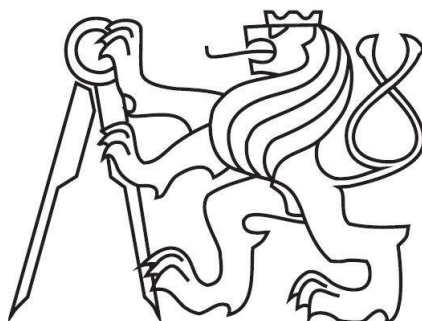


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE

OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Leica

Scan Station P40, RTC360 a BLK360

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Křemen, Ph.D.

Katedra speciální geodézie

Bc. Josef Souček



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE



I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Souček	Jméno: Josef	Osobní číslo: 458885
Zadávací katedra: Katedra speciální geodézie		
Studijní program: Geodézie a kartografie		
Studijní obor: Geodézie a kartografie -		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Leica - Scan Station P40, RTC360 a BLK360	
Název diplomové práce anglicky: Accuracy Verification of Leica 3D Laser Scanners - Scan Station P40, RTC360 a BLK360	
Pokyny pro vypracování: Ověření přesnosti měření úhlů a délek. Určení součtové konstanty. Testování šumu měření v různých vzdálenostech na různé barevné povrchy. Zpracování a vyhodnocení naměřených dat, zhodnocení výsledků.	
Seznam doporučené literatury: Štroner, M. a kol.: 3D skenovací systémy. Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha, 2013, ISBN 978-80-01-05371-3.	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Tomáš Křemen, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 25.2.2020	Termín odevzdání diplomové práce: 18.5.2020
	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma „Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Leica - Scan Station P40, RTC360 a BLK360“ jsem vypracoval samostatně, s výjimkou odborných konzultací. Použitou literaturu a prameny uvádím v seznamu zdrojů.

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Tomáši Křemenovi, Ph.D., za vedení mé diplomové práce, cenné rady a odborný dohled. Děkuji také firmě Gefos a.s. za zapůjčení testovaných skenerů.

Abstrakt

Tato diplomová práce vznikla za účelem ověření přesnosti 3D skenerů pomocí experimentálního měření. Pro testování byl vybrán 3D skener Scan Station P40, který patří katedře speciální geodezie a dále byly z firmy Gefos a.s. zapůjčeny RTC360 a BLK 360. Pro ověření délkové přesnosti byla použita základna s pohyblivým vozíkem a délky byly porovnávány s interferometrem. Pro úhlovou přesnost byla využita stejná základna, kdy stanoviště se skenerem bylo umístěno kolmo k dráze. Další experiment testoval šum skenerů pomocí měření na ideální rovinu, kterou tvořila deska s různě barevnými povrchy. Měření probíhalo z několika vzdáleností. Posledním testem bylo určení součtové konstanty skenerů. Určovala se klasickým polním způsobem. Výsledkem byly směrodatné odchylky pro jednotlivé experimenty.

Klíčová slova

Laserový skener, přesnost, šum, experiment

Abstract

This thesis was created to verify accuracy of 3D scanners. For this purpose, an experiment was designed. For testing was chosen a 3D scanner Scan Station P40 which belongs to the department of special geodesy. The second and third scanner was an RTC 360 and a BLK 360 borrowed from a Gefos a.s. company. The base with movable cart was used for verification of the length accuracy and the length was compared with interferometer. The same base was used for angle accuracy. The stand with scanners was placed in vertical direction to the base. Next experiment tested noise of the scanners with use of measurement of an ideal surface, which was formed by the desk with ten squares. Each square had different colour. The measuring was done from several distances. Purpose of the last experiment was to find out the value of the additive constant. This experiment was done by basic field testing. The result of these experiments were standard deviations.

Keywords

Laser scanner, precision, noise, experiment

Obsah

1. Úvod	9
2. Testované skenery	10
2.1. Leica BLK 360	10
2.2. Leica RTC 360	12
2.3. Leica ScanStation P40	14
3. Experimenty navržené pro ověření přesnosti laserových skenerů	16
3.1. Ověření přesnosti délek	17
3.2. Ověření úhlové přesnosti	19
3.3. Určení velikosti šumu	20
3.4. Určení součtové konstanty	21
4. Zpracování	23
4.1. Ověření přesnosti délek	24
4.2. Ověření úhlové přesnosti	28
4.3. Určení velikosti šumu	29
4.4. Určení součtové konstanty	31
5. Výsledky	32
5.1. Ověření přesnosti délek	32
5.1.1. Leica BLK 360	32
5.1.2. Leica RTC 360	33
5.1.3. Leica ScanStation P40	34
5.1.4. Zhodnocení testu	35
5.2. Ověření úhlové přesnosti	37
5.2.1. Leica BLK 360	38
5.2.2. Leica RTC 360	39
5.2.3. Leica ScanStation P40	40
5.2.4. Zhodnocení testu	41

5.3. Určení velikosti šumu.....	42
5.3.1. Leica BLK 360	42
5.3.2. Leica RTC 360.....	43
5.3.3. Leica ScanStation P40	44
5.3.4. Zhodnocení testu.....	45
5.4. Určení součtové konstanty	46
6. Závěr.....	47
7. Seznam obrázků	48
8. Seznam tabulek	49
9. Seznam grafů.....	49
10. Seznam použitých zdrojů	50
11. Seznam příloh.....	51
12. Přílohy na DVD.....	51
13. Přílohy	52

1. Úvod

V dnešní době je laserové skenování velmi hojně využíváno. Nejčastěji ve strojírenství a stavebnictví. Dále se využívá například v geodézii, archeologii, nebo na dokumentaci či rekonstrukci historických staveb. Proto je důležité vědět, jaké přesnosti tyto přístroje dosahují. Výrobce sice deklaruje svou přesnost, ale v České republice nejsou žádné závazné normy, které by definovaly postup nebo metodiku, jakou se má přesnost skenerů určovat. K ověření jejich přesnosti byl v této práci použit experiment, který byl již dříve navržen. Kromě určení přesnosti skenerů tato práce také kontroluje správnost navrženého experimentu. K otestování byl vybrán školní přístroj Leica Scan Station P40, který je již nějakou dobu používán a ozkoušený. Dále byly z firmy Gefos a.s. zapůjčeny Leica BLK360 a RTC 360. BLK 360 je skener, který je malý, lehký a cenově dostupnější, než jsou skenery jako je například P40. Skener RTC 360 by měl být takovou střední cestou. Jedná se podobně jako BLK 360 o malý a dobře přenosný přístroj. Jeho cena je také znatelně menší, než cena P40 a jeho výkon by měl dosahovat k lepším skenerům. Testované parametry přístrojů budou délková a úhlová přesnost. Dále půjde o určení velikosti šumu jednotlivých skenerů a posledním testem je určení součtové konstanty jednotlivých skenerů. K výsledkům budou přidány i vlastní postřehy a názory, a také klady i zápory, které se objevily při měření, nebo následném zpracování.

2. Testované skenery

Za účelem otestování přesnosti byly vybrány celkem 3 laserové skenery. Leica ScanStation P40, která byla zapůjčena z katedry speciální geodzie na fakultě stavební ČVUT. Zbýlé dva přístroje byly vypůjčeny z firmy GEFOS a.s. Jedná se o Leica BLK360 a Leica RTC360.

2.1. Leica BLK 360

První testovaný 3D skener se jmenuje BLK360, který byl vyroben ve firmě Leica (Obr. 1). Jedná se o panoramatický skener se zorným polem $360^{\circ} \times 300^{\circ}$. Celé otočení přístroje trvá asi 3 min. Dosah skeneru se pohybuje od 0,6 m do 60 m. Využívá vysokorychlostní, pulzní dálkoměr se zářením o vlnové délce 830nm. Dokáže měřit rychlostí až 360 000 bodů za sekundu. Zařízení tvoří systém tří kamer, kde první je na fotografie, druhá je na obarvení mračna a třetí je termální kamera. Dále přístroj obsahuje inerciální měřicí jednotku. Skener byl navržen převážně pro interiérové práce, ale lze jej využít i pro venkovní měření. Pracovní teplota se pohybuje od 5°C do 40°C . Výhodou je nízká hmotnost a malé rozměry. Přístroj váží jen 1 kg a měří 165 mm na výšku a 100 mm na šířku. Plně nabitá baterie je schopná vydržet až 40 skenů. Přesnost uváděná výrobcem je uvedena v tabulce níže Tab. 1.



Obr. 1 BLK360

Tab. 1 Technické parametry BLK360

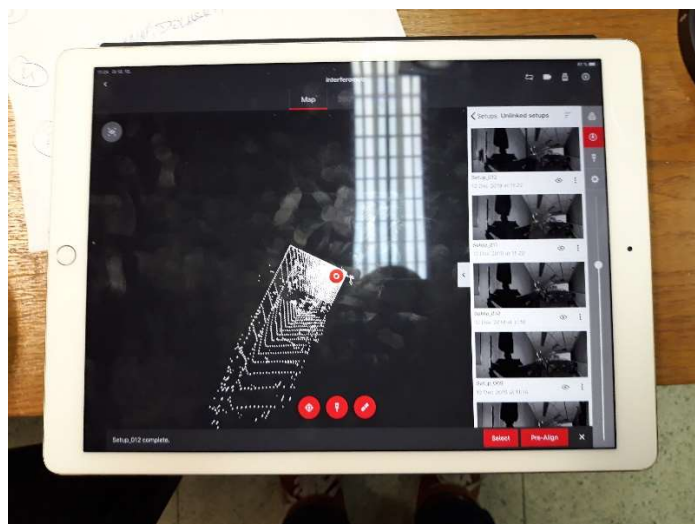
Přesnost skeneru	
Úhlová přesnost	40'' (0,0123 g)
Délková přesnost	4 mm/10 m a 7 mm/20 m
3D přesnost bodu	6 mm/10 m a 8 mm/20 m

Přístroj se upevňuje na stativ (Obr. 2), který má speciální čep určený pro tento skener. Pro jednoduchou a přehlednou manipulaci se využívá propojení skeneru s tabletem (Obr. 3) nebo laptopem se softwarem Cyclone. Rozlišení skenu lze měnit i pomocí tlačítka na přístroji. Dá se nastavit rozlišení 5/10/20 mm na 10 m. Lze tedy skenovat i bez připojeného externího zařízení, ale nejdou nastavit žádné další parametry. Pro propojení je používán WLAN, jejíž signál je vysílán ze skeneru. Jednotlivé skeny jsou ukládány na vnitřní paměť skeneru, která unese 100 záznamů.

Pokud máme přístroj spojen s tabletem, data jsou ukládána jak do vnitřní paměti skeneru, tak do paměti tabletu. Záznamy pak lze prohlížet ihned po dokončení skenu. Pokud skenujeme bez propojení, tak lze jednotlivé skeny prohlédnout až po jejich přenosu na PC s patřičným softwarem.



Obr. 2 Stativ k BLK360



Obr. 3 Tablet k BLK360

2.2. Leica RTC 360

Druhým testovaným přístrojem byl RTC360, který pochází z dílny Leica (Obr. 4). Jedná se opět o panoramatický skener se zorným polem $360^{\circ} \times 300^{\circ}$. Nabízí 3 možnosti rozlišení skenování, a to 3/6/12 mm na 10 m. Při těchto rozlišeních je doba skenování 2 min, 56 sekund a 21 sekund. Dosah se pohybuje od 0,5 m až do 130 m. Rychlost skenování dosahuje až 2 000 000 bodů za sekundu. Dále dokáže díky integrovanému VIS (Visual Inertial System), který se skládá ze systému pěti kamer a jedné inerciální měřící jednotky, sledovat pozici skeneru relativně vůči předchozímu stanovisku v reálném čase (Obr. 5). Provozní teplota se pohybuje od -5°C do $+40^{\circ}\text{C}$. Baterie vydrží při plném provozu 4 hodiny. Rozměry přístroje jsou $120 \times 240 \times 230$ mm. Přesnost skeneru je uvedena v tabulce níže Tab. 2.

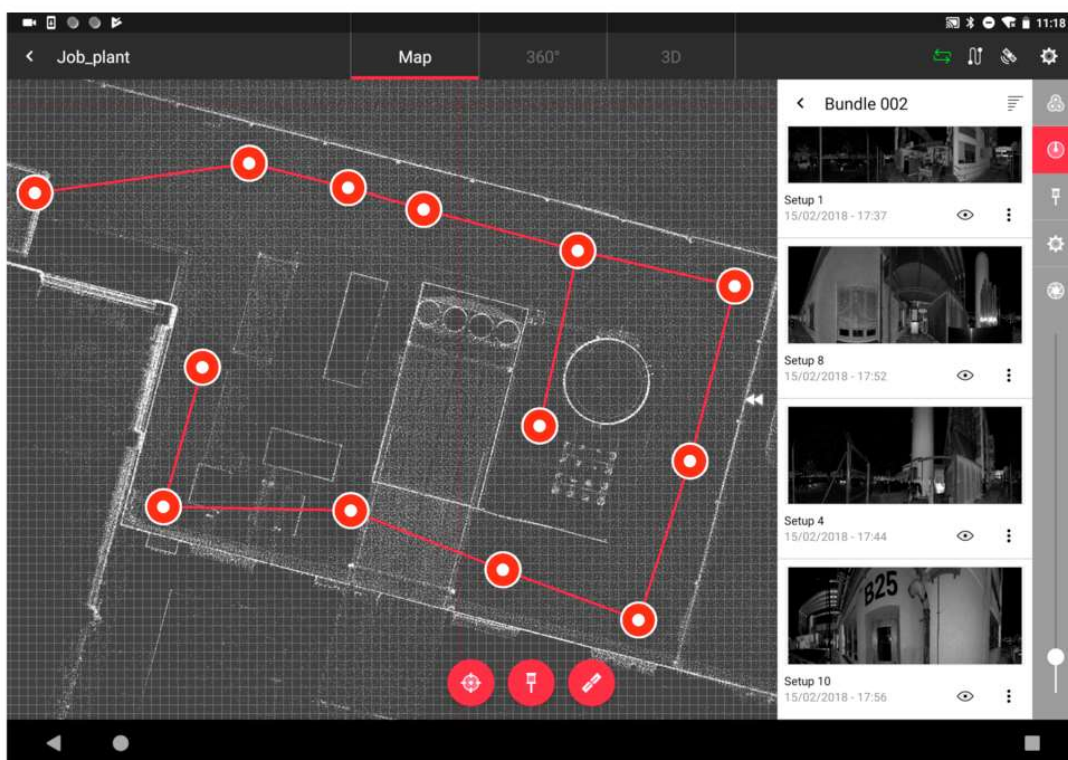


Obr. 4 RTC360

Tab. 2 Technické parametry RTC360

Přesnost skeneru			
Úhlová přesnost	18'' (0,0055 g)		
Délková přesnost	1 mm + 10 ppm		
3D přesnost bodu	1,9 mm/10 m	2,9 mm/20 m	5,3 mm/40 m

K upevnění přístroje lze použít libovolný stativ s měřičskou podložkou, jelikož skener má na dané podložky adaptér. Zařízení má dotykový displej, na kterém lze nastavit rozlišení skenu. Lze také nahlédnout na hotový záznam. Nicméně jednodušší je propojit skener s externím zařízením a ovládat jej dálkově. Je nutné mít software Cyclone stejně jako u BLK360.



Obr. 5 Propojení jednotlivých stanovisek

2.3. Leica ScanStation P40

Třetí a poslední testovaný skener pochází z firmy Leica a nese název ScanStation P40 (Obr. 6). Označení P40 udává dosah skeneru. Dále existuje P30/P40/P50. Řada P se vyznačuje vysokou úrovní zachyceného detailu a velkou přesností dat. Dosah P40 se pohybuje od 0,4 m do 270 m. Zorné pole přístroje je 360° (horizontální) a 270° (vertikální). Využívá pulzní dálkoměr pracující na vlnové délce 1550 nm (neviditelné záření) / 658 nm (viditelné záření). Rychlost skenování je 1 000 000 za sekundu. Pracovní teplota skeneru je od -20 °C do +50 °C. Interní baterie má výdrž 5,5 h a externí 7,5 h. Údaje týkající se přesnosti jsou uvedeny v tabulce níže Tab. 3.



Obr. 6 P40

Tab. 3 Technické parametry P40

Přesnost skeneru		
Úhlová přesnost	8'' (0,0025 g)	
Délková přesnost	1,2 mm + 10 ppm	
3D přesnost bodu	3 mm/50 m	6 mm/100 m

Na přístroji se nachází integrovaný dotykový displej, kterým lze přímo ovládat skener (Obr. 7). Dálkové ovládání je možné pomocí Leica kontroleru CS10/CS15 nebo jiného zařízení, které se dokáže propojit se vzdálenou plochou systému Windows. Rozměry skeneru jsou 238 mm (délka) x 358 mm (šířka) x 395 mm (výška). Hmotnost zařízení je 12,25 kg. Pro snazší přepravu se používá transportní kufr (Obr. 8). Značná výhoda tohoto skeneru je, že má poměrně velké možnosti nastavení rozlišení skenování.

Lze nastavit hustotu 50 / 25 / 12,5 / 6,3 / 3,1 / 1,6 / 0,8 mm na 10 m. Dále se dá nastavit normální, nebo vysoká citlivost. Podle nastavení se pohybuje i doba skenování, kdy při nejmenší hustotě je to 20 sekund a při nejvyšší hustotě je to kolem jedné hodiny. Pokud se nastaví vysoká citlivost může doba skenování dosahovat více než tři hodin. Data jsou pak velmi objemná, a proto přístroj obsahuje SSD Disk, který má kapacitu 256 GB.



Obr. 7 Displej u P40



Obr. 8 Transportní kufr pro P40

3. Experimenty navržené pro ověření přesnosti laserových skenerů

Ověřování přesnosti používaných přístrojů je jednou z důležitých činností geodetů. Je důležité vědět, jak moc se můžeme na dosažený výsledek měření spolehnout. Pro většinu geodetických přístrojů existuje celá řada metod či postupů pro určení parametrů měření. Patří sem norma ČSN ISO 17123 – *Optika a optické přístroje* [1], nebo také ČSN ISO 8322-1 až 10 – *Určování přesnosti měřících přístrojů*. Ovšem tyto normy se nezabývají 3D skenovacími systémy. Existuje německá norma VDI/VDE 2634, která je pro malé základnové skenery, avšak pro terestrické skenovací systémy nemá skoro žádné využití. Další zahraniční norma věnující se skenovacím systémům je ISO 17123 – 9 *Terrestrial laser scanners* [3], ale ta nebyla v České republice implementována. V České republice tedy neexistuje žádný jednotný postup pro ověřování přesnosti terestrických skenovacích systémů. Přístroje jsou kalibrovány podle vnitřních postupů výrobců. Problematikou metod a postupů na určení parametrů měření pro 3D skenovací systémy se zabývá řada publikací například *3D skenovací systémy* [4], nebo *Algoritmus určování rovnice roviny pro laserové skenování* [5]. Mezi základní testované parametry patří zejména délka a úhel. Další vlastnosti, které lze zkoumat, jsou například šum, součtová konstanta, osová chyby, nebo například přesnost cílení. Dalším předmětem výzkumu je i vliv skenovaného objektu na již zmíněné veličiny. Sem by patřil třeba tvar objektu a materiál ze kterého se skládá. S tím souvisí odrazivost materiálu, jeho barva či průhlednost. Experimenty použité pro tuto diplomovou práci byly vybrány podle postupu použitého v uvedené diplomové práci *Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Trimble TX8 a FARO Focus 3D X 130* [6] autor Lucie Holíková.

Další podkapitoly se již týkají navržených experimentů pro tuto diplomovou práci.

3.1. Ověření přesnosti délek

Prvním navrženým testem je ověření měření délek. K tomuto experimentu byla využita dráha s interferometrem, která se nachází na fakultě stavební ČVUT v podzemní laboratoři. Pro stanoviště byla použita deska, která byla upevněna na dráhu (Obr. 9).



Obr. 9 Stanoviště pro skenery

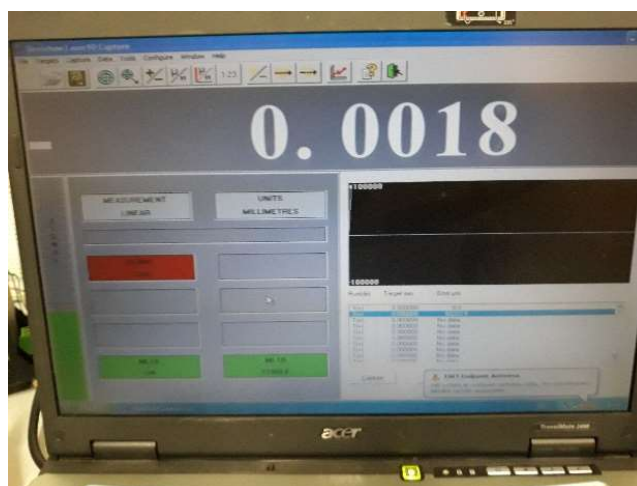
Dále byl na dráhu umístěn pojízdný vozík, který byl upraven tak, aby na něj mohly být umístěny cíle. Byly zvoleny 2 koule o známém rozměru. Jedna měla průměr 0,200 m a druhá 0,145 m. Jako třetí byl vybrán černobílý terč (Obr. 10).



Obr. 10 Vozík a cíle

Původní účel této dráhy je pro měření s interferometrem. Tento přístroj slouží k relativnímu určování délek, a to s velmi vysokou přesností. Řádově se tato hodnota pohybuje v mikrometrech (μm). Jelikož přesnost skenerů se pohybuje v řádu milimetrů, tak byly hodnoty naměřené interferometrem brány jako bezchybné. Výsledky získané ze skeneru se pak porovnávaly s délkou naměřenou interferometrem. Avšak i takto přesný přístroj má své nevýhody. Tou zásadní je stálá nutnost spojení zdroje záření laserového paprsku se svým přijímačem. Pokud dojde k přerušení signálu, tak zařízení nic neměří. Je tedy nutné, aby se nacházel v prostředí s ideálně stálou teplotou a vlhkostí. Další důležitou složkou je proudění vzduchu. Ideální prostředí je pak takové, kde se nehýbe vzduch. Tyto podmínky byly z větší části v podzemní laboratoři na fakultě dodrženy. Data naměřená na interferometru byla kontrolována přes počítač v programu Renishaw Linear Measuring.

Ukázka rozhraní viz (Obr. 11)



Obr. 11 Renishaw Linear Measuring

Experimenty, které probíhaly v laboratoři (délková a úhlová přesnost) byly rozděleny na dva dny. První den se provedla měření s BLK 360 a P40. Druhý den se měřilo s RTC 360. Na začátku experimentu byly umístěny P40 a BLK360 na stanovisko vytvořené pro tento test. Vozík byl postaven do výchozí pozice a provedlo se měření. Další pozice vozíku byly rozměřovány interferometrem. V tomto experimentu šlo o určování relativních délek mezi jednotlivými pozicemi vozíku. Pozice vozíku byla vždy zajištěna svorkou, kdyby došlo k přerušení laserového svazku paprsku. Díky tomuto zajištění pozice cílů by se v případě ztráty signálu nemuselo začínat od začátku. Experiment byl prováděn na více vzdálenostech. Jednalo se o 2, 3, 5, 10, 15, 20 a 23 metrů. Tyto délky jsou relativní vzdálenosti mezi pozicemi vozíku. Poslední vzdálenost se zvolila, protože to byla maximální délka používané dráhy.

U každé pozice vozíku bylo provedeno celkem 5 skenů. Bohužel u skeneru BLK360 došlo ke ztrátě dat, a tak vzdálenost 23 metrů nebude uvedena. Pro tento experiment byla od určité vzdálenosti změněna rozlišení skenování. Použitá rozlišení pro všechny skenery jsou uvedena v Tab. 4.

Tab. 4 Nastavené rozlišení skenování

Vzdálenost	Skener	Rozlišení
1–5 m	BLK360	10 mm / 10 m
	RTC360	6 mm / 10 m
	P40	6 mm / 10 m
10-23 m	BLK360	5 mm / 10 m
	RTC360	3 mm / 10 m
	P40	3 mm / 10 m

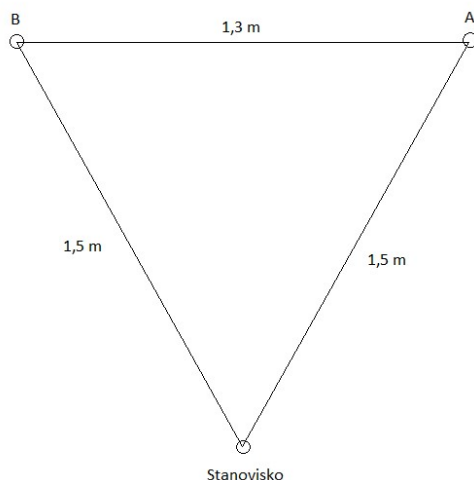
Další práce s naměřenými daty pokračovaly na počítači v software Cyclone a Microsoft Excel.

3.2. Ověření úhlové přesnosti

Druhým prováděným experimentem bylo ověření přesnosti měření úhlů. Pro tento účel byla znovu využita dráha s pojízdným vozíkem a interferometrem. Stanovisko pro skenery bylo tentokrát zvoleno tak, aby bylo kolmo na dráhu a naplno se tak uplatnila úhlová chyba. Vzdálenost stanoviska činila přibližně 16 metrů od dráhy s vozíkem. Jako cíle byly opět zvoleny dvě koule se známým rozměrem a černobílý terč.

Nejprve byl vozík umístěn do pozice A, kde se opět umístila svorka pro zachování polohy cílů. Následně se provedlo každým skenerem 5 měření. Nastavené rozlišení bylo stejné jako u minulého testu pro vzdálenosti nad 10 metrů. Čili 3 mm / na 10 m pro RTC360 a P40, a pro BLK360 5 mm / 10 m.

Poté byl vozík posunut do pozice B. Délka byla odměřena interferometrem a zaznamenána. Ve druhém postavení bylo provedeno znovu 5 skenů, a to se stejným rozlišením jako v pozici A. Ukázka jednoduchého schématu pro experiment úhlové přesnosti je zobrazen na obrázku (Obr. 12).



Obr. 12 Schéma měření úhlové přesnosti

Další zpracování měření probíhalo v software Cyclone a Microsoft Excel.

3.3. Určení velikosti šumu

Třetím testem bylo ověření šumu jednotlivých skenerů. Šum je náhodná chyba, která se skládá z dálkoměrné a úhlové složky. Tato chyba má vliv na správné určení polohy objektu. Tento experiment měl za úkol otestovat schopnost skeneru měřit na různě barevné povrchy. K tomu posloužila deska vyrobená z dřevotřísky, na které bylo umístěno deset matných barevných čtverců (Obr. 13). Jednotlivé čtverce mají rozměr 25x25 cm a je mezi nimi mezera 5 cm. Měření probíhalo na fakultě stavební ČVUT v devátém patře budovy B. Chodba měří kolem 140 metrů na délku, a tak byla pro tento test dostačující. Důležité bylo dávat pozor, aby deska nebyla příliš blízko stěny a nedocházelo tak k nechtěným odrazům svazku paprsku.



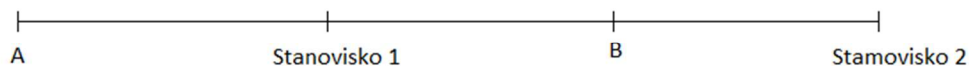
Obr. 13 Deska s barevnými čtverci

Nejprve byla deska umístěna na kolmo ke skenerům a provedly se 3 skeny. Poté byla pootočena o 45° a provedla se další 3 měření. Tento proces byl prováděn na více vzdálenostech. Jednalo se o 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125 metrů. Pro P40 byla vynechána vzdálenost 1 metr, protože nebyl zajištěn kolmý dopad svazku paprsku na desku. U BLK360 nebylo měřeno nad 50 m, jelikož větší vzdálenosti přesahují jeho dosah. Délka 125 m u RTC360 nebyla vyhodnocena, jelikož v naměřených datech byla deska téměř nerozpoznatelná.

Další vyhodnocování barevných čtverců probíhalo v programu Cyclone.

3.4. Určení součtové konstanty

Posledním experimentem bylo určování součtové konstanty jednotlivých skenerů. Měření probíhalo opět v devátém patře budovy B jako u předchozího testu. Byly zaměřeny dva kulové cíle o známém průměru. Měření proběhlo ve dvou postaveních přístroje. Jednou mezi cíli podruhé za nimi viz (Obr. 14).



Obr. 14 Schéma měření – určení součtové konstanty

Součtová konstanta je hodnota, která je vždy konstantní pro daný přístroj. Vzniká, protože mechanický střed přístroje není totožný s elektronickým středem. Tato veličina patří mezi systematické chyby přístroje a ovlivňuje naměřenou vzdálenost, a to vždy stejným způsobem. Ukázka sestavy na určení součtové konstanty je uvedena níže (Obr. 15).

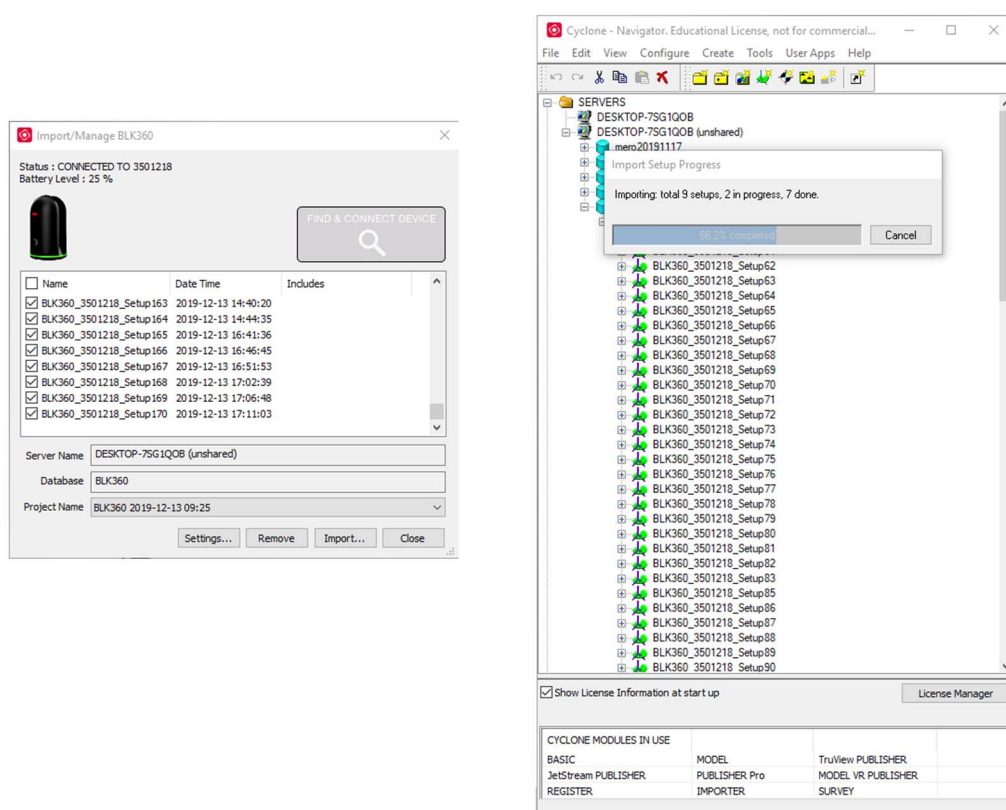


Obr. 15 Sestava – součtová konstanta

4. Zpracování

Tato kapitola se bude zabývat zpracováním jednotlivých naměřených dat ze skenerů. Zejména pak jejich přenosem do jiného zařízení, nahráním do software Cyclone a následně vyhodnocením veškerých skenů v tomto programu. Výpočty se provedly v programu Microsoft excel.

Přenos dat se lišil u BLK 360, jelikož je nutné data přenést přímo z přístroje pomocí WLAN. Nevýhodou je, že se hůře kontroluje, který sken je který. Je dobré si zaznamenat časy konkrétního záznamu, a pak lze daný sken najít. Po propojení s počítačem v programu Cyclone už není žádný další problém s přenosem dat. Ukázka přenosu dat u BLK360 viz obrázek níže (Obr. 16).

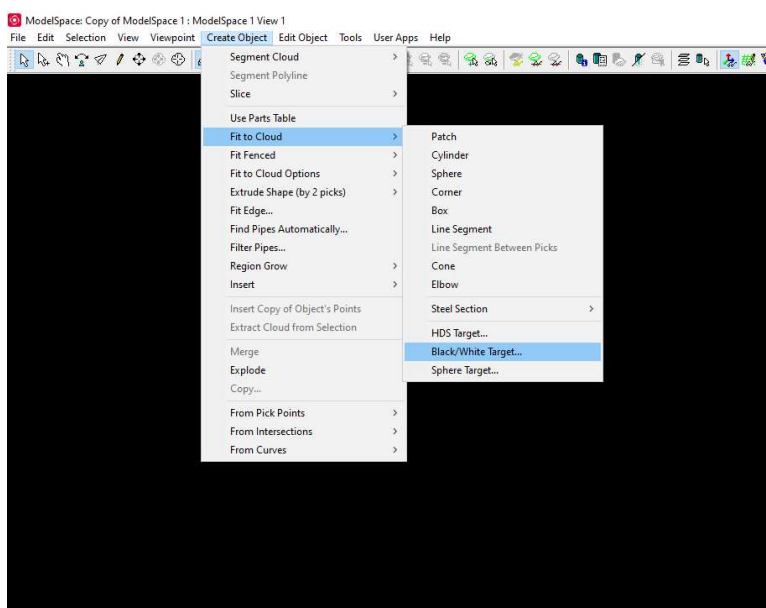


Obr. 16 Ukázka přenosu dat-BLK360

U zbylých dvou přístrojů byla data nahrána přímo z přístroje na flash disk a následně přenesena do počítače. Po uložení všech záznamů do PC následovalo jejich vyhodnocování v sw. Cyclone.

4.1. Ověření přesnosti délek

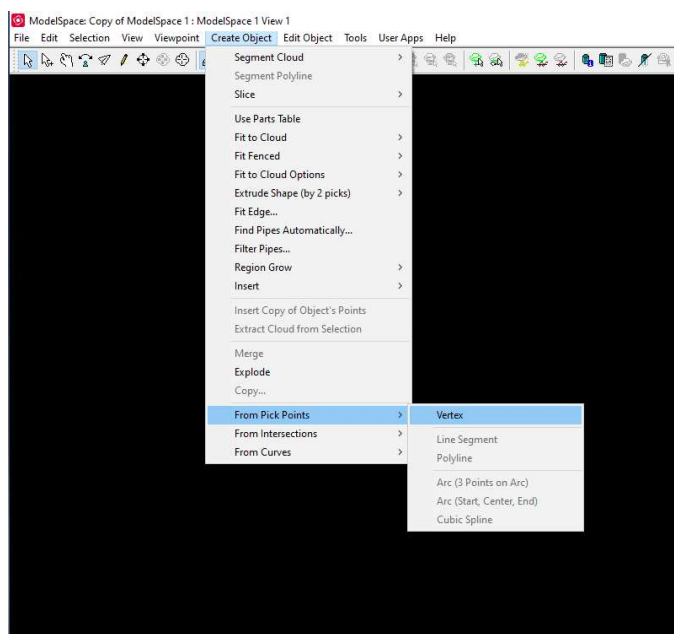
Napřed se naimportovala data do programu Cyclone, a poté bylo nutné v mračně bodů identifikovat cíle. To znamená nalézt střed černobílého terče a vymodelovat dva kulové cíle (Obr. 10). V tomto programu existuje funkce na vyhodnocení černobílého terče, která automaticky nalezne jeho střed (Obr. 17). K této funkci se dostaneme tak, že na horní liště vybereme "Create Object", následně najedeme kurzorem na "Fit to Cloud" a vybereme možnost "Black/White Target".



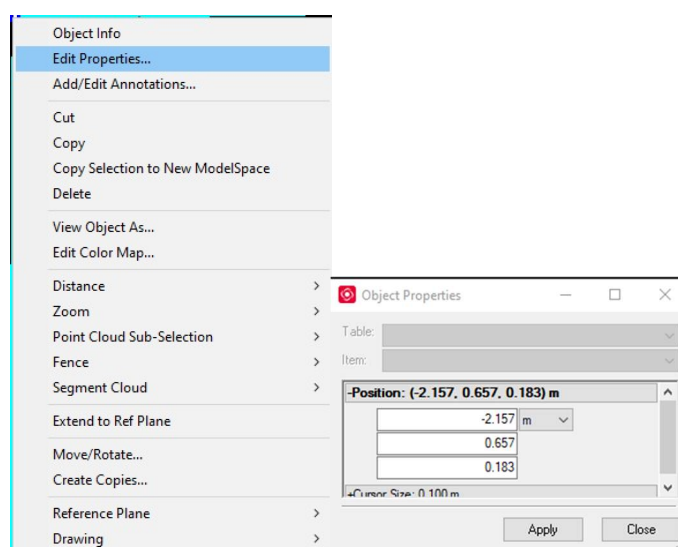
Obr. 17 Rozpoznání černobílého cíle

Pokud se nám zdá, že střed nebyl určen dostatečně přesně, tak jej lze vymodelovat i ručně (Obr. 18). K tomu znovu vybereme "Create Object", následně najedeme na "From Pick Points" a zvolíme možnost "Vertex".

Jestliže vybíráme střed manuálně, tak můžeme vybrat bod z mračna, který by mohl reprezentovat střed terče. Pokud bod, který by ležel přesně uprostřed, v mračnu nenajdeme, tak vybere bod, který je středu nejbližší. Následně upravíme jeho souřadnice tak, aby se nacházel přesně uprostřed terče. Důležité je si pomocí natáčení mračna hlídat pozici takto upravovaného bodu. Jedná se o prostorové souřadnice, proto je náročnější si polohu bodu pohlídat. Ukázka úpravy souřadnic ručně určeného středu je uvedena níže (Obr. 19). K této úpravě se dostaneme tak, že klikneme pravým tlačítkem myši na bod, který byl zvolen jako střed terče. Dále vybereme možnost "Edit Properties" a zde upravujeme jednotlivé souřadnice bodu. Po určení středu si zaznamenáme jeho souřadnice, které budeme dále používat.

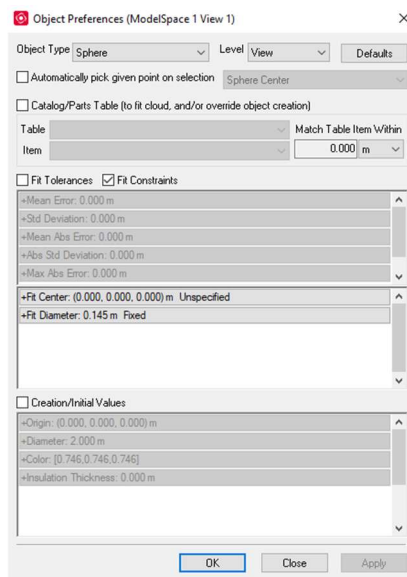


Obr. 18 Manuální střed



Obr. 19 Úprava souřadnic

Dále bylo nutné vymodelovat z mračka kulové cíle o známém průměru. Využijeme funkci, kterou disponuje sw. Cyclone. Před provedením tohoto úkonu musíme zvolit průměr koule, kterou chceme vytvořit (Obr. 20). Vybereme v horní liště možnost "Edit" a poté zvolíme možnost "Object Preferences". V dialogovém okně "Object Type" pak vybereme možnost "Sphere" a následně rozklikneme možnost "Fit Diameter" a navolíme známý průměr. V našem případě se jedná o 0,145 m pro malou kouli a 0,200 m pro velkou.



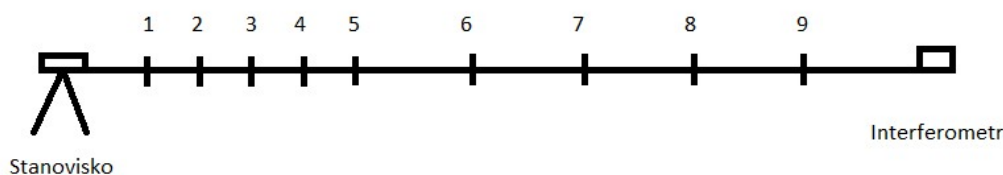
Obr. 20 Nastavení parametrů koule

Po nastavení průměru označíme mračno bodů a zvolíme funkci pro modelaci kulového cíle. Postupujeme stejně jako u černobílého terče. Vybereme mračno a v horní liště vybereme možnost "Create Object", následně najedeme na "Fit to Cloud" a vybereme možnost "Sphere". Pokud máme vytvořenou kouli, tak si rozklikneme informace o objektu (Obr. 21) a uložíme si souřadnice středu koule, které použijeme v dalším zpracování experimentu.



Obr. 21 Informace o kouli

Další úpravy probíhaly v sw. Microsoft Excel. Ze získaných souřadnic cílů se vypočítaly relativní délky mezi jednotlivými pozicemi vozíku. Výpočet proběhl pomocí vztahu pro prostorovou délku (1). Každá pozice vozíku byla naskenována celkem pětkrát, proto máme vždy pět délek pro porovnání. Pro lepší znázornění bylo vyhotoveno jednoduché schéma měření viz (Obr. 22). Čísla v obrázku představují jednotlivé pozice vozíku s cíli. Pozice 1 až 5 mají mezi sebou vzdálenost vždy po jednom metru. Pozice 5 až 8 jsou od sebe vzdáleny po pěti metrech. Vzdálenost mezi pozicí 8 a 9 jsou 3 metry. Vzdálenost mezi stanoviskem a pozicí 1 je přibližně 1 metr.



Obr. 22 Schéma měření délkové přesnosti

$$d = \sqrt{(X_i - X_1)^2 + (Y_i - Y_1)^2 + (Z_i - Z_1)^2} \quad (1)$$

X_i , Y_i a Z_i jsou souřadnice cíle v určité pozici vozíku, které odpovídají Obr. 22

Tyto relativní délky byly následně porovnávány s hodnotou, která byla naměřená interferometrem. Výpočet rozdílů viz (2). Délka z interferometru byla brána jako bezchybná. Z rozdílů byl vypočítán průměr, a směrodatná odchylka podle vzorce (3).

$$\Delta d = d_{int} - d_s \quad (2)$$

d_{int} je délka z interferometru a d_s je délka ze skeneru

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta d \cdot \Delta d}{n - 1}} \quad (3)$$

Kde n je počet měření na jedné pozici vozíku.

4.2. Ověření úhlové přesnosti

Zpracování druhého experimentu bylo velmi podobné tomu předchozímu. Data ze skenerů byla nahrána do programu Cyclone a v něm stejným postupem, jako u testování délek, byly získány souřadnice cílů. Další výpočty byly provedeny v sw. Excel. Na výpočet naměřeného úhlu byla použita kosinová věta (6). Abychom mohli tento vztah použít je nutné vypočítat všechny délky v trojúhelníku. Pomocí vztahu (4) se vypočítala délka ramene trojúhelníku SA (Obr. 12), to znamená vzdálenost mezi stanoviskem a cílem v pozici A, a poté se obdobně vypočítala vzdálenost mezi stanoviskem a cílem v pozici B. Nakonec se dopočítá vzdálenost cíle v pozici A od cíle v pozici B. Tato vzdálenost se vypočítá pomocí vztahu (5).

$$d_{SA} = \sqrt{(X_A)^2 + (Y_A)^2 + (Z_A)^2} \quad (4)$$

X_A, Y_A, Z_A jsou souřadnice cíle v pozici A viz Obr. 12

$$d_{AB} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad (5)$$

$$AB^2 = SA^2 + SB^2 - 2 \cdot SA \cdot SB \cdot \cos\gamma \quad (6)$$

Kde AB je protilehlá strana ke stanovisku, SA, SB jsou spojnice stanovisko poloha A, B vozíku.

Úhel byl vypočítán pomocí kosinové věty pětkrát z vypočítaných délek v trojúhelníku. Následně se vypočítal úhel znovu, ale tentokrát byla pro vzdálenost mezi cílem v pozici A a cílem v pozici B použita hodnota získaná z interferometru. Tato hodnota úhlu byla brána jako výchozí. Úhly vypočítané pouze z hodnot ze skeneru byly porovnávány s hodnotou úhlu získanou interferometrem. Z porovnání byly získány rozdíly úhlů. Rozdíly byly vypočítány podle (7). Pomocí vztahu (8) byla vypočítána výběrová směrodatná odchylka.

$$\Delta\gamma = \gamma_{int} - \gamma_s \quad (7)$$

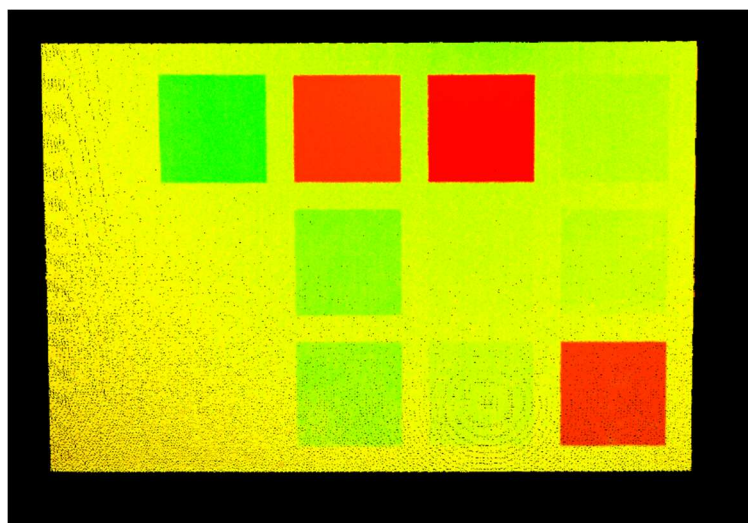
Kde γ_{int} je úhel z interferometru a γ_s je úhel ze skeneru

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta\gamma \cdot \Delta\gamma}{n - 1}} \quad (8)$$

n je počet měřených úhlů

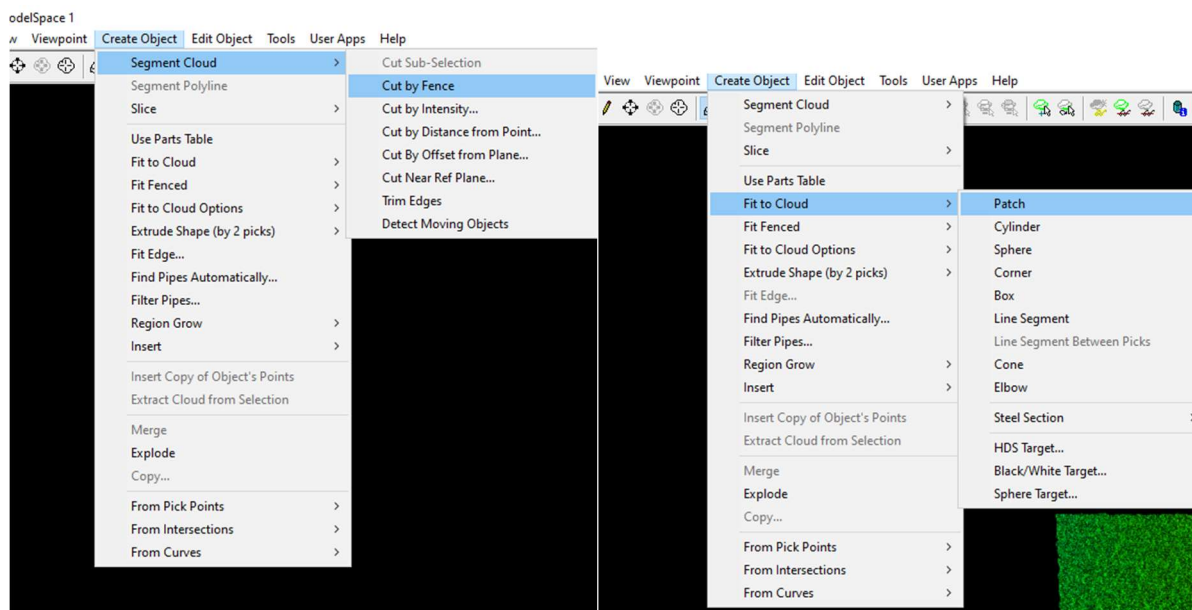
4.3. Určení velikosti šumu

Jako první věc bylo nutné nalézt testovanou desku v mračnech bodů, která byla naimportována do programu Cyclone. Z mračna se nejprve vyseletovaly body, které reprezentují desku. Ostatní body se odstraní. Zbude nám jen deska s barevnými čtverci. Jejich barvy se lišily podle toho, s jakou intenzitou odráží laserový paprsek (Obr. 23). Pokud barevné čtverce mají stejnou barvu jako celá deska, znamená to, že intenzita, se kterou se svazek paprsku odráží, je velmi podobná.



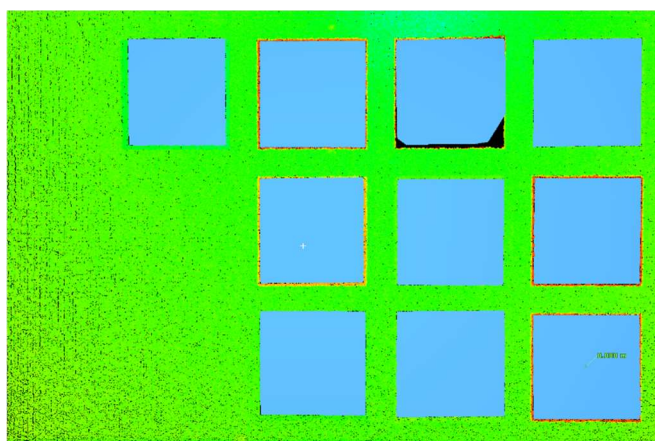
Obr. 23 Mračno bodů – deska

Jako další věc bylo potřeba vybrat jednotlivé barevné čtverce a proložit je rovinou. K tomu byla využita funkce "fence" v programu Cyclone. Tuto funkci zapneme klávesou "F". Po aktivaci funkce vybereme body barevného čtverce. Po vybrání bodů vybereme v horní liště možnost "Create Object", poté najedeme na možnost "Segment Cloud" a vybereme možnost "Cut by Fence". Body, které se nachází v této části, necháme proložit rovinou pomocí funkce "patch". K té se dostaneme výběrem v horní liště možnosti "Create Object", poté najedeme na možnost "Fit to Cloud" a zvolíme možnost "Patch". Ukázka výběru oblasti a proložení rovinou je uvedena níže (Obr. 24). Toto proložení je nutné udělat i v místě, kde mají čtverce stejnou barvu jako celá deska. I když jsou špatně identifikovatelné, tak nemohou být z experimentu vynechány.



Obr. 24 Ukázka prokládání čtverců rovinou

Po vytvoření rovin z vybraných oblastí, viz (Obr. 25), byly porovnávány s celou deskou. Pro tento účel bylo mračno tvořící desku proloženo rovinou stejným způsobem, jako byly proloženy jednotlivé čtverce. Pozorovanými parametry byla směrodatná odchylka proložení, a také vzdálenost mezi deskou a barevnými čtverci. Zajímá nás, jestli daná barva byla proložena rovinou za deskou, anebo před ní. Také je důležité zjistit s jakou přesností toto proložení proběhlo.



Obr. 25 Barevné čtverce proložené rovinami

4.4. Určení součtové konstanty

V posledním testu byly z dat v programu Cyclon modelovány koule o známém průměru stejně, jako v prvním a druhém experimentu. Po uložení souřadnic středů koulí z informačního okna viz (Obr. 21) byly provedeny výpočty v softwaru Excel. Ze získaných souřadnic středu koule A a koule B se nejprve vypočítala vzdálenost AB_1 . Jedná se o vzdálenost mezi cíli A, B při postavení stanoviska mezi nimi. Výpočet byl proveden podle vztahu pro prostorovou vzdálenost (10). Tato vzdálenost je zatížena dvojnásobnou součtovou konstantou. Následně se vypočítá vzdálenost AB_2 . Jedná se o vzdálenost mezi cíli A, B při postavení stanoviska za cíli. Tato vzdálenost by neměla být zatížena součtovou konstantou. Pro lepší znázornění situace viz schéma měření (Obr. 14). Po získání jednotlivých vzdáleností vypočítáme podle předpokladu (9) součtovou konstantu daného skeneru. Konstanta byla vypočítána třikrát a následně průměrována. Poté se vypočítaly odchylky od průměru, ze kterých byla vypočítána směrodatná odchylka podle vztahu (11).

$$AB_1 + 2s = AB_2 \quad S_c = \frac{AB_2 - AB_1}{2} \quad (9)$$

Kde AB_1 je vzdálenost naměřená při postavení stanoviska mezi cíli a AB_2 je délka naměřená při postavení stanoviska za cíli. S_c je součtová konstanta.

$$AB = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2} \quad (10)$$

Kde X_A, Y_A, Z_A jsou souřadnice cíle A a X_B, Y_B, Z_B jsou souřadnice cíle B

$$S = \sqrt{\frac{\sum v \cdot v}{n - 1}} \quad (11)$$

Kde v je odchylka od průměru

5. Výsledky

V této kapitole budou uvedeny výsledky jednotlivých experimentů a jejich zhodnocení. Po úpravě dat v sw. Cyclone byly veškeré výpočty provedeny v programu Microsoft Excel.

5.1. Ověření přesnosti délek

Nejprve budou uvedeny výsledky experimentu, který se týkal ověření délkové přesnosti jednotlivých skenerů. Klíčové pro tento test bylo porovnání relativní délky naměřené interferometrem, která byla brána jako bezchybná a délky získané skenováním. Z rozdílů, které vznikly se spočítaly směrodatné odchylky. Výsledné hodnoty jsou uvedené v tabulce níže. Kvůli přehlednosti byla pro směrodatné odchylky vytvořena vlastní tabulka.

5.1.1. Leica BLK 360

Tab. 5 Výsledky ověření délek – BLK 360

Pozice	Délka interferometru	Délka BLK360 [m]			Rozdíly [mm]		
		Malá koule	Velká koule	Terč M	Malá koule	Velká koule	Terč
1-2	1,0004	1,0048	1,0026	1,0055	-4,4	-2,2	-5,1
2-3	1,0053	1,0042	1,0042	1,0034	1,1	1,4	1,9
3-4	1,0045	1,0079	1,0083	1,0086	-3,4	-3,8	-4,1
5-6	5,0028	5,0035	5,0012	5,0005	-0,7	1,6	2,3
5-7	10,0002	9,9979	9,9954	10,0001	2,3	4,8	0,1
5-8	15,0013	15,0012	14,9985	15,0005	0,1	2,8	0,8

M... manuálně určený střed

V Tab. 5 jsou uvedeny naměřené délky skenerem BLK360 a následně porovnány s délkami z interferometru. Veškeré vzdálenosti získané pomocí skeneru se měřily pětkrát a do tabulky byl uveden jejich průměr. U hodnot ve sloupci *rozdíly*, které jsou záporné, byla skenerem naměřena větší vzdálenost, než je vzdálenost z interferometru. Z tabulky vyplývá, že největší rozdíl délek byl mezi pozicemi 1-2 a činil **-5,1 mm**. Z výsledných hodnot vidíme, že skener nevykazuje konstantní rozdíl.

Za normálních okolností by relativní délky byly počítány od první pozice vozíku na Obr. 22. Bohužel první den testu několikrát došlo k výpadku interferometru, a proto byly výchozí pozice, odkud se počítaly délky, několikrát změněny. Ve sloupci *pozice* je uvedeno, pro které pozice je relativní délka vypočítána a pro kterou se vztahuje délka naměřená interferometrem.

Tab. 6 Směrodatné odchytky měření délek – BLK 360

Pozice	Směrodatná odchytky [mm]		
	Malá koule	Velká koule	Terč
1-2	4,98	2,49	5,88
2-3	1,38	1,63	2,17
3-4	3,80	4,36	4,62
5-6	1,59	2,22	3,68
5-7	2,86	5,48	3,32
5-8	2,26	3,58	2,48

V Tab. 6 jsou uvedeny směrodatné odchytky získané z rozdílů měření délek. Největší hodnota směrodatné odchytky je mezi pozicí 1-2 a je **5,88 mm**. Hodnota, kterou uvádí výrobce je 4 mm / 10 m. Hodnota mezní odchytky, která činí dvojnásobek uváděné odchytky výrobcem, byla dodržena.

5.1.2. Leica RTC 360

Tab. 7 Výsledky ověření délek – RTC 360

Pozice	Délka interferometru	Délka RTC360 [m]			Rozdíly [mm]		
		Malá koule	Velká koule	Terč M	Malá koule	Velká koule	Terč
1-2	0,9984	0,9985	0,9988	0,9988	-0,1	-0,4	-0,4
1-3	2,0014	2,0020	2,0023	2,0007	-0,6	-0,9	0,7
1-4	3,0019	3,0026	3,0030	3,0021	-0,7	-1,1	-0,2
1-5	4,0023	4,0032	4,0037	4,0024	-0,9	-1,4	-0,1
1-6	9,0000	9,0009	9,0018	8,9997	-0,9	-1,8	0,3
1-7	13,9999	14,0012	14,0017	13,9995	-1,3	-1,8	0,4
1-8	19,0017	19,0024	19,0031	19,0019	-0,7	-1,4	-0,2
1-9	22,0018	22,0022	22,0032	22,0011	-0,4	-1,4	0,7

M... manuálně určený střed

V Tab. 7 se nachází hodnoty naměřené skenerem RTC 360 a interferometrem. Délky získané z interferometru se liší od hodnot v Tab. 5, protože experiment s RTC 360 probíhal jiný den. Tentokrát nedocházelo k výpadku interferometru, takže relativní délky jsou počítány od první pozice vozíku. Dále v Tab. 7 můžeme nalézt rozdíly mezi délkou z interferometru a skeneru.

Největší rozdíl byl **-1,8 mm** mezi pozicemi 1-6 a 1-7. Z výsledných rozdílů je vidět, že skener RTC 360 u kulových cílů měří delší vzdálenosti, zatímco u černobílého terče spíše kratší.

Tab. 8 Směrodatné odchytky měření délek – RTC 360

Pozice	Směrodatná odchytky [mm]		
	Malá koule	Velká koule	Terč
1-2	0,19	0,51	0,45
1-3	0,64	1,06	0,97
1-4	0,77	1,25	0,22
1-5	0,97	1,53	0,46
1-6	1,00	2,07	0,83
1-7	1,43	2,01	0,56
1-8	0,82	1,52	0,61
1-9	0,47	1,57	0,84

V Tab. 8 jsou uvedeny směrodatné odchytky vypočítané z rozdílů délek. Největší hodnota směrodatné odchytky je **2,07 mm** a nachází se mezi pozicemi 1-6 u velké koule. To odpovídá vzdálenosti 10 metrů. Výrobce uvádí hodnotu 1 mm + 10 ppm. Hodnota mezní odchytky, která je dvojnásobek odchytky uváděné výrobcem, byla dodržena.

5.1.3. Leica ScanStation P40

Tab. 9 Výsledky ověření délek – P40

Pozice	Délka interferometru	Délka P40 [m]			Rozdíly [mm]		
		Malá koule	Velká koule	Terč A	Malá koule	Velká koule	Terč
1-2	1,0004	1,0007	1,0014	1,0001	-0,3	-1,0	0,3
2-3	1,0053	1,0050	1,0047	1,0049	0,3	0,6	0,4
3-4	1,0045	1,0047	1,0047	1,0043	-0,2	-0,2	0,2
5-6	5,0028	5,0022	5,0023	5,0021	0,6	0,5	0,7
5-7	10,0002	9,9997	9,9996	9,9992	0,5	0,6	1,0
5-8	15,0013	15,0007	15,0009	15,0008	0,6	0,4	0,5
8-9	3,0014	3,0011	3,0014	3,0011	0,3	0,0	0,3

A... automaticky určený střed

V Tab. 9 jsou uvedeny naměřené délky skenerem Leica P40 a z interferometru. Hodnoty z interferometru jsou stejné jako v Tab. 5, jelikož měření probíhalo stejný den. Kvůli výpadkům interferometru byly výchozí pozice, odkud byly počítány délky, měněny a jsou uvedeny ve

sloupci *Pozice*. Stejně jako v přechozích tabulkách jsou v Tab. 9 rozdíly délek z interferometru a P40. Největší rozdíl je **1,0 mm** mezi pozicemi 5-7. Skener vykazuje přibližně konstantní rozdíl.

Tab. 10 Směrodatné odchytky měření délek – P40

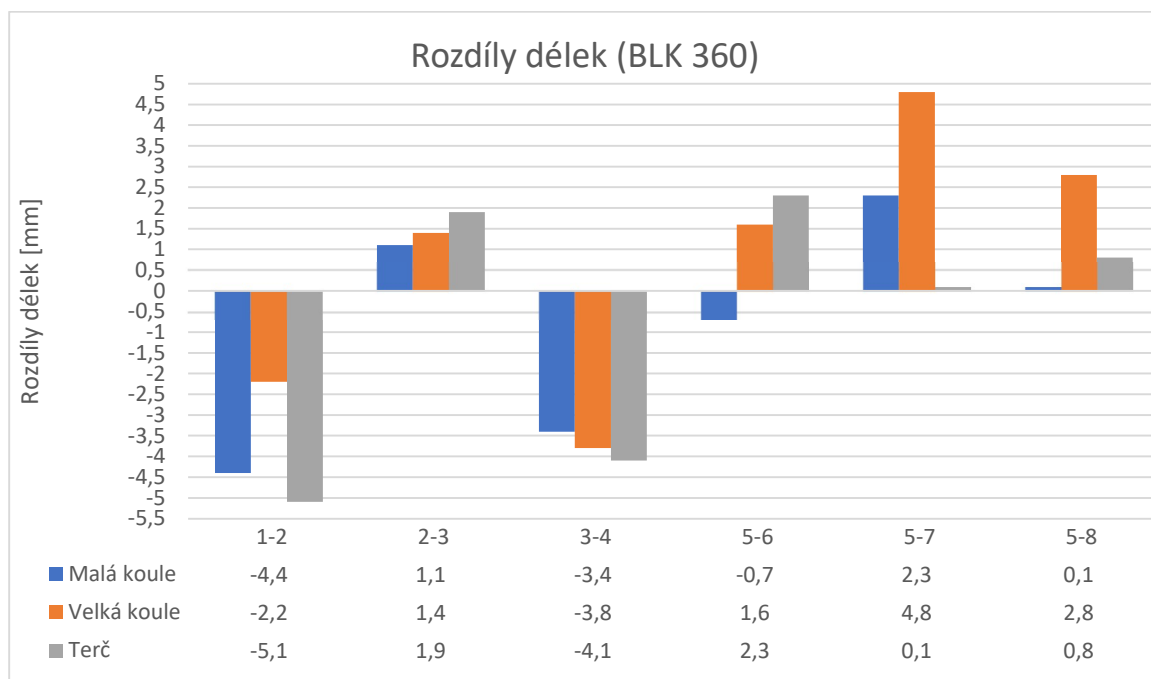
Pozice	Směrodatná odchytky [mm]		
	Malá koule	Velká koule	Terč
1-2	0,32	1,08	0,33
2-3	0,38	0,70	0,48
3-4	0,20	0,27	0,27
5-6	0,65	0,61	0,76
5-7	0,52	0,65	1,17
5-8	0,71	0,49	0,58
8-9	0,29	0,09	0,35

V Tab. 10 jsou znázorněny směrodatné odchytky z měření se skenerem Leica P40. Největší hodnota směrodatné odchytky je **1,17 mm** mezi pozicemi 5-7. Hodnota, kterou uvádí výrobce je 1,2 mm / 10 m. Tato hodnota byla dodržena.

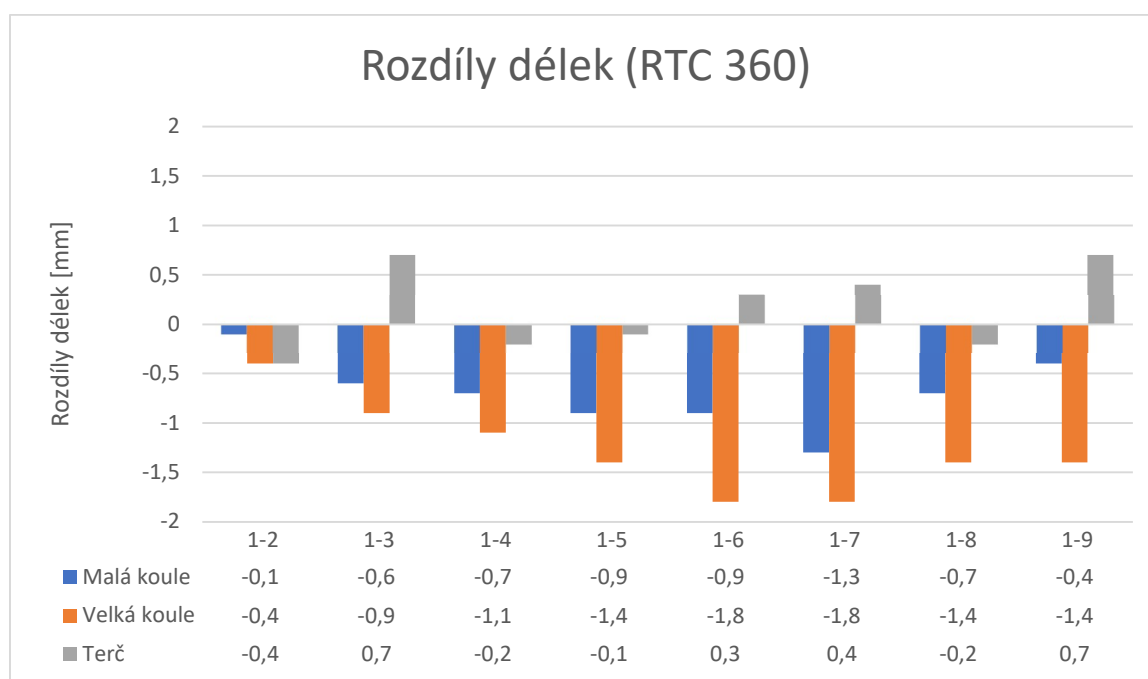
5.1.4. Zhodnocení testu

Pro přehlednější porovnání jednotlivých výsledků byly vytvořeny grafy, které zobrazují jednotlivé rozdíly délek. Graf se pro lepší přehlednost bude týkat vždy jen jednoho skeneru.

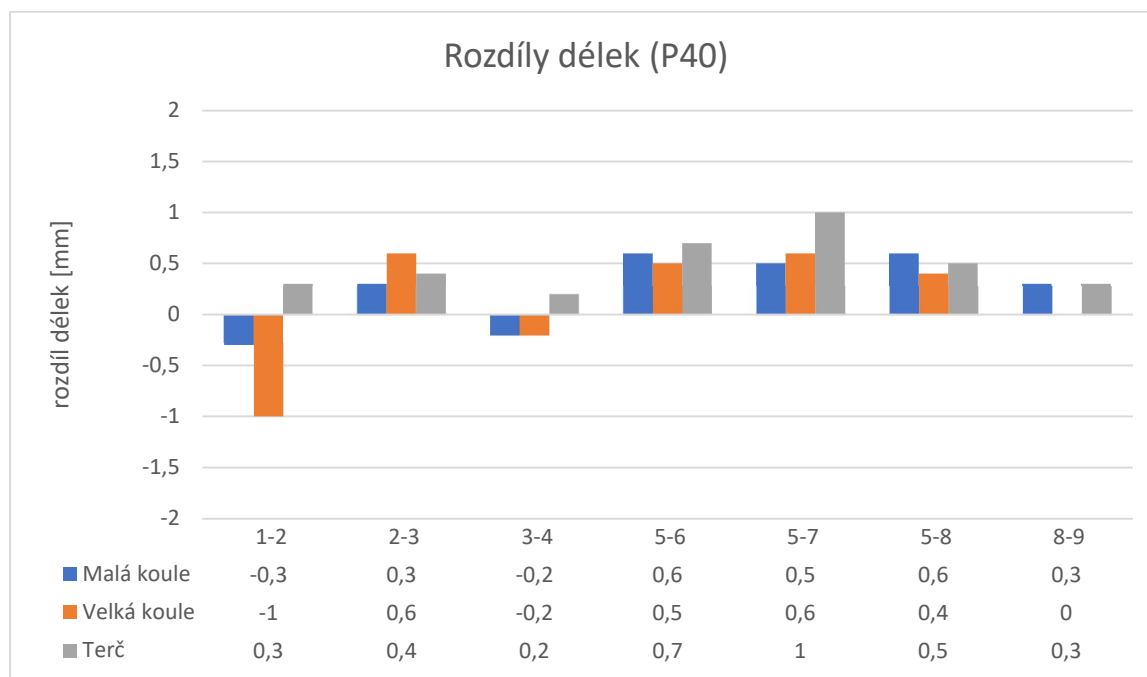
Z Graf 1, Graf 2 a Graf 3 je patrné, že BLK 360 dosahoval znatelně vyšších rozdílů délek, zatímco RTC360 a P40 měly relativně podobné hodnoty. To bylo vzhledem k uváděným přesnostem výrobce očekávané. RTC 360 mělo největší rozdíly u velké koule.



Graf 1 Rozdíly délek (BLK 360)



Graf 2 Rozdíly délek (RTC 360)



Graf 3 Rozdíly délek (P40)

Pokud zhodnotíme Tab. 6, Tab. 8 a Tab. 10, je jasné, že svou dominanci v rozptylu měření předvedl skener P40. U BLK 360 se ukázalo, že má poměrně vysokou směrodatnou odchylku pro všechny cíle. RTC 360 mělo nejmenší rozptyl u velkého kulového cíle. U BLK 360 a RTC 360 bylo nutné manuálně určovat střed terče. Když byl střed určen automaticky, tak vznikaly velké rozdíly. Výsledek testu pravděpodobně ovlivnily i výpadky interferometru během prvního dne měření s BLK 360 a P40.

5.2. Ověření úhlové přesnosti

V této podkapitole jsou uvedeny výsledky experimentu, který se týkal úhlové přesnosti jednotlivých skenerů. V tomto testu bylo důležité porovnání úhlů získaných pomocí skenování a z interferometru. Všechny úhly se počítaly pomocí kosinové věty z naměřených délek. Následně se vypočítaly směrodatné odchylky jednotlivých měření, kvůli zjištění rozptylu získaných dat. Veškeré výpočty probíhaly v programu Microsoft Excel.

5.2.1. Leica BLK 360

Tab. 11 Výsledky úhlové přesnosti – BLK 360

Malá koule interferometr	Úhly BLK360 [gon]		Velká koule interferometr	Úhly BLK360 [gon]	
	Úhel měřený	Rozdíl		Úhel měřený	Rozdíl
5,1553	5,1659	-0,0105	5,1667	5,1708	-0,0041
	5,1574	-0,0020		5,1736	-0,0069
	5,1590	-0,0036		5,1749	-0,0082
	5,1602	-0,0048		5,1749	-0,0082
	5,1561	-0,0007		5,1718	-0,0052

Terč (M)	Úhly BLK360 [gon]	
interferometr	Úhel měřený	Rozdíl
5,1231	5,1258	-0,0027
	5,1277	-0,0046
	5,1215	0,0016
	5,1242	-0,0010
	5,1322	-0,0091

M... znamená, že byl použit manuální střed pro vyhodnocení černobílého terče

V Tab. 11 jsou hodnoty obdrženy z měření pomocí BLK 360. Tabulka je rozdělena na tři části pro lepší přehlednost. Jedna část je vždy pro konkrétní cíl. Provedlo se celkem 5 skenů, které se porovnávaly s hodnotou z interferometru. Různé hodnoty úhlu u interferometru jsou kvůli tomu, že vzdálenosti od jednotlivých cílů ke stanovisku nejsou stejné. Tato situace je stejná pro Tab. 13 a Tab. 15. Jednotlivé rozdíly úhlů jsou znázorněny v tabulce. Největší naměřený rozdíl je u malé koule a činí **-0,0105 gon**.

Následně byla vypočítána směrodatná odchylka z výsledných rozdílů. Hodnoty odchylek pro každý cíl jsou uvedeny v Tab. 12. Největší vypočítaná odchylka byla u velké koule a její hodnota je **0,0075 gon**. Výrobce uvádí úhlovou přesnost 0,0123 gon. Hodnota uváděná výrobcem byla dodržena.

Tab. 12 Směrodatná odchylka úhlové přesnosti – BLK 360

Směrodatná odchylka [gon]		
Malá koule	Velká koule	Terč M
0,0062	0,0075	0,0053

5.2.2. Leica RTC 360

Tab. 13 Výsledky úhlové přesnosti – RTC 360

Malá koule	Úhly RTC360 [gon]		Velká koule	Úhly RTC360 [gon]	
interferometr	Úhel měřený	Rozdíl	interferometr	Úhel měřený	Rozdíl
5,0394	5,0429	-0,0035	5,0559	5,0587	-0,0029
	5,0422	-0,0028		5,0576	-0,0018
	5,0406	-0,0012		5,0571	-0,0013
	5,0401	-0,0007		5,0562	-0,0004
	5,0405	-0,0011		5,0573	-0,0014

Terč (A)	Úhly RTC360 [gon]	
interferometr	Úhel měřený	Rozdíl
5,0138	5,0159	-0,0021
	5,0177	-0,0040
	5,0133	0,0005
	5,0133	0,0005
	5,0177	-0,0039

A... znamená, že k vyhodnocení černobílého terče byl použit automatický střed

V Tab. 13 jsou uvedeny výsledky testu úhlové přesnosti, které byly pořízeny pomocí skeneru RTC 360. Tabulka byla opět rozdělena na tři části pro jednotlivé cíle. Naměřené úhly byly porovnány s interferometrem a jejich rozdíly jsou uvedeny v tabulce. Maximální dosažený rozdíl je u černobílého terče **-0,0040 gon**.

Vypočítané směrodatné odchylky pro každý cíl jsou uvedeny v Tab. 14. Nejvyšší dosažený rozptyl byl u černobílého terče a činil **0,0030 gon**. Výrobce uvádí úhlovou přesnost 0,0055 gon. Tato hodnota byla dodržena.

Tab. 14 Směrodatné odchylky – RTC 360

Směrodatná odchylka		
Malá koule	Velká koule	Terč (A)
0,0024	0,0019	0,0030

5.2.3. Leica ScanStation P40

Tab. 15 Výsledky úhlové přesnosti – P40

Malá koule	Úhly P40 [gon]		Velká koule	Úhly P40 [gon]	
interferometr	Úhel měřený	Rozdíl	interferometr	Úhel měřený	Rozdíl
5,0420	5,0425	-0,0005	5,0531	5,0551	-0,0020
	5,0434	-0,0014		5,0556	-0,0026
	5,0441	-0,0021		5,0544	-0,0013
	5,0422	-0,0002		5,0540	-0,0009
	5,0421	-0,0001		5,0541	-0,0011

Terč (A)	Úhly P40 [gon]	
interferometr	Úhel měřený	Rozdíl
5,0119	5,0105	0,0014
	5,0132	-0,0013
	5,0121	-0,0002
	5,0117	0,0002
	5,0111	0,0008

V Tab. 15 jsou uvedeny naměřené úhly skenerem Leica ScanStation P40 a jejich následné porovnání s úhlem pořízeným interferometrem. Z jednotlivých hodnot vidíme, že nejvyšší rozdíl je **-0,0026 gon** a nacházel se u velké koule.

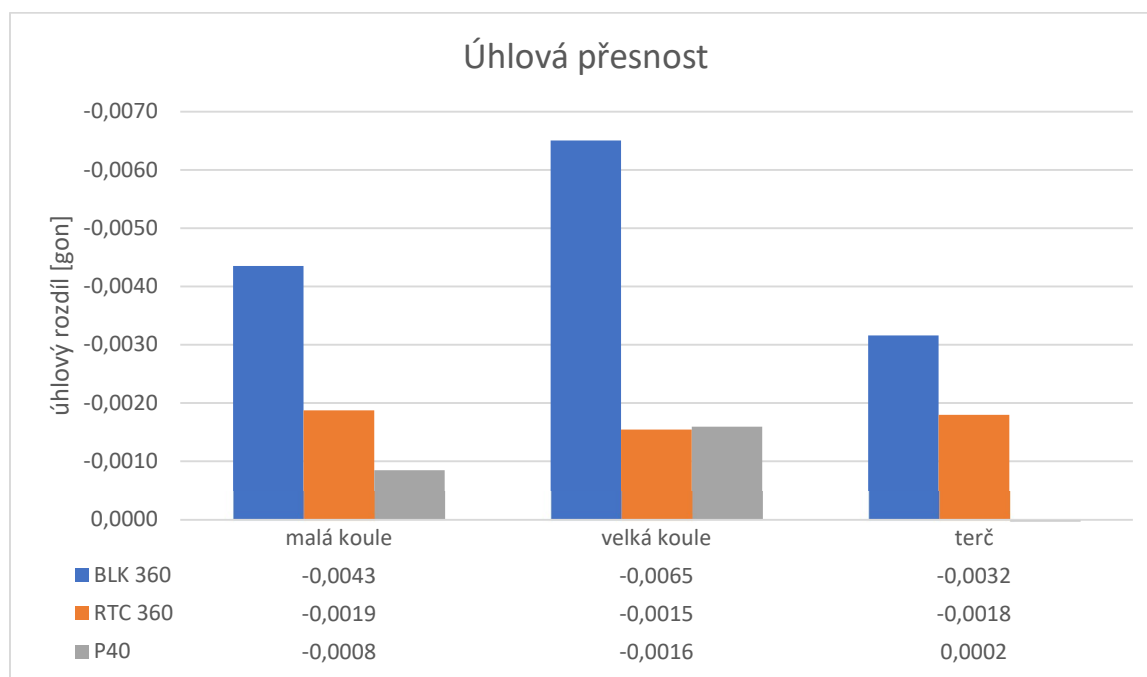
Následně byly vypočítány směrodatné odchylky měření, které jsou uvedeny v Tab. 16. Největší hodnota rozptylu je **0,0019 gon** u velké koule. Výrobce uvádí úhlovou přesnost 0,0025 gon. Tato hodnota byla dodržena.

Tab. 16 Směrodatné odchylky – P40

Směrodatná odchylka		
Malá koule	Velká koule	Terč (A)
0,0013	0,0019	0,0011

5.2.4. Zhodnocení testu

V této podkapitole budou shrnuty výsledky experimentu, který se týkal úhlové přesnosti. Pro názorné srovnání byl vyhotoven Graf 4, ve kterém jsou uvedeny průměrné hodnoty úhlových rozdílů. V grafu jsou výsledky pro všechny tři cíle. Z dat vidíme, že nejvyšších hodnot dosahoval BLK 360.



Graf 4 Úhlová přesnost

U černobílého terče dopadl nejlépe P40 (rozptyl měření byl téměř nulový). BLK 360 mělo podle očekávání rozdíly nejvyšší. Pro černobílý terč u RTC 360 bylo použito automatické určení středu, které zde dosahovalo lepší výsledků.

Hodnoty vypočítaných délek použitých v kosinové větě jsou uvedeny v elektronické příloze.

5.3. Určení velikosti šumu

Testování velikosti šumu se provádělo na desce s barevnými čtverci. Jednotlivé čtverce se proložily rovinou. Sledované parametry tohoto testu získané z jednotlivých dat byly směrodatné odchytky proložení, vzdálenosti mezi deskou a rovinou proložení a počet bodů, ze kterých byly roviny vytvořeny. Uvedeny budou pouze tabulky týkající se vzdálenosti 5 metrů. Zbytek bude uveden v přílohách.

5.3.1. Leica BLK 360

Tab. 17 Výsledky určování šumu - BLK 360

5 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchytká [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchytká [m]	Vzdálenost [m]
bílá	996	0,0010	0,0000	916	0,0010	0,0000
šedá	1096	0,0020	0,0030	827	0,0020	0,0003
černá	1078	0,0010	0,0013			
oranžová	965	0,0010	0,0000	687	0,0010	0,0007
modrá	1112	0,0010	0,0000	800	0,0020	-0,0010
červená	1069	0,0010	-0,0010	769	0,0010	0,0000
zelená	1087	0,0020	0,0020	705	0,0020	-0,0027
žlutá	1062	0,0010	-0,0003	814	0,0010	-0,0007
fialová	1042	0,0010	0,0000	778	0,0010	0,0000
hnědá	1053	0,0020	0,0043	694	0,0020	0,0007

- ... rovina byla proložena za deskou

+ ... rovina byla proložena před deskou

Výsledky získané ze skeneru BLK 360 jsou uvedeny v Tab. 17. Tabulka se skládá ze dvou částí. V první jsou uvedeny hodnoty pro desku, která byla kolmo k přístroji a druhá část je pro natočení desky o 45°. Výsledky uvedené v tabulce jsou průměry ze tří měření. Můžeme vidět, že na proložení roviny je použit přibližně stejný počet bodů u všech barev. Výjimku tvoří černá barva u natočení o 45°. U ní bylo naměřeno příliš málo bodů na proložení roviny. Je to způsobeno tím, že černá a obecně tmavé barvy více pohlcují laserový svazek. K tomu se přidává fakt, že je deska natočená, takže laserový svazek se neodráží přímo nazpět ke skeneru. Směrodatná odchytká se pohybuje kolem 1 až 2 mm.

5.3.2. Leica RTC 360

Tab. 18 Výsledky určování šumu - RTC 360

5 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	3638	0,0000	0,0000	3643	0,0000	0,0000
šedá	3741	0,0000	-0,0010	3269	0,0000	-0,0010
černá	3712	0,0000	-0,0003	3112	0,0010	-0,0010
oranžová	3780	0,0000	0,0000	2836	0,0000	0,0000
modrá	3662	0,0000	-0,0010	3307	0,0000	-0,0010
červená	3755	0,0000	-0,0010	3144	0,0000	-0,0010
zelená	3660	0,0000	0,0000	2888	0,0000	0,0000
žlutá	3660	0,0000	-0,0010	3343	0,0000	-0,0010
fialová	3702	0,0000	-0,0007	3001	0,0000	0,0000
hnědá	3660	0,0000	0,0000	2713	0,0000	0,0000

- ... rovina byla proložena za deskou

+ ... rovina byla proložena před deskou

Výsledky určování šumu z přístroje RTC 360 na vzdálenost 5 metrů jsou uvedeny v Tab. 18. Z jednotlivých hodnot můžeme pozorovat, že zatímco pro kolmé postavení byl použit přibližně stejný počet bodů na proložení rovinou, tak u natočeného postavení se počty bodů poměrně liší. Nejméně bodů je použito pro hnědou barvu. Jedná se opět o tmavou barvu. Skener ale evidentně pracuje lépe s černou barvou, než BLK 360, protože i při šikmém postavení desky je zde dostatek bodů pro proložení rovinou. Je nutné upozornit, že deska je vzdálená od přístroje jen 5 m. Jedná se tedy o velmi malou vzdálenost. Vzdálenosti proložených rovin jsou převážně záporné, takže byly vyhodnoceny za deskou. Tyto hodnoty mají velikost do 1 mm. Proložení rovinou proběhlo poměrně přesně.

5.3.3. Leica ScanStation P40

Tab. 19 Výsledky určování šumu - P40

5 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	1078	0,0000	0,0000	964	0,0000	0,0000
šedá	1062	0,0000	0,0000	935	0,0000	0,0000
černá	1065	0,0000	-0,0003	962	0,0040	0,0000
oranžová	1046	0,0000	0,0010	913	0,0000	0,0010
modrá	1063	0,0000	-0,0010	909	0,0000	-0,0010
červená	1068	0,0000	-0,0010	944	0,0000	-0,0010
zelená	1047	0,0000	0,0000	886	0,0000	0,0000
žlutá	1070	0,0000	-0,0010	884	0,0000	-0,0010
fialová	1041	0,0000	-0,0003	897	0,0000	-0,0010
hnědá	1031	0,0010	0,0010	877	0,0000	0,0003

- ... rovina byla proložena za deskou

+ ... rovina byla proložena před deskou

V Tab. 19 jsou uvedeny výsledky určování šumu pomocí Leica ScanStation P40. Z hodnot v tabulce vidíme, že pro všechny barvy v jednom postavení byl použit přibližně stejný počet bodů. Důležité je poukázat na černou barvu v natočeném postavení. Přestože je tvořena podobným počtem bodů jako barvy ostatní, tak má směrodatnou odchylku proložení **4 mm**. Jednotlivé vzdálenosti mají opět spíše záporné znaménko, takže proložení rovin proběhlo za deskou. Tyto hodnoty se ale pohybují do 1 mm, proto lze říct, že jejich proložení proběhlo v rámci přesnosti přístroje uváděné výrobcem.

5.3.4. Zhodnocení testu

Jelikož experiment probíhal na více vzdálenostech, tak je nutné zhodnotit i další výsledky a nejen vzdálenost 5 metrů. Zbylá data jsou uvedena v tabulkách viz Přílohy. Z tabulek v příloze (A) můžeme vidět, že BLK 360 při kolmém postavení desky dokázal proložit roviny u všech barevných čtverců poměrně přesně. Až u 50 m začaly směrodatné odchylky narůstat. U natočeného postavení desky nebyla v žádné vzdálenosti proložena rovina černá barva. U 50 metrů už nebyla vyhodnocena šedá, černá, modrá, zelená a hnědá barva.

V celkovém hodnocení můžeme říct, že BLK 360 dokáže při kolmém dopadu laserového svazku měřit na vzdálenost 50 metrů bez větších obtíží. Pokud by se měřil objekt pod větším úhlem, tak by mohl mít tento přístroj menší problémy. Podle mého názoru nevýhodou u BLK 360 je, že skeny trvají poměrně dlouho a může být poněkud složité se orientovat v jednotlivých skenech při převodu dat. Výhoda je, že přístroj je malý a lehký, takže není problém s přenosem.

V příloze (B) můžeme pozorovat, že skener RTC 360 při kolmém postavení desky prokládal roviny se směrodatnou odchylkou kolem **1 mm** a vzdálenost od desky se pohybovala také kolem **1 mm**. U 25 metrů pro natočené postavení desky již nebyla vyhodnocena černá barva. U 50 metrů nastal lehký nárůst vzdálenosti proložení roviny od desky. Dosahoval hodnoty **2 mm**. Ve vzdálenosti 75 metrů se nevyhodnotila šedá, černá a hnědá barva a narostla hodnota směrodatné odchylky proložení. Nejvyšší hodnota byla **3 mm**. Vzdálenost proložení roviny od desky u oranžové barvy byla **8 mm**. Ve vzdálenosti 100 metrů již byla deska značně deformovaná, a proto nebyla vyhodnocena.

RTC 360 dokázalo bez problému naměřit desku na 100 m při kolmém postavení. U vzdálenosti 75 m při natočeném postavení desky skener nedokázal vyhodnotit některé barvy. Mohl by tak nastat problém při skenování vysokých objektů. Výhodou přístroje bylo, že skeny probíhají rychle a dá se velmi snadno přenášet podobně jako BLK 360. Další výhodou je velmi snadná manipulace při nastavování parametru skenu, a to i pokud jej ovládáme jen přes dotykový displej na přístroji. Menší nevýhoda byla, že nejde u tohoto přístroje nastavit úhel skenu a musí se vždy provést 360° sken.

V příloze (C) jsou data týkající se měření pomocí P40. Z tabulek je vidět, že pro kolmé postavení desky nebyl žádný problém s vyhodnocením barevných čtverců. Směrodatná odchylka se pohybovala kolem **1 mm**, a to až od 75 metrů. Vzdálenost roviny od desky byla také kolem **1 mm**. U natočeného postavení desky se směrodatná odchylka černé barvy

pohybovala kolem **4 mm** a od 50 m již nebyla vyhodnocena. Od 50 metrů hodnoty směrodatných odchylek a vzdáleností rovin od desky začaly narůstat. Při měření na 100 m byla největší vzdálenost roviny od desky **7 mm**. Jednalo se o hnědou barvu. Ve vzdálenosti 125 m došlo ke zlepšení směrodatných odchylek i vzdálenosti roviny od desky, protože byla použita hustota skenování 1,6 mm / 10 m. Skenování trvalo znatelně delší dobu, ale díky tomu lze měřit i na velkou vzdálenost, konkrétně 125 m.

Skener P40 ukázal, že při nastavení vyšší hustoty byly jen tři barvy, které na vzdálenost 125 m nedokázal změřit při natočení desky. Jedná se o černou, hnědou a šedou barvu. Výhodou skeneru je podle mě, že dokáže měřit rychle a můžeme nastavit výseč, kterou chceme skenovat a zvolit potřebnou hustotu skenování. Dále bylo u tohoto přístroje poměrně snadné vyhodnocování skenů v programu Cyclone, zatímco u BLK 360 (výrazný šum) a RTC 360 (větší šum než u P40) to bylo poněkud složitější. Nevýhodou je velikost a váha skeneru, takže je poněkud složitější na přenášení.

5.4. Určení součtové konstanty

Veškeré výsledky týkající se určení součtové konstanty jednotlivých skenerů jsou uvedeny v Tab. 20. Výsledná hodnota je získána průměrem ze tří hodnot. Součtová konstanta byla vypočítána podle vzorce (9). Dále byla vypočítána směrodatná odchylka měření, abychom viděli rozptyl výsledků.

Tab. 20 Výsledky určení součtové konstanty

Součtová konstanta [mm]	BLK360	RTC360	P40
1. měření	7,8	-1,7	-0,6
2. měření	9,0	-1,2	-1,2
3. měření	6,4	-1,5	-0,9
Průměr	7,8	-1,4	-0,9
Směrodatná odchylka	1,29	0,25	0,26

Z výsledných hodnot v Tab. 20 vidíme, že skenery P40 a RTC 360 mají podobnou součtovou konstantu, jejíž velikost se pohybuje kolem **1 mm**. Rozptyl měření pro **RTC 360** byl **0,25 mm** a pro **P40** byl **0,26 mm**. Z výsledku tohoto experimentu vyšlo najevo, že BLK 360 má neočekávaně vysokou součtovou konstantu. Její hodnota je přibližně **8 mm**. Rozptyl měření byl **1,29 mm**. Z výsledku se domnívám, že by bylo vhodné ověřit součtovou konstantu BLK 360.

6. Závěr

Hlavní náplní této práce bylo otestovat přesnost 3D laserových skenerů Leica BLK 360, Leica RTC 360 a Leica ScanStation P40. Za tímto účelem byly provedeny celkem čtyři experimenty. Hlavním předmětem těchto testů byla délková a úhlová přesnost, určení šumu a součtové konstanty jednotlivých skenerů. Z měření délkové přesnosti vyšlo najevo, že délky měří nejlépe P40. RTC 360 vykázalo jen o trochu horší výsledky. Všechny skenery splnily přesnost udávanou výrobcem. Tento experiment byl původně navržen tak, že se určovaly absolutní délky na základně. Nicméně tato základna nebyla dlouhou dobu přeměřena, a tak se tento test modifikoval na měření relativních délek pomocí interferometru. Bohužel první den docházelo při měření k výpadkům interferometru. Dále bylo nutné u BLK 360 a RTC 360 manuálně vyhodnocovat středy terčů. Při testování úhlů měl znovu o trochu lepší výsledky P40. Přesnosti dané výrobcem byly splněny. Experiment byl opět modifikován tak, aby se využilo měření interferometrem. U tohoto testu RTC 360 ukázalo lepší výsledky při automatickém vyhodnocení terče než u testování délek. Při testování šumu se ukázalo, že BLK 360 vykazuje poměrně velký šum, který byl pro tmavší barvy výraznější než pro světlé barvy. RTC 360 měl šum o něco menší a P40 měl šum minimální. Poslední test ukázal, že součtová konstanta RTC 360 a P40 je minimální. U BLK 360 byla zjištěna vysoká hodnota součtové konstanty a chtělo by ji znovu ověřit.

Jednotlivé skenery jsou celkem odlišné a mají své silné a slabší stránky. Osobně se mi líbila práce s Leica RTC 360, protože s ním byla velmi jednoduchá manipulace, nebyl náročný na přenášení a svou přesností nebyl příliš daleko od P40. Řekl bych, že skener BLK 360 trochu doplácí na svou jednoduchost. Je sice pravda, že je malý a cenově mnohem dostupnější, ale jeho přesnost není úplně nejlepší a skenování trvá poměrně dlouhou dobu a data vykazují výraznější šum oproti ostatním testovaným skenerům.

7. Seznam obrázků

<i>Obr. 1 BLK360</i>	10
<i>Obr. 2 Stativ k BLK360</i>	11
<i>Obr. 3 Tablet k BLK360</i>	11
<i>Obr. 4 RTC360</i>	12
<i>Obr. 5 Propojení jednotlivých stanovišek</i>	13
<i>Obr. 6 P40</i>	14
<i>Obr. 7 Displej u P40</i>	15
<i>Obr. 8 Transportní kufr pro P40</i>	15
<i>Obr. 9 Stanoviško pro skenery</i>	17
<i>Obr. 10 Vozík a cíle</i>	17
<i>Obr. 11 Renishaw Linear Measuring</i>	18
<i>Obr. 12 Schéma měření úhlové přesnosti</i>	20
<i>Obr. 13 Deska s barevnými čtverci</i>	21
<i>Obr. 14 Schéma měření – určení součtové konstanty</i>	22
<i>Obr. 15 Sestava – součtová konstanta</i>	22
<i>Obr. 16 Ukázka přenosu dat-BLK360</i>	23
<i>Obr. 17 Rozpoznání černobílého cíle</i>	24
<i>Obr. 18 Manuální střed</i>	25
<i>Obr. 19 Úprava souřadnic</i>	25
<i>Obr. 20 Nastavení parametrů koule</i>	26
<i>Obr. 21 Informace o kouli</i>	26
<i>Obr. 22 Schéma měření délkové přesnosti</i>	27
<i>Obr. 23 Mračno bodů – deska</i>	29
<i>Obr. 24 Ukázka prokládání čtverců rovinou</i>	30
<i>Obr. 25 Barevné čtverce proložené rovinami</i>	30

8. Seznam tabulek

<i>Tab. 1</i> Technické parametry BLK360	10
<i>Tab. 2</i> Technické parametry RTC360	13
<i>Tab. 3</i> Technické parametry P40	14
<i>Tab. 4</i> Nastavené rozlišení skenování	19
<i>Tab. 5</i> Výsledky ověření délek – BLK 360.....	32
<i>Tab. 6</i> Směrodatné odchytky měření délek – BLK 360	33
<i>Tab. 7</i> Výsledky ověření délek – RTC 360.....	33
<i>Tab. 8</i> Směrodatné odchytky měření délek – RTC 360	34
<i>Tab. 9</i> Výsledky ověření délek – P40.....	34
<i>Tab. 10</i> Směrodatné odchytky měření délek – P40	35
<i>Tab. 11</i> Výsledky úhlové přesnosti – BLK 360.....	38
<i>Tab. 12</i> Směrodatná odchytky úhlové přesnosti – BLK 360	38
<i>Tab. 13</i> Výsledky úhlové přesnosti – RTC 360.....	39
<i>Tab. 14</i> Směrodatné odchytky – RTC 360	39
<i>Tab. 15</i> Výsledky úhlové přesnosti – P40.....	40
<i>Tab. 16</i> Směrodatné odchytky – P40	40
<i>Tab. 17</i> Výsledky určování šumu - BLK 360	42
<i>Tab. 18</i> Výsledky určování šumu - RTC 360	43
<i>Tab. 19</i> Výsledky určování šumu - P40	44
<i>Tab. 20</i> Výsledky určení součtové konstanty	46

9. Seznam grafů

<i>Graf 1</i> Rozdíly délek (malá koule).....	36
<i>Graf 2</i> Rozdíly délek (velká koule)	36
<i>Graf 3</i> Rozdíly délek (terč)	37
<i>Graf 4</i> Úhlová přesnost	41

10. Seznam použitých zdrojů

[1] ČSN ISO 17123: Optika a optické přístroje - Terénní postupy pro zkoušení geodetických a měřických přístrojů. Praha: ÚNZM, 2009.

[2] ČSN ISO 8322-1 – Geometrická přesnost ve výstavbě. Určování přesnosti měřících přístrojů. Část 1: Teorie

[3] ISO 17123-9 - Optics and optical instruments. Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Part 9: Terrestrial laser scanners

[4] ŠTRONER M., POSPÍŠIL J., KOSKA B., KŘEMEN T., URBAN R., SMÍTKA V., TRÁSÁK P., 3D skenovací systémy. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2013.

[5] KOSKA, Bronislav. Algoritmus určování rovnice roviny pro laserové skenování. Stavební onzor. 2003, 12(10), 309-313. ISSN 1210-4027.

[6] HOLÍKOVÁ, Lucie. Ověření přesnosti 3D laserových skenerů Trimble TX8 a FARO Focus 3D X130. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Křemen, Ph.D.

[7] Švejda, Jan. Testování vlastností 3D skenerů Leica ScanStation P40 a BLK360. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

[8] Gefos Leica BLK360 [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/3d-laserove-skenovani/3d-laserove-skenery/blk360>

[9] Gefos Leica RTC360 [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/3d-laserove-skenovani/3d-laserove-skenery/rtc360>

[10] Gefos LeicaScan Station P30/40/50 [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/3d-laserove-skenovani/3d-laserove-skenery/scanstation-p30-40-50>

11. Seznam příloh

A. Určování velikosti šumu – BLK 360	52
B. Určování velikosti šumu – RTC 360	54
C. Určování velikosti šumu – P40	56

12. Přílohy na DVD

- 1) Tabulky u délkové přesnosti – delkova_presnost.xls
- 2) Tabulka vypočítaných délek u testování úhlové přesnosti – uhlova_presnost.xls
- 3) Vypočítané délky u součtové konstanty – souctova_konstanta.xls

13. Přílohy

A. Určování velikosti šumu – BLK 360

1 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	19911	0,0010	-0,0010	23993	0,0010	0,0000
šedá	25881	0,0027	0,0003	18020	0,0030	0,0010
černá	16985	0,0050	0,0110			
oranžová	24596	0,0010	0,0017	7876	0,0010	0,0020
modrá	22206	0,0020	-0,0040	15830	0,0017	-0,0033
červená	24339	0,0010	-0,0007	11110	0,0010	-0,0003
zelená	20670	0,0027	-0,0037	7584	0,0020	-0,0030
žlutá	18552	0,0010	-0,0010	13370	0,0010	0,0000
fialová	19787	0,0010	-0,0003	9755	0,0010	0,0007
hnědá	17409	0,0020	0,0007	6689	0,0020	-0,0003

10 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	1151	0,0010	0,0000	1088	0,0010	-0,0003
šedá	1402	0,0010	0,0003	1005	0,0020	-0,0010
černá	1389	0,0010	0,0000			
oranžová	1273	0,0010	0,0010	914	0,0010	0,0010
modrá	1432	0,0010	-0,0020	1009	0,0010	-0,0023
červená	1403	0,0010	-0,0010	963	0,0010	0,0000
zelená	1436	0,0010	0,0000	944	0,0020	-0,0030
žlutá	1388	0,0010	-0,0003	1008	0,0010	0,0000
fialová	1410	0,0010	0,0000	977	0,0010	0,0000
hnědá	1404	0,0010	0,0017	911	0,0020	0,0003

25 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	210	0,0010	-0,0007	176	0,0020	0,0000
šedá	225	0,0020	-0,0023	152	0,0057	0,0030
černá	231	0,0010	-0,0007			
oranžová	218	0,0010	-0,0003	167	0,0023	0,0007
modrá	230	0,0010	-0,0017	162	0,0043	-0,0017
červená	230	0,0010	-0,0010	174	0,0030	-0,0007
zelená	231	0,0020	0,0000	165	0,0047	-0,0020
žlutá	236	0,0010	-0,0017	174	0,0027	-0,0007
fialová	226	0,0010	-0,0013	173	0,0027	-0,0007
hnědá	238	0,0013	-0,0003	163	0,0043	0,0013

50 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	59	0,0017	0,0007	36	0,0057	-0,0017
šedá	62	0,0033	0,0013			
černá	58	0,0030	-0,0003			
oranžová	53	0,0020	0,0010	34	0,0057	0,0003
modrá	55	0,0030	-0,0013			
červená	59	0,0030	-0,0017	28	0,0053	0,0017
zelená	49	0,0027	0,0010			
žlutá	67	0,0020	-0,0020	34	0,0057	0,0017
fialová	63	0,0020	-0,0013	33	0,0053	0,0027
hnědá	59	0,0040	0,0023			

B. Určování velikosti šumu – RTC 360

1 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	3990	0,0000	0,0000	4487	0,0000	0,0000
šedá	4184	0,0000	-0,0010	4430	0,0000	-0,0010
černá	4436	0,0010	-0,0030	4596	0,0010	-0,0010
oranžová	7725	0,0000	0,0000	3799	0,0000	0,0000
modrá	4048	0,0000	-0,0010	4289	0,0000	-0,0010
červená	4122	0,0000	-0,0010	4026	0,0000	-0,0010
zelená	6312	0,0000	-0,0003	3698	0,0000	0,0000
žlutá	3835	0,0000	-0,0010	3991	0,0000	-0,0010
fialová	4008	0,0000	-0,0010	3624	0,0000	0,0000
hnědá	6014	0,0000	0,0000	3624	0,0000	0,0000

10 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	918	0,0000	0,0000	791	0,0000	0,0000
šedá	964	0,0000	-0,0010	799	0,0000	0,0000
černá	957	0,0000	-0,0003	727	0,0013	0,0000
oranžová	941	0,0000	0,0000	719	0,0000	0,0000
modrá	973	0,0000	-0,0010	794	0,0000	-0,0010
červená	942	0,0000	-0,0010	729	0,0000	-0,0010
zelená	920	0,0000	0,0000	709	0,0000	0,0000
žlutá	916	0,0000	-0,0010	776	0,0000	-0,0010
fialová	948	0,0000	-0,0007	721	0,0000	0,0000
hnědá	973	0,0000	0,0000	711	0,0000	0,0003

25 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylna [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylna [m]	Vzdálenost [m]
bílá	165	0,0010	0,0000	122	0,0010	0,0000
šedá	165	0,0010	0,0000	108	0,0010	-0,0010
černá	156	0,0010	0,0000			
oranžová	156	0,0010	0,0000	113	0,0010	0,0000
modrá	165	0,0010	-0,0010	120	0,0010	-0,0010
červená	158	0,0010	-0,0010	106	0,0010	-0,0010
zelená	160	0,0010	0,0000	114	0,0010	-0,0003
žlutá	148	0,0010	-0,0007	108	0,0010	-0,0010
fialová	144	0,0010	-0,0010	104	0,0010	-0,0007
hnědá	157	0,0010	0,0000	108	0,0010	-0,0003

50 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylna [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylna [m]	Vzdálenost [m]
bílá	36	0,0010	0,0003	26	0,0010	0,0000
šedá	36	0,0007	-0,0003	26	0,0020	-0,0007
černá	34	0,0007	-0,0003			
oranžová	36	0,0010	0,0000	26	0,0010	-0,0007
modrá	36	0,0010	-0,0010	26	0,0010	-0,0013
červená	36	0,0003	-0,0010	24	0,0013	-0,0023
zelená	36	0,0010	0,0000	24	0,0010	-0,0020
žlutá	38	0,0010	-0,0007	24	0,0010	-0,0017
fialová	36	0,0010	-0,0010	24	0,0010	-0,0023
hnědá	36	0,0003	0,0000	24	0,0013	-0,0027

75 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylna [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylna [m]	Vzdálenost [m]
bílá	16	0,0010	0,0010	9	0,0020	0,0010
šedá	16	0,0010	0,0003			
černá	16	0,0010	0,0010			
oranžová	16	0,0010	0,0013	10	0,0030	-0,0087
modrá	16	0,0010	-0,0017	9	0,0020	-0,0027
červená	16	0,0010	-0,0010	9	0,0027	-0,0043
zelená	16	0,0010	0,0000	9	0,0020	-0,0043
žlutá	16	0,0010	0,0000	9	0,0023	-0,0013
fialová	16	0,0010	-0,0010	9	0,0027	-0,0030
hnědá	16	0,0010	0,0003			

100 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	9	0,0003	0,0007			
šedá	9	0,0010	0,0003			
černá	9	0,0010	-0,0013			
oranžová	9	0,0003	0,0013			
modrá	9	0,0010	0,0000			
červená	9	0,0000	-0,0003			
zelená	9	0,0010	0,0003			
žlutá	12	0,0010	0,0003			
fialová	12	0,0010	0,0010			
hnědá	12	0,0017	0,0017			

C. Určování velikosti šumu – P40

10 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	1011	0,0000	0,0000	726	0,0000	0,0000
šedá	984	0,0000	0,0000	683	0,0000	0,0000
černá	930	0,0000	0,0000	634	0,0040	0,0003
oranžová	949	0,0000	0,0010	647	0,0000	0,0010
modrá	1002	0,0000	-0,0010	695	0,0000	-0,0010
červená	961	0,0000	-0,0010	649	0,0000	-0,0010
zelená	955	0,0000	0,0000	582	0,0000	0,0000
žlutá	949	0,0000	-0,0010	676	0,0000	-0,0010
fialová	940	0,0000	-0,0007	615	0,0000	0,0000
hnědá	940	0,0000	0,0010	586	0,0000	0,0010

25 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	144	0,0000	0,0000	103	0,0000	0,0000
šedá	144	0,0000	-0,0007	96	0,0010	0,0000
černá	144	0,0000	0,0000	83	0,0037	-0,0017
oranžová	144	0,0000	0,0010	109	0,0000	0,0003
modrá	144	0,0000	-0,0010	99	0,0000	-0,0010
červená	144	0,0000	-0,0010	111	0,0000	-0,0010
zelená	144	0,0000	0,0000	96	0,0000	0,0000
žlutá	148	0,0000	-0,0010	96	0,0000	-0,0010
fialová	148	0,0000	-0,0010	96	0,0000	-0,0010
hnědá	152	0,0000	0,0010	96	0,0010	0,0000

50 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	44	0,0000	0,0000	30	0,0010	0,0003
šedá	44	0,0000	-0,0010	24	0,0030	-0,0003
černá	44	0,0000	-0,0010			
oranžová	44	0,0007	0,0007	24	0,0007	0,0000
modrá	47	0,0000	-0,0010	24	0,0010	-0,0017
červená	44	0,0000	-0,0010	24	0,0010	-0,0017
zelená	47	0,0007	0,0000	24	0,0010	-0,0003
žlutá	47	0,0003	-0,0003	24	0,0007	-0,0010
fialová	49	0,0003	0,0000	24	0,0010	-0,0013
hnědá	49	0,0003	0,0010	24	0,0023	0,0010

75 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	16	0,0010	0,0003	8	0,0007	0,0007
šedá	16	0,0007	-0,0003	7	0,0037	-0,0013
černá	16	0,0000	0,0000			
oranžová	16	0,0003	0,001	8	0,0007	-0,0030
modrá	16	0,0010	-0,001	8	0,0007	-0,0010
červená	16	0,0000	-0,001	8	0,0010	-0,0037
zelená	16	0,0010	0,0000	8	0,0007	-0,0030
žlutá	16	0,0007	-0,001	8	0,0003	-0,0007
fialová	16	0,0000	-0,001	8	0,0007	-0,0033
hnědá	16	0,0000	0,0003	8	0,0043	-0,0043

100 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	9	0,0000	0,0000	6	0,0007	-0,0023
šedá	9	0,0010	-0,0007			
černá	9	0,0000	-0,0003			
oranžová	9	0,0003	0,0010	6	0,0020	-0,0030
modrá	9	0,0003	-0,0010	6	0,0013	-0,0027
červená	9	0,0000	-0,0010	6	0,0010	-0,0030
zelená	9	0,0003	0,0003	6	0,0013	-0,0040
žlutá	9	0,0000	-0,0007	6	0,0017	0,0010
fialová	9	0,0000	-0,0003	6	0,0013	0,0007
hnědá	9	0,0003	0,0013	6	0,0013	-0,0070

125 m	Kolmo			Natočení 45°		
	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]	Počet bodů	Směrodatná odchylka [m]	Vzdálenost [m]
bílá	83	0,0010	0,0000	61	0,0013	-0,0003
šedá	65	0,0020	0,0000			
černá	81	0,0010	-0,0007			
oranžová	81	0,0010	0,0003	68	0,0020	0,0007
modrá	100	0,0000	-0,0010	72	0,0010	-0,0010
červená	93	0,0000	-0,0010	79	0,0020	-0,0003
zelená	84	0,0003	0,0000	72	0,0020	0,0003
žlutá	107	0,0000	-0,0007	73	0,0017	0,0010
fialová	107	0,0003	-0,0003	77	0,0020	0,0010
hnědá	100	0,0010	0,0007			