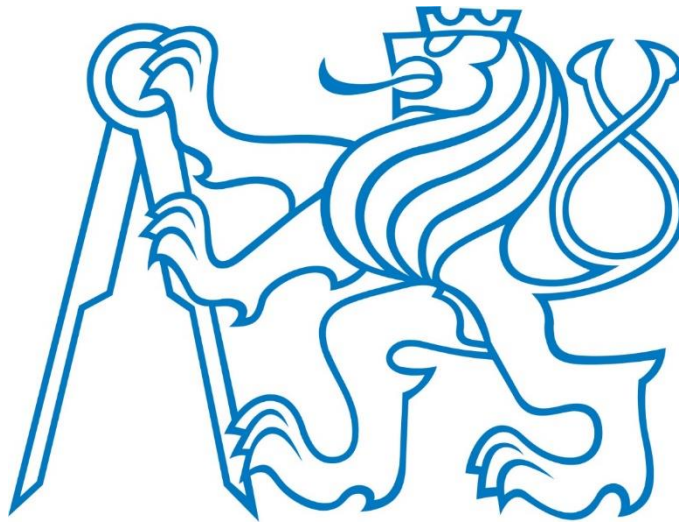


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA GEOMATIKY



**TESTOVÁNÍ KVALITY A PŘESNOSTI SKENOVACÍ
TOTÁLNÍ STANICE TRIMBLE SX10**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.

Bc. Miloslav Srp



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Srp Jméno: Miloslav Osobní číslo: 410902
Zadávací katedra: Katedra geomatiky
Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Testování kvality a přesnosti skenovací totální stanice Trimble SX10.

Název diplomové práce anglicky: Quality and precision determination of scanning total station Trimble SX10

Pokyny pro vypracování:

1. Na školní laboratorní základně určete podrobný průběh chyb dálkoměru.
2. Proveďte vyhodnocení přesnosti výsledku skenování na skenovací kalibrační základně.
3. Porovnejte mračno bodů získané fotogrammetrickou metodou s mračnem získaném laserovým skenováním.
4. Otestujte přesnost měření Hz směrů při cílení na dlouhé vzdálenosti.

Seznam doporučené literatury:

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

Datum zadání diplomové práce: 12.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval zcela samostatně pod odborným vedením vedoucího práce. Veškerá použitá literatura a další informační zdroje jsou uvedeny v seznamu literatury

V Praze dne:

Miloslav Srp

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D. za odborné rady a ochotu při každé situaci. Dále bych chtěl poděkovat společnosti GEOTRONICS Praha, s.r.o. za zapůjčení testovaného přístroje a také firmě GEOREAL spol. s.r.o., jmenovitě Ing. Radku Houškovi za poskytnutí rad a umožnění vstupu na skenovací základnu. Poté bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavovi Šedinovi za objasnění problematiky digitální fotogrammetrie.

V neposlední řadě děkuji svým blízkým za podporu po celou dobu studia.

**Testování kvality a přesnosti skenovací
totální stanice Trimble SX10**

Quality and precision determination of scanning total station
Trimbe SX10

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá testováním skenovací totální stanice Trimble SX10. V první části práce jsou uvedeny základní informace o testovaném přístroji. Dále byla provedena série testů, která měla za úkol otestovat přesnost dálkoměru, využitelnost a použitelnost manuálního cílení za použití kamerového obrazu zobrazeného na displeji. Další test ověřil, zda je dodržena udávaná přesnost laserového skenování měřením na laserové skenovací základně a nakonec, zda je možné využít snímky pořízené z kamery přístroje pro fotogrammetrické zpracování a výsledné mračno bodů porovnat s laserovým skenováním.

Klíčová slova

Trimble SX10, přesnost, laserové skenování, fotogrammetrie, mračno bodů.

Abstract

This master's thesis provides information about testing the scanning total station Trimble SX10. There is the basic information about the testing device in the first part of my thesis. In the second part was carried a series of tests. The purpose of those tests was to measure the precision of range-finder, usability and practicability manual targeting with using the camera images showed on the display. Another test verified whether the precision of the laser scanning by measuring on the laser scanning base has complied. The last test showed us if the pictures taken from the total station are good to use for photogrammetric evaluation and also to compare dense cloud with laser scanning dense cloud.

Keywords

Trimble SX10, precision, laser scanning, photogrammetry, dense cloud

Obsah

1.	ÚVOD.....	9
2.	REŠERŠE PRACÍ NA TÉMA TESTOVÁNÍ LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ.....	10
3.	TESTOVANÝ PŘÍSTROJ	11
3.1	Technické parametry	11
3.2	Ovladatelnost.....	12
4.	MĚŘENÍ.....	13
4.1	Určení podrobného průběhu chyb dálkoměru.....	13
4.1.1	Popis experimentu	13
4.1.2	Školní kalibrační základna.....	13
4.1.3	Zpracování	15
4.1.4	Výsledky	16
4.2	Testování přesnosti měření Hz směřů při cílení na dlouhé vzdálenosti	18
4.2.1	Popis experimentu	18
4.2.2	Zpracování	19
4.2.2.1	Rozbory přesnosti.....	19
4.2.2.2	Velikost pixelu na snímku.....	21
4.2.3	Vyhodnocení.....	25
4.3	Vyhodnocení přesnosti skenování na skenovací základně.....	26
4.3.1	Popis experimentu	26
4.3.1.1	Kalibrační základna.....	26
4.3.2	Měření.....	27
4.3.3	Zpracování	28
4.3.4	Vyhodnocení.....	32
4.3.5	Výsledky.....	34
4.4	Porovnání mračna bodů získaného fotogrammetricky s mračnem z laserového skenování.....	35
4.4.1	Popis experimentu	35
4.4.2	Měření.....	36

4.4.3	Zpracování.....	37
4.4.3.1	Vytvoření mračna bodů v programu Agisoft PhotoScan Professional 38	
4.4.3.2	Registrace v programu Geomagic.....	39
4.4.3.3	Porovnání mračen v CloudCompare.....	39
4.4.4	Vyhodnocení	39
4.4.4.1	Porovnání mračna z laserového skenování s mračnem vytvořeným ze snímků z fotoaparátu	39
4.4.4.2	Porovnání mračna z laserového skenování s mračnem vytvořeným ze snímků z totální stanice	40
5.	ZÁVĚR	41
6.	POUŽITÉ ZDROJE	42
7.	SEZNAM OBRÁZKŮ	44
8.	SEZNAM TABULEK	45
9.	SEZNAM GRAFŮ.....	45
10.	SEZNAM PŘÍLOH.....	45
11.	OBSAH PŘILOŽENÉHO DATOVÉHO NOSIČE.....	46

1. Úvod

Laserové skenování, jako měřická metoda, se v poslední době stala nedílnou součástí měřické praxe. Výrobci měřického vybavení, jako např. totálních stanic, se snaží držet tohoto trendu a vytváří přístroje, které jsou současně totální stanicí a laserovým skenerem. Tímto směrem se vydala i firma Trimble a uvedla na trh přístroj Trimble SX10.

Tato diplomová práce má za cíl otestovat totální stanicí Trimble SX10. Tato totální stanice v sobě skrývá místo standardního dalekohledu trojici kamer. Dále v sobě má zabudovaný laserový skener.

Nejprve bylo provedeno testování dálkoměru a to na školní kalibrační základně a jako etalon byla použita dříve testovaná totální stanice Trimble S8HP.

Dále bylo provedeno testování manuálního cílení při měření Hz směrů. Cíle byly ve vzdálenosti minimálně 700 metrů. Bylo otestováno, jak se bude chová kamera při cílení na takto vzdálené cíle.

Další testování proběhlo na kalibrační základně laserového skenování, kde bylo otestováno jak měření v režimu totální stanice, tak určení cílů vyhodnocením laserového skenování. Výsledky byly porovnány s dříve určenými souřadnicemi.

Další experiment byl proveden na válcové fasádě observatoře na střeše Fakulty stavební, která byla nejprve naskenována a poté přístrojem vyfotografována ze skenovacích stanovisek. Bylo zjišťováno, jestli bude možné tímto způsobem mračno bodů z těchto snímků vytvořit. Následně byla mračna bodů porovnána a zjištěny jejich odchylky.

2. Rešerše prací na téma testování laserového skenování

Bakalářská práce Martina Touška s názvem „Testování skenovacího systému Trimble TX5“ se zabývala testováním vlastností laserového skenovacího systému Trimble TX5. Zdroj: [1].

Diplomová práce Jakuba Kozáka na téma „Testování parametrů základnových skenovacích“ systémů se zabývala testováním podle německé směrnice VDI/VDE 2634. Zdroj: [2].

Disertační práce Václava Smítky s názvem „Přesnost 3D skenovacích technologií v geodezii a možnosti jejího zvyšování“ se zabývala zkoumáním přesnosti dílčích kroků v procesu pořizování i zpracování dat laserového skenování. Zdroj: [3].

Diplomová práce Jaroslava Šediny na téma „Porovnání 3D skenovacích metod s mračnem bodů, vytvořených obrazovou korelací v digitální fotogrammetrii“ se zabývala reálnou dosažitelnou přesností programů zpracování snímků a posouzení vhodnosti pro využití v oblasti památkové péče. Zdroj: [4].

Diplomová práce Milana Kuty s názvem „Projekt, realizace a zhodnocení přesnosti kalibrační základny laserového skenování“ se zabývala návrhem a realizací kalibrační základny v sídle firmy GEOREAL spol. s.r.o. v Plzni. Na tuto práci bylo navázáno. Zdroj: [12].

3. Testovaný přístroj

Skenovací totální stanice od americké firmy Trimble, typ SX10 je zobrazena na Obr. 1. Sériové číslo přístroje je: 30410413.

Rozměrná dalekohledová část přístroje v sobě skrývá dálkoměr, laserový skener a kamery. Laserové skenování pracuje na principu rozmítání paprsku pomocí rotačního zrcátka. Dále obsahuje trojici kamer, které úplně nahrazují dalekohled. Cílení je tedy možné pouze přes externí display. Přístroj je zajímavý tím, že obsahuje další kameru místo optického centrovače. Pokud by nastala situace, kdy by musel být použit zároveň optický centrovač v přístroji s optickým centrovačem v trojnožce, musela by být použita speciální trojnožka, která má v sobě zabudované polopropustné zrcadlo, které odráží paprsek v trojnožce a zároveň propouští paprsek z totální stanice.



Obr. 1: Trimble SX10, zdroj: [5]

3.1 Technické parametry

Hlavní technické parametry přístroje jsou uvedeny v Tab. 1. Specifikace by se daly rozdělit do několika kategorií. První kategorie je přesnost měření totální stanice, druhá je výkon skenování a třetí jsou speciality.

Totální stanice v sobě nese pulsní dálkoměr, který disponuje rozsahem měření délky 1 – 5 500 m. Čas měření délky na hranol je 1,6 s. Při odečítání úhlů je využíván absolutní snímač s diametrálním čtením, kde nejmenší dílek čtení je 0,01 mgon.

Zorné pole prístroje je 360°x300°. Celkový sken s rozstupem bodů 50 mm na 50 m trvá 12 minut. Rozsah měření na bílou barvu Kodak¹ je 0,9 - 600 m.

Dále přístroj obsahuje čtyři kamery. Jedna kamera je na místě optického centrovače, dvě kamery jsou rovnoběžné s osou měření (náhledová a hlavní) a jednu koaxiální kameru obsahuje dalekohled.

Tab. 1: Hlavní technické parametry Trimble SX10

Úhlová přesnost	0,3 mgon	3D přesnost bodu z laserového skenování	2,5mm @ 100 m
Délková přesnost – hranol, měření standard	1 mm + 1,5 ppm	Rozlišení každého čipu kamery	5 Mpix (2592 x 1944 pix)
Frekvence skenování	26,6 kHz	Dalekohledová kamera – velikost pixelu	0,88 mm na 50 m

3.2 Ovladatelnost

Veškeré ovládání přístroje probíhalo skrze kontroler Trimble Tablet, který je patrný na Obr. 2. V kontroleru je nahrán software Trimble Access, ten je velice intuitivní a ovládání přístroje probíhalo bez problémů. Veškerá data se ukládají do vnitřní paměti kontroleru, který komunikuje s přístrojem přes kabelové rozhraní (USB 2.0) nebo bezdrátově. Bezdrátová komunikace probíhá buďto prostřednictvím radiového spojení, nebo přes Wi-Fi připojení (standartní frekvence 2,4 GHz).



Obr. 2: Trimble Tablet, zdroj: [5]

¹ katalogové číslo E1527795

4. Měření

Tato kapitola popisuje testování přístroje Trimble SX10, testy jsou rozděleny do podkapitol. Jako první probíhal test dálkoměru, dále bylo testováno cílení na dlouhé vzdálenosti, poté byl přístroj převezen na skenovací základnu a nakonec bylo provedeno otestování vyhodnocení snímků zpracovaných fotogrammetricky. Každá podkapitola je podrobně vysvětlena, výsledky jsou popsány, popř. graficky znázorněny.

4.1 Určení podrobného průběhu chyb dálkoměru

Tato část testuje přesnost měření dálkoměru. Dle specifikací je přesnost standardního měření délek $1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm}$, bylo tedy provedeno testování, jestli je tato přesnost dodržena. Vzhledem k tomu, že měření bylo provedeno v laboratorních podmínkách, které jsou v omezeném prostoru, byla otestována pouze část rozsahu a to cca od 1 do 20 ti metrů.

4.1.1 Popis experimentu

Na školní kalibrační základně proběhlo současné měření délek dvěma přístroji. Jako etalon byl použit přístroj s přesnějším dálkoměrem Trimble S8HP, který byl dříve testován s interferometrem (Renishaw ML10).

Trimble SX10 byl upevněn na šroub nucené centrace, který je připevněn v ose testovací základny. Trimble S8HP byl postaven na stativ, tak aby byl také přibližně v ose. Postavení přístrojů je patrné na Obr. 3.

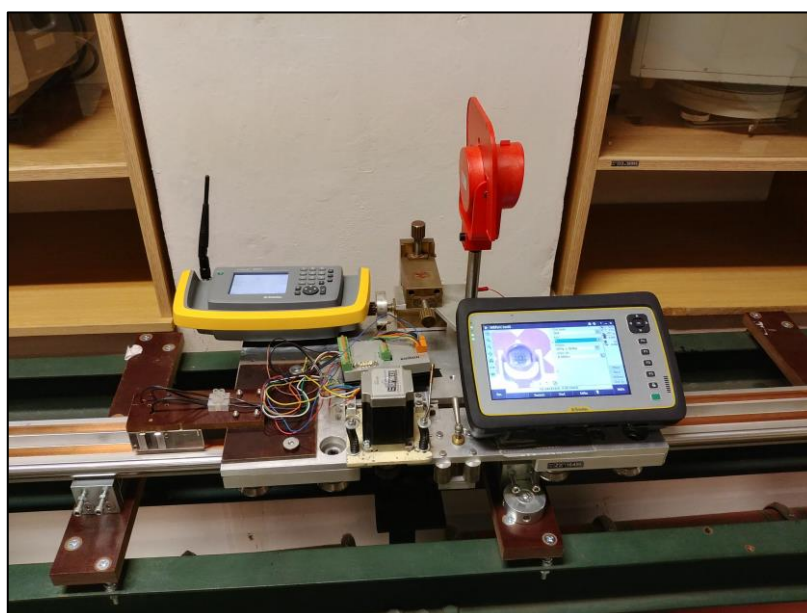
4.1.2 Školní kalibrační základna

Základna je umístěna v laboratoři Bs-128, která se nachází v suterénu Fakulty stavební ČVUT v Praze.



Obr. 3: Postavení přístrojů

Kalibrační základna se skládá z podpěr, dráhy a vozíku. Podpěry, které na sobě mají zabudované rektifikační šrouby pro urovnění dráhy, jsou v pravidelném intervalu 0,5 m. Dráha je vyrobena ze dvou ocelových broušených tyčí, které jsou usazeny v duralovém pouzdře o délce přibližně 23 metrů. Na kolejnicích jsou připevněny měděné pásy, do kterých je puštěn elektrický proud pro pohon elektromotoru vozíku. Na vozíku byl připevněn odrazný hranol, což je patrné na Obr. 4.



Obr. 4: Vozík s hranolem

4.1.3 Zpracování

Vzhledem k dřívějšímu testování totální stanice Trimble S8HP, byly převzaty absolutní chyby dálkoměru z bakalářské práce kolegy Tomáše Reindla [6]. Vzhledem k tomu, že se lišily měřené vzdálenosti se vzdálenostmi převzatými, tak musely být absolutní chyby přepočteny. Přepočet byl proveden lineární interpolací podle vzorce (1).

$$\Delta_{mi} = \Delta_{ki} + (S_{s8i} - S_{ki}) * \frac{\Delta_{di} - \Delta_{ki}}{S_{di} - S_{ki}} \quad (1)$$

Kde: Δ_{mi} je absolutní chyba měřené délky,
 Δ_{ki} je absolutní chyba převzaté kratší délky,
 Δ_{di} je absolutní chyba převzaté delší délky,
 S_{s8i} je měřená délka,
 S_{ki} je převzatá kratší délka,
 S_{di} je převzatá delší délka.

Dále byly určeny relativní chyby testovaného dálkoměru podle vzorce (2).

$$\Delta_{ri} = (S_{sx10i} - S_{sx101}) - (S_{s8i} - S_{s81}) \quad (2)$$

Kde: Δ_{ri} je relativní chyba pro určitou délku,
 S_{sx10i} je měřená délka určovaného dálkoměru,
 S_{sx101} je měřená délka určovaného dálkoměru ke vztažnému bodu,
 S_{s8i} je měřená délka etalonu,
 S_{s81} je měřená délka etalonu ke vztažnému bodu.

Na relativní chyby byla aplikována Fourierova transformace, která vytvořila funkci harmonického průběhu chyb dálkoměru. Pomocí této funkce lze dopočítat velikost chyby pro libovolnou délku. Fourierova transformace vypočetla, že opravná funkce má 171 vstupujících sad parametrů. Většina z nich měla periodu do 1 m a amplitudu do 0,12 mm, tento šum byl z v následujícího výpočtu odstraněn.

Každé měření obsahuje systematické chyby, proto byla zvolena mezní velikost amplitudy. Parametry funkce, které měly menší amplitudu než mezní hodnotu, byly z výpočtu vyřazeny. Jako mezní velikost amplitudy byla zvolena průměrná hodnota všech vypočtených amplitud.

Funkce vyjadřující chyby dálkoměru je patrná ve vzorci (3).

$$y_i = \sum_{j=1}^p A_j * \sin\left(\frac{2 * \pi}{T_j} * d_i + \varphi_j\right) \quad (3)$$

Kde: p je počet amplitud,
 A_j je amplituda,
 T_j je perioda,
 d_i je počáteční fáze,
 φ_j je měření vzdálenost.

Vzhledem k tomu, že FFT neudává vertikální posun, musela se opravná funkce o velikost tohoto posunu opravit podle vzorce (4).

$$y = \frac{\sum_{j=1}^p (y_i^{FFT} - y_i)}{n} \quad (4)$$

Kde: n je počet měřených délek,
 y_i^{FFT} je chyba dálkoměru.

4.1.4 Výsledky

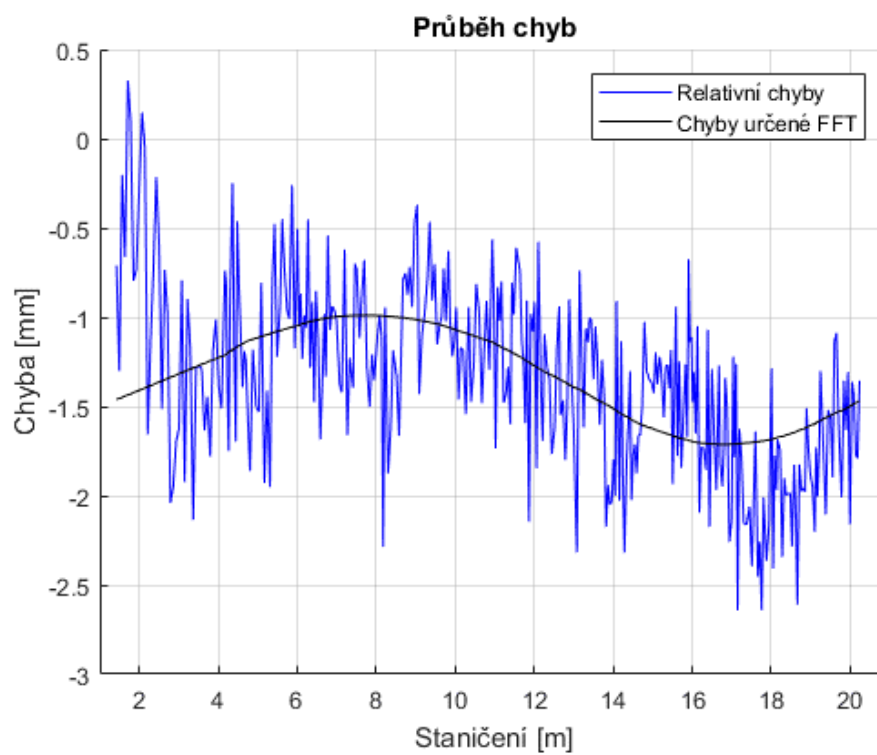
Z FFT byly získány parametry opravné funkce, které jsou vidět v Tab. 2.

Tab. 2: Hodnoty opravné funkce

Perioda [m]	Fázový posun [rad]	Amplituda [m]
17,100	-0,3042	0,361

Celkový průběh relativních chyb a chybového modelu je patrný v Graf 1.

Z chybového modelu se dá také vyčíst jaká je velikost chyby, která se pohybuje cca od -1,7 mm do -1 mm, což splňuje udávanou přesnost pro standardní měření délek. Výrobce udává přesnost standardního měření délek na hranol je 1mm + 1,5 ppm.



Graf 1: Porovnání relativních chyb s chybovým modelem

4.2 Testování přesnosti měření Hz směrů při cílení na dlouhé vzdálenosti

Tato podkapitola popisuje použitelnost přístroje při měření horizontálních směrů s cílením na dlouhé vzdálenosti bez použití automatického cílení.

Měření bylo provedeno ve třech skupinách, byly vypočteny rozborů přesnosti a výsledná směrodatná odchylka byla porovnána s mezní odchylkou.

Volba cílů byla volena tak, aby konfigurace pokrývala celý horizontální kruh a zároveň aby každý z cílů byl jinak vzdálený od stanoviště.

4.2.1 Popis experimentu

Měření probíhalo na střeše Stavební fakulty ČVUT v Praze. Pro kontrolu a porovnání dat bylo provedeno stejné měření s přístrojem Trimble S8HP.

Na pilíř č.2, který obsahuje upínací šroub na nucenou centraci byla připevněna trojnožka, která byla zhorizontována pomocí přístrojové libely. Do této trojnožky se následně usazovaly oba přístroje, tudíž byla poloha stanovištěk totožná Obr. 5.



Obr. 5: Trimble SX10 na pilíři

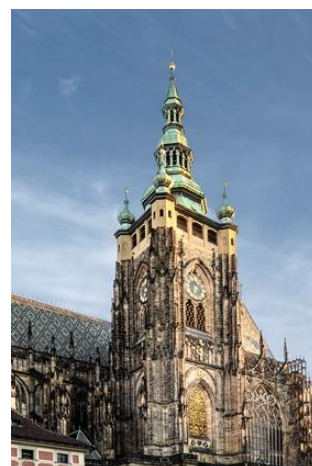
Měření probíhalo ve třech skupinách a cíleno bylo na středy makovic věží. Zvolené cíle jsou vidět na Obr. 6 - Obr. 11.



Obr. 6: Hotel International, zdroj: [7]



Obr. 7: Bohoslovecká kolej, zdroj: [8]



Obr. 8: katedrála sv. Víta, zdroj: [9]



Obr. 9: kostel sv. Vavřince, vlastní fotografie



Obr. 10: kostel sv. Norberta, zdroj: [10]



Obr. 11: kostel sv. Matěje, zdroj: [11]

4.2.2 Zpracování

Zpracování měření vodorovných směrů probíhalo standardním způsobem. Výpočet byl proveden v MS Excel.

4.2.2.1 Rozbory přesnosti

Každý směr je označen $\varphi_{i,j,I}$ nebo $\varphi_{i,j,II}$, kde i značí číslo skupiny (1 – 3), j značí číslo směru (1 – 6) a I, II označuje první nebo druhou polohu dalekohledu.

Nejprve byl vypočten průměr poloh podle vzorce(5).

$$\varphi_{i,j} = \frac{\varphi_{i,j,I} + \varphi_{i,j,II} \pm 200gon}{2} \quad (5)$$

Dále redukce k prvnímu směru podle vzorce (6).

$$\varphi'_{i,j} = \varphi_{i,j} - \varphi_{i,1} \quad (6)$$

Poté byl vypočten průměr skupin podle vzorce (7).

$$\varphi_{\emptyset j} = \frac{\varphi'_{1,j} + \varphi'_{2,j} + \varphi'_{3,j}}{3} \quad (7)$$

Následně velikosti prvních oprav podle vzorce (8).

$$v_{i,j} = \varphi_{\emptyset j} - \varphi'_{i,j} \quad (8)$$

Velikosti prvních oprav byly porovnány s mezní opravou (9)

$$v_{M\varphi} = u_{\alpha,n} * \sqrt{2} * \frac{\sigma_{\varphi}}{\sqrt{3}} = 0,426 mgon \quad (9)$$

Kde $u_{\alpha,n} = 1,74$, protože hladina významnosti α byla použita 0,05 a n je počet skupin, v tomto případě 3. Pokud bude velikost opravy větší, než je mezní oprava, bude měření označené jako podezřelé a provede se výpočet bez podezřelého bodu. Tudíž $u_{\alpha,n} = 1,39$ a velikost mezní opravy je 0,340 mgon [13].

Následoval výpočet průměrných oprav pro každou skupinu (10).

$$v_{\emptyset i} = \frac{\sum v_{i,j}}{n} \quad (10)$$

Kde n je počet směrů.

Z průměrných oprav byly vypočteny druhé opravy (11).

$$w_{i,j} = v_{\emptyset i} - v_{i,j} \quad (11)$$

Z druhých oprav byla vypočtena výběrová směrodatná odchylka směru (12).

$$\sigma_{\varphi R} = \sqrt{\frac{\sum w^2}{s * (s - 1) * (n - 1)}} \quad (12)$$

Kde s je počet skupin.

Výběrová směrodatná odchylka byla porovnána s mezní výběrovou směrodatnou odchylkou směru (13).

$$S_{M\varphi R} = \sigma_{\varphi} * \left(1 + \sqrt{\frac{2}{n'}} \right) = 0,422 \text{ } mgon \quad (13)$$

Kde n' je počet nadbytečných měření.

4.2.2.2 Velikost pixelu na snímku

Vzhledem k tomu, že testovaná totální stanice nedisponuje dalekohledem pro optické cílení ale dle specifikací třemi kamerami o rozlišení 5 Mpix (2592 x 1944 pix), bylo nutné ověřit, zdali bude kvalita snímků dostačující pro manuální zacílení. Pro tento test byla použita dalekohledová kamera koaxiální, která byla využita při měření osnova směrů. Při měření směrů bylo pořizeno několik snímků na dané cíle. Bohužel, i po konzultaci s technickou podporou, se povedlo stáhnout snímky pouze o rozlišení 640 x 480 pix, tudíž byly pro další zpracování použity tyto snímky (Obr. 12 - Obr. 17).

Vodorovný rozměr pixelu se určí z jasně identifikovatelných bodů na snímku, tak že se vezme délka mezi body a vydělí se počtem pixelů. Vzhledem k tomu, že v geodetických údajích nejsou uvedeny žádné rozměry makovic a také nemáme k dispozici technickou dokumentaci a ani stavební projekty, musely být tyto rozměry určeny nepřímou metodou.

Pro určení velikosti pixelu, bylo nutné změřit vodorovný úhel mezi jasně identifikovanými body na snímku. Bohužel na kostelu sv. Norberta nebylo nic, co by se dalo považovat za jasně identifikované body, byl tento snímek z dalšího zpracování odstraněn (Obr. 16). Měření bylo provedeno přístrojem LEICA TCA 2003. Měření probíhalo v pěti skupinách.



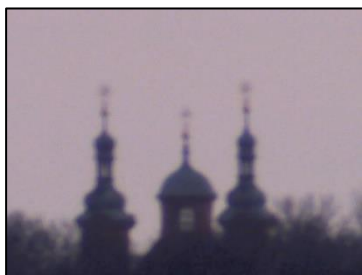
Obr. 12: foto International



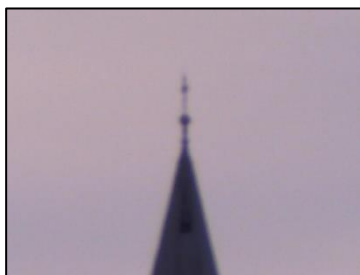
Obr. 13: foto Bohoslovecká



Obr. 14: foto sv. Vít



Obr. 15: foto sv. Vavřinec



Obr. 16: foto sv. Norbert



Obr. 17: foto sv. Matěj

Dále bylo nutné určit vodorovnou vzdálenost mezi stanoviskem a makovicí věže, některé z makovic jsou součástí databáze bodových polí, tudíž byla vzdálenost vypočtena ze souřadnic. U ostatních makovic musela být vzdálenost určena jiným způsobem. Požadovaná přesnost určení vzdálenosti je patrná ve vzorci (14).

$$\sigma_d = \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_{PIX}}\right)^2 * \sigma_{V_{PIX}}^2 + \left(\frac{V_{PIX}}{\omega_{PIX}^2}\right)^2 * \left(\frac{\sigma_{\omega_{PIX}}}{\rho}\right)^2} = 4,2m \quad (14)$$

Kde ω_{PIX} je úhlová velikost pixelu (1,2 mgon),

$\sigma_{\omega_{PIX}}$ požadovaná přesnost určení velikosti pixelu (0,1 mgon),

V_{PIX} je velikost pixelu ve skutečnosti (10 mm),

$\sigma_{V_{PIX}}$ je požadovaná přesnost určení velikosti pixelu ve skutečnosti (5 mm).

Dle požadované přesnosti je zřejmé, že můžeme vzdálenost bez problémů odměřit z mapy. Vzdálenosti byly 3x odměřeny a následně z nich byla vypočtena průměrná délka. Kontrolně byly odměřeny vzdálenosti k makovicím o známých souřadnicích a následně porovnány se vzdálenostmi vypočtenými. Rozdíl dosahoval maximálně 1 metru, což splňuje předchozí rozbor přesnosti.

Úhlová velikost pixelu byla vypočtena podle vzorce (27).

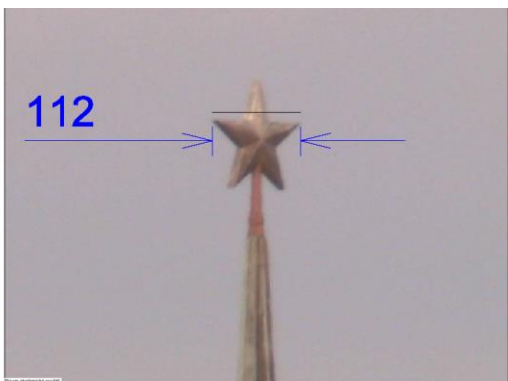
$$1PIX_j = \frac{\frac{\omega_j * \rho}{d_j}}{\frac{\sum PIX_j}{d_j * \rho}} \quad (15)$$

Kde ω_j je úhel zjišťovaného objektu,

d_j je vzdálenost zjišťovaného objektu od stanoviska,

$\sum PIX_j$ je velikost zjišťovaného objektu na snímku.

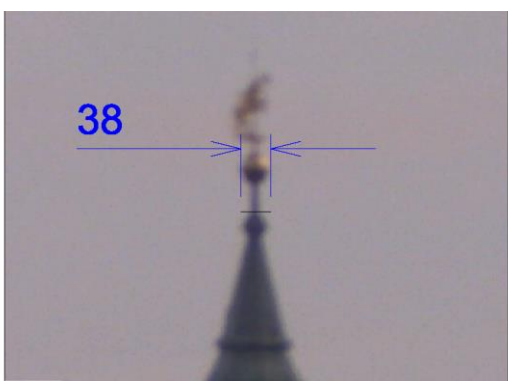
Velikost zjišťovaného objektu na snímku byla určována v programu MicroStation V8i. Pro každý obrázek byl vytvořen nový výkres. Do výkresu byla nahrána fotografie dané makovice pomocí funkce Raster Manager. Rozměry fotografie byly zvětšeny tak, aby se velikost 1 pixelu rovnala délce 1 metru. Následně bylo provedeno měření délek. Délky se měřily 3x a do dalšího výpočtu byla použita průměrná délka. Průměrná délka se tedy rovná počtu pixelů mezi jasně identifikovatelnými body. Počty pixelů a zvolené body jsou vyznačeny na Obr. 18 až Obr. 22.



Obr. 18: Počet pixelů – International



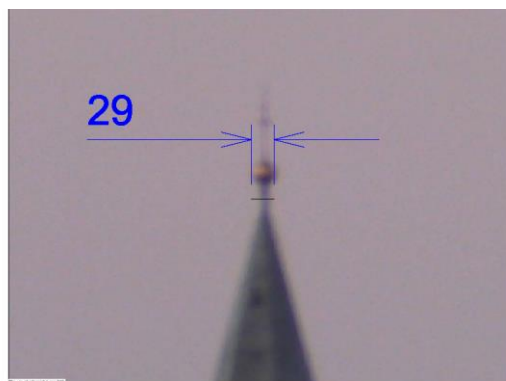
Obr. 19: Počet pixelů – Bohoslovecká kolej



Obr. 20: Počet pixelů – sv. Vít



Obr. 21: Počet pixelů – sv. Vavřinec



Obr. 22: Počet pixelů – sv. Martin

4.2.3 Vyhodnocení

Výpočtem úhlové velikosti pixelu na snímku bylo zjištěno, že 1 pixel odpovídá úhlu 1,13 mgon, což je patrné v Tab. 3. Technická specifikace koaxiální kamery udává že jeden pixel na snímku odpovídá velikosti 0,88 mm na 50 m. Když pixel převedeme na úhlovou míru, tak je to 1,12 mgon. Experimentální přesnost splňuje přesnost dle specifikací, jestliže koaxiální kamera disponuje rozlišením 640 x 480 pix. Pokud bude prováděno měření s manuálním cílením, výsledná přesnost směru je patrná ve vzorci (16).

Tab. 3: Úhlová velikost pixelu na snímcích

Snímek	Úhel [gon]	Délka od stanoviška [m]	Délka na snímku [pix]	1 pixel [gon]
International	0,12694	772	112	0,00113
Bohoslovecká kolej	0,03098	945	27	0,00115
sv. Vít	0,04252	1712	38	0,00112
sv. Vavřinec	0,28632	2356	255	0,00112
sv. Martin	0,03330	1293	29	0,00115

$$\sigma_{\varphi MAN} = \sqrt{\sigma_{\varphi}^2 + \sigma_{1PIX}^2} = \sqrt{0,3^2 + 1,2^2} = 1,24 \text{ mgon} \quad (16)$$

Kde σ_{φ} je směrodatná odchylka měření,

σ_{1PIX} je velikost 1 pixelu, tudíž směrodatná odchylka cílení.

Jako další byl proveden výpočet rozborů přesnosti. Byly porovnány velikosti prvních oprav s mezní opravou, dále byla vypočtena výběrová směrodatná odchylka směru, která byla porovnána s mezní odchylkou směru. Mezní odchylka nebyla překročena, což dle předchozího výpočtu není možné. Nejspíše je to způsobeno nesouladem rozlišení snímku a rozlišením displeje, 1 pixel na snímku je tak veliký, že je zobrazen na tolika pixelech displeje, že lze výběr obrazového pixelu provádět bezchybně. Výpočet je k nahlédnutí v Příloha č. 1.

4.3 Vyhodnocení přesnosti skenování na skenovací základně

V této kapitole bylo popsáno zpracování polárního měření a měření laserovým skenerem. Dále bylo provedeno porovnání s dříve a přesněji určenými souřadnicemi v diplomové práci kolegy Ing. Milana Kutý [12].

4.3.1 Popis experimentu

Měření bylo provedeno z centrického stanoviska, byly vidět všechny body. Nejdříve bylo měřeno v režimu laserového skeneru a následně v režimu totální stanice. Výrobce udává 3D přesnost bodu získaná laserovým skenováním je 2,5 mm, bylo otestováno, jestli je tato přesnost dodržena.

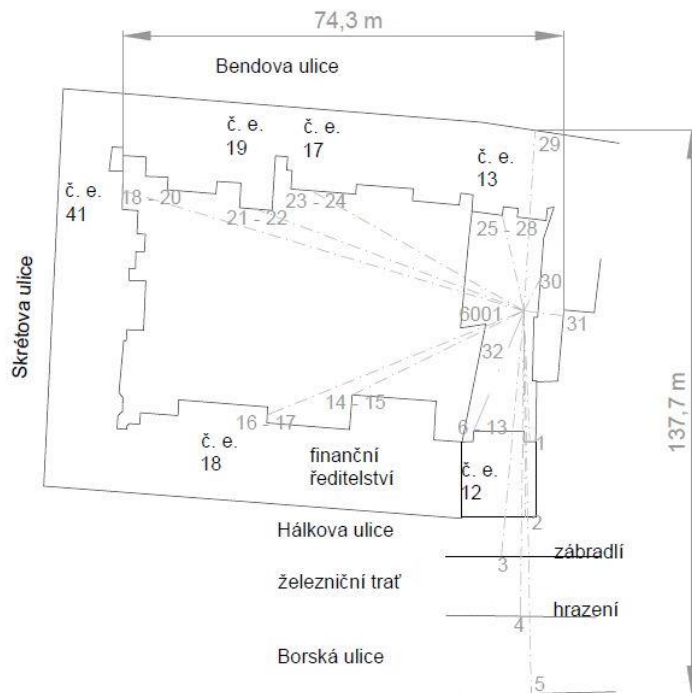
4.3.1.1 Kalibrační základna

Kalibrační základna se nachází v centru města Plzeň, ve vnitrobloku ulic Hálkova, Bendova, Skrétova a Klatovská třída. V tomto vnitrobloku sídlí také firma GEOREAL spol. s.r.o., která se podílela společně s kolegou Ing. Milanem Kutou na tvorbě této sítě.

Síť je stabilizována ze 32 kruhových odrazných štítků o poloměru 6 cm (Obr. 23), které jsou upevněny na blízkých stálých objektech. Konfigurace bodů je znázorněna na Obr. 24.



Obr. 23: Odrazný štítek, zdroj: [12]

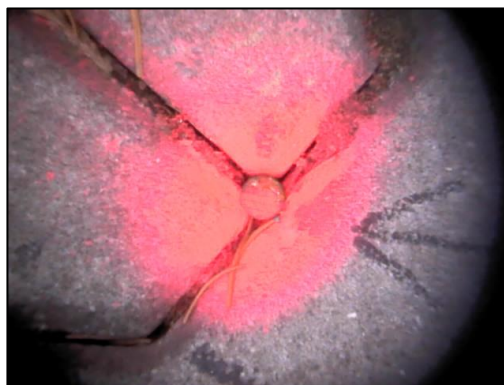


Obr. 24: Rozložení bodů kalibrační základny, zdroj:[12]

4.3.2 Měření

Při tomto experimentu mělo být, mimo jiné, otestováno, jak moc je komfortní provádět měření z blízkého vozidla, bohužel se nám nepovedlo přístroj spárovat s kotrolerem přes Wi-Fi připojení, musel být připojen přes kabel, tudíž muselo být měření provedeno v kabelem limitující vzdálenosti.

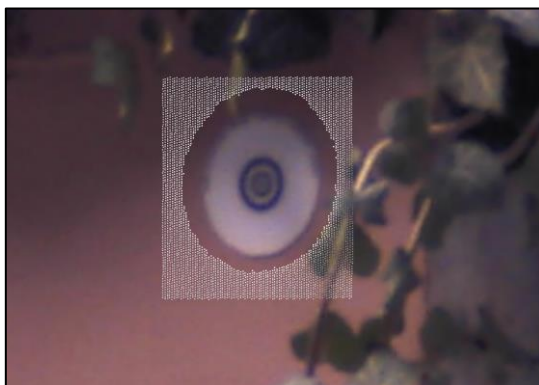
Základna obsahuje 1 bod stanoviska. Přístroj byl tedy zcentrován a zhorizontován nad tímto bodem a jeho pozice byla po celou dobu kontrolována pomocí centrační kamery. Fotografie z dané kamery je patrná na Obr. 25. Na displeji byly zobrazeny informace o náklonu přístroje, bohužel se informace do snímků nepřenáší.



Obr. 25: Kontrola centrace přístroje nad bodem

Při měření laserovým skenerem bylo vždy vybráno blízké okolí bodu, které bylo naskenováno. Vzhledem k tomu, že body jsou signalizovány odrazným štítkem, bylo zamýšleno, že bude výsledný bod určen ve středu místa s nejintenzivnějšího signálu.

Bohužel, přístroj místa vyhodnotil tak, že je v místě příliš intenzivní odraz, tudíž body, které se měli nacházet na odrazném štítku, vůbec neuložil (Obr. 26). Kvůli špatné viditelnosti nebyl oskenován bod č.5.



Obr. 26: Naskenované okolí bodu

Dále byla změřena polární metodou relativní poloha středů odrazných štítků vůči stanovisku. Měření bylo provedeno ve 2 skupinách za využití manuálního cílení. Vzhledem k časové náročnosti měření bylo měřeno pouze na 23 bodů.

4.3.3 Zpracování

Každá měřená hodnota má označení i,j,I nebo i,j,II , kde i je číslo skupiny (1 - 2), j je číslo směru (1 – 23), a I, II znamená číslo polohy. Nejdříve bylo provedeno zpracování měření polární metody. Zpracování vodorovných směrů bylo podobné jako v kapitole 4.2.2.1. Nejprve byl vypočten průměr poloh a poté průměr skupin. Dále byly zpracovány zenitové úhly, které byly opraveny o indexovou chybu (17).

$$i_{i,j} = \frac{400^g - (\zeta_{i,j,I} + \zeta_{i,j,II})}{2} \quad (17)$$

Výsledný zenitový úhel byl vypočten podle vzorce (18).

$$\zeta_{\emptyset j} = \frac{(\zeta_{1,j} + i_{1,j}) + (\zeta_{2,j} + i_{2,j})}{2} \quad (18)$$

Dále byl vypočtena průměrná šikmá délka podle vzorce (19).

$$\check{s}_{\varnothing j} = \frac{\check{s}_{1jI} + \check{s}_{1jII} + \check{s}_{2jI} + \check{s}_{2jII}}{4} \quad (19)$$

Z průměrovaného měření byly dále vypočteny souřadnice v místním souřadnicovém systému. Systém byl vytvořen tak, že počátek byl vložen do stanoviska, a osa +X byla vložena do vodorovné roviny a směřuje do bodu č. 1. Osa +Y byla vložena do vodorovné roviny a je otočena +X pravý úhel doprava. Osa +Z doplňuje pravotočivý souřadný systém a směřuje do zenitu v počátku. Dále byla k souřadnicím přičtena konstanta (1000, 5000, 100), aby souřadnice nebyly záporné.

Výsledné souřadnice bodů se počítali podle vzorců (20) až (22).

$$X_j = X_s + s_j * \cos \sigma_j \quad (20)$$

$$Y_j = Y_s + s_j * \sin \sigma_j \quad (21)$$

$$Z_j = Z_s + \Delta_h \quad (22)$$

Kde X_s , Y_s a Z_s jsou souřadnice stanoviska [1000, 5000, 100], s_j je vodorovná délka, která je vypočtena podle (23).

$$s_j = \check{s}_{\varnothing j} * \sin \zeta_{\varnothing j} \quad (23)$$

σ_j je směrnik který byl vypočten podle vzorce (24).

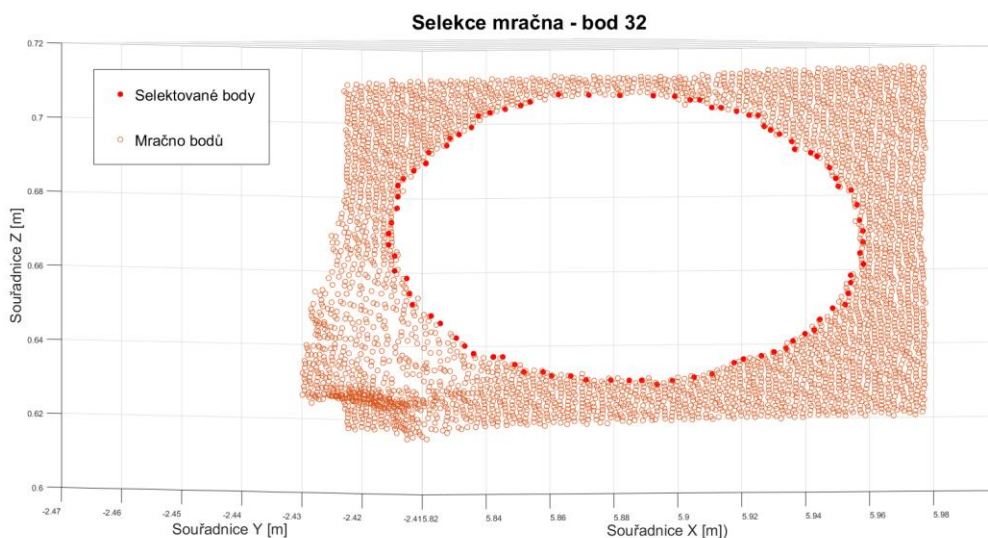
$$\sigma_j = \varphi_j - \varphi_1 \quad (24)$$

Δ_h je převýšení, které bylo vypočteno podle vzorce (25).

$$\Delta_h = \check{s}_{\varnothing j} * \cos \zeta_{\varnothing j} \quad (25)$$

Výpočet souřadnic v místním systému je zobrazen v Příloha č. 2.

Dalším krokem bylo připravení dat z laserového skenování. Nejprve byly ručně vyselektovány body, které se nacházely nejbližší místu, kde nebyly body uloženy viz Graf 2.



Graf 2: Selekcce bodů z mračna – bod 32

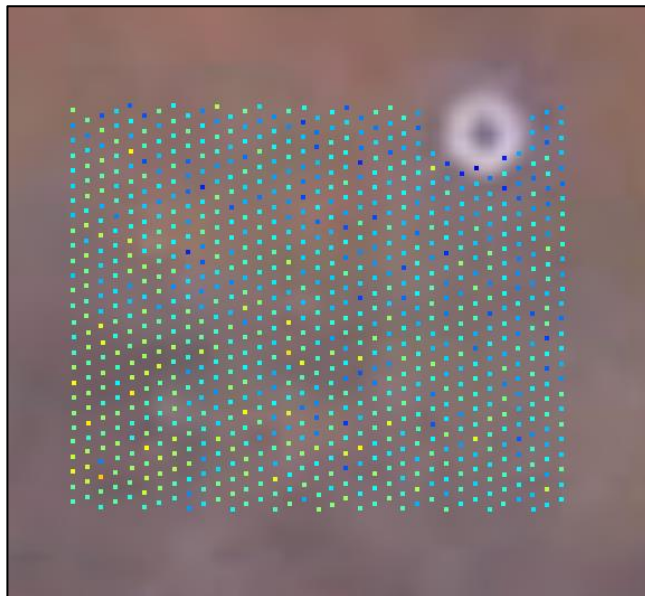
Z těchto bodů byly vypočteny průměrné souřadnice, které byly považovány jako středy odrazných štítků.

Přesnost polohy středu byla ověřena experimentálním výpočtem. Danými body byla proložena rovina a dále byly vypočteny ortogonální průměty daných bodů do roviny (Graf 3). Následně byly ortogonální průměty transformovány do rovinného souřadnicového systému a byla jimi proložena elipsa. Pro proložení elipsy byla použita funkce `fit_ellipse` [14]. Následně byl střed elipsy transformován do původního souřadnicového systému. Testování odchylek bylo provedeno na bodu č. 8. Rozdíl dvojího určení středu jsou patrné v Tab. 4. Z rozdílu je patrné, že lze střed štítků určit průměrováním souřadnic.

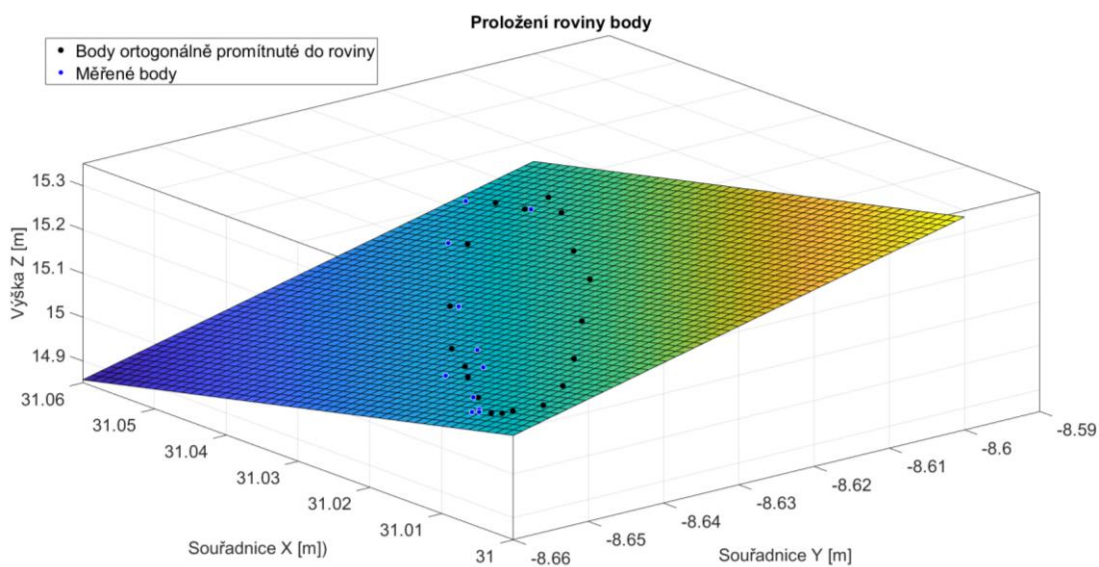
Tab. 4: Porovnání dvojího určení souřadnic

Bod	Průměr			Proložení elipsy			Rozdíl		
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
8	18,6070	10,9479	3,7129	18,6070	10,9483	3,7130	0,0	0,4	-0,1

Při skenování bodu č. 20 byla špatně vybrána oblast skenování z důvodu nesouososti náhledové kamery a skeneru. Tento bod byl z následujícího zpracování vyřazen (Obr. 27).



Obr. 27: Skenování bod č. 20



Graf 3: Ortogonální průměty v rovině – bod 8.

4.3.4 Vyhodnocení

Výsledné souřadnice v místním souřadnicovém systému byly porovnány s již dříve určenými body, které byly převzaty z [12]. Porovnání bylo provedeno Helmertovou 3D transformací. Výpočet transformace byl proveden v programu Matlab a byla použita funkce helmert3d. Tato funkce je součástí balíku funkcí Geodetic Transformation [15].

Nejprve bylo provedeno porovnání převzatých souřadnic a souřadnic určených výpočtem polární metody, které je vidět v Tab. 5. Tímto bylo ověřeno, že nedošlo k žádnému posunu bodů. Největší souřadnicové rozdíly jsou na bodu 30, což bylo očekáváno z důvodu vzdálenosti bodu od stanoviska, která je cca 5,3 m, tudíž ze špatného cílení na krátké vzdálenosti.

Tab. 5 Rozdíl souřadnic dříve určené základny se souřadnicemi určenými polární metodou

bod	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔZ [mm]
1	1,05	0,09	0,52
2	0,94	-0,43	0,51
4	-1,33	-0,21	-0,47
5	0,48	0,87	-0,31
8	0,83	-0,14	0,41
10	0,58	0,00	0,20
12	-0,98	-0,26	-0,21
14	0,21	-1,01	0,49
15	-0,91	-1,85	-0,78
18	1,00	0,94	-0,46
19	0,05	0,21	0,49
20	-0,87	0,28	-0,36
21	-0,10	-0,54	0,24
22	-0,02	-0,16	-0,10
23	-0,02	0,31	-0,08
24	-0,02	0,69	0,00
25	-0,94	0,32	-0,11
26	-0,11	-0,17	-0,22
27	0,15	-0,43	-0,32
28	0,30	-0,68	-0,72
29	0,03	-0,24	0,10
30	-1,24	1,72	0,38
32	0,92	0,69	0,81

Dále bylo provedeno porovnání převzatých souřadnic se souřadnicemi určenými z laserového skenování, které jsou zobrazeny v Tab. 6. Před samotným porovnáním byla provedena transformace dat s počátkem v bodě 1 a osou +X směřující do bodu 2, protože

by byly úhly rotace příliš velké, matice rotace by byla takřka singulární a výsledky by byly nepřesné. Souřadnice před a po transformaci jsou v Příloha č. 3. Porovnání bylo provedeno se souřadnicemi převzatými.

Tab. 6: Rozdíl souřadnic dříve určené základny a souřadnic určených laserovým skenováním

bod	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔZ [mm]
1	0,56	0,59	-2,32
2	0,33	7,38	-8,63
4	-0,24	-3,34	4,84
8	0,49	-0,46	-1,50
10	-1,03	4,86	0,42
12	-2,25	1,18	3,67
14	-1,21	-1,11	-0,22
15	-4,55	-3,46	-1,95
18	2,81	2,97	-5,38
19	0,77	1,33	1,21
21	-0,90	-0,08	3,24
22	2,39	1,43	0,85
23	1,52	0,58	1,41
24	-1,02	0,82	1,91
25	-0,32	-5,67	1,09
26	0,75	-3,56	-0,09
27	0,14	-1,14	0,81
28	1,32	-4,32	0,09
29	0,13	-1,39	1,02
30	-1,52	3,49	-1,04
32	1,80	-0,11	0,54

Z výsledných rozdílů souřadnic byly vypočteny směrodatné odchylky pro každou souřadnici podle vzorce (26).

$$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (26)$$

Kde n je počet odchylek od průměru,

v_i je daná odchylka od průměru, tyto odchylky jsou také v Příloha č. 3.

Z těchto směrodatných odchylek byla vypočtená směrodatná odchylka polohová, podle vzorce (27).

$$\sigma_{3D} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (27)$$

Vzorce pro výpočet byly převzaty z mé bakalářské práce [16].

4.3.5 Výsledky

Výsledné směrodatné odchylky pro každou souřadnici a směrodatná odchylka polohová jsou zobrazeny v Tab. 7. Výrobce udává 3D přesnost bodu @ 100m je 2,5 mm.

Úvaha: *Co znamená 3D přesnost bodu @ 100 m? Přesnost bodu se nedá určit pouze jedním parametrem, protože lze předpokládat že přesnost bodu se bude vyvíjet v závislosti na poloze. Správně určená přesnost bodu je dána šesti parametry, Parametry jsou délka, vodorovný směr, zenitový úhel a velikosti 3 poloos elipsoidu chyb. Můžeme se domnívat, že výrobce nějak zohlednil dané parametry a z nich určil výslednou přesnost. Buď by to mohla být ta nejnižší určená přesnost, tak aby všechno měření mělo lepší přesnost, než je tato uvedená, nebo by to mohla být nějaká průměrná hodnota, nebo ta nejvíce přesná, aby to vypadalo dobře na papíře. Můžeme se teoreticky domnívat, že by to mohla být polohová směrodatná odchylka polohová, bude tedy uvedena ta.*

Pokud je úvaha správná je z tabulky patrné že vypočtená polohová směrodatná odchylka souboru měření nesplňuje technické specifikace udané výrobcem.

Tab. 7: Směrodatné odchylky laserového skenování

odchylka	velikost [mm]
σ_x	1,7
σ_y	3,1
σ_z	3,0
σ_{3D}	4,6

4.4 Porovnání mračna bodů získaného fotogrammetricky s mračnem z laserového skenování

Úvaha: *Vzhledem k tomu, že přístroj má v sobě zabudované kamery, dalo by se te mračno bodů vytvořit z pořízených snímků? Pokud ano, tak jaké bude dosahovat přesnosti?*

Budou vytvořeny tři soubory mračen bodů, které mezi sebou budou porovnány.

4.4.1 Popis experimentu

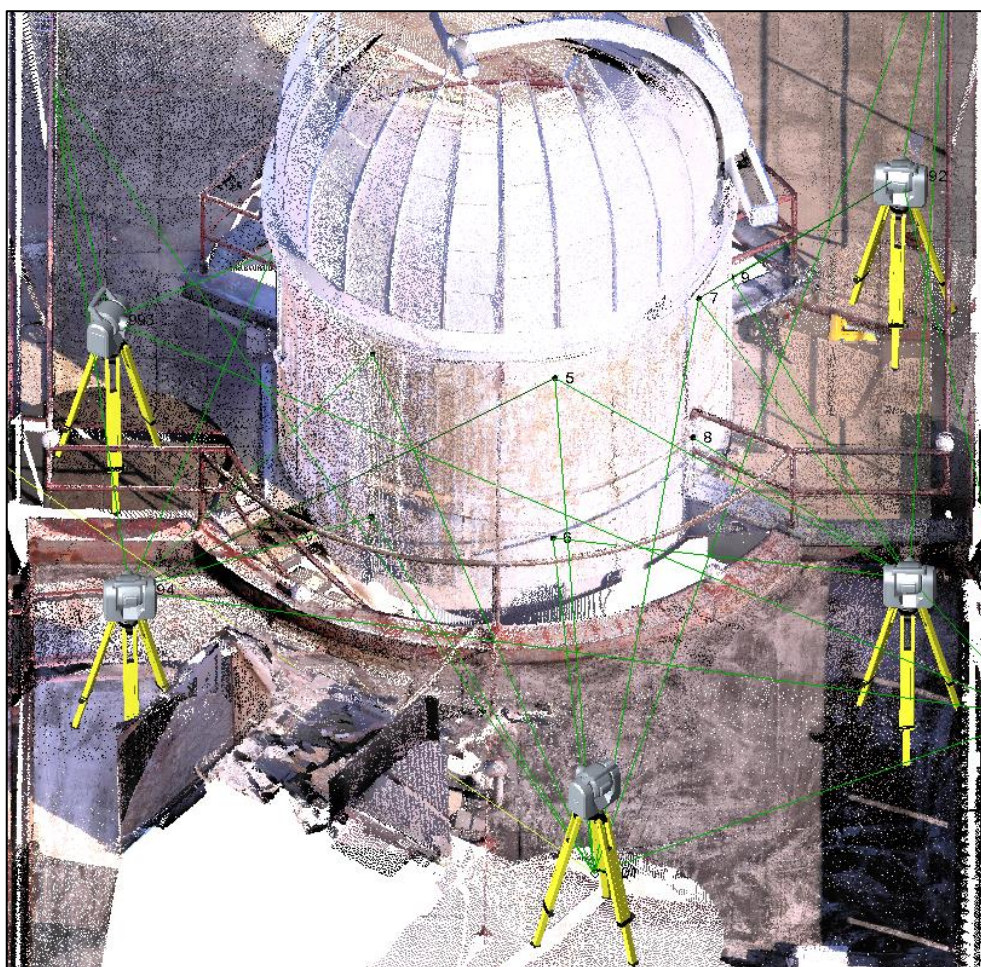
Pro vyhodnocení byla zvolena válcová plocha školní observatoře, která se nachází na střeše fakulty Stavební Obr. 28. Válcová plocha byla naskenována a také se daným přístrojem vyfotografována určovaná oblast. Fotografování bude probíhalo pouze na sken pozicích. Poslední vyhodnocení bylo provedeno fotoaparátem. Pořizování snímků bylo provedeno dle zásad snímkování. Ze snímků byla vytvořena mračna bodů. Následně se mezi sebou mračna porovnají a zjistí se odchylky.



Obr. 28: Observatoř na střeše

4.4.2 Měření

Nejprve bylo na určovaném objektu nalepeno 11 značek. Značky slouží jako bodové pole pro měření v místním souřadnicovém systému, tak pro určení správného měřítka fotogrammetrické metody. Na prvním volném stanovisku (bod 4001 s orientací na bod 4002) byly zaměřeny značky a následně byly vypočteny jejich souřadnice v místním souřadnicovém systému, poté bylo spuštěno měření laserovým skenerem, při kterém bylo vždy pořízeno několik fotografií observatoře. Počet snímků volil software automaticky v závislosti na vzdálenosti a orientaci přístroje. Na dalším volném stanovisku (bod 9991) byly nejprve protínáním určeny souřadnice stanoviska, dále byly zaměřeny nové značky, které nebyly z předchozího stanoviska viditelné a poté bylo spuštěno laserové skenování a také byly pořízeny fotografie skenovaného území. Tento postup se opakoval ještě na dalších třech stanoviscích. Rozložení bodů a stanovisek je patrné na Obr. 29.



Obr. 29: Konfigurace stanovisek a bodů

V dalším kroku byla kopule vyfotografována fotoaparátem Canon EOS 20 D s objektivem Canon EF-S 10-22 který je zobrazen na Obr. 30. Fotografování probíhalo tak, že se na začátku zájmového území pořídil první snímek, poté se udělal úkrok a pořídil se další snímek. Všechny tyto snímky byly vyfoceny s osou záběru kolmo na kopuli. Poté byly pořízeny snímky s osou záběru stočenou o cca 45° oproti původním snímkům. Toto fotografování proběhlo s nastavenou ohniskovou vzdáleností 10 mm, poté byla ohnisková vzdálenost nastavena na 22 mm a bylo provedeno další snímkování s osou kolmou na kopuli. Celkem bylo pořízeno 77 fotografií.



Obr. 30: Canon EOS 20 D + Canon EF-S 10-22

4.4.3 Zpracování

Zpracování mračna bodů z laserového skenování spočívalo pouze v exportu dat z programu Trimble Business Center. Nebylo nutné provádět spojení mračen, toto probíhalo automaticky, protože bylo měřeno v souřadnicích. Souřadnice bodů byly vyexportovány.

Dále bylo vytvořeno mračno bodů ze snímků. Zpracování snímků bylo provedeno v programu Agisoft PhotoScan Profesional. Poté na sebe byla mračna bodů manuálně registrována. Registrace byla provedena v programu Geomagic a nakonec byla mračna bodů porovnána v programu CloudCompare.

4.4.3.1 Vytvoření mračna bodů v programu Agisoft PhotoScan Professional

- Přidání nového chunk – slouží pro společné zpracování fotek.
- Import snímků do chunk.
- Nahrání seznamu souřadnic vřícovacích bodů. Souřadnice byly ve formátu .csv, které byly vyexportovány z přístroje. Souřadnice v místním systému jsou v Tab. 8, kde body 1 – 11 jsou značky, bod 4001 je první stanoviště a bod 4002 je vymyšlený bod, do kterého byla vložena osa +X. Body (9991 – 9994 jsou další stanoviště).
- Označení vřícovacích bodů na snímcích.
- Výpočet svazkového vyrovnání.
- Filtrace spojovacích bodů, po každé filtraci se znovu provede svazkové vyrovnání.
- Výpočet hustého mračna bodů.
- Export mračna bodů.

Tab. 8: Seznam souřadnic bodů na observatoři

Bod	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	9,330	3,177	1,678
2	5,685	2,052	2,996
3	4,306	1,785	2,996
4	4,318	1,783	1,221
5	3,134	2,641	2,964
6	3,144	2,629	1,224
7	2,947	4,038	3,019
8	2,930	3,959	1,572
9	3,438	4,878	2,344
10	5,777	9,574	1,791
11	-1,270	3,615	1,654
4001	0,000	0,000	1,500
4002	100,000	0,000	0,000
9991	0,017	3,482	2,364
9992	3,196	6,505	2,522
9993	6,358	0,902	2,557
9994	3,965	-1,220	2,679

4.4.3.2 Registrace v programu Geomagic

- Import mračen, důležité je, aby obě mračna měla stejné měřítko.
- Manuální registrace souřadnicových systémů. Jedno mračno bylo transformováno do druhého souřadnicového systému pomocí minimálně 3 identických bodů, které se označí na obou mračnech.
- Export registrovaných mračen ve formátu .OBJ.

4.4.3.3 Porovnání mračen v CloudCompare

- Import mračen.
- Přesná registrace mračen.
- Výpočet diferenciálního modelu. Model byl vytvořen tak, aby byly rozdíly vzdáleností mračen barevně znázorněny podle barevného měřítka.

4.4.4 Vyhodnocení

Cílem tohoto experimentu nebylo určit, z kolika stanovisek by bylo nutné pořizovat snímky určovaného území, ani na kolika snímcích by muselo území být, aby bylo vůbec možné získat mračno bodů. Cílem bylo určit, zdali půjdou snímky pořízené tímto přístrojem vůbec použít pro fotogrammetrické zpracování.

4.4.4.1 Porovnání mračna z laserového skenování s mračnem vytvořeným ze snímků z fotoaparátu

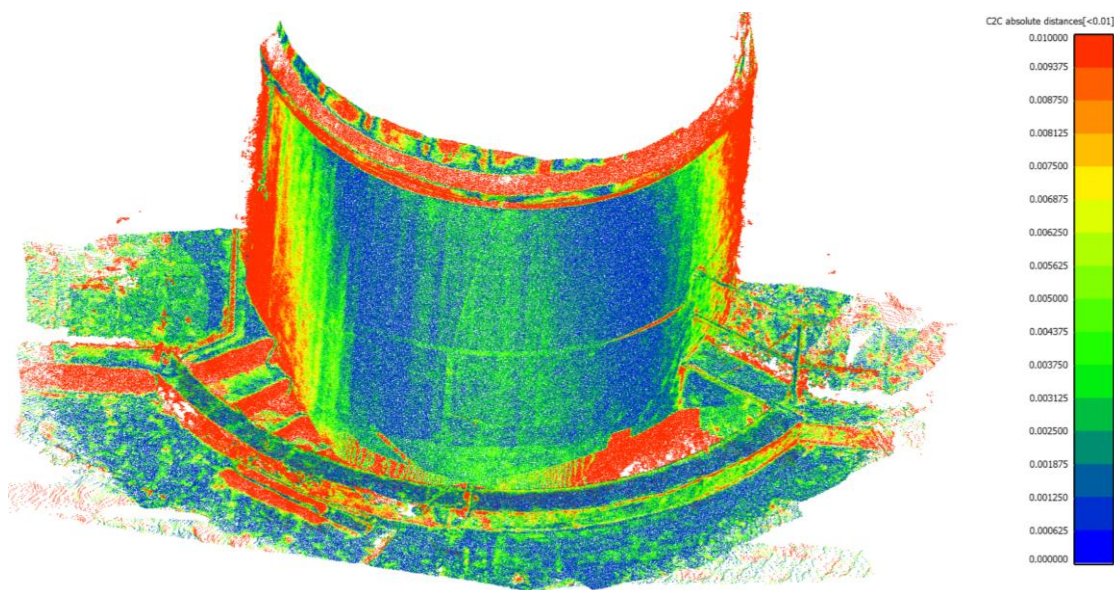
Při pohledu na mračno z fotoaparátu lze spatřit na krajích zájmového území zvlněné plochy, což je nejspíše způsobeno špatnou konfigurací snímkování. Dále je vidět, že tato metoda má problémy s vyhodnocením zábradlí a hromosvodu. Mračno je zobrazeno v Příloha č. 4.

Při porovnání mračen je vidět, že odchylky na kopuli se pohybují od 0 mm do 5 mm. Na okolních místech, které ovšem nebyly předmětem zkoumání, jsou odchylky větší než 1 cm, což je způsobeno špatným snímkováním. Diferenciální model je patrný v Obr. 32.

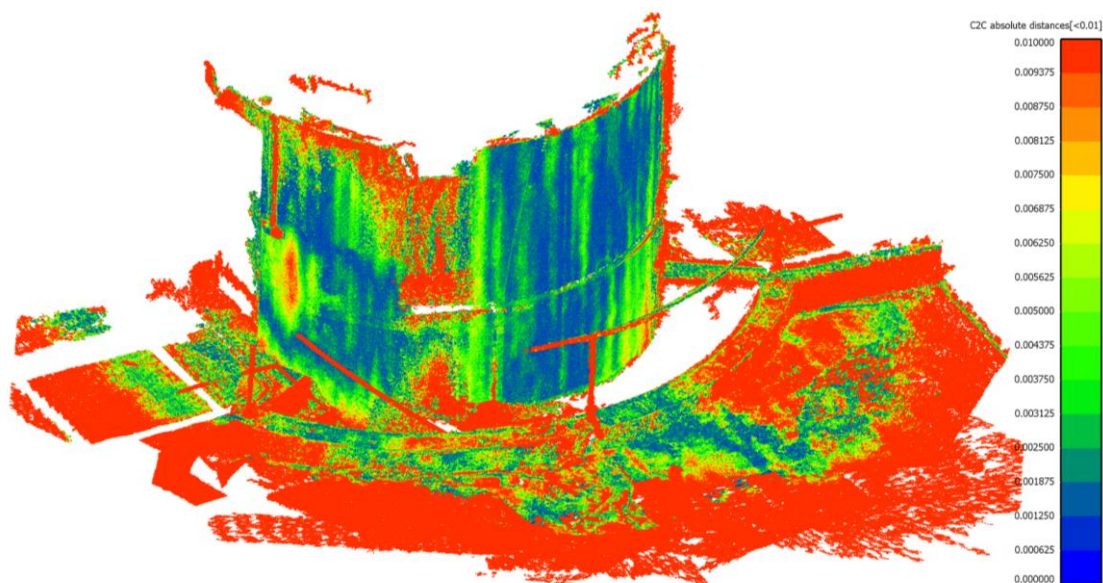
4.4.4.2 Porovnání mračna z laserového skenování s mračnem vytvořeným ze snímků z totální stanice

Při pohledu na mračno je patrné, že nebylo vytvořeno dostatečné množství snímků, protože mračno v sobě má prázdná místa a také nešlo vytvořit mračno celého zájmového území. Mračno je zobrazeno v Příloha č. 5.

Při porovnání mračen je vidět, že v jednom místě kopule se odchylky pohybují okolo 1 cm. Diferenciální model je patrný v Obr. 31.



Obr. 32: Porovnání mračna získaného laserovým skenováním s mračnem získaným fotoaparátém



Obr. 31: Porovnání mračna získaného laserovým skenováním s mračnem získaným totální stanicí

5. Závěr

Tato diplomová práce měla za cíl otestovat skenovací totální stanici Trimble SX10.

V laboratorních podmínkách byl určen chybový průběh standardního měření délek na hranol. Velikosti chyb se pohybují od -1,7 mm do -1 mm, což splňuje technické specifikace uvedené výrobcem.

Při manuálním cílení bylo zjištěno, že úhlová horizontální velikost 1 pixelu koaxiální kamery odpovídá cca 1,1 mgon., což se nehodí pro přesné práce, ale pro tento typ měření není tento přístroj určen. Při přepočtu na délkovou velikost bylo zjištěno, že 1 pixel odpovídá 0,88 mm na 50 metrů, což splňuje parametry kamery.

Z testování na laserové skenovací základně bylo zjištěno, že výběrová směrodatná odchylka polohová daného souboru měření je 4,6 mm. Částečný vliv na přesnost má také způsob určení středů bodů, protože přístroj v režimu laserového skeneru neumí měřit body na odrazném štítku. Stálost bodů byla před začátkem experimentu ověřena polární metodou.

Při porovnání mračen bodů bylo zjištěno, že mračno vytvořené ze snímků přístroje obsahuje mnoho míst, které nejsou dobře vyhodnoceny z důvodu nízkého rozlišení kamery a také ze špatné konfigurace snímků. Pro tento způsob vytvoření mračna bodů se přístroj nehodí, ale je dost pravděpodobné, že existuje jiná metoda zpracování, která bude má lepší výsledky. Vzhledem k tomu, že tento přístroj není určen pro fotogrammetrické měření, výsledky jsou chvályhodné.

Práce s přístrojem, dle mé osobní zkušenosti, je velice příjemná. Ovládání je velice intuitivní a jednoduché a dá se naučit během velmi krátkého času. Výhodou přístroje je spojení totální stanice a laserového skeneru v jednom zařízení.

6. Použité zdroje

- [1] TOUŠEK, Martin. *Tetování skenovacího systému Trimble TX5*. Praha, 2013. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [2] KOZÁK, Jakub. *Testování parametrů základnových skenovacích systémů*. Praha, 2013. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [3] SMÍTKA, Václav. *Přesnost 3D skenovacích technologií v geodezii a možnosti jejího zvyšování*. Praha, 2013. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [4] ŠEDINA, Jaroslav. *Porovnání 3D skenovacích metod s mračnem bodů, vytvořeným obrazovou korelací v digitální fotogrametrii*. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [5] TRIMBLE GEOSPATIAL. [Online]. [Cit. 2018-03-12]. Dostupné z: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/sx10>
- [6] REINDL, Tomáš. *Testování dálkoměrů totálních stanic Trimble S6 a S8 na laboratorní základně*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [7] *International (hotel v Praze)*. [Online]. [Cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/International_\(hotel_v_Praze\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/International_(hotel_v_Praze))
- [8] *Husův sbor (Dejvice)*. [Online]. [Cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Hus%C5%AFv_sbor_\(Dejvice\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hus%C5%AFv_sbor_(Dejvice))
- [9] *Katedrála svatého Víta, Václava a Vojtěcha*. [Online]. [Cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Katedr%C3%A1la_svat%C3%A9ho_V%C3%ADta_a_Vojt%C4%9Bcha
- [10] *Kostel svatého Norberta (Střešovice)*. [Online]. [Cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kostel_svat%C3%A9ho_Norberta_\(St%C5%99e%C5%A1ovice\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kostel_svat%C3%A9ho_Norberta_(St%C5%99e%C5%A1ovice))
- [11] *Kostel svatého Matěje (Praha)*. [Online]. [Cit. 2018-04-29]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kostel_svat%C3%A9ho_Mat%C4%9Bje_\(Praha\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kostel_svat%C3%A9ho_Mat%C4%9Bje_(Praha))
- [12] KUTA, Milan. *Projekt, realizace a zhodnocení přesnosti kalibrační základny laserového skenování*. Praha 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.

- [13] HAMPACHER, Miroslav – ŠTRONER, Martin. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodezii*. 2. vyd. Praha. CTU Publishing House, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.
- [14] OHAD, Gal. *fit_ellipse*. File Exchange – MathWorks. [Online].
[Cit. 2018-04-20]. Dostupné z:
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3215-fit-ellipse>
- [15] WASMEIER, Peter. *Geodetic Transformation*. File Exchange – MathWorks. [Online]. [Cit. 2018-04-29]. Dostupné z:
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9696-geodetic-transformations>
- [16] SRP, Miloslav. *Tunelové měření v UEF Josefs využitím Trimble S8*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.

7. Seznam obrázků

Obr. 1: Trimble SX10, zdroj: [5]	11
Obr. 2: Trimble Tablet, zdroj: [5]	12
Obr. 3: Postavení přístrojů	14
Obr. 4: Vozík s hranolem	14
Obr. 5: Trimble SX10 na pilíři	18
Obr. 6: Hotel International, zdroj: [7]	19
Obr. 7: Bohoslovecká kolej, zdroj: [8]	19
Obr. 8: katedrála sv. Víta, zdroj: [9]	19
Obr. 9: kostel sv. Vavřince, vlastní fotografie	19
Obr. 10: kostel sv. Norberta, zdroj: [10]	19
Obr. 11: kostel sv. Matěje, zdroj: [11]	19
Obr. 12: foto International.....	22
Obr. 13: foto Bohoslovecká	22
Obr. 14: foto sv. Vít	22
Obr. 15: foto sv. Vavřinec.....	22
Obr. 16: foto sv. Norbert.....	22
Obr. 17: foto sv. Matěj	22
Obr. 18: Počet pixelů – International	24
Obr. 19: Počet pixelů – Bohoslovecká kolej	24
Obr. 20: Počet pixelů – sv. Vít.....	24
Obr. 21: Počet pixelů – sv. Vavřinec	24
Obr. 22: Počet pixelů – sv. Martin	24
Obr. 23: Odrazný štítek, zdroj: [12]	26
Obr. 24: Rozložení bodů kalibrační základny, zdroj:[12]	27
Obr. 25:Kontrola centrace přístroje nad bodem	27
Obr. 26: Naskenované okolí bodu.....	28
Obr. 27: Skenování bod č. 20.....	31
Obr. 28: Observatoř na střeše.....	35
Obr. 29: Konfigurace stanovisek a bodů	36
Obr. 30: Canon EOS 20 D + Canon EF-S 10-22.....	37
Obr. 32: Porovnání mračna získaného laserovým skenováním s mračnem získaným totální stanicí.....	40
Obr. 31: Porovnání mračna získaného laserovým skenováním s mračnem získaným fotoaparátem	40

8. Seznam tabulek

Tab. 1: Hlavní technické parametry Trimble SX10	12
Tab. 2: Hodnoty opravné funkce	16
Tab. 3: Úhlová velikost pixelu na snímcích	25
Tab. 4: Porovnání dvojího určení souřadnic	30
Tab. 5: Rozdíl souřadnic dříve určené základny se souřadnicemi určenými polární metodou	32
Tab. 6: Rozdíl souřadnic dříve určené základny a souřadnic určených laserovým skenováním	33
Tab. 7: Směrodatné odchylky laserového skenování	34
Tab. 8: Seznam souřadnic bodů na observatoři	38

9. Seznam grafů

Graf 1: Porovnání relativních chyb s chybovým modelem	17
Graf 2: Selekcce bodů z mračna – bod 32	30
Graf 3: Ortogonální průměty v rovině – bod 8.	31

10. Seznam příloh

Příloha č. 1: Rozbory přesnosti měření směrů	47
Příloha č. 2: Výpočet souřadnic laserové skenovací základny z polárního měření v místním systému	48
Příloha č. 3: Transformace souřadnic skenovací základny získané metodou laserového skenování	49
Příloha č. 4: Mračno bodů vytvořené ze snímků pořízených fotoaparátem	50
Příloha č. 5: Mračno vytvořené ze snímků pořízených totální stanicí	51
Příloha č. 6: Mračno bodů získané laserovým skenováním	52

11. Obsah příloženého datového nosiče

- 01_dalkomer
 1. protokol_mereni_S8HP.txt
 2. protokol_mereni_SX10.txt
 3. vypocet_delky.xls
 4. vstup_matlab.txt
 5. vypocet_delky.m
- 02_hz_smery
 1. snimky (složka)
 2. protokol_mereni_S8HP.txt
 3. protokol_mereni_SX10.txt
 4. vypocet_smery_1.xls
 5. vypocet_smery_2.xls
- 03_presnost_skenovani
 1. surova_data (složka)
 2. mracna_bodu (složka)
 3. selekovane_body (složka)
 4. vypocet (složka)
- 04_fotogrammetrie
 1. surova_data (složka)
 2. snimky_fotoaparatu (složka)
 3. porovnani (složka)
 4. mracno_ts.obj
 5. mracno_skenovani.obj
 6. mracno_fotak.obj

Příloha č. 1: Rozbory přesnosti měření směrů

skupina	bod	směr I [gon]	směr II [gon]	průměr poloh [gon]	redukce [gon]	průměr skupin [gon]	v [cc]	w [cc]
1	hotel International	22,02979	222,03091	22,03035	0,00000	0,00000	0,0	1,5
	Bohoslovecká kolej	132,10678	332,10894	132,10786	110,07751	110,07744	-0,7	2,3
	chrám sv. Víta	148,38724	348,38836	148,38780	126,35745	126,35780	3,5	-1,9
	kostel sv. Vavřince	167,99527	367,99732	167,99630	145,96595	145,96615	2,0	-0,5
	kostel sv. Norberta	215,51226	15,51337	215,51282		193,48179		
	kostel sv. Martina	346,52700	146,52682	346,52691	324,49656	324,49685	2,9	-1,4
2	hotel International	22,02868	222,03089	22,02979	0,00000		0,0	-1,8
	Bohoslovecká kolej	132,10676	332,10789	132,10733	110,07754		-1,0	-0,7
	chrám sv. Víta	148,38616	348,38973	148,38795	126,35816		-3,6	1,9
	kostel sv. Vavřince	167,99372	367,99637	167,99505				
	kostel sv. Norberta	215,51001	15,51338	215,51170	193,48191		-1,2	-0,6
	kostel sv. Martina	346,52520	146,52866	346,52693	324,49715		-2,9	1,2
3	hotel International	22,02865	222,03091	22,02978	0,00000		0,0	0,2
	Bohoslovecká kolej	132,10506	332,10902	132,10704	110,07726		1,8	-1,5
	chrám sv. Víta	148,38564	348,38949	148,38757	126,35779		0,1	0,1
	kostel sv. Vavřince	167,99531	367,99694	167,99613	145,96635		-2,0	2,2
	kostel sv. Norberta	215,51006	15,51284	215,51145	193,48167		1,2	-1,0
	kostel sv. Martina	346,52252	146,52796	346,52524				

Mezní výběrová směrodatná odchylka směru $S_{M\varphi_R} = 4,22$ cc nebyla překročena. Výběrová směrodatná odchylka směru $\sigma_{\varphi_R} = 1,01$ cc.

Příloha č. 2: Výpočet souřadnic laserové skenovací základny z polárního měření v místním systému

bod	φ_{\emptyset} [gon]	ζ_{\emptyset} [gon]	\check{s}_{\emptyset} [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	266,65521	99,79466	22,5330	1022,5329	5000,0000	100,0727
2	268,50975	99,50285	34,8003	1034,7844	5001,0136	100,2718
4	271,49859	99,42015	86,1215	1085,8688	5006,5455	100,7844
5	270,22997	98,98892	107,0563	1106,8740	5006,0075	101,7002
8	290,08270	89,15543	21,9063	1020,1438	5007,7667	103,7136
10	289,98158	79,47952	22,7430	1020,1398	5007,7284	107,2046
12	289,82261	70,51448	24,0933	1020,1433	5007,6721	110,7643
14	341,21062	87,25347	32,8625	1012,5322	5029,6677	106,5359
15	341,21607	72,14100	35,5635	1012,5321	5029,6745	115,0709
18	388,99665	89,71974	72,7050	975,3307	5067,3854	111,6896
19	390,89416	89,51561	73,3183	973,1227	5067,1468	112,0202
20	390,91104	88,19291	73,5868	973,1055	5067,1383	113,5697
21	394,10659	86,49896	51,0403	979,1448	5045,3294	110,7433
22	394,10735	84,91363	51,3268	979,1462	5045,3250	112,0497
23	5,27983	94,36581	40,4283	977,0392	5033,0829	103,5733
24	5,30238	83,38501	41,6878	977,0241	5033,0797	110,7569
25	57,70692	100,22626	17,7315	982,4435	5002,4841	99,9370
26	57,55899	86,70875	17,7553	982,8073	5002,4734	103,6800
27	57,42326	75,90969	18,6990	982,806276	5002,511	106,9082
28	57,45650	66,33560	20,1288	982,801676	5002,502	110,1549
29	73,97555	100,35556	31,0260	969,17937	4996,44	99,82672
30	103,43745	96,85213	5,2810	995,581617	4997,119	100,261
32	348,75793	93,41602	6,4595	1001,78256	5006,173	100,6669

Příloha č. 3: Transformace souřadnic skenovací základny získané metodou laserového skenování

bod	Souřadnice před transformací			Souřadnice po transformaci			Velikost prvních oprav na druhou		
	x [m]	y [m]	z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	vv_x	vv_y	vv_z
1	14,010	17,648	0,071	1022,533	5000,000	100,071	0,31	0,35	5,37
2	22,426	26,609	0,264	1034,784	5001,020	100,264	0,11	54,52	74,49
4	58,512	63,189	0,792	1085,870	5006,539	100,792	0,06	11,12	23,43
8	18,607	10,948	3,713	1020,144	5007,766	103,713	0,24	0,21	2,26
10	18,578	10,965	7,206	1020,139	5007,733	107,206	1,06	23,63	0,18
12	18,533	11,005	10,769	1020,142	5007,673	110,769	5,05	1,40	13,50
14	31,028	-8,631	6,537	1012,532	5029,667	106,537	1,45	1,23	0,05
15	31,030	-8,636	15,071	1012,530	5029,673	115,071	20,68	11,97	3,81
18	37,444	-61,217	11,687	975,336	5067,389	111,687	7,89	8,82	28,91
19	35,883	-62,798	12,023	973,127	5067,150	112,023	0,59	1,77	1,47
20	35,863	-62,809	13,551	973,106	5067,140	113,551	0,81	0,01	10,52
21	22,538	-44,518	10,748	979,146	5045,331	110,748	5,73	2,04	0,73
22	22,538	-44,512	12,052	979,151	5045,328	112,052	2,31	0,34	1,99
23	11,638	-38,551	3,576	977,042	5033,085	103,576	1,03	0,68	3,67
24	11,624	-38,563	10,760	977,025	5033,081	110,760	0,10	32,16	1,18
25	-8,973	-15,291	-0,061	982,444	5002,480	99,939	0,57	12,66	0,01
26	-8,753	-15,001	3,681	982,808	5002,471	103,681	0,02	1,30	0,65
27	-8,723	-15,028	6,910	982,806	5002,512	106,910	1,75	18,67	0,01
28	-8,734	-15,023	10,156	982,803	5002,500	110,156	0,02	1,94	1,05
29	-21,950	-21,926	-0,172	969,179	4996,441	99,828	2,32	12,17	1,08
30	-5,002	-1,671	0,260	995,581	4997,122	100,260	3,25	0,01	0,29
32	5,944	-2,441	0,668	1022,533	5000,000	100,071	0,31	0,35	5,37

Příloha č. 4: Mračno bodů vytvořené ze snímků pořízených fotoaparátem



Příloha č. 5: Mračno vytvořené ze snímků pořízených totální stanicí



Příloha č. 6: Mračno bodů získané laserovým skenováním

