	10 x

---

### 4.3.6 Vliv barevného filtru

Velikost radiální distorze objektivu se pro různá barevná spektra liší. Důvodem je chromatická aberace – závislost ohniskové vzdálenosti čočky na vlnové délce světla. Chromatická aberace se však dá zredukovat použitím barevného filtru.

Pro uskutečnění experimentu s barevným filtrem byl použit zelený filtr Tianya 55 mm (viz obr. 4-11). Volba zelené barvy filtru je zdůvodněná tím, že zelené spektrum má ze všech spekter ohnisko čočky umístěné nejbližší teoretické hodnotě. Parametry experimentu jsou uvedeny v tabulce 4-7.



Obr. 4-11 Zelený barevný filtr Tianya 67 mm

Tab. 4-7 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu fotografií

<b>Vzdálenost (m)</b>	2
<b>Počet fotografií</b>	28
<b>Počet kódovaných značek</b>	67
<b>Počet měřítkových tyčí</b>	2
<b>Okolní teplota</b>	21 °C
<b>Stativ</b>	ne
<b>Opakováno</b>	10 x

#### 4.4 Způsob vyhodnocení získaných údajů

4.4

Přesnost měření fotogrammetrického systému Tritop byla vyhodnocena na základě čtyř parametrů. Tři parametry vyhodnotil samostatně software Tritop Professional, zbývající parametr byl vyhodnocen manuálně srovnáním referenčních a změřených hodnot. Jednotlivé parametry jsou popsány v tabulce 4-8.

Tab. 4-8 Hodnotící parametry experimentů

<b>Parametry vyhodnocené softwarem</b>		<b>Parametr vyhodnocen manuálně</b>
Parametr	Zkratka	Odečtením naměřených hodnot od referenčních získaných z certifikovaných měřítkových tyčí
Average reference point deviation	$\sigma_c$	
Average image point deviation	-	
Average scale bar deviation	-	

##### 4.4.1 Parametry vyhodnocené softwarem

4.4.1

Tři hodnotící parametry automaticky vyhodnotil software Tritop Professional. Jednalo se o průměrnou odchylku referenčních bodů (Average reference point deviation), průměrnou odchylku bodů obrazu (Average image point deviation) a průměrnou odchylku měřítkových tyčí (Average scale bar deviation).

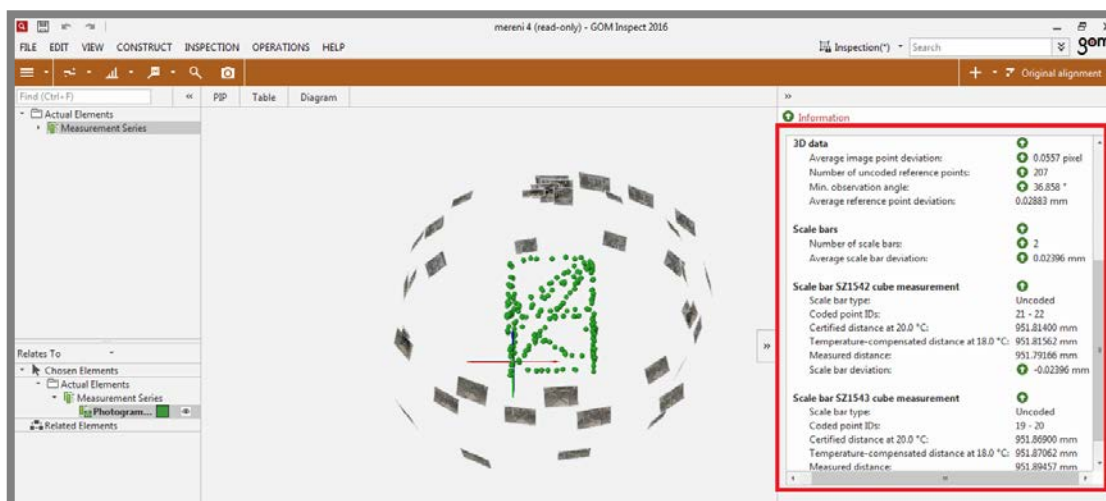
Průměrná odchylka referenčních bodů vyjadřuje průměrnou vzdálenost pozorovaných obrazových bodů od příslušné reference. Vizualizuje odchylku bodu v prostoru měřeného objektu.

Průměrná odchylka bodu obrazu vyjadřuje odchylku bodů umístěných ve středu referenčních značek na jednotlivých snímcích. Vizualizuje odchylku bodu v 2D prostoru. Pokud tato odchylka dosáhne hodnoty vyšší než 0,08 pixelů, měření je vyhodnoceno jako chybné.

Průměrná odchylka měřítkových tyčí udává odchylku mezi skutečnou vzdáleností bodů na certifikované tyči a změřenou vzdáleností systémem Tritop. V případě použití metrových měřítkových tyčí nesmí odchylka na jednotlivých tyčích překročit hodnotu 25  $\mu\text{m}$ , při použití dvoumetrové tyče pak odchylka nesmí přesáhnout hodnotu 45  $\mu\text{m}$ , jinak je měření vyhodnoceno jako chybné.

Zmíněné hodnotící parametry jsou vypsané v informacích o projektu v pravé části pracovní plochy softwaru Tritop Professional nebo GOM Inspect (viz obr. 4-12 a 4-13).

Důležitou informací, jež se využila při kontrole vytvořených měření, byl údaj o minimálním pozorovaném úhlu (min. observation angle – viz obr. 4-13). Hodnota minimálního pozorovaného úhlu reprezentuje nejmenší úhel mezi fotografiemi, pod kterým byl vyhodnocený určitý referenční bod. Pokud je tento údaj menší než 3,5  $^\circ$ , objeví se v projektu varovný vykřičník poukazující na možnost vnesení vysoké chyby do měření. V případě výskytu této chyby bylo nutné odstranit chybně vyhodnocený bod z měření, nebo vytvořit novou fotografii odlišně orientovanou v prostoru.



**Obr. 4-12** Lokace hodnotících parametrů fotogrammetrického projektu v softwaru GOM Inspect – na obrázku označená červeným rámečkem

3D data	
Average image point deviation:	0.0725 pixel
Number of uncoded reference points:	60
Min. observation angle:	19.447 °
Average reference point deviation:	0.03216 mm
Scale bars	
Number of scale bars:	2
Average scale bar deviation:	0.00568 mm
Scale bar SZ1344	
Scale bar type:	Uncoded
Coded point IDs:	0 - 1
Certified distance at 20.0 °C:	948.66200 mm
Temperature-compensated distance at 21.0 °C:	948.66119 mm
Measured distance:	948.66688 mm
Scale bar deviation:	0.00569 mm

Obr. 4-13 Detail informací o projektu získaný z fotogrammetrického měření

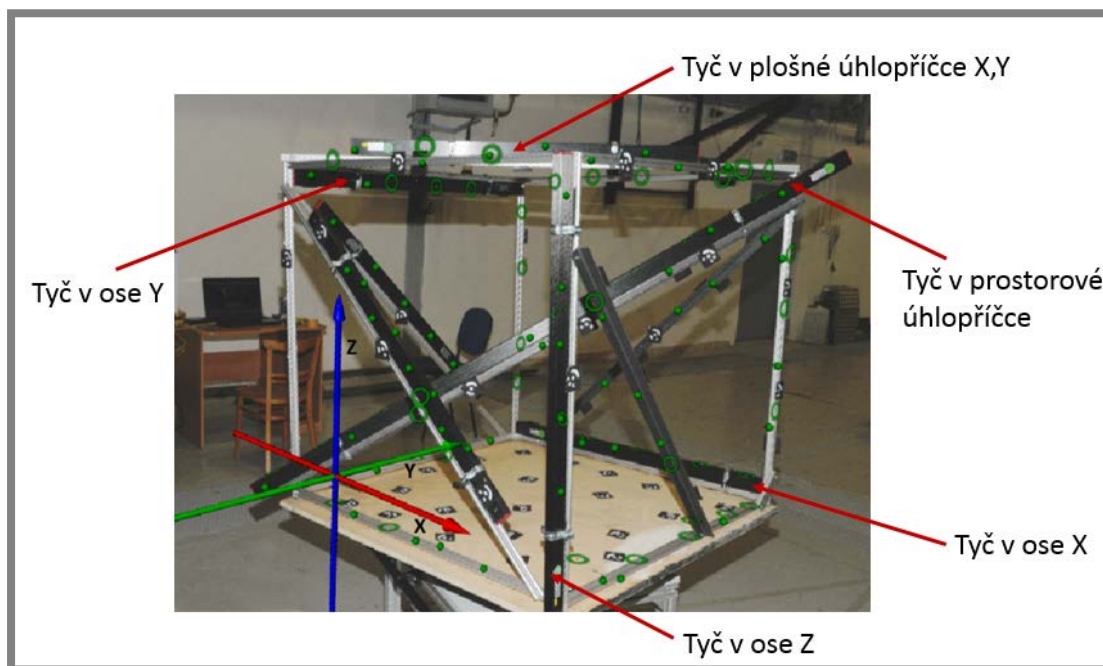
#### 4.4.2 Parametr vyhodnocen manuálně

4.4.2

Další parametr, jenž hodnotil přesnost měření systému Tritop, byl získán manuálně, odečtením referenčních hodnot z měřítkových tyčí a změřených hodnot fotogrammetrickým systémem.

Tento parametr reflektuje odchylku měřené vzdálenosti v jednotlivých osách globálního souřadného systému X, Y, Z, dále odchylku v plošné úhlopříčce krychle reprezentovanou osami X a Y a odchylku v prostorové úhlopříčce tělesa. Přestože se na tělese vyskytuje celkově sedm kalibračních tyčí, manuálně se vyhodnocovalo pouze pět vzdáleností, protože dvě tyče, umístěné v plošných úhlopříčkách krychle, sloužily k tvorbě měřítka objektu - jejich přesnou vzdálenost program znal, využíval ji při výpočtu a automaticky vyhodnotil jejich odchylku (viz obr. 4-13 Scale bar deviation).

Na obrázku 4-14 je zobrazena orientace objektu vůči globálnímu souřadnému systému, včetně orientace kalibračních tyčí, jež se podílely na vzniku manuálně určeného hodnotícího parametru.



Obr. 4-14 Orientace objektu vůči globálnímu souřadnému systému

#### 4.4.3 Statistická analýza výsledků

Po získání výsledků měření z měřítkových tyčí (viz kapitola 4.4.2) bylo potřeba určit, zda jsou data zatížena náhodnou nebo systematickou chybou. K tomuto účelu byly použity parametrické a neparametrické statistické testy. Zda použít parametrický či neparametrický test se pro daný soubor dat rozhoduje na základě výsledku testu normality.

Test normality zkoumá, jakým způsobem jsou sledovaná data rozložena. Pokud rozložení odpovídá Gaussovu rozdělení pravděpodobnosti, pak soubor dat považujeme za normální a uplatňujeme parametrické testy (v práci využít Studentův t-test). Pokud rozložení dat neodpovídá Gaussovu rozdělení, pak se používají neparametrické testy (např. Wilcoxonův test). Pro testování hypotéz o normalitě rozdělení sledovaných dat byl v této diplomové práci využit Anderson-Darling test v softwaru Minitab. Zamítnutí či nezamítnutí hypotézy se hodnotilo pomocí hodnoty spolehlivosti P-Value. Byla-li výsledkem testu hodnota spolehlivosti  $P < 0,05$ , pak se hypotéza o normálním rozdělení sledovaných dat zamítla. V opačném případě byla podmínka normálního rozdělení dat splněna. Na obrázku 5-1 v kapitole 5 je zobrazen graf Anderson-Darlingova testu, kde hodnota spolehlivosti P je zobrazena v tabulce vpravo.

Stejně jako v případě testu normality, byly i parametrické a neparametrické testy vyhodnocovány na základě hodnoty spolehlivosti P. Pokud byla v těchto testech hodnota  $P < 0,05$ , pak byla chyba měření statisticky významnou (systematickou). V opačném případě byla chyba měření náhodná. Protože se v měření vyskytovala pouze normálně rozložená data, byl v rámci řešení diplomové práce pro vyhodnocení systematických či náhodných chyb zvolen parametrický Studentův t-test.

#### 4.4.4 Použité grafy

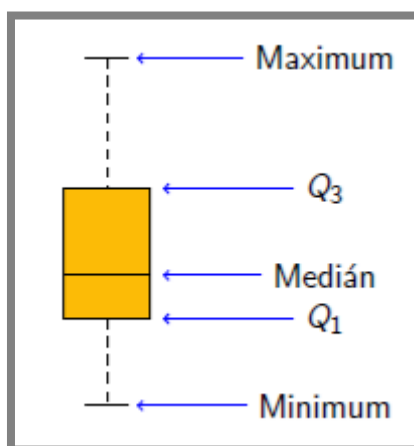
Získané výsledky byly zaneseny do krabicových grafů. Tyto grafy umožňují analyzovat data z hlediska polohy, variability a souměrnosti. Poloha vyjadřuje střed celé skupiny údajů, kolem kterého všechny hodnoty kolísají (v krabicovém grafu je středem myšlen medián). Variabilita určuje rozptyl hodnot kolem zvoleného středu skupiny.

Na obrázku 4-16 je ukázka krabicového grafu, jenž definuje jednu sérii opakovaných měření. Hodnoty maxima a minima označují měření, při nichž vznikla největší a nejmenší odchylka.  $Q_1$  je označení pro první kvartál – pod touto hodnotou se nachází 25 % všech opakovaných měření.  $Q_3$  označuje třetí kvartál – pod touto hodnotou se nachází 75 % všech opakovaných měření. Medián je hledaná statistická veličina, definována jako hodnota, která se nachází přesně uprostřed všech hodnot seřazených do neklesající posloupnosti. Její matematické vyjádření pro sudý počet hodnot je následující:

$$Me(x) = \frac{X_{(\frac{N}{2})} + X_{(\frac{N}{2})+1}}{2} \quad (16)$$

kde:

$Me(x)$	(-)	je medián
$X$	(-)	hodnota v neklesající posloupnosti
$N$	(-)	index udávající pořadí čísla v posloupnosti



Obr. 4-16 krabicový graf

### 4.4.5 Hodnocení experimentů a využití získaných dat

Do krabicových grafů (viz kapitola 4.4.4) byly zaneseny údaje o průměrné odchylce referenčních bodů – parametr, jež vyhodnocuje systém Tritop. Aby došlo k podložení těchto dat, byl pro většinu experimentů vytvořen další krabicový graf, do něhož byly zaneseny výsledky odchylek měření, získaných manuálně – odečtením z měřítkových tyčí (viz kapitola 4.4.2). Do takto vytvořených grafů byla zanesena data buďto ze všech metrových měřítkových tyčí (celkově 4 tyče), nebo data z dvoumetrové tyče.

Grafy obsahující i manuálně získaná data byly použity pro hodnocení experimentů s počtem fotografií, vzdáleností, opakovatelností měření a počtem vázacích bodů. Experiment s počtem měřítkových tyčí tato data neobsahuje, protože jednotlivé tyče byly v průběhu experimentu využívány pro tvorbu měřítka objektu. Experiment s barevným filtrem byl prováděn v době, kdy autor neměl přístup ke všem měřítkovým tyčím, proto také neobsahuje manuálně získaná data.

Parametr průměrná odchylka bodů obrazu (average image point accuracy) byl využit pro testování predikčních vztahů. Vztah od společnosti GOM (16) i vztah, jež popsal ve své práci **Fraser** (17) vyžadují použití tohoto parametru. Standardně se pro predikční vztahy tento parametr odhaduje, na základě zkušeností, které uživatel s daným fotogrammetrickým systémem má. Je však důležité zdůraznit, že tento parametr výrazně ovlivňuje predikční schopnost obou vztahů. Pro hodnocení přesnosti obou vztahů byl proto tento parametr odvozen přímo z provedených měření.

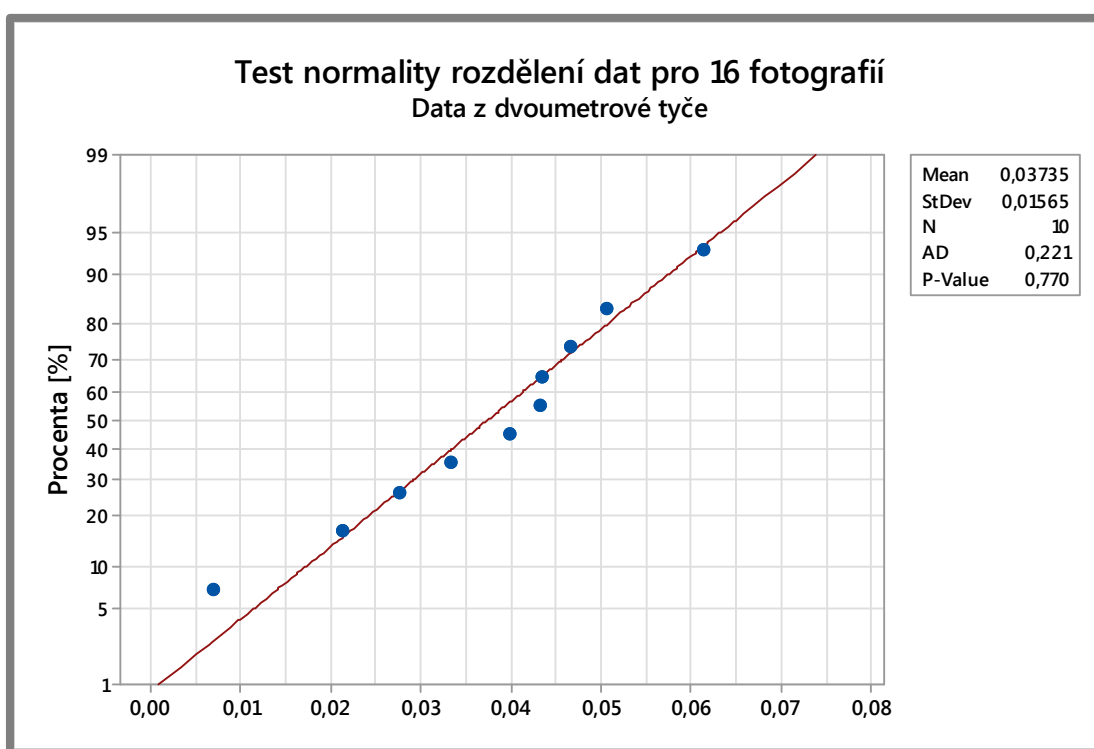
## 5 VÝSLEDKY

V následujících odstavcích jsou uvedeny výsledky a zhodnocení všech provedených experimentů. V úvodní části této kapitoly je statistická analýza dat získaných z měřítkových tyčí. Výsledkem této analýzy zjištění, zda byly odchylky měření zatíženy systematickou či náhodnou chybou. V dalších částech jsou popsány výsledky měření experimentů s počtem fotografií, vázacích bodů, měřítkových tyčí, dále pak experimenty se vzdáleností, opakovatelnosti měření a barevným filtrem. V závěrečné části jsou analyzovány všechny predikční vztahy získané z rešerše.

### 5.1 Statistické zhodnocení dat získaných z měřítkových tyčí

#### 5.1.1 Test normality

Odchyly měření získané z měřítkových tyčí se od odchylek vyhodnocených softwarem Tritop liší. Tritop vyhodnotí odchylku měření vždy jako průměrné kladné číslo – není možné určit, jaký typ chyb se v měření vyskytl. U dat získaných z měřítkových tyčí je však známá přesná hodnota, ke které by se data měla blížit. Je tak možné určit, zda jsou odchylky měření vzhledem k nominální hodnotě kladné či záporné. Díky tomu je možné na těchto datech statisticky určit, zda jsou získané odchylky měření zatíženy systematickou či náhodnou chybou.



Obr. 5-1 Test normality dat měření pro 16 fotografií na dvoumetrové tyči

Výsledky hodnot P pro všechny experimenty jsou zobrazeny v tabulkách 5-1 až 5-4.

Tab. 5-1 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro měření se vzdáleností

Anderson-Darling test		Hodnota P pro měření se vzdáleností			
Měřítková tyč v ose:	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m	3,5 m
<b>X</b>	0,135	0,128	0,785	0,079	0,848
<b>Y</b>	0,214	0,276	0,775	0,081	0,514
<b>Z</b>	0,878	0,13	0,145	0,113	0,094
<b>XY</b>	0,434	0,657	0,107	0,071	0,609
<b>XYZ</b>	0,399	0,433	0,537	0,493	0,362

Tab. 5-2 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro měření s počty fotografií

Anderson-Darling test		Hodnota P pro měření s počty fotografií			
Měřítková tyč v ose:	16 fotografií	19 fotografií	22 fotografií	28 fotografií	40 fotografií
<b>X</b>	0,323	0,284	0,813	0,128	0,578
<b>Y</b>	0,378	0,708	0,574	0,276	0,239
<b>Z</b>	0,174	0,351	0,34	0,13	0,636
<b>XY</b>	0,853	0,1	0,706	0,657	0,782
<b>XYZ</b>	0,77	0,672	0,261	0,433	0,876

Tab. 5-3 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro měření s počty vázacích bodů

Anderson-Darling test		Hodnota P pro měření s počty vázacích bodů			
Měřítková tyč v ose:	31 značek	44 značek	67 značek	84 značek	100 značek
<b>X</b>	0,409	0,105	0,128	0,951	0,656
<b>Y</b>	0,238	0,194	0,276	0,657	0,786
<b>Z</b>	0,138	0,077	0,13	0,583	0,809
<b>XY</b>	0,382	0,3	0,657	0,735	0,547
<b>XYZ</b>	0,507	0,261	0,433	0,779	0,15

Tab. 5-4 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro test opakovatelnosti měření

Anderson-Darling test	Hodnota P pro test opakovatelnosti měření	
Měřítková tyč v ose:	Standardní měření z ruky	Měření s použitím stativu a rotačního stolu
<b>X</b>	0,128	0,679
<b>Y</b>	0,276	0,519
<b>Z</b>	0,13	0,147
<b>XY</b>	0,657	0,541
<b>XYZ</b>	0,433	0,891

U hodnot získaných z měřítkových tyčí byla po provedení Anderson-Darling testu hodnota P pro všechny provedené experimenty vyšší než 0,05, což znamená, že data jsou rozdělena normálně. K vyhodnocení systematické či náhodné chyby tedy lze ve všech případech využít studentův T-test.

## 5.1.2 Vyhodnocení systematické a náhodné chyby

V následujících tabulkách jsou uvedeny P hodnoty studentova T-testu pro data získaná z měřítkových tyčí. V případě, že mají data nízkou hodnotu (nižší než 0,05), se jedná o systematické chyby měření. Pokud je hodnota P vyšší než 0,05, je měření zatíženo náhodnou chybou.

Tab. 5-5 P hodnoty T-testu pro měření se vzdáleností

T-test	Hodnota P pro měření se vzdáleností				
	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m	3,5 m
Měřítková tyč v ose:					
X	0,001	0,036	0,214	0,000	0,002
Y	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000
Z	0,305	0,367	0,645	0,531	0,521
XY	0,000	0,005	0,000	0,007	0,000
XYZ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 5-6 P hodnoty T-testu pro měření s počty fotografií

T-test	Hodnota P pro měření s počty fotografií				
	16 fotografií	19 fotografií	22 fotografií	28 fotografií	40 fotografií
Měřítková tyč v ose:					
X	0,000	0,000	0,224	0,036	0,044
Y	0,003	0,001	0,000	0,003	0,004
Z	0,160	0,009	0,091	0,367	0,055
XY	0,001	0,000	0,000	0,005	0,000
XYZ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 5-7 P hodnoty T-testu pro měření s počty vázacích bodů

T-test	Hodnota P pro měření s počty vázacích bodů				
	31 značek	44 značek	67 značek	84 značek	100 značek
Měřítková tyč v ose:					
X	0,007	0,857	0,036	0,001	0,030
Y	0,015	0,000	0,003	0,000	0,003
Z	0,534	0,386	0,367	0,002	0,941
XY	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
XYZ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tab. 5-8 P hodnoty T-testu pro test opakovatelnosti měření

T-test	Hodnota P pro test opakovatelnosti měření	
	Standardní měření z ruky	Měření s použitím stativu a rotačního stolu
X	0,036	0,265
Y	0,003	0,019
Z	0,367	0,125
XY	0,005	0,003
XYZ	0,000	0,00

Na základě podrobení dat z měřítkových tyčí studentovým T-testem lze říci, že většina měření byla zatížena systematickou chybou (hodnota  $p < 0,05$ ). Z dat také vyplývá, že měřená tyč v ose Z měla naopak ve většině případů hodnotu P vyšší než 0,05, měření z této tyče tedy vykazovalo náhodné chyby měření.

Systematické chyby neodpovídají Gaussově náhodnému uspořádání dat. V případě měření s fotoaparátém Nikon D300s vykazovala většina odchylek kladnou hodnotu – měřená vzdálenost byla větší, než nominální. Systematické chyby lze v některých případech zredukovat vhodnou softwarovou úpravou. Vzhledem k faktu, že na ose Z byly z větší části náhodné chyby, zatímco v ostatních měřených osách (X, Y, XY, XYZ) byly nalezeny systematické chyby, lze předpokládat, že posun bodů v horizontálním směru snímku je příliš velký. Tento posun může být způsobený nedostatečnou kalibrací tangenciální složky distorze objektivu.

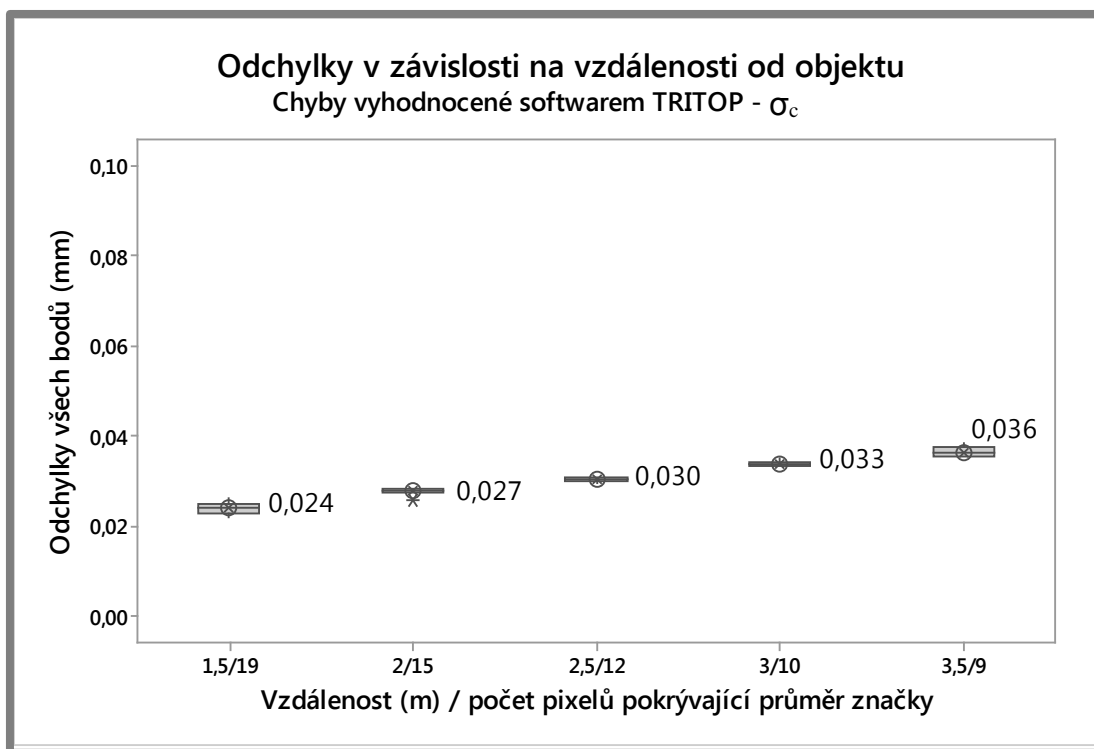
## 5.2 Vliv vybraných faktorů na přesnost fotogrammetrického měření

### 5.2.1 Analýza odchylek měření v závislosti na vzdálenosti od objektu

Cílem experimentu bylo zjistit, jaký vliv má snímací vzdálenost na přesnost měření systému Tritop. Grafy prezentující výsledky měření obsahují kromě informace o snímané vzdálenosti také informaci o počtu pixelů pokrývajících průměr referenčních značek. Oba parametry jsou totiž vzájemně provázány. V tabulce 5-9 jsou uvedeny hodnoty odchylek, jež byly vyhodnoceny softwarem Tritop. Tyto hodnoty byly zaneseny do krabicového grafu na obrázku 5-2.

Tab. 5-9 Odchylky v závislosti na vzdálenosti od objektu (hodnoty z Tritopu)

Vzdálenost (m)	Min (mm)	1. Kvartil (mm)	Medián (mm)	3. Kvartil (mm)	Max (mm)	Rozpětí (mm)
1,5	0,02201	0,023255	0,024005	0,02454	0,02609	0,00408
2	0,0257	0,0274425	0,027895	0,02806	0,02834	0,00264
2,5	0,02934	0,0299475	0,030375	0,0306475	0,03117	0,00183
3	0,03286	0,03324	0,03341	0,03426	0,03481	0,00195
3,5	0,03511	0,035648	0,036245	0,037238	0,03828	0,00317

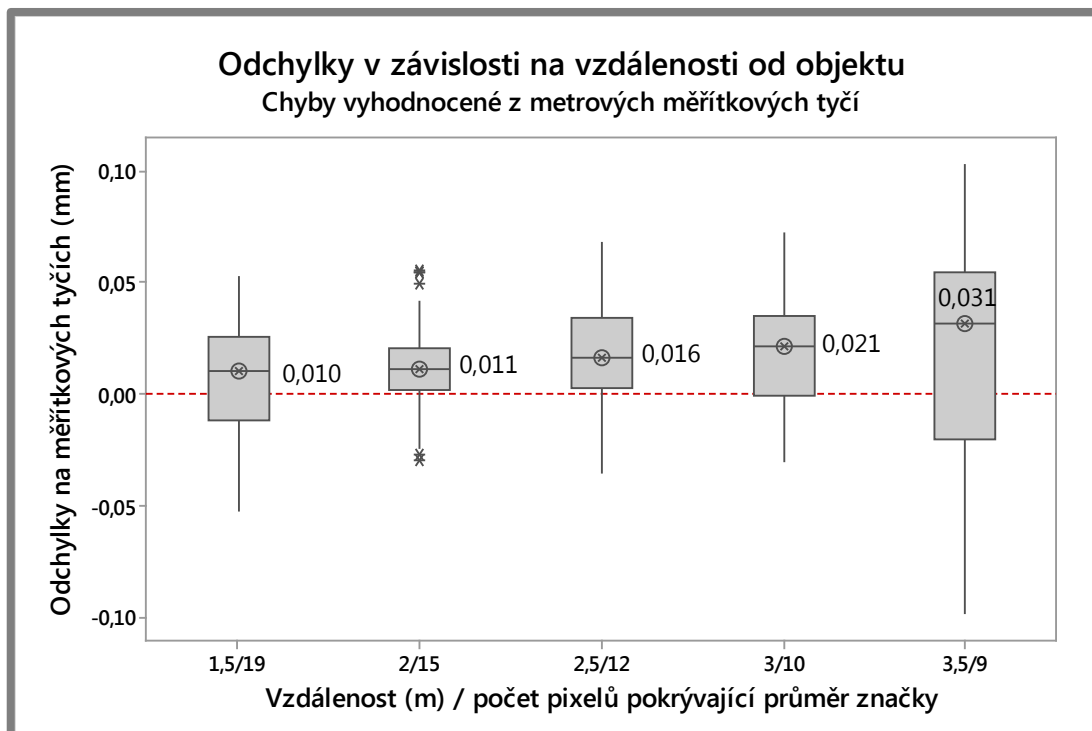


Obr. 5-2 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z Tritopu

Tabulka 5-10 obsahuje hodnoty odchylek měření, jež byly odečteny z metrových měřítkových tyčí a vstupují do krabicového grafu na obrázku 5-2.

Tab. 5-10 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z metrových měřítkových tyčí

Vzdálenost (m)	Min (mm)	1. Kvartil (mm)	Medián (mm)	3. Kvartil (mm)	Max (mm)	Rozpětí (mm)
1,5	-0,053	-0,0114	0,01075	0,024725	0,0531	0,1061
2	-0,0298	0,0017	0,0113	0,020325	0,05306	0,08286
2,5	-0,0359	0,00355	0,0164	0,029175	0,0687	0,1046
3	-0,03	0,0042	0,0215	0,0344	0,073	0,1032
3,5	-0,0987	-0,0171	0,03155	0,05335	0,1033	0,202

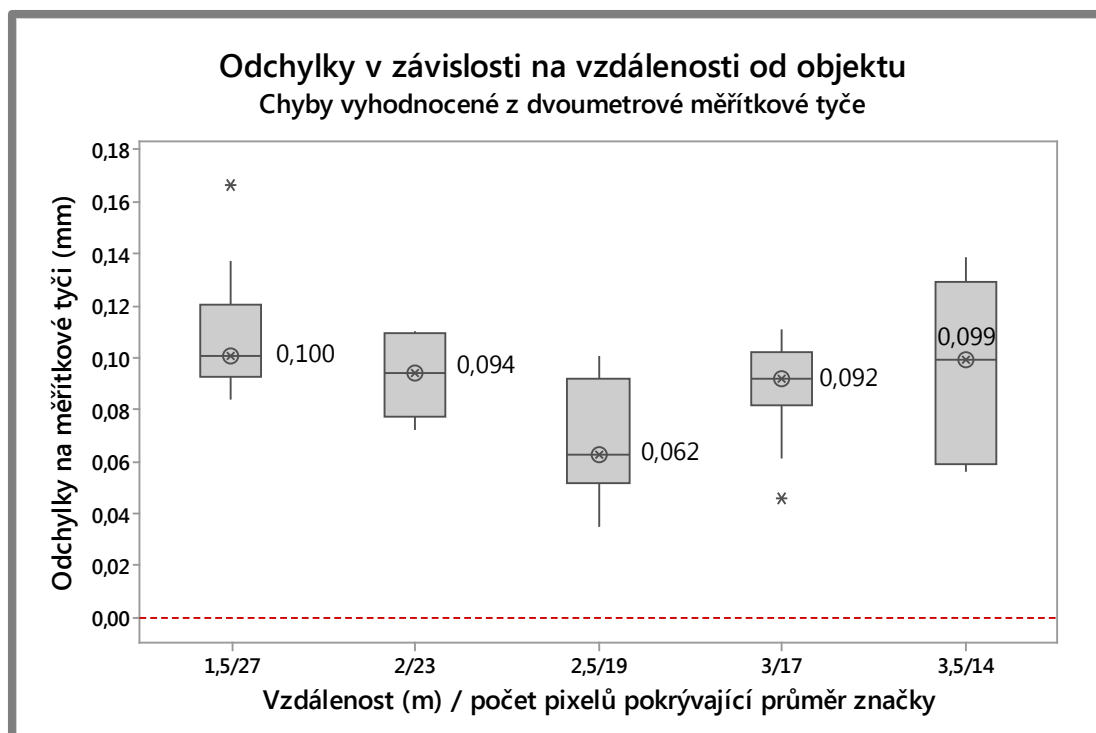


Obr. 5-3 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z metrových měřtkových tyčí

Tabulka 5-11 obsahuje hodnoty odchylek měření, jež byly odečteny z dvoumetrové měřtkové tyče a vstupují do krabicového grafu na obrázku 5-4.

Tab. 5-11 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z dvoumetrové měřtkové tyče

Vzdálenost [m]	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
1,5	0,0841	0,093775	0,1003	0,10965	0,1369	0,0528
2	0,0722	0,0777	0,9415	0,10828	0,1098	0,0376
2,5	0,0347	0,053925	0,0624	0,0861	0,1004	0,0657
3	0,0609	0,08875	0,09175	0,09955	0,111	0,0501
3,5	0,0559	0,065175	0,099	0,1244	0,139	0,0831



Obr. 5-4 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče

Z dat vyhodnocených systémem Tritop je patrná téměř lineární závislost odchylek měření na vzdálenosti od objektu, nicméně rozdíly mezi jednotlivými měřeními jsou velmi malé. U dat získaných odečtením z metrových měřítkových tyčí je opět patrná téměř lineární závislost, rozdíl mediánových hodnot a rozptyl dat je však výraznější než v předchozím případě. Největší přesnosti se dosahuje ve vzdálenosti 1,5 m od objektu, kdy byl průměr referenčních značek pokryt 19 pixely. Pokud by byl objekt focen z menší vzdálenosti než 1,5 m, předpokládá se naopak zhoršení přesnosti měření, protože by na fotografii měřená tyč nebyla viditelná celá, ale pouze její část. Vzdálenost by pak byla určena ze dvou fotografií, které by mohly vnést do měření chybu vlivem resekce (orientace fotografie v prostoru). Tento předpoklad potvrzuje měření s dvoumetrovou tyčí – medián odchylek je při nejmenší měřené vzdálenosti (1,5 m) vyšší než u ostatních měření. Nejlepších výsledků bylo při měření dvoumetrové tyče dosaženo ve vzdálenosti 2,5 m od objektu, kdy průměr referenční značky opět pokrývalo 19 pixelů (referenční značky na dvoumetrové tyči měly větší průměr než na metrových tyčích). Měření provedená blíže či dále vykazují vyšší hodnotu odchylek.

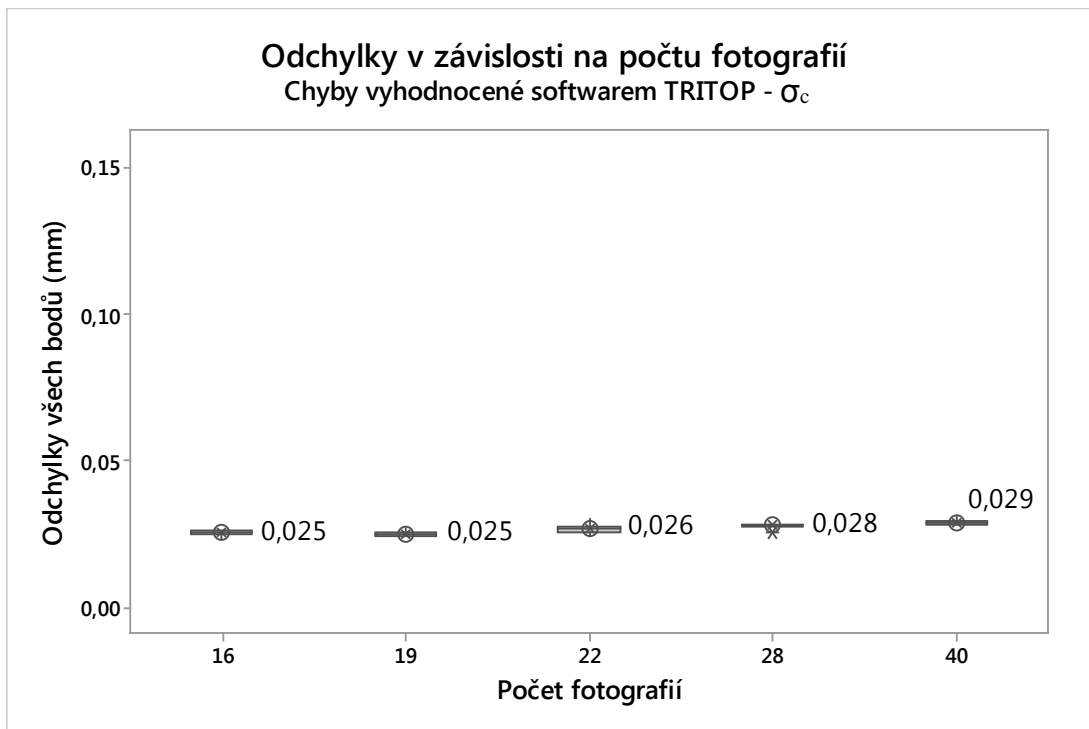
### 5.2.2 Analýza odchylek měření v závislosti na počtu fotografií

5.2.2

Účelem experimentu bylo zjistit, jak počet fotografií, formující výsledný model, ovlivňuje měření se systémem Tritop. V tabulce 5-12 jsou uvedeny hodnoty odchylek, vyhodnocených softwarem Tritop Professional ( $\sigma_c$ ). Tyto hodnoty byly zaneseny do krabicového grafu na obrázku 5-5.

Tab. 5-12 Odchyly v závislosti na počtu fotografií - hodnoty z Tritopu

Počet fotografií	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
16	0,02351	0,024604	0,02509	0,025498	0,02633	0,00282
19	0,02358	0,02398	0,02475	0,0251	0,02684	0,00326
22	0,02422	0,025655	0,026455	0,0274275	0,02982	0,0056
28	0,0257	0,0274425	0,027895	0,02806	0,02834	0,00264
40	0,02796	0,0284375	0,028795	0,0292975	0,03038	0,00242

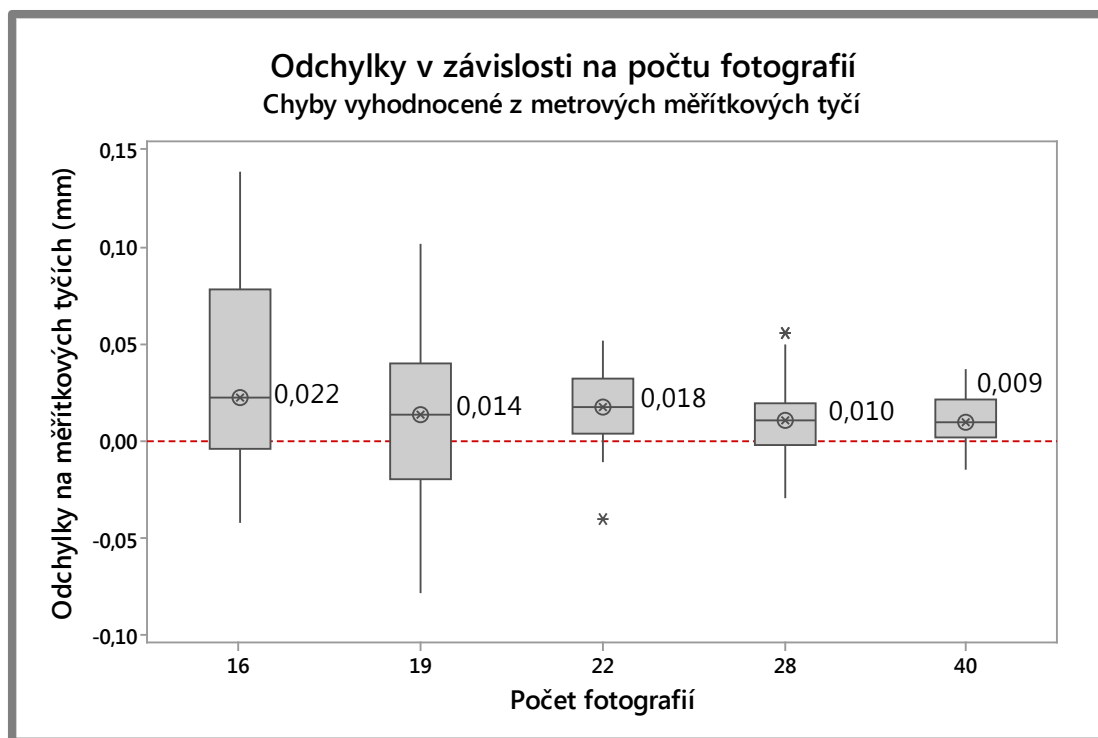


Obr. 5-5 Odchyly v závislosti na počtu fotografií - hodnoty z Tritopu

Tabulka 5-13 obsahuje hodnoty odchylek měření, jež byly odečteny z metrových měřítkových tyčí a vstupují do krabicového grafu na obrázku 5-6.

Tab. 5-13 Odchyly v závislosti na počtu fotografií - hodnoty z metrových měřítkových tyčí

Počet fotografií	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
16	-0,0428	-0,003925	0,0224	0,07645	0,1382	0,181
19	-0,0784	-0,0155	0,01355	0,03775	0,1018	0,1802
22	-0,0407	0,00425	0,0175	0,03025	0,0514	0,0921
28	-0,0298	-0,00108	0,01035	0,01827	0,0555	0,0853
40	-0,015	0,000192	0,0094	0,02047	0,0372	0,0522



Obr. 5-6 Odchyly v závislosti na počtu fotografií – hodnoty z metrových měřtkových tyčí

Z dat vyhodnocených systémem Tritop (obr. 5-5) vyplývá, že přesnost měření není zlepšená v důsledku narůstajícího počtu fotografií, naopak dochází k mírnému zhoršení mediánu odchytek (v řádech tisícín). To je však v rozporu s odbornou literaturou [25]. Data získaná z měřtkových tyčí (obr. 5-6) naopak poukazují na fakt, že přesnost měření se zlepšuje se vzrůstajícím počtem fotografií – snižuje se rozptyl dat a medián odchytek. Větší vypovídající hodnotu mají data odečtená z měřtkových tyčí, protože zobrazují reálnou změřenou odchytku. Graf na obrázku 5-6 zároveň potvrzuje, že počet 28 fotografií, který doporučuje společnost GOM, je pro provedení přesného měření dostatečný. U experimentu se 40 fotografiemi totiž došlo jen k nepatrnému snížení mediánu a rozptylu odchytek.

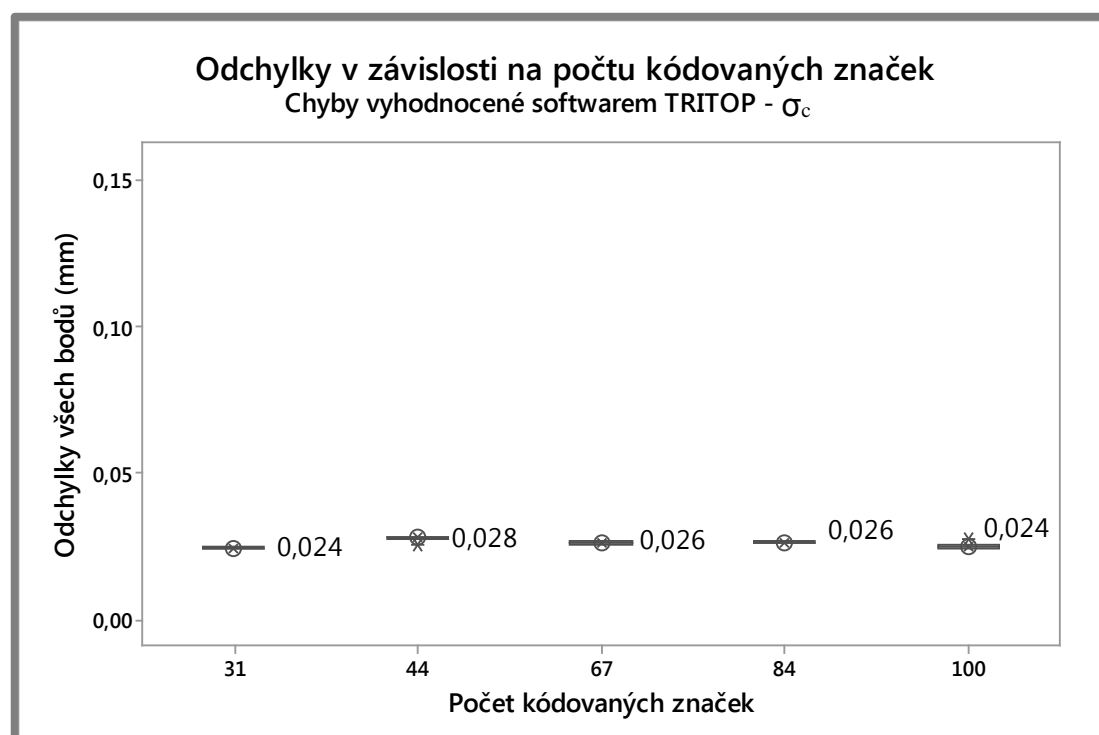
### 5.2.3 Analýza odchytek měření v závislosti na počtu vázacích bodů

5.2.3

Cílem experimentu bylo zjistit, jak počet vázacích bodů umístěných na měřeném objektu ovlivní výslednou přesnost systému Tritop. Tabulka 5-13 obsahuje hodnoty odchytek měření, jež byly vyhodnocené systémem Tritop a vstupují do grafu na obrázku 5-7. Tabulka 5-15 obsahuje data odečtená z měřtkových tyčí, tato data jsou zobrazena na obrázku 5-8.

Tab. 5-14 Odchytky v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z Tritopu

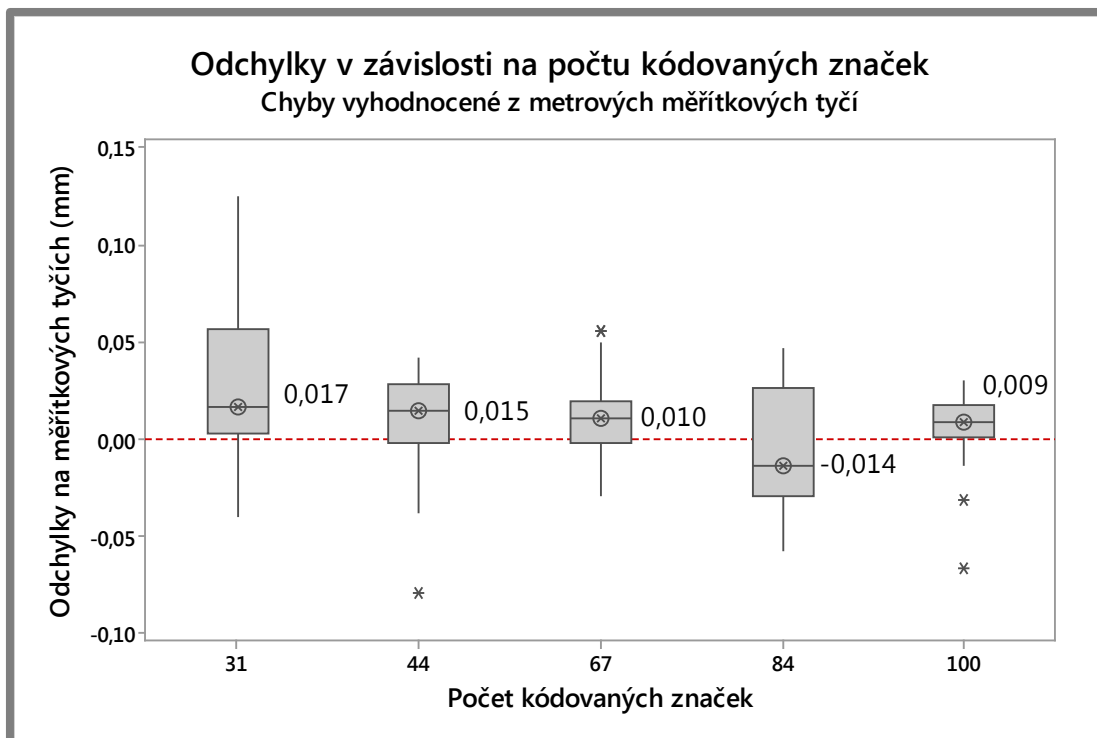
Počet vázacích bodů	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
31	0,02331	0,0239275	0,02433	0,024495	0,0249	0,00159
46	0,0251	0,0273	0,02791	0,02808	0,02834	0,00324
67	0,0257	0,025625	0,026255	0,0266	0,02688	0,00118
84	0,02589	0,026	0,026215	0,026583	0,02694	0,00105
100	0,02339	0,0240625	0,024455	0,02486	0,02736	0,00397



Obr. 5-7 Odchytky v závislosti na počtu vázacích bodů - hodnoty z Tritopu

Tab. 5-15 Odchytky v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z metrových měřítkových tyčí

Počet vázacích bodů	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
31	-0,0406	-0,001575	0,01665	0,031125	0,125	0,1656
46	-0,0794	-0,001975	0,0146	0,027625	0,042	0,1214
67	-0,0298	-0,001075	0,01035	0,018275	0,0555	0,0853
84	-0,0584	-0,0284	-0,01425	0,0224	0,0465	0,1049
100	-0,0667	0,0021	0,0085	0,01595	0,0296	0,0963



Obr. 5-8 Odchylky v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z metrových měřtkových tyčí

Z hodnot získaných systémem Tritop (obr. 5-7) není patrný vliv počtu kódovaných značek na přesnost měření. Mezi jednotlivými experimenty je sice malý rozdíl v přesnosti měření (v řádech tisícín), není však patrná závislost jednotlivých měření na sobě. Rozdíly v přesnosti mohou být způsobeny jiným faktorem – experimenty byly v tomto případě prováděny v průběhu několika dnů, s objektem bylo manipulováno a nemusel být vždy snímán ve stejné dráze a zcela stejné vzdálenosti. Data získaná z měřtkových tyčí (obr. 5-8) naznačují vliv počtu kódovaných značek na přesnost měření. Postupné navyšování kódovaných značek vedlo ke zpřesnění mediánu odchylek a ke zmenšení rozptylu hodnot. Experiment s 84 značkami narušil trend postupného zpřesňování výsledků měření. Z výsledků plyne, že počet kódovaných značek může mírně zpřesnit výsledek měření, nejedná se však o tolik významný faktor, jako v případě předchozích dvou experimentů.

#### 5.2.4 Analýza odchylek měření v závislosti na počtu měřtkových tyčí

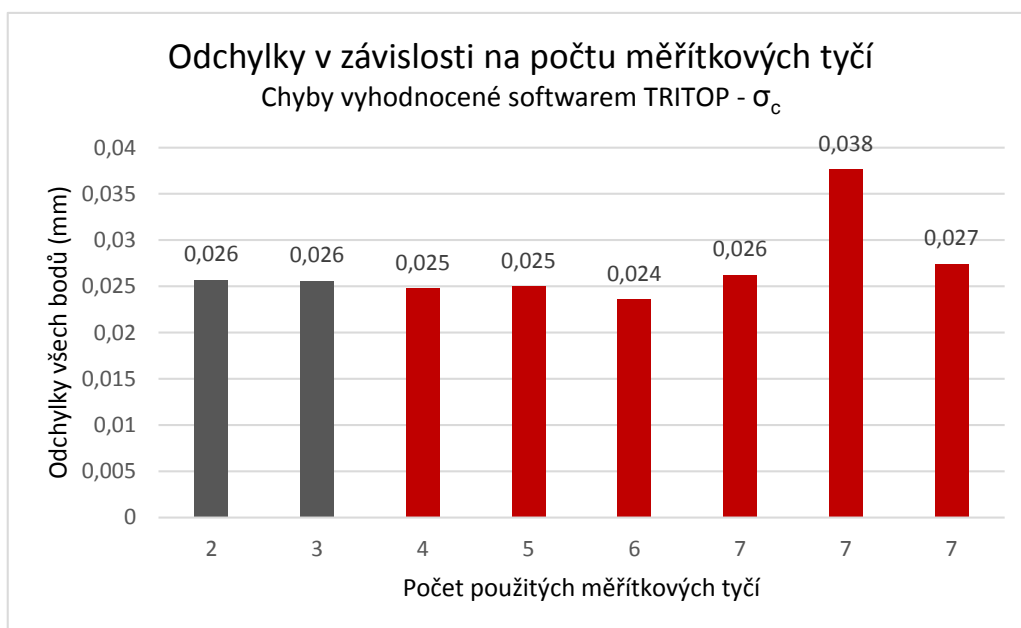
5.2.4

Měřtkové tyče slouží k určení výsledného měřítka projektu. Matematickému modelu stačí pro vytvoření měřítka pouze jedna měřtková tyč. Společnost GOM však doporučuje měření provádět s použitím dvou tyčí. Podle manuálu pro systém Tritop [4] je hlavním důvodem pro použití druhé tyče ověření, zda jsou údaje z první tyče zadány do softwaru správně. Eliminuje se tím tedy vliv lidského faktoru. Kromě toho jsou zde i další důvody, které manuál neuvádí. Z toho důvodu byl proveden experiment, jehož podstatou bylo zjistit, zda vyšší počet měřtkových tyčí přinese i zpřesnění měření systému Tritop. V tabulce 5-16 jsou uvedeny hodnoty odchylek bodů získaných ze softwaru Tritop Professional. V tabulce jsou uvedeny i odchylky na měřtkových tyčích z jednotlivých měření. Jednotlivé sloupce tabulky jsou barevně

odlišené - shodná barva sloupců označuje data z tyčí, které spolu tvoří pár. Součástí analýzy dat bylo i zjištění souvislostí mezi daty z jednotlivých párů tyčí. Červenou barvou jsou v tabulce označena data, která překročila toleranci pro velikost odchylky měřítkové tyče (vyšší než 25  $\mu\text{m}$ ). Graf na obrázku 5-9 zobrazuje odchylky bodů vyhodnocených softwarem Tritop. Červenou barvou jsou opět označena měření, v nichž došlo k překročení tolerance pro velikost odchylky měřítkové tyče.

Tab. 5-16 Odchylky v závislosti na počtu měřítkových tyčí

Počet měřítkových tyčí	$\sigma_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	Tyč 1 [ $\mu\text{m}$ ]	Tyč 2 [ $\mu\text{m}$ ]	Tyč 3 [ $\mu\text{m}$ ]	Tyč 4 [ $\mu\text{m}$ ]	Tyč 5 [ $\mu\text{m}$ ]	Tyč 6 [ $\mu\text{m}$ ]	Tyč 7 [ $\mu\text{m}$ ]
2	25,7	11,2	-11,2					
3	25,6	-5,89	0,93	4,97				
4	24,79	-36,1	-32,44	2,35		32,32		
5	25,04	-18,69	-9,76	-19,08		35,45	-25,14	
6	23,63	-12,78	-13,73	24,94	9,02	50	-42,06	
7	26,25	-13,35	-8,24	-24,16	14,67	28,25	-32,88	6,10
7	37,64	12,51	4,75	109,5	23,90	8,78	1,83	132,32
7	27,43	-32,43	-6,02	-50,46	11,9	36,7	-16,2	28,68

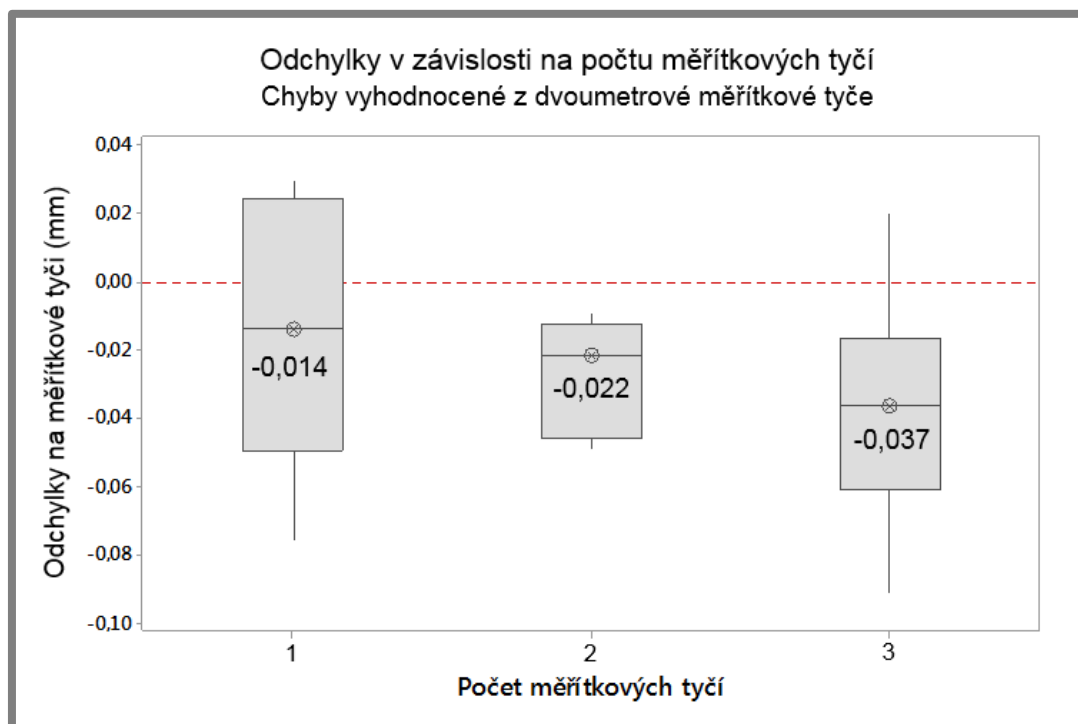


Obr. 5-9 Odchylky v závislosti na počtu měřítkových tyčí – hodnoty z Tritopu

Z výsledků vyplývá, že vyšší počet měřítkových tyčí v měření nepřinesl zpřesnění výsledků. Přestože byla v měření s šesti měřítkovými tyčemi odchylka nejmenší, u sedmi použitých měřítkových tyčí byla odchylka zase největší. Nedá se tedy říct, že by s vyšším počtem měřítkových odchylky klesaly. Doposud však bylo měření hodnoceno pouze na základě dat získaných softwarem Tritop. Byl proto proveden další experiment, u kterého byly sledovány odchylky na dvoumetrové měřítkové tyči. Výsledky tohoto experimentu byly zaneseny do tabulky 5-17 a grafu na obrázku 5-10.

**Tab. 5-17** Odchylky v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z metrových měřítkových tyčí

Počet měřítkových tyčí	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
1	-0,0759	-0,0412	-0,0139	0,0226	0,029	0,1049
2	-0,0492	-0,0447	-0,0218	-0,013	-0,0097	0,0395
3	-0,0916	-0,0513	-0,0368	-0,0292	0,0197	0,1113



**Obr. 5-10** Odchylky v závislosti na počtu měřítkových tyčí – hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče

Jak je patrné z grafu na obrázku 5-10, ani data vyhodnocená na základě odchylek z měřítkové tyče nenaznačují, že by se s rostoucím počtem měřítkových tyčí zlepšovala přesnost měření systému Tritop. Data naopak ukazují negativní trend vzrůstajících odchylek.

Další poznatek plynoucí z výsledků měření je, že při vyšším počtu měřítkových tyčí (4 a více) se vyskytovala výrazná odchylka na některé z měřítkových tyčí (viz tabulka 5-17). Tritop v takovém případě označí měření za nepřesné. Při opakování měření se sedmi tyčemi se projevil velmi výrazný rozptyl odchylek mezi měřeními – odchylky všech bodů vyhodnocené softwarem Tritop měly hodnoty mezi 0,026 až 0,037 mm. Z toho důvodu lze soudit, že vysoký počet měřítkových tyčí zhoršuje i opakovatelnost měření.

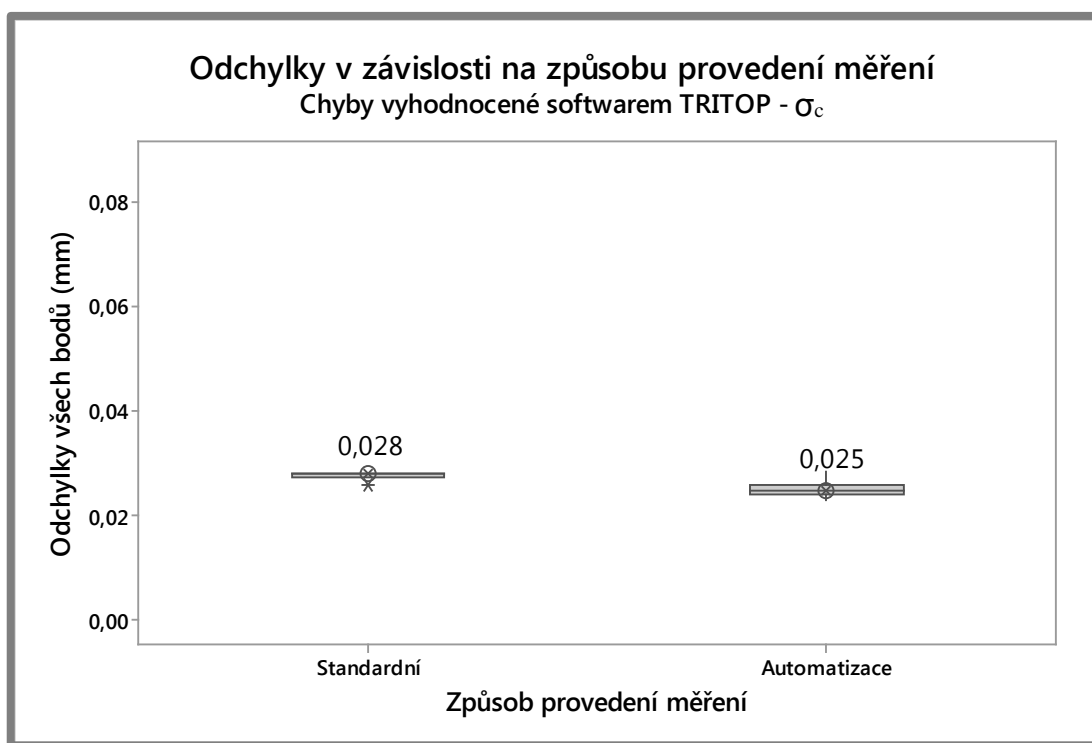
Při použití dvou měřítkových tyčí byly výsledné odchylky na tyčích vždy shodné, ale měly opačné znaménko. Při použití vyššího počtu měřítkových tyčí nebyly mezi jednotlivými hodnotami odchylek shledány souvislosti.

### 5.2.5 Test opakovatelnosti měření

Test opakovatelnosti měření srovnal měření provedené z ruky (což odpovídá standardnímu měření) s měřením, kdy byl použit rotační stůl a stativ (využita automatizace měření). Výsledky byly zaznamenány do krabicových grafů na obrázcích 5-11, 5-12 a 5-13. Hodnoty odchylek jsou uvedeny v tabulkách 5-18 a 5-19 a 5-20.

Tab. 5-18 Odchylky v závislosti na způsobu měření (hodnoty z Tritopu)

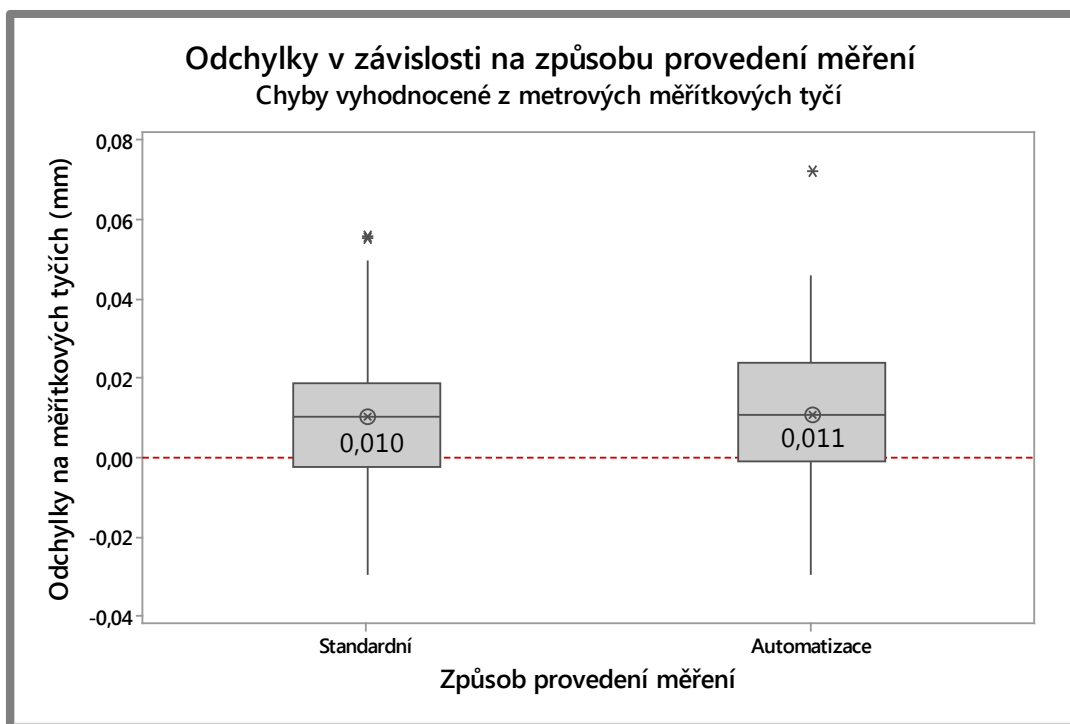
Způsob měření	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
Standardní	0,0257	0,0274425	0,027895	0,02806	0,02834	0,00264
Automatizace	0,02298	0,02428	0,0245	0,02517	0,02837	0,00539



Obr. 5-11 Odchylky v závislosti na způsobu měření (hodnoty z Tritopu)

Tab. 5-19 Odchylky v závislosti na způsobu měření – hodnoty z metrových měřítkových tyčí

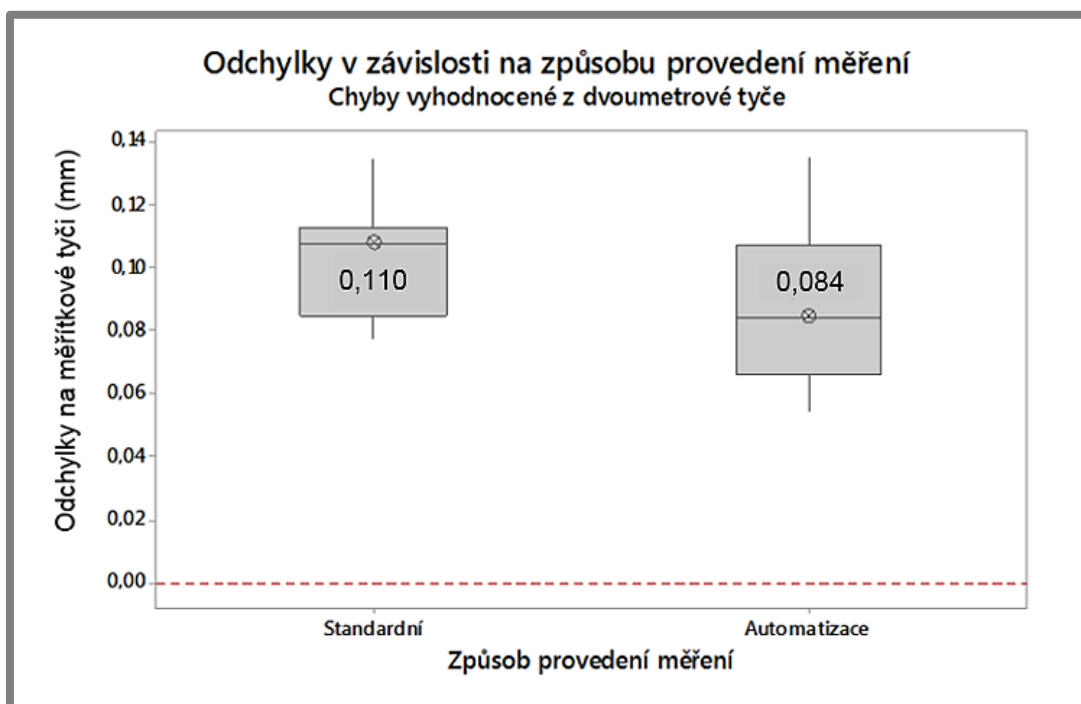
Způsob měření	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
Standardní	-0,0298	-0,00108	0,01035	0,018275	0,0555	0,0853
Automatizace	-0,0297	-0,0007	0,01185	0,02295	0,0721	0,1018



Obr. 5-12 Odchyly v závislosti na počtu měřítkových tyčí - hodnoty z metrových měřítkových tyčí

Tab. 5-20 Odchyly v závislosti na způsobu měření – hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče

Způsob měření	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
Standardní	0,0775	0,090625	0,10765	0,1097	0,1351	0,0576
Automatizace	0,0543	0,069425	0,08435	0,101025	0,1347	0,0804



Obr. 5-13 Odchyly v závislosti na počtu měřítkových tyčí - hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče

Z výsledků měření je patrné, že automatizace měření nepřispěla k lepší opakovatelnosti výsledků. Naopak se rozptyl odchylek u dat ze softwaru Tritop mírně navýšil. Tento jev může být způsoben tím, že se rotační stůl s přípravkem při otáčení rozkmital a i přes to, že byl focen v klidové poloze, mohly být stále na přípravku přítomné drobné vibrace. Dalším problémem bylo, že rotační stůl nedokázal přípravek otočit o přesně stanovený úhel (45 °), ale byl vždy vlivem svého momentu setrvačnosti mírně pootočen o větší hodnotu úhlu. Z toho důvodu nebyla v jednotlivých experimentech pozice snímků vždy stejná a tím mohla být degradována opakovatelnost měření.

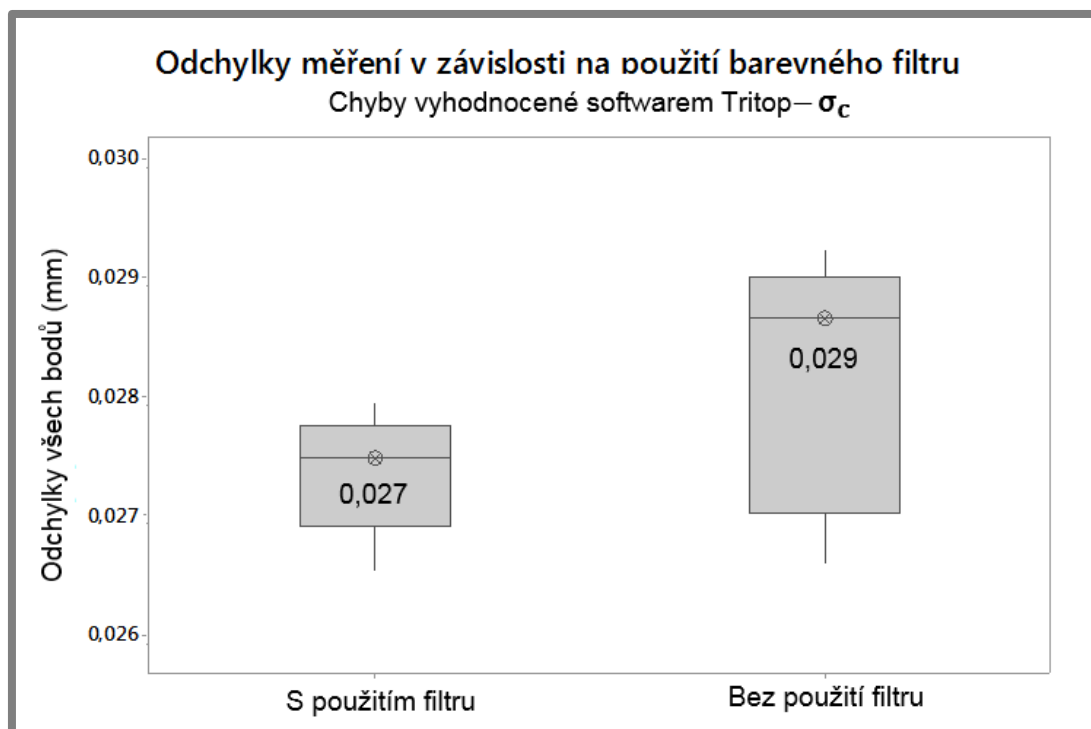
Ze získaných dat dále plyne, že i přes horší opakovatelnost měření bylo docíleno přesnějších výsledků s použitím rotačního stolku a stativu. Přesnější výsledky vykazují data z Tritopu i odečtená data z dvoumetrové měřítkové tyče. U dat z metrových tyčí není patrný výraznější rozdíl mezi rozpětím dat ani přesností měření.

### 5.2.6 Vliv barevného filtru

Experiment s použitím barevného filtru byl proveden z důvodu potlačení chromatické aberace na fotografiích. Chromatická aberace je způsobena rozdílnou polohou ohniska pro různá barevná spektra a může negativně ovlivnit přesnost měření fotogrammetrického systému. Pro experiment byl zvolen zelený externí filtr objektivu, protože podle literatury bylo s jeho použitím dosaženo nejlepších výsledků [16]. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 5-21 a obrázku 5-13.

Tab. 5-21 Odchylky v závislosti na použití barevného filtru – data z Tritopu

Způsob měření	Min [mm]	1. Kvartil [mm]	Median [mm]	3. Kvartil [mm]	Max [mm]	Rozpětí [mm]
S filtrem	0,02662	0,02691	0,02744	0,02776	0,02803	0,00141
Bez filtru	0,02668	0,02725	0,02873	0,02901	0,02931	0,00263



Obr. 5-14 Odchylky v závislosti na použití barevného filtru – vyhodnoceno Tritopem

Z výsledků měření vyplývá, že při použití externího barevného filtru došlo k mírnému snížení nepřesnosti měření a rozptylu hodnot. Experiment byl hodnocen pouze z hlediska odchylek získaných systémem Tritop z důvodu, že v období provádění experimentu již nebyly k dispozici měřítkové tyče, ze kterých by se dala odečíst reálná odchylka měření.

### 5.3 Přesnost predikčních vztahů

5.3

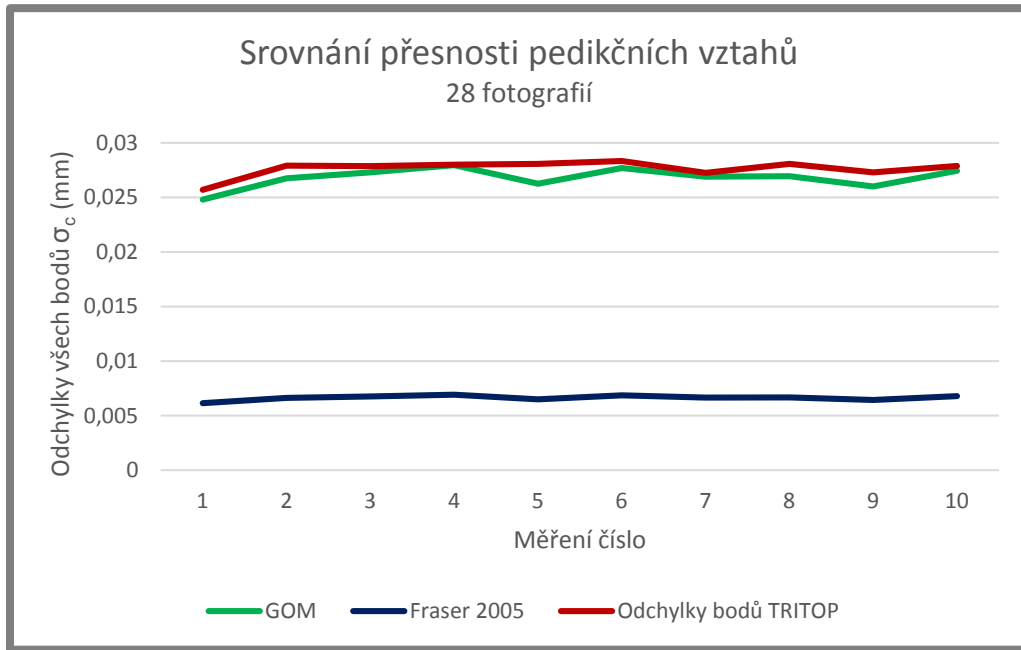
Následující kapitola se zabývá analýzou predikčních vztahů definujících přesnost fotogrammetrického systému. Predikční vztahy 16 a 17 určují odchylku, kterou vyhodnocuje software, hodnotícím kritériem pro tyto vztahy tedy byla jejich schopnost přiblížit se hodnotám stanoveným systémem Tritop. Vztahy 14 a 15 definují přesnost měření vztaženou na jednotku měřené vzdálenosti, byly proto hodnoceny z hlediska dat získaných z měřítkových tyčí.

#### 5.3.1 Predikční vztahy závislé na více faktorech

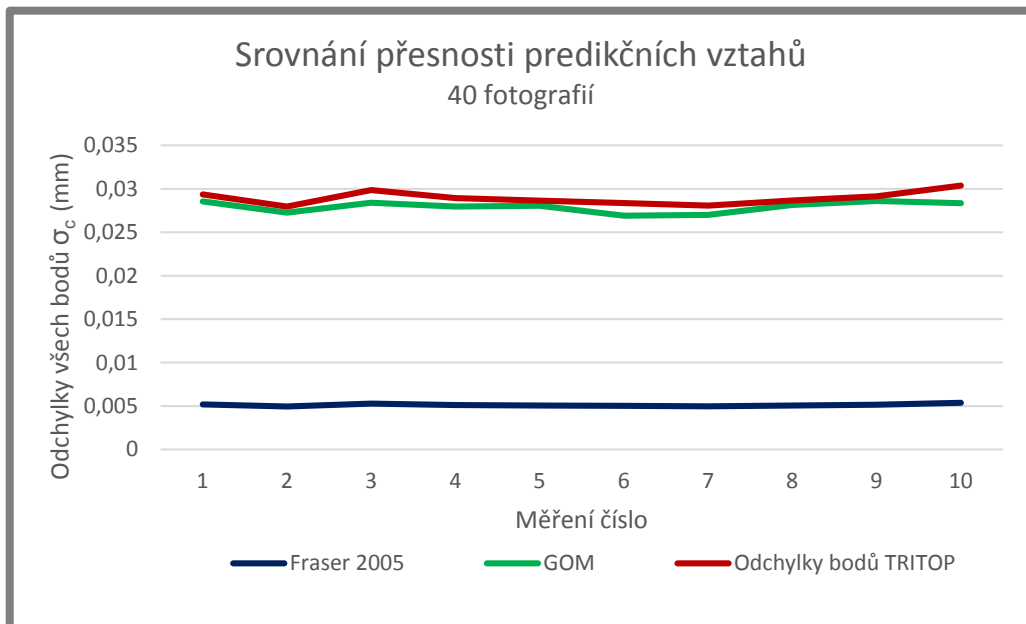
5.3.1

Předně došlo k analýze vztahů, jež definují přesnost fotogrammetrického systému v závislosti na větším počtu faktorů. Jedná se o vztahy, jež definovala společnost GOM (16) a Fraser (17), (viz kapitola 2.8). Pro srovnání byly využity měření, u nichž se lišil počet použitých fotografií (protože vztah 17 tento faktor zohledňuje). Měření byla pořízena ze vzdálenosti dvou metrů. Počet fotografií byl 28 a 40. Konvergentní úhly byly vyšší než  $100^\circ$ , proto byl koeficient  $q$  zvolen 1. Odchylky bodů snímku byly brány ze skutečných hodnot měření, jejich vynásobením velikostí jednoho pixelu

snímače fotoaparátu byl získán koeficient  $\sigma$  vstupující do obou vztahů. Na obrázcích 5-15 a 5-16 je srovnání obou predikčních vztahů. Zelenou barvou jsou označená data získaná z predikčního vztahu 16 od společnosti GOM, modrá barva reprezentuje data ze vztahu 17, jež definoval Fraser. Červenou barvou jsou označeny odchylky bodů vyhodnocené softwarem Tritop.



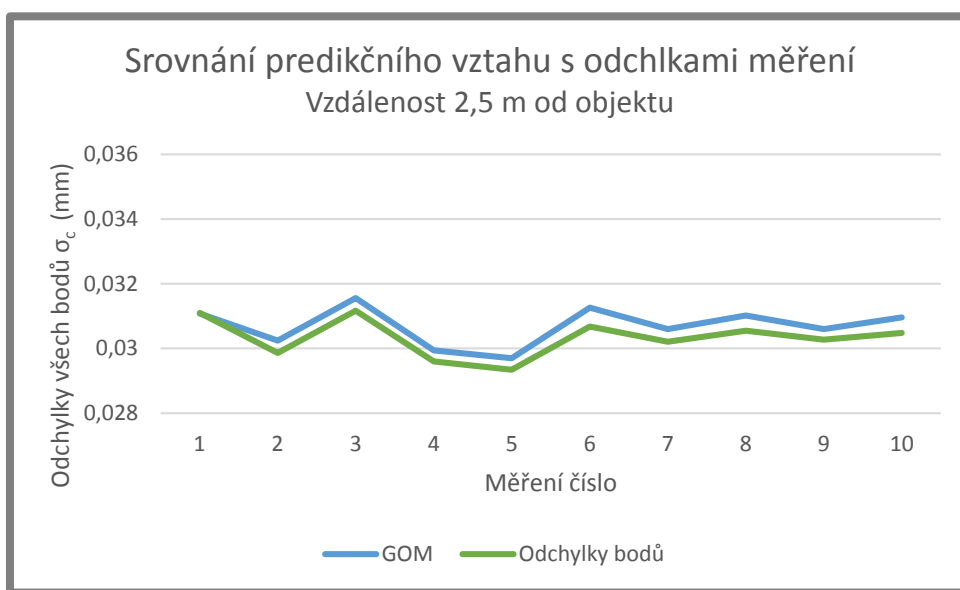
Obr. 5-15 Srovnání predikčních vztahů v měření s 28 fotografiemi



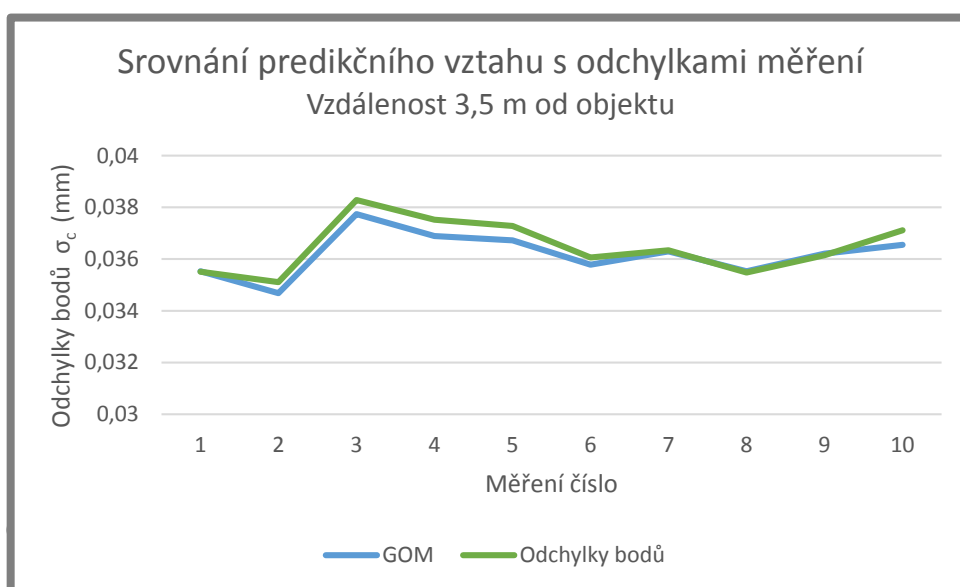
Obr. 5-16 Srovnání predikčních vztahů v měření se 40 fotografiemi

Z výsledků vyplývá, že predikční vztah, jenž dává k dispozici společnost GOM, měl pro dané experimenty predikční přesnost 96,5 %. Naopak vztah popsany v práci 17 není pro predikci měření systému Tritop příliš vhodný. Špatná predikce vztahu 17 může být odůvodněná tím, že byl vytvořen pro konkrétní aplikaci – měření rádiového teleskopu.

Přesnost predikce měření byla u vztahu 17 dále ověřena v závislosti na vzdálenosti objektu od měřicí stanice – viz obr. 5-17 a 5-18. V těchto měřeních měl vztah 98,5%, respektive 99,2% přesnost.



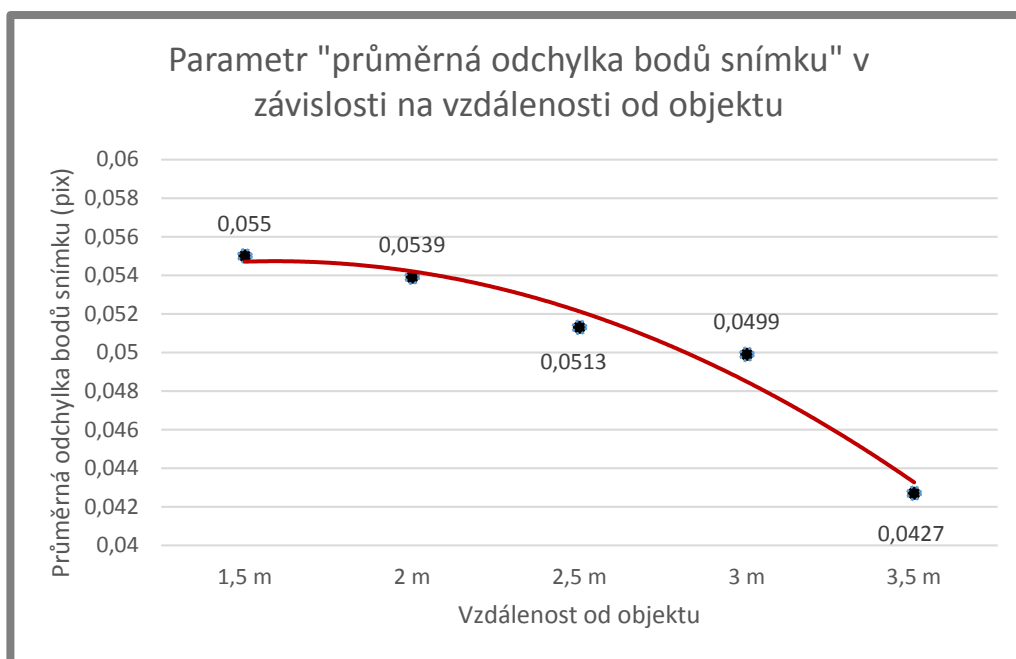
**Obr. 5-17** Predikční přesnost vztahu od společnosti GOM – měření ve vzdálenosti 2,5 m.



**Obr. 5-18** Predikční přesnost vztahu od společnosti GOM – měření ve vzdálenosti 3,5 m.

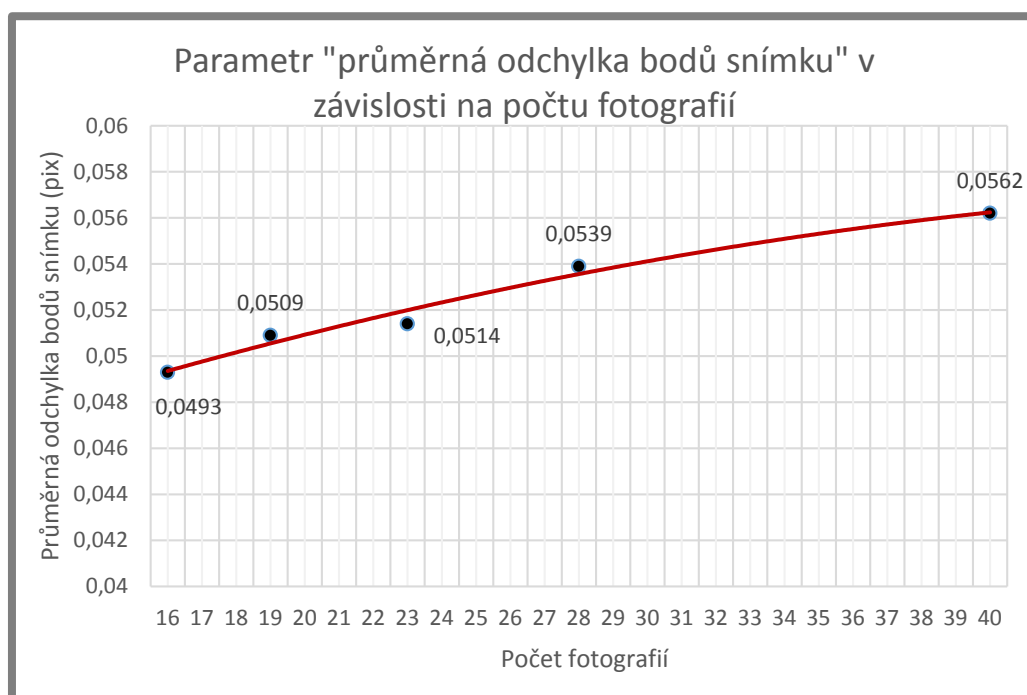
### 5.3.2 Hodnoty $\sigma$ ze získaných měření

Na základě získaných údajů je patrné, že vztah od společnosti GOM je velmi vhodný pro predikci odchylek měření fotogrammetrickým systémem Tritop. Je však závislý na správně zvolené hodnotě parametru „průměrná odchylka bodů snímku“ (average image point deviation). Hodnota parametru  $\sigma$  (image accuracy), obsažená v predikčním vztahu, se získá vynásobením popisovaného parametru „průměrná odchylka bodů snímku“ s velikostí jednoho pixelu snímače fotoaparátu (velikostí je myšlena délka v mm, nikoliv celá plocha pixelu). V případě použitého fotoaparátu Nikon D300s byla velikost pixelu 0,006 mm. Do predikčního vztahu byly v rámci řešení diplomové práce doplněny skutečné hodnoty parametru „průměrná odchylka bodu snímku“ ze softwaru, v praxi se však tato hodnota volí. Protože v současnosti neexistují souhrnná doporučení, která by definovala, jakou hodnotu parametru „průměrná odchylka bodů snímku“ zvolit pro určitou aplikaci, jsou hodnoty tohoto parametru z provedených měření zaneseny do grafů na obrázcích 5-19 a 5-20.



Obr. 5-19 Parametr „průměrná odchylka bodů obrazu“ v závislosti na vzdálenosti od objektu

Koeficient „průměrná odchylka bodů snímku“ v závislosti na vzdálenosti od objektu (obr. 5-19) byl pořízen s 28 fotografiemi (včetně čtyř kalibračních). Počet kalibračních tyčí ani počet kódovaných značek podle získaných údajů na tento parametr nemají vliv, proto nejsou uvedeny.



Obr. 5-20 Parametr „průměrná odchylka bodů obrazu“ v závislosti na počtu fotografií

Koeficient „průměrná odchylka bodů snímku“ v závislosti na počtu fotografií (obr. 5-20) byl získán při snímání objektu ve vzdálenosti 2 m.

### 5.3.3 Predikční vztahy závislé na jediném faktoru

5.3.3

Dále došlo k analýze vztahů 14 a 15, jež definují přesnost systému Tritop v závislosti na měřené délce. Vztah 14 stanovuje hodnotu přesnosti systému Tritop na 1 měřený metr  $\pm 25 \mu\text{m}$ . Vzorec 15 udává přesnost měření systému Tritop na 1 metr  $\pm 14 \mu\text{m}$ . Pro analýzu byla využita data z měřítkových tyčí – minimální a maximální hodnoty. V případě velkého rozptylu některých hraničních hodnot od mediánu byla použita druhá nejvyšší/nejnižší hodnota z měření. Data z metrových měřítkových tyčí jsou zanesena do tabulky 5-22.

Tab. 5-22 Min. a max. odchylky v závislosti na způsobu měření – hodnoty z metrové měřítkové tyče

Měření zohledňující počet fotografií			Měření zohledňující vzdálenost od objektu			Měření zohledňující počet vázacích bodů		
Počet fotografií	Min. ( $\mu\text{m}$ )	Max. ( $\mu\text{m}$ )	Vzdálenost (m)	Min. ( $\mu\text{m}$ )	Max. ( $\mu\text{m}$ )	Počet vázacích bodů	Min. ( $\mu\text{m}$ )	Max. ( $\mu\text{m}$ )
<b>16</b>	-42,8	138,2	<b>1,5</b>	-53	53,1	<b>31</b>	-14,2	71,8
<b>19</b>	-44	73	<b>2</b>	-29,8	55,5	<b>46</b>	-39	42
<b>23</b>	-11	51,4	<b>2,5</b>	-35,9	68,7	<b>67</b>	-29,8	55,5
<b>28</b>	-29,8	55,5	<b>3</b>	-30,2	73	<b>84</b>	-52,2	46,5
<b>40</b>	-5,3	37,2	<b>3,5</b>	-64	91,1	<b>100</b>	-13,9	29,6

Jak je patrné z tabulky 5-20, do oblasti odchylek stanovených predikčními vztahy (do 14 nebo 25  $\mu\text{m}$ ) se extrémny z provedeného měření nevešly. Nejnižší extrémny vykazuje měření se 100 kódovanými značkami (-13,9  $\mu\text{m}$ ; 29,6  $\mu\text{m}$ ), těmto hodnotám by odpovídala stanovená maximální přípustná odchylka  $\pm 30 \mu\text{m}/1 \text{ m}$ . Další nízkou hodnotu extrémů vykazuje měření se 40 fotografiemi (- 5,3  $\mu\text{m}$ ; 37,2  $\mu\text{m}$ ), těmto hodnotám odpovídá stanovená maximální přípustná odchylka  $\pm 40 \mu\text{m}/1 \text{ m}$ .

U dvoumetrové tyče byly odchylky měření nelineárně vyšší oproti výsledkům z metrových tyčí. Maximální odchylka v případě nejpřesnějšího měření byla +94,7  $\mu\text{m}$  (objekt snímán ze vzdálenosti 2,5 m). Těto hodnotě by odpovídala maximální přípustná odchylka  $\pm 50 \mu\text{m}/1 \text{ m}$ . Maximální a minimální hodnoty odchylek z ostatních měření, jež byly vyhodnoceny na dvoumetrové tyči, jsou zobrazeny v tabulce 5-23.

Tab. 5-23 Min. a max. odchylky v závislosti na způsobu měření – hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče

Měření zohledňující počet fotografií			Měření zohledňující vzdálenost od objektu			Měření zohledňující počet vázacích bodů		
Počet fotografií	Min. ( $\mu\text{m}$ )	Max. ( $\mu\text{m}$ )	Vzdálenost (m)	Min. ( $\mu\text{m}$ )	Max. ( $\mu\text{m}$ )	Počet vázacích bodů	Min. ( $\mu\text{m}$ )	Max. ( $\mu\text{m}$ )
<b>16</b>	6,9	103,2	<b>1,5</b>	93,5	166,8	<b>31</b>	65,9	138
<b>19</b>	11,8	112,1	<b>2</b>	72,2	109,8	<b>46</b>	31	104,5
<b>23</b>	44	134,8	<b>2,5</b>	34,7	94,7	<b>67</b>	77,5	135,1
<b>28</b>	77,5	135,1	<b>3</b>	45,5	111	<b>84</b>	47,2	102
<b>40</b>	53,6	125,4	<b>3,5</b>	55,9	126,9	<b>100</b>	35,6	99,8

V případě mediánů by stanovená odchylka  $\pm 14 \mu\text{m}$  odpovídala nejpřesnějším měřením. Ovšem podle normy VDI/VDE 2634 se musejí zohledňovat všechny naměřené hodnoty. Pokud některá z odchylek předčí stanovenou hodnotu, může se měření opakovat. Pokud i podruhé dojde k překročení hodnoty, musí dojít k ukončení testu. Pro stanovení odchylek měření v závislosti na měřené vzdálenosti byly z toho důvodu využity nejvyšší naměřené odchylky.

## 6 DISKUZE

### 6.1 Statistická analýza výsledků

Výsledky získané odečtením naměřených hodnot od dat z měřítkových tyčí byly statisticky vyhodnoceny. Data byla podrobena Anderson-Darlingově testu pro zjištění normality rozložení dat s výsledkem normálního rozdělení všech dat. Následně byl proveden studentův T-test pro zjištění systematické nebo náhodné chyby. Data vyhodnocená z měřítkových tyčí umístěných v osách X, Y, XY, XYZ obsahovala ve většině případů systematickou chybu měření. Data z vertikálně ustavené tyče vykazovala naopak náhodné chyby měření. Na základě této analýzy lze vyvodit výraznější zkreslení obrazu v horizontálním směru snímku. Tvarově toto zkreslení připomíná tangenciální složku distorze obrazu. Autorovi není známo, zda systém Tritop ve svém matematickém modelu zohledňuje i tuto složku distorze. S největší pravděpodobností je tato složka řešena nedostatečně a lepší kalibrační model by mohl přispět k přesnějším výsledkům. Dalším možným řešením takto vzniklých systematických chyb by mohla být výměna objektivu.

### 6.2 Vliv vzdálenosti snímaného objektu

Největší vliv na přesnost fotogrammetrického měření měla vzdálenost snímaného objektu. Tento faktor rozhoduje o počtu pixelů pokrývajících průměr referenčních značek. Na základě získaných měření bylo zjištěno, že optimální vzdálenost pro měření metrového objektu je 1,5 m, v případě dvoumetrového objektu byly nejnižší odchylky měření zaznamenány z 2,5 metrové vzdálenosti. V obou případech byl průměr referenčních značek pokryt 19 pixely. Obě uvedené optimální hodnoty jsou zároveň i hraniční – při dalším snížení snímací vzdálenosti by sice došlo k nárůstu pixelů pokrývajících průměr referenčních značek, zároveň by ale měřený objekt nebyl na jedné fotografii zaznamenán celý. Hledaná vzdálenost mezi body by poté byla vyhodnocena ze dvou fotografií, jejichž poloha ve scéně byla určena s drobnou chybou. Došlo by tím i k degradaci přesnosti měření hledané vzdálenosti. To dokládá graf na obrázku 5-4, kdy měření s vyššími počty pixelů vždy nepřináší přesnější výsledky.

### 6.3 Vliv počtu fotografií

Druhý největší vliv na přesnost měření měl počet pořízených fotografií v měřených sériích. Na základě dat z měřítkových tyčí bylo zjištěno, že s rostoucím počtem fotografií narůstá přesnost měření systémem Tritop. Tento fakt je v souladu s analyzovanou literaturou [9; 25]. Odchylky, jež vyhodnocuje samostatně systém Tritop, však vykazovaly opačný trend – s rostoucím počtem fotografií mírně vzrůstaly odchylky (v rádech tisícín). V případě provedených experimentů měly větší váhu výsledky získané z měřítkových tyčí, protože reflektovaly reálnou změřenou odchylku v různých osách globálního souřadného systému. Dalším důležitým poznatkem je, že rozdíl v přesnosti měření při pořízení 28 a 40 fotografií byl minimální. Tato skutečnost potvrzuje, že počet fotografií doporučený společností GOM (28 včetně čtyř kalibračních), je pro provedení přesného projektu dostačující. Další navyšování

fotografií by tak mohlo přinést jen nepatrné zpřesnění výsledků, ale zcela jistě by zvýšilo výpočetní náročnost celého projektu.

---

#### **6.4 Vliv počtu kódovaných značek**

U dat vyhodnocených z měřítkových tyčí byl pozorován vliv počtu kódovaných značek na přesnost fotogrammetrického měření, tento faktor však nebyl tak výrazný jako v případě vlivu vzdálenosti či počtu pořízených fotografií. Celkově došlo k zpřesnění měření o 49 % mezi experimentem s nejnižším a nejvyšším počtem kódovaných značek. Důvodem zlepšení měření je s největší pravděpodobností plynulejší rozložení kódovaných značek ve scéně v případě experimentů s vyššími počty značek. U dat vyhodnocených systémem Tritop nebyla pozorována žádná závislost mezi hodnotami jednotlivých měření. Z toho lze usuzovat, že parametr „průměrná odchylka bodů snímku,“ jež vyhodnocuje systém Tritop, není ovlivněn množstvím kódovaných značek ve scéně.

---

#### **6.5 Vliv počtu měřítkových tyčí**

Na základě odchylek získaných systémem Tritop nebylo pozorováno zpřesnění měření při použití vysokého počtu měřítkových tyčí. Naopak při použití většího množství než 3 měřítkových tyčí v měření došlo k výrazné odchylce alespoň na jedné z nich a projevila se také zhoršená opakovatelnost měření. Data odečtená z měřítkové tyče vykazovala trend vzrůstajících odchylek měření s rostoucím počtem měřítkových tyčí. Není však jisté, zda by se pozorované negativní projevy vyššího počtu měřítkových tyčí přenesly i do měření s mnohem rozměrnějším objektem.

---

#### **6.6 Vliv automatizace měření**

Experiment, u kterého bylo dosaženo automatizace měření za pomoci stavivu a automatizovaného rotačního stolku, byl proveden za účelem zajištění lepší opakovatelnosti měření. Na základě analýzy dat však bylo zjištěno, že tato experimentální konfigurace naopak zvětšila rozptyl získaných dat – zhoršila se opakovatelnost. Možným důvodem zhoršené opakovatelnosti mohly být přítomné vibrace na přípravku způsobené pohybem rotačního stolu. Dalším možným důvodem mohla být nestejná konfigurace snímků mezi jednotlivými experimenty, jež byla způsobena nedostatečným bržděním rotačního stolu po vykonání rotace o stanovený úhel. Navzdory zhoršené opakovatelnosti vykazovala konfigurace s rotačním stolem a stavivem zpřesnění mediánu odchylek měření. Toto zpřesnění měření vykazovala data ze softwaru Tritop, tak i data získaná z dvoumetrové měřítkové tyče.

---

#### **6.7 Vliv barevného filtru**

Měření s použitím externího barevného filtru vykazovalo oproti klasickému měření mírné zlepšení odchylek a rozptylu dat, což je v souladu s analyzovanou literaturou [16]. Daný experiment však byl proveden v období, kdy již nebylo k dispozici všech 7 měřítkových tyčí. Z toho důvodu byl vyhodnocen pouze na základě odchylek získaných ze softwaru Tritop Professional. Aby se skutečně potvrdila účinnost

externího barevného filtru, musel by být experiment zopakován za stejných podmínek, za kterých byly vytvořeny ostatní experimenty (využití všech 7 měřítkových tyčí).

## 6.8 Přesnost predikčních vztahů

6.8

---

Dalším cílem práce bylo vyhodnotit přesnost existujících predikčních vztahů. Na základě získaných dat bylo zjištěno, že predikční vztah od společnosti GOM vykazuje více než 96% shodu s naměřenými daty (parametr „průměrná odchylka bodů obrazu“ byl převzat ze softwaru Tritop Professional). Vztah, který definoval ve své práci Fraser, měl predikční shodu menší než 20 %. Nízká predikční přesnost druhého vztahu může být způsobena tím, že byl původně definován pro jiný fotogrammetrický systém a pro konkrétní aplikaci – měření rádiového teleskopu.

Dále byly testovány vztahy, jež určují přesnost systému Tritop na základě měřené délky. Vztah od společnosti GOM stanovuje měřenou přesnost  $\pm 25 \mu\text{m}/1 \text{ m}$ . Grzelka [23] ve své publikaci určil přesnost tohoto systému na  $\pm 14 \mu\text{m}/1 \text{ m}$ . Nejpřesnější měření provedená v rámci řešení této práce vykazují maximální přípustnou odchylku měření  $\pm 30 \mu\text{m}/1 \text{ m}$ . Nejvyšší odchylky v případě špatné metodiky měření (nízký počet fotografií, velká vzdálenost od objektu) pak přesáhly hodnotu  $\pm 100 \mu\text{m}/1 \text{ m}$ . Tato skutečnost dokazuje důležitost správného provedení měření. V případě přejímacích testů by špatná metodika měření mohla vést k porušení certifikace. Vyšší hodnoty odchylek oproti literatuře i v případě nejpřesnějších sérií měření mohou být způsobeny systematickými chybami, jež byly nalezeny v rámci statistické analýzy dat (viz kapitola 5.1).

### 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo statisticky vyhodnotit vliv vybraných faktorů na přesnost fotogrammetrického systému Tritop. Primárně byly pro tvorbu experimentů zvoleny parametry měření související s počtem pořízených fotografií, počtem kódovaných značek, vzdáleností od objektu a počtem měřítkových tyčí. Jedná se o parametry, které podle odborných zdrojů ovlivňují přesnost fotogrammetrických systémů, striktně však nejsou zohledněny normou VDI/VDE 2634 part 1 (viz kapitola 2.6). Navíc jsou snadno ovlivnitelné inspektorem před nebo během měření.

Objektem měření byly pro veškeré provedené experimenty měřítkové tyče umístěné na přípravku tvaru krychle – v souladu s normou VDI/VDE 2634 part 1. Experimenty byly vyhodnoceny na základě odchylek, které byly získány buďto automatickým vyhodnocením přímo ze softwaru, nebo odečtením naměřených hodnot od dat z měřítkových tyčí. Z provedených experimentů byly vyvozeny následující závěry:

- S přibývajícím počtem fotografií došlo ke zmenšení odchylek měření až o 56 % a došlo také ke snížení rozptylu odchylek u opakovaných měření. Automaticky vyhodnocené odchylky softwarem Tritop však vykazovaly trend růstu odchylek s přibývajícím počtem snímků.
- Optimální vzdálenost pro měření metrových měřítkových tyčí byla 1,5 m. U dvoumetrové tyče byly nejnižší odchylky měření zaznamenány ve vzdálenosti 2,5 m. V obou případech byl průměr referenčních značek pokryt 19 pixely. Odchylky vyhodnocené softwarem Tritop vykazovaly lineární závislost růstu odchylek měření na vzdálenosti od měřeného objektu.
- S rostoucím počtem kódovaných značek vzrostla přesnost měření až o 49 % a zmenšil se rozptyl odchylek při opakovaných měřeních. Tento faktor neměl vliv na odchylky vyhodnocené softwarem a neovlivňoval predikční vztahy.
- Z naměřených dat vyplývá, že s vyšším počtem měřítkových tyčí roste pravděpodobnost, že na některé z měřítkových tyčí bude nalezena příliš vysoká odchylka měření – měření bude vyhodnoceno jako chybné. Nebyla nalezena korelace mezi počtem měřítkových tyčí a nižšími odchylkami měření.
- Využití stativu a rotačního stolku nepřineslo lepší opakovatelnost měření, došlo však ke snížení odchylek měření o 23 % na dvoumetrové tyči.
- Při použití zeleného filtru došlo k snížení odchylek měření o 7 % a k redukci rozptylu dat.
- Na základě statistické analýzy pomocí Anderson-Darlingova testu a studentova T-testu bylo zjištěno, že systém užívaný v rámci řešení této práce způsobuje systematické chyby v horizontálním směru snímku. Tyto chyby mohou být způsobeny nedostatečnou kalibrací tangenciální složky distorze objektivu.

Dalším cílem práce byla analýza přesnosti predikčních vztahů. Na základě provedených analýz byly vyvozeny následující závěry:

- Vztah od společnosti GOM vykazuje více než 96,5% predikční přesnost, pokud je hodnota parametru sigma převzata ze softwaru.

- Vzorec publikovaný v práci Fraser [25] měl nižší než 20% přesnost predikce chyby.
- Maximální přípustná odchylka (MPE) nepřesáhla v případě nejpřesnějších sérií měření hodnotu  $\pm 30 \mu\text{m} / 1 \text{ m}$ . Nejpřesnější měření byla pořízena při použití 100 kódovaných značek ve scéně a při pořízení 40 fotografií.

S pomocí získaných dat byly vytvořeny grafy závislosti parametru „průměrná odchylka bodů obrazu“ na počtu fotografií a snímací vzdálenosti. Tyto grafy umožní uživateli přesněji zvolit hodnotu parametru  $\sigma$  a tím zpřesní výstup teoretického predikčního vztahu od společnosti GOM.

### **Konkrétní výsledky, které odpovídají stanoveným cílům práce:**

- Popis faktorů, ovlivňujících přesnost měření fotogrammetrického systému.
- Návrh a provedení experimentů zkoumající vybrané faktory.
- Statistické vyhodnocení získaných výsledků.
- Vyhodnocení přesnosti predikčních vztahů.
- Rozšíření informací o volbě parametru  $\sigma$  (Image accuracy).

Všechny vytyčené cíle jsou autorem považovány za splněné. Výstupem této práce je také publikace v odborném časopise.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

---

- [1] SVATÝ, Zdeněk. *VYUŽITÍ FOTOGRAMMETRIE VE ZNALECKÉ PRAXI* [online]. Praha, 2012 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: [http://k622.fd.cvut.cz/downloads/zaverecne\\_prace/bp\\_svaty\\_2012.pdf](http://k622.fd.cvut.cz/downloads/zaverecne_prace/bp_svaty_2012.pdf)
- [2] Application Example: Quality Control. In: *GOM* [online]. Braunschweig: GOM mbH, 2008 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: [http://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/tritop\\_cmm\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/tritop_cmm_EN.pdf)
- [3] Blízká fotogrammetrie. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. vugtk, 2011 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: [https://www.vugtk.cz/slovník/6590\\_blizka-fotogrammetria](https://www.vugtk.cz/slovník/6590_blizka-fotogrammetria)
- [4] *Photogrammetry V7.5 SRI: Manual Advanced*. Braunschweig, Germany: GOM mbH Mittelweg 7-8 D-38106, 2012
- [5] BÖHM, Jozef. *FOTOGRAMMETRIE*. Ostrava, 2002. Učební text. VŠB-TUO.
- [6] LUHMANN, Thomas, et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*, Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Fundamental methods, s 1-25. ISBN 978-184995-057-2
- [7] Defining the principal point. *Pcigeomatics* [online]. Toronto: PCI Geomatics, 2016 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: [http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/concepts/orthoengine\\_c/chapter\\_45.html](http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/concepts/orthoengine_c/chapter_45.html)
- [8] Konstanta komory. *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. vugtk, 2011 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: [https://www.vugtk.cz/slovník/5215\\_konstanta-komory](https://www.vugtk.cz/slovník/5215_konstanta-komory)
- [9] LUHMANN, Thomas, et al. *Close range photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Analytical methods, s. 201 – 315. ISBN 978-184995-057-2.
- [10] Producer Field Guide Contents: Photogrammetric Concepts. *HEXAGON Geospatial* [online]. Stockholm: Hexagon Geospatial, c2017 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: [https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/reader/uOKHREQkd\\_XR9iPo9Y\\_Ijw/Nu0OzztnM14LCrB3IdCvWg](https://hexagongeospatial.fluidtopics.net/reader/uOKHREQkd_XR9iPo9Y_Ijw/Nu0OzztnM14LCrB3IdCvWg)
- [11] HANZL, Vlastimil. *Fotogrammetrie: Teoretické základy fotogrammetrie*. Brno, 2006. Studijní opora. VUT-FAST.

- [12] Blokové vyrovnání paprskových svazků. *Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí* [online]. vugtk, 2011 [cit. 2017-03-28]. [http://www.vugtk.cz/slovník/termin.php?jazykova\\_verze=termin&tid=7498&l=bundle-block-adjustment](http://www.vugtk.cz/slovník/termin.php?jazykova_verze=termin&tid=7498&l=bundle-block-adjustment)
- [13] Distorze objektivu. *Terminologický slovník zeměměřičství a katastru nemovitostí* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: [https://www.vugtk.cz/slovník/5208\\_distorze-objektivu](https://www.vugtk.cz/slovník/5208_distorze-objektivu)
- [14] AGARWAL, S., et al. Bundle adjustment in the large. *European conference on computer vision*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 29-42.
- [15] LUHMANN, T., et al. *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Dunbeath, Caithness KW6 6EG, Scotland, UK: Whittles Publishing, 2011. Measurement concepts and solutions in practice, s. 441-467 ISBN 978-184995-057-2.
- [16] REMONDINO, Fabio a Clive FRASER. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *ISPR*. 2006, roč. 36, č. 5, s. 266-272. ISSN 1682-1750.
- [17] WENDT Klaus a Thomas LUHMANN. Recommendations for an acceptance and verification test of optical 3-D measurement system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2000, roč. 33, č. 5, s. 493-499.
- [18] LUHMANN, Thomas, Fabio REMONDINO a Mark R. SHRORTIS. 3D Imaging - How to Achieve Highest Accuracy. *Proceedings of SPIE*. 2011, s. 1-11.
- [19] FRASER, Clive. Advances in Close-Range Photogrammetry. *The Photogrammetric Record*. 2015, roč. 30, č. 149, s. 257-268. ISSN 0031868x.
- [20] ZATOČILOVÁ, Aneta et al. An approach to the shape deviation measurement of cylindrical forgings. *International Conference of Mechine Desing Departments*. Brno: Brno University of Technology 2012, roč. 53, č. 1, s. 331-338.
- [21] CHANDLER, Jim H.; FRYER, John G.; JACK, Amanda. Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *The Photogrammetric Record*, 2005, 20.109: 12-26.
- [22] FENG, Xiuxia. The comparison of camera calibration methods based on structured-light measurement. *Congress on Image and Signal Processing*. 2008, roč. 2, č. 1, s. 155-160. ISBN 978-0-7695-3119-9

- [23] MANSUROV, Nasim. What is Chromatic Aberration? In: *Photographylife* [online]. Denver: Photographylife, 2017 [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <https://photographylife.com/what-is-chromatic-aberration>
- [24] FEI DAI a MING LU. Photo-based 3D modeling of construction resources for visualization of operations simulation: Case of modeling a precast façade. *2008 Winter Simulation Conference*. IEEE, 2008, roč. 40, č. 5, s. 2439-2446. ISBN 978-1-4244-2707-9.
- [25] FRASER, Clive S., Alex WOODS a Danny BRIZZI. Hyper Redundancy for Accuracy Enhancement in Automated Close Range Photogrammetry. *The Photogrammetric Record*. 2005, roč. 20, č. 111, s. 205-217. ISSN 0031-868x.
- [26] GUO, X. et al. Automatic shape-based target extraction for close-range photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016, roč. 42, s. 583-587. ISSN 2194-9034.
- [27] GOLPARVAR-FARD, Mani, et al. Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. *Automation in Construction*, 2011, 20.8: 1143-1155.
- [28] *Accuracy of the photogrammetry*. Braunschweig. 2012.
- [29] TRITOP CMM: Optical 3D. *Trillion quality systems* [online]. Braunschweig: Gom, 2004 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://trilion.com/wp-content/uploads/2012/01/TRITOP-portable-CMM.pdf>
- [30] GRZELKA M. et al. Accuracy of the photogrammetric measuring system for large size elements. *Archives of foundry engineering*. 2011, roč. 15, č. 2, s. 75-80. ISSN 1897-3310.
- [31] ZHANG, De-hai, et al. Exploitation of photogrammetry measurement system. *Optical Engineering*, 2010, 49.3: 037005-037005-11.
- [32] The basics of photogrammetry. *Geodetic Systems* [online]. Melbourne: Geodetic Systems, 2011 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry/>
- [33] Metodika hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů. *Úřad vlády České republiky* [online]. Praha: Vláda České republiky, 2013 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: [http://www.vyzkum.cz/storage/att/373C18E8F5E1311F5B8AF2BD17FAB115/M2013\\_v95.pdf](http://www.vyzkum.cz/storage/att/373C18E8F5E1311F5B8AF2BD17FAB115/M2013_v95.pdf)

**9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN****9.1 Seznam použitých zkratk**

CMM	- Coordinate-measuring machine
CCD	- Charge coupled device
CMOS	- Complementary metal-oxide-semiconductor
FBM	- Feature-based matching
SfM	- Structure from motion
MPE	- Maximum permissible error
StDev	- Standard deviation
Pix	- Pixels

**9.2 Seznam použitých symbolů**

$H'$	(-)	Hlavní snímkový bod
$x', y'$	(-)	Souřadnice obrazového bodu snímku $P'$
$x'_0, y'_0$	(-)	Souřadnice středu zobrazení $H'$
$\Delta x', \Delta y'$	(-)	Korekční parametry zkreslení obrazu
$c'$	(-)	Konstanta komory
$r'$	(mm)	Vzdálenost obrazového bodu od hlavního snímkového bodu
$\Delta r'_{rad}$	(-)	Zvolená distorzní křivka
$\omega$	(°)	Natočení kolem osy $x'$
$\kappa$	(°)	Natočení kolem osy $y'$
$\varphi$	(°)	Natočení kolem osy $z'$
$m$	(-)	Faktor měřítka
$R$	(-)	Rotační matice
$x'$	(-)	Vektor směřující ze středu promítání do obrazového bodu $P'$
$X_0, Y_0, Z_0$	(-)	Souřadnice středu promítání $O'$ v souřadném systému objektu
$A_m$	(-)	Jacobiho matice obsahující parciální derivace funkčního modelu
$X_m$	(-)	Matice s korekcemi neznámých parametrů vnější orientace
$L_m$	(-)	Matice se vstupními parametry (souřadnice snímků a bodů)
$V_m$	(-)	Matice obsahující odchylky snímkových souřadnic
$L_m$	(mm)	Měřená délka
$\sigma_c$	(mm)	Směrodatná odchylka souřadnic bodů objektu
$\sigma$	( $\mu\text{m}$ )	Průměrná odchylka obrazových bodů „Image accuracy“
$k$	(-)	Počet použitých fotografií
$d$	(m)	Vzdálenost objektu
$f$	(mm)	Ohnisková vzdálenost
$q$	(-)	Empirický faktor (v rozmezí 0,5 – 0,7)
$Me(x)$	(-)	Medián
$X$	(-)	Hodnota v neklesající posloupnosti
$N$	(-)	Index udávající pořadí čísla v posloupnosti

**10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

Obr. 1-1	Kontrola kvality pomocí fotogrammetrie [2]	13
Obr. 2-1	Referenční značky na zkoumaném objektu [4]	14
Obr. 2-2	Centrální projekce [5]	15
Obr. 2-3	Princip fotogrammetrického měření [6]	15
Obr. 2-4	Znázornění vnějších a vnitřních parametrů fotoaparátu [9]	18
Obr. 2-5	Vstupy a výstupy algoritmu bundle adjustment [9]	21
Obr. 2-6	Definování bodů pro fotogrammetrické měření [10]	21
Obr. 2-7	Šachovnicové pole určené ke kalibraci [15]	23
Obr. 2-8	Testovací pole [16]	24
Obr. 2-9	Testovací krychle pro acceptance test [18]	25
Obr. 2-10	Rozmístění měřených tyčí [17]	26
Obr. 2-11	Rozdělení chyb vznikajících při fotogrammetrickém měření [18]	27
Obr. 2-12	Měření křídla Boeingu [19]	28
Obr. 2-13	Schéma chromatické aberace [23]	30
Obr. 2-14	Míra radiální distorze v závislosti na barevném kanálu [16]	31
Obr. 2-15	Správná pozice fotoaparátu [24]	32
Obr. 2-16	Špatná pozice fotoaparátu [24]	32
Obr. 2-17	Doporučené rozložení stanic při snímání roviny [24]	33
Obr. 2-18	Konfigurace pro měření rádiového teleskopu [25]	34
Obr. 2-19	Pozice fotoaparátu při měření teleskopu [25]	34
Obr. 2-20	Odraz blesku na světlém povrchu z různých pozic, u pozice 2 systém může omylem považovat odraz za referenční značku [4].	35
Obr. 2-21	Přesnost měření v závislosti na počtech fotografií a konvergentních úhlech vztahené k vypočteným souřadnicím objektu X, Y, Z [25]	37
Obr. 4-1	Schéma postupu řešení	41
Obr. 4-2	Pohled do hledáčku fotoaparátu Nikon D300s [34]	42
Obr. 4-3	Nekódované značky (vlevo), kódované značky (uprostřed) a orientační kříž (vpravo)	43
Obr. 4-4	Invarové kalibrační tyče (vlevo) a karbonové kalibrační tyče (vpravo)	43
Obr. 4-5	Objekt měření	45
Obr. 4-6	Upnutí karbonové tyče pomocí dvoubodové objímky	45
Obr. 4-7	Standardní konfigurace měření se systémem Tritop [2]	46
Obr. 4-8	Prostorové uspořádání fotografií v prvním měření (vlevo) a v pátém měření (vpravo)	47
Obr. 4-9	Konfigurace kódovaných značek pro první měření (vlevo) a pro páté měření (vpravo)	49
Obr. 4-10	Měření s rotačním stolcem a stativem	50
Obr. 4-11	Zelený barevný filtr Tianya 67 mm	51
Obr. 4-12	Lokace hodnotících parametrů fotogrammetrického projektu v softwaru GOM Inspect – na obrázku označená červeným rámečkem	52
Obr. 4-13	Detail informací o projektu získaný z fotogrammetrického měření	53
Obr. 4-14	Orientace objektu vůči globálnímu souřadnému systému	54
Obr. 4-15	krabicový graf	55
Obr. 5-1	Test normality dat měření pro 16 fotografií na dvoumetrové tyči	57
Obr. 5-2	Odchyšky v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z Tritopu	61

Obr. 5-3 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	62
Obr. 5-4 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče .....	63
Obr. 5-5 Odchyly v závislosti na počtu fotografií - hodnoty z Tritopu.....	64
Obr. 5-6 Odchyly v závislosti na počtu fotografií – hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	65
Obr. 5-7 Odchyly v závislosti na počtu vázacích bodů - hodnoty z Tritopu.....	66
Obr. 5-8 Odchyly v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	67
Obr. 5-9 Odchyly v závislosti na počtu měřítkových tyčí – hodnoty z Tritopu.....	68
Obr. 5-10 Odchyly v závislosti na počtu měřítkových tyčí – hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče .....	69
Obr. 5-11 Odchyly v závislosti na způsobu měření (hodnoty z Tritopu).....	70
Obr. 5-12 Odchyly v závislosti na počtu měřítkových tyčí - hodnoty z metrových měřítkových tyčí.....	71
Obr. 5-13 Odchyly v závislosti na počtu měřítkových tyčí - hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče .....	71
Obr. 5-14 Odchyly v závislosti na použití barevného filtru – vyhodnoceno Tritopem .....	73
Obr. 5-15 Srovnání predikčních vztahů v měření s 28 fotografiemi .....	74
Obr. 5-16 Srovnání predikčních vztahů v měření se 40 fotografiemi .....	74
Obr. 5-17 Predikční přesnost vztahu od společnosti GOM – měření ve vzdálenosti 2,5 m. ....	75
Obr. 5-17 Predikční přesnost vztahu od společnosti GOM – měření ve vzdálenosti 2,5 m. ....	75
Obr. 5-18 Predikční přesnost vztahu od společnosti GOM – měření ve vzdálenosti 3,5 m. ....	75
Obr. 5-19 Parametr „průměrná odchylna bodů obrazu“ v závislosti na vzdálenosti od objektu .....	76
Obr. 5-20 Parametr „průměrná odchylna bodů obrazu“ v závislosti na počtu fotografií .....	77

**11 SEZNAM TABULEK**

Tab. 2-1 Srovnání přesností softwarů využívajících algoritmus bundle adjustment .....	24
Tab. 2-2 Výsledky měření křídla .....	28
Tab. 2-3 Porovnání Zhang a Tsai kalibrační metody [22] .....	30
Tab. 4-1 Parametry fotoaparátu Nikon D300s .....	42
Tab. 4-2 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu fotografií .....	47
Tab. 4-3 Parametry experimentu zkoumající vliv vzdálenosti .....	48
Tab. 4-4 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu fotografií .....	48
Tab. 4-5 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu fotografií .....	49
Tab. 4-6 Parametry experimentu zkoumající opakovatelnost měření .....	50
Tab. 4-7 Parametry experimentu zkoumající vliv počtu měřítkových tyčí .....	51
Tab. 4-8 Hodnotící parametry experimentů .....	51
Tab. 5-1 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro měření se vzdáleností .....	58
Tab. 5-2 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro měření s počty fotografií .....	58
Tab. 5-3 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro měření s počty vázacích bodů .	58
Tab. 5-4 P hodnoty Anderson-Darlingova testu pro test opakovatelnosti měření .....	58
Tab. 5-5 P hodnoty T-testu pro měření se vzdáleností .....	59
Tab. 5-6 P hodnoty T-testu pro měření s počty fotografií .....	59
Tab. 5-7 P hodnoty T-testu pro měření s počty vázacích bodů .....	59
Tab. 5-8 P hodnoty T-testu pro test opakovatelnosti měření .....	59
Tab. 5-9 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu (hodnoty z Tritopu) .....	60
Tab. 5-10 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	61
Tab. 5-11 Odchyly v závislosti na vzdálenosti od objektu - hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče .....	62
Tab. 5-12 Odchyly v závislosti na počtu fotografií - hodnoty z Tritopu .....	64
Tab. 5-13 Odchyly v závislosti na počtu fotografií - hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	64
Tab. 5-14 Odchyly v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z Tritopu .....	66
Tab. 5-15 Odchyly v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	66
Tab. 5-16 Odchyly v závislosti na počtu měřítkových tyčí .....	68
Tab. 5-17 Odchyly v závislosti na počtu vázacích bodů – hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	69
Tab. 5-18 Odchyly v závislosti na způsobu měření (hodnoty z Tritopu) .....	70
Tab. 5-19 Odchyly v závislosti na způsobu měření – hodnoty z metrových měřítkových tyčí .....	70
Tab. 5-20 Odchyly v závislosti na způsobu měření – hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče .....	71
Tab. 5-21 Odchyly v závislosti na použití barevného filtru – data z Tritopu .....	72
Tab. 5-22 Min. a max. odchyly v závislosti na způsobu měření – hodnoty z metrové měřítkové tyče .....	77
Tab. 5-23 Min. a max. odchyly v závislosti na způsobu měření – hodnoty z dvoumetrové měřítkové tyče .....	78

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

---

### **Příloha č. 1**

Článek: *Aspects affecting measurement accuracy of TRITOP photogrammetry system*