



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra speciální geodézie**

Zvyšování přesnosti dat 3D skenování pro geodetický monitoring

**Raising the Accuracy of the 3D Scanning Data for Geodetic
Monitoring**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Petr Jašek

Doktorský studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

Školitel: prof. Ing. Jiří Pospíšil, CSc

Praha, 2018



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Petr Jašek

Název disertační práce: Zvyšování přesnosti dat 3D skenování pro geodetický monitoring.

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Jiří Pospíšil, CSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

SGS12/051/OHK1/1T/11 „Optimalizace získávání a zpracování 3D dat pro potřeby inženýrské geodézie“.

SGS13/059/OHK1/1T/11 „Optimalizace získávání a zpracování 3D dat pro potřeby inženýrské geodézie“.

SGS14/059/OHK1/1T/11 „Optimalizace získávání a zpracování 3D dat pro potřeby inženýrské geodézie“.

SGS15/059/OHK1/1T/11 „Optimalizace získávání a zpracování 3D dat pro potřeby inženýrské geodézie“.

SGS16/059/OHK1/1T/11 „Optimalizace získávání a zpracování 3D dat pro potřeby inženýrské geodézie“.

SGS17/059/OHK1/1T/11 „Optimalizace získávání a zpracování 3D dat pro potřeby inženýrské geodézie“.

V Praze dne 23.1.2018

.....
podpis

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé disertační práce panu prof. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, CSc., školiteli specialistovi Ing. Tomáši Křemenovi, Ph.D. a vedoucímu katedry speciální geodézie prof. Ing. Martinovi Štronerovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním této disertační práce.

Rovněž bych chtěl poděkovat celé své rodině, přítelkyni a nejbližším přátelům za podporu po celou dobu mého studia. Velký dík, také patří všem zaměstnancům Katedry speciální geodézie.

ABSTRAKT

Disertační práce je souborem dílčích témat směřujících k určení a zvýšení přesnosti dat laserového skenování a k určení rozlišovací schopností jednotlivých systémů. Dva projekty jsou věnovány způsobu určení rozlišovací schopnosti, a to na bázi testování fotografických objektivů a testováním na 3D obrazech. Jedna z kapitol je věnována praktickému využití terestrického laserového skeneru v oblasti geodetického monitoringu s milimetrovou až submilimetrovou přesností. Jsou navrženy postupy, principy zpracování a možnosti zpřesnění délkového měření. Největší část je věnována srovnání úspěšnosti a účinnosti metod redukce šumu v datech laserového skenování, a to jak komerčními způsoby, tak způsoby publikovanými v rámci výzkumu na Katedře speciální geodézie. Součástí této oblasti je také posouzení přínosu vlnkové transformace v oblasti redukce šumu dat v terestrickém laserovém skenování. V poslední kapitole je pak popsána rychle se rozvíjející možnost leteckého snímání metodami RPAS a následného výpočtu obrazového skenování a následné redukce šumu v takto získaném mračnu.

ABSTRACT

The dissertation is a set of partial topics aimed at determining and increasing the accuracy of laser scanning data and determining the resolving capabilities of individual measuring systems. Two projects are devoted to a way of identifying resolving capabilities based on testing photographic lenses and testing on 3D images. One of the chapters is focused on the practical use of a terrestrial laser scanner in the field of geodetic monitoring with millimeter up to submillimeter accuracy. Procedures, principles of processing and possibilities of refinement of length measurements are proposed in this thesis. The largest part is dedicated to the comparison of the success and effectiveness of methods of noise reduction in laser scanning data, both by commercial methods and by methods published in the Department of Special Geodesy. Part of this area is also an assessment of the contribution of wavelet transform in the area of noise reduction in terrestrial laser scanning. The last chapter describes the rapidly evolving possibility of aerial photography using RPAS methods and subsequent calculation of image scanning and subsequent reduction of noise in the cloud thus obtained.

SEZNAM ZKRATEK

CTF – Contrast transfer function – funkce přenosu kontrastu

DWT – Discrete wavelet transform – diskrétní vlnková transformace

EIFOV – effective instantaneous field of view – efektivní okamžité zorné pole

EKG – elektrokardiograf

GNSS – global navigation satellite systems

IBMR – image building modeling and rendering

MNČ – metoda nejmenších čtverců

RPAS – remotely piloted aircraft systém – vzdáleně řízené letecké systémy

SSÚD - středisko správy a údržby dálnic

TLS – terestrický laserový skener

UAV – Unmanned Aerial Vehicle – bezpilotní letadlo

ÚCL – úřad pro civilní letectví

OBSAH

ABSTRAKT	4
ABSTRACT	4
SEZNAM ZKRATEK	5
OBSAH	6
1 ÚVOD	10
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
3 TEORETICKÉ ZÁKLADY	12
3.1 Skenovací systémy	13
3.1.1 Dělení a typy skenovacích systémů	13
3.1.2 Základní součásti skenovacích systémů	16
3.2 Vlivy působící na přesnost skenovacích systému.....	24
3.2.1 Vnitřní vlivy	24
3.2.2 Vnější vlivy	26
3.3 Základní měření a zpracování.....	28
3.3.1 Signalizace a zaměření vřícovacích bodů.....	28
3.3.2 Měření	29
3.3.3 Vstupní úprava mračen.....	30
3.3.4 Registrace mračen	30
3.3.5 Zpracování měření.....	31
4 SOUČASNÝ STAV.....	33
4.1 Určení rozlišovací schopnosti TLS.....	33
4.2 Odstranění délkového šumu z dat TLS.....	34
4.2.1 Opakované měření délky.....	34
4.2.2 Průměrování opakovaných skenů.....	34
4.2.3 Průměrování prostorových polárních souřadnic blízkých bodů.....	34
4.2.4 Průměrování délek blízkých bodů.....	35

4.2.5	Laser Scanner Super-resolution	35
4.2.6	Prokládání okolních dat polynomickými plochami nultého až čtvrtého řádu....	35
4.2.7	Využití konvolučního filtru.....	36
4.2.8	Non-local průměrování	36
4.2.9	Využití vlnkové transformace	36
4.2.10	Komerční software Geomagic Studio	37
4.3	Využití TLS v přesném geodetickém monitoringu	37
4.4	Využití digitální pozemní a letecké fotogrammetrie – obrazové skenování	38
4.4.1	Pozemní fotogrammetrie	38
4.4.2	Letecká fotogrammetrie	38
5	ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA.....	41
5.1	Použité přístroje a vybavení – charakteristiky přesnosti	41
5.1.1	Použité skenery a totální stanice	41
5.1.2	Další vybavení a přípravy	41
5.2	Určení rozlišovací schopnosti TLS na základě vyhodnocení intenzit.....	43
5.2.1	Použité vybavení a přístroj.....	43
5.2.2	Popis experimentu.....	43
5.2.3	Počtení vyhodnocení	46
5.2.4	Grafické vyhodnocení	49
5.2.5	Shrnutí a závěry.....	52
5.3	Využití TLS v přesném geodetickém monitoringu	53
5.3.1	Použité přístroje a vybavení	54
5.3.2	Modelace rozboru přesnosti vodorovného posunu bodů 1-4.	54
5.3.3	Kontrola stálosti sledovaných pilířů a vztažné sítě	55
5.3.4	Postup skenování.....	56
5.3.5	Zpracování naskenovaných mračen	57
5.3.6	Shrnutí a závěry.....	61

5.4	Využití vlnkové transformace (Wavelet transform) pro redukci šumu dat v TLS	61
5.4.1	Popis vlnkové transformace	62
5.4.2	Spojité vlnková transformace.....	62
5.4.3	Diskrétní vlnková transformace	62
5.4.4	Prahování.....	63
5.4.5	Mateřské vlnky	64
5.4.6	Volba použité vlnky	67
5.4.7	Příprava skenu před redukcí šumu	67
5.4.8	Testování přínosu na virtuálním skenu	68
5.4.9	Testování přínosu na skutečných skenech	73
5.4.10	Zhodnocení využití vlnkové transformace pro redukci dat v TLS.....	81
5.5	Úspěšnost metod redukce šumu v datech TLS v závislosti na skenované vzdálenosti a zvolené hustotě skenování.	82
5.5.1	Použité metody redukce šumu.....	83
5.5.2	Příprava a zhodnocení metod redukce šumu.....	83
5.5.3	Zhodnocení úspěšnosti redukce šumu dat.....	100
5.5.4	Závislost použité metody výpočtu prokládání	102
5.6	Určení absolutní rozlišovací schopnosti terestrických skenerů.....	108
5.6.1	Testovací přípravky.....	108
5.6.2	Postup vyhodnocení rozlišovací schopnosti.....	109
5.6.3	Rozlišovací schopnost Leica HDS3000 a Leica HDS3000 po redukcí šumu..	110
5.6.4	Rozlišovací schopnost Trimble TX5 a Surphaser 25HSX.....	111
5.6.5	Rozlišovací schopnost Leica Nova MS50 a Leica P20.....	112
5.6.6	Rozlišovací schopnost Leica P20 po redukcí šumu	113
5.6.7	Zhodnocení rozlišovací schopnosti	115
5.7	Využití mračna bodů získaného pomocí RPAS	116
5.7.1	Přehled komerčních řešení	116

5.7.2	Součásti systému Skywalker 2015/1830	117
5.7.3	Legislativní povinnosti	119
5.7.4	Letecké a výpočetní práce	119
5.7.5	Aplikace na nezpevněné povrchy	121
5.7.6	Aplikace na zpevněné povrchy	132
6	ZÁVĚR	136
7	BIBLIOGRAFIE	140
8	VLASTNÍ PUBLIKACE	144
9	PŘÍLOHY	146
9.1	Seznam obrázků	146
9.2	Seznam tabulek	150
9.3	Použité vybavení	152
9.3.1	Skenery	152
9.3.2	Totální stanice a multistanice	154
9.4	Tabulky odchylek na identických bodech sesuvného území Rabenov	156
9.4.1	Nálet č.1	156
9.4.2	Nálet č.2	157
9.5	Obsah příloženého CD	158

1 ÚVOD

Jedním z problémů přesnosti terestrického laserového skenování (TLS) je náhodný šum v měřené délce, která je bezpodmínečně nutná pro prostorové určení souřadnic [1]. Existují postupy pro potlačení šumu, které jsou založeny na měřickém postupu nebo početním vyhodnocení, ale každý z možných postupů má svá omezení. Jednou z možností redukce šumu měření délky je její následná filtrace v počítači. V rámci práce bylo testováno 16 postupů pro potlačení šumu. Jednou z možných metod filtrace je metoda vlnkové transformace – wavelet, kterou se zabývá samostatná kapitola této práce. Tato transformace se s výhodou používá pro odfiltrování vysokofrekvenčního šumu z dat elektrokardiografu – EKG [2]. Další významnou aplikací vlnkové transformace je „image denoising“ (odšumění obrazu). Vlastnost vlnkové transformace odstraňovat šum ve 2D obraze bude využita v případě redukce šumu dat TLS.

Dalším a neméně důležitým faktorem určujícím a omezujícím dosažitelnou přesnost TLS je jeho absolutní rozlišovací schopnost. V rámci práce jsou navrženy dvě testovací metody pro určení rozlišovací schopnosti. První navržená metoda testování rozlišovací schopnosti je založená na bázi testování fotografických objektivů s využitím speciálních přípravků. Pro druhou metodu byla vytvořena testovací deska se čtyřmi prostorovými přípravky pro určení absolutní rozlišovací schopnosti.

Další z částí výzkumu je navržení způsobu získání dat TLS s nižší přesností měření délky (4 mm) a aplikací postupů vedoucích ke zpřesnění získaných dat terestrického laserového skeneru pro využití v oblasti geodetického monitoringu. Cílem je navržení takových postupů, aby byl vliv náhodné nepřesnosti měřené délky (délkový šum) alespoň částečně eliminován.

Rychle rozvíjející možnosti pro geotechnický monitoring jsou metody obrazového skenování na základě leteckého snímkování (RPAS) a následném výpočtu mračna bodů pomocí obrazové korelace. Jedná se o moderní metodu digitální fotogrammetrie.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Práce je souborem více dílčích témat a její koncepce a zaměření směřuje k možnostem využití laserového skenování a mračna bodů vzniklého obrazovou korelací v geodetickém monitoringu. Hlavní náplní jsou následující témata:

- Určení reálné dosažitelné rozlišovací schopnosti terestrického laserového skeneru v daných podmínkách a při daném nastavení. Testování je provedeno jak na bázi testování fotografických objektivů na 2D obrazcích, tak na komplexní rozlišovací schopnosti na 3D obrazcích.
- Využití moderní vlnkové transformace v oblasti redukce šumu dat laserového skenování. Aplikace vlnkové transformace v běžné praxi a návrh výpočetního postupu a softwaru k její aplikaci.
- Využití terestrického laserového skeneru s dálkoměrem s nižší přesností pro speciální geodetické práce. Návrh postupu měření, filtrace dat, vyhodnocení a odhady směrodatných odchylek měřených posunů.
- Srovnání účinnosti metod redukce šumu v datech laserového skenování v závislosti na hustotě a vzdálenosti skenování a vliv metody výpočtu na úspěšnost redukce šumu v datech TLS.
- Porovnání přesnosti terestrického měření a mračna bodů vzniklého obrazovou korelací z leteckých snímků pořízených metodami RPAS.

3 TEORETICKÉ ZÁKLADY

Jelikož je problematika laserového skenování velice specifická, bude v následující kapitole uvedena základní terminologie, základní dělení a fungování terestrických laserových skenovacích systému podle [3].

3D skenovací systém – systém umožňující převést vybraný reálný objekt do podoby počítačového virtuálního modelu. Tento systém se skládá ze 3D skeneru, řídicí jednotky, programu pro řízení skenování, programu pro zpracování naměřených dat a příslušenství.

Hustota skenování – je dána vzájemným úhlovým rozestupem (krokem) mezi sousedními body ve vertikálním a horizontálním směru.

Modelování – vytváření prostorového modelu z mračna bodů

Mračno bodů – soubor zaměřených bodů ve 3D na povrchu skenovaného objektu. Jednotlivé body jsou měřeny neselektivně (nerepresentují jednotlivé charakteristické body či linie).

Obrazové skenování – je postup kdy mračno bodů vzniká metodou obrazové korelace z digitální letecké nebo pozemní fotogrammetrie.

Parametry skenování – jsou údaje, které je nutné před skenováním nastavit. Jedná se o velikost a polohu skenovaného prostoru, hustotu skenování, snímkování digitální kamerou, měření intenzity, atd.

Přesnost měření skeneru – je přesnost určení jednoho bodů na objektu.

Registrace (transformace) – proces transformace dat z jednotlivých stanovisek skeneru do jediného souřadnicového souřadnicového systému.

Rozlišení – charakterizuje, jaký nejmenší detail je možné získat ze zaměřeného mračna bodů

Rozlišovací schopnost – je minimální velikost detailu který jsme jednoznačně schopni ze skenu rozlišit při konkrétním nastavení skeneru. Rozlišovací schopnost je primárně ovlivněna nastavenou hustotou skenování, velikosti laserové stopy a velikosti náhodného šumu konkrétní skenovací aparatury.

Sken – mračno bodů získané z jedné pozice skeneru při jednom nastavení parametrů skenování a při jednom měření.

Skenování – soubor činností vedoucí k získání mračna bodů skenovacím systémem.

Šum – šumem se rozumí chybně nebo nechtěně změřené body.

Terestrický skenovací systém – statický nebo kinematický skenovací systém s nosičem pohybujícím se po zemi.

Trojúhelníková síť – soubor trojúhelníků, které jsou definovány třemi body umístěnými kdekoli v prostoru a pro tyto trojúhelníky jsou uchovány topologické vztahy.

Základnový skener – souřadnice jsou určovány na základě „protínání z úhlů“ ze základny.

3.1 Skenovací systémy

Základním společným rysem skenovacích systému je neselektivní, bezkontaktní určování prostorových souřadnic na měřeném objektu pro jeho následnou 3D modelaci a vizualizaci. Metoda laserového skenování umožňuje v relativně krátkém čase detailní zachycení složitých staveb, konstrukcí, interiérů a drobných předmětů.

3.1.1 Dělení a typy skenovacích systémů

Skenovací systémy lze obecně dělit podle velkého množství kritérií. Jedno ze základních kritérií je dělení podle pozice skeneru vůči zemskému povrchu [1].

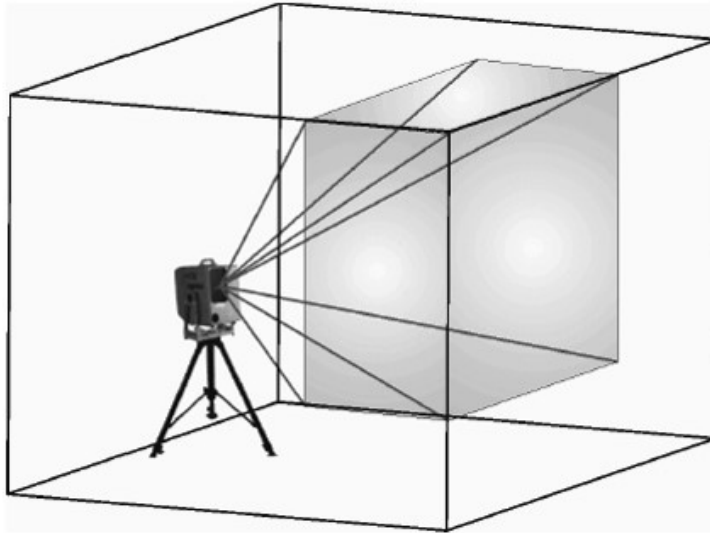
3.1.1.1 Statické systémy

Základní vlastností statických skenovacích systému je to, že během celého měření zůstává neměnná poloha a orientace v prostoru. V následujících kapitolách bude uvedeno jedno z možných dělení statických terestrických systému.

3.1.1.1.1 Tvar zorného pole

3.1.1.1.1.1 Kamerové

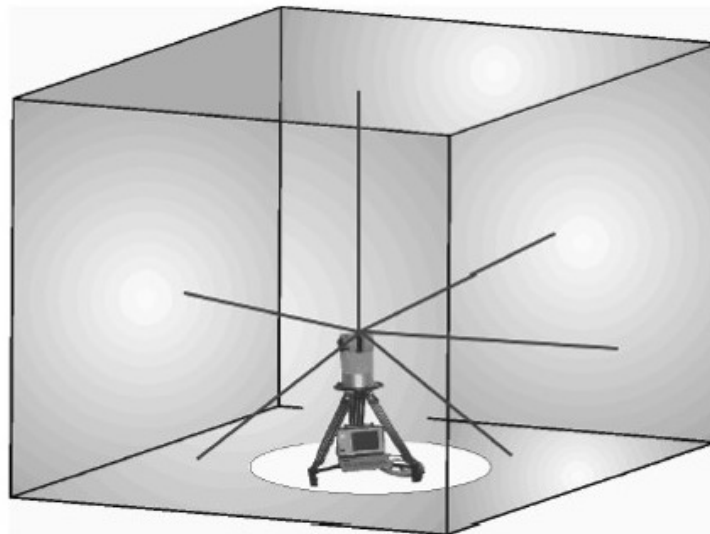
Rozmítání laserového svazku je činěno pomocí dvou zrcadel nebo optických hranolů. Tento systém umožňuje rozmítat svazek do relativně malého zorného pole (Obr. 3.1).



Obr. 3.1: Zorné pole kamerového skeneru [1].

3.1.1.1.2 Panoramatické

U tohoto druhu skeneru je pomocí servomotorů otáčeno celou dálkoměrnou součástí, což umožňuje pokrýt téměř celé okolí (Obr. 3.2).



Obr. 3.2: Zorné pole panoramatického skeneru [1].

3.1.1.1.3 Freestylové

Jedná se o ruční laserový skener umožňuje barevné laserové skenování. Prakticky se jedná o princip kinematického kamerového skeneru. Jde o princip měření, kdy uživatel drží FARO Freestyle v ruce a skenuje místa, na které skenerem ukáže (Obr. 3.3). Jedná se spíše o doplňkové skenování.

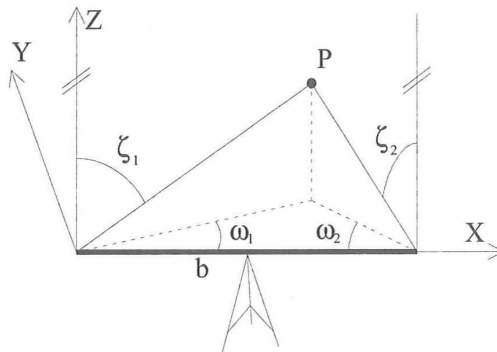


Obr. 3.3: FARO Freestyle skener [4].

3.1.1.1.2 Způsob určení prostorových souřadnic

3.1.1.1.2.1 Metoda prostorového protínání vpřed (Základnové skenery)

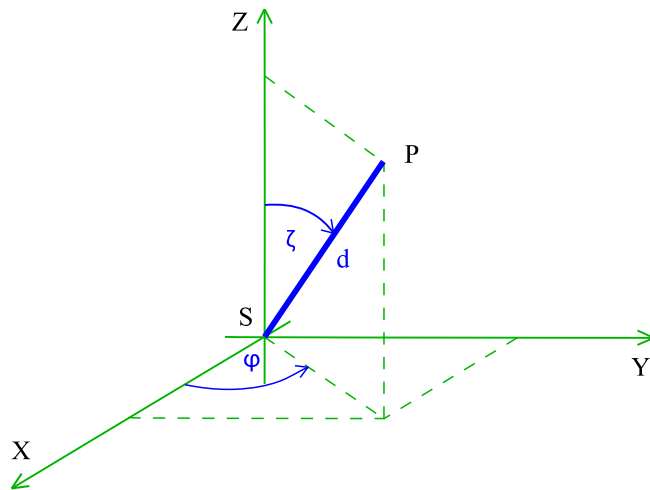
První metoda, která stála při rozvoji terestrických skenovacích systému. Je založená na určení horizontálních a vertikálních úhlů od základny o známe délce (Obr. 3.4).



Obr. 3.4: Schéma prostorového protínání [1].

3.1.1.1.2.2 Metoda prostorové polární metody (Polární skenery)

K určení prostorových souřadnic je potřeba znát horizontální a vertikální úhel natočení polohy zrcadla rozmítajícího laserový svazek (obecně se u skeneru dá říci, že stačí znát dva na sebe kolmé úhly) a délku průvodiče určenou buď pulsním nebo fázovým dálkoměrem synchronizovaně s probíhajícím odečtem horizontálního směru a vertikálního úhlu (Obr. 3.5).



Obr. 3.5: Schéma prostorové polární metody

3.1.1.2 Kinematické systémy

V současné době je již kinematické systémy běžnou metodou pro efektivní a rychlý sběr dat z rozsáhlého území. Každý kinematický systém se skládá z několika základních komponent: Laserový skener, INS/GNSS jednotka k určení pozice a orientace, řídicí počítač a kamery [3].

3.1.1.2.1 Terestrické kinematické systémy

Hlavními nosiči jsou osobní automobily (pick-up), železniční vozy, lodě, robotické vozíky a vozíky s ručním pohonem. Samostatnou částí kinematických skenerů jsou tzv. 2D skenery skenující v příčné rovině a samotný posun v podélné rovině obstarává prostředek na kterém je systém umístěn – loď, železniční vozidlo, atd.

3.1.1.2.2 Letecké kinematické systémy

Hlavními nosiči kinematických skenerů jsou letadla, vrtulníky a vzducholodě. Obvyklá výška snímání je mezi 200 – 1600 metrů nad skenovaným terénem. Dosažitelná přesnost je v řádu jednotek decimetrů.

3.1.2 Základní součásti skenovacích systémů

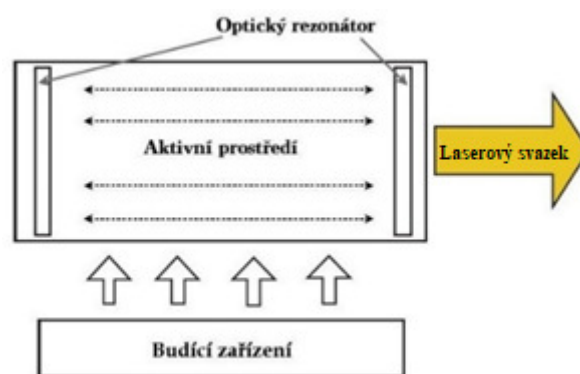
3.1.2.1 Zdroje záření

Jako zdroje záření se v oblasti laserového skenování nejčastěji využívá laseru a projektorů.

3.1.2.1.1 Lasery

Laser pochází z anglického výrazu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, tj. zesilování světla stimulovanou emisí záření [5]. Základní vlastností laserového světla je že je koherentní, monochromatické a ve formě úzkého svazku paprsků. Z fyzikálního hlediska je laser kvantově elektronický zesilovač elektromagnetického záření nejčastěji v oblasti viditelného světelného spektra a přilehlých vlnových délek.

Laser je tvořen třemi základními součástmi a to: zdroj energie, aktivní zesilovač a optický rezonátor (Obr. 3.6).



Obr. 3.6: Schéma principu laseru [6].

Lasery se nejčastěji dělí podle aktivního prostředí nebo vlnové délky emitovaného záření. Podle aktivního prostředí je možné lasery dělit na plynové, polovodičové, kapalinové a chemické. V současných skenovacích systémech jsou využívány lasery polovodičové a to z důvodu jejich kompaktnosti, možnosti přeladění v širokém spektrálním pásmu, malého rozměru, vysoké účinnosti, malé spotřebě elektrické energie a nízkou citlivostí na zacházení. Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost na teplotě aktivního polovodičového materiálu.

Polovodičové lasery (polovodičová dioda)

Fungování polovodičového laseru je založeno na stejném principu jako u ostatních laserů, a to na procesu stimulované emise. Aktivním prostředím je zde okolí P a N přechodu, kde dochází k injekci elektronů do děr. Na rozdíl od ostatních laserů zářivý přechod u polovodičových laserů neexistuje mezi diskrétními energetickými hladinami, ale mezi dovolenými energetickými pásy. Stejně jako u ostatních typů laserů i zde je třeba optického rezonátoru, kde dochází k zesílení světelného záření díky stimulované emisí. U laserových

diod plní roli zrcadel odštípnutí krystalu v krystalografických rovinách (v některých polovodičových laserech se z důvodu zvýšení kvality generovaného záření používá místo zrcadel hranol či difrakční mřížka). Polovodičové lasery využívané v oblasti geodézie pracují jak v neviditelné oblasti světelného spektra, tak ve viditelné oblasti světelného spektra např. 623 nm až 635 nm a 650 nm = červená, 532 nm = zelená.

3.1.2.1.2 Projektory

Ve skenovacích systémech je možno použít pro dokumentaci malých předmětů virtuálních značek. Tyto virtuální značky mohou být vytvořeny běžnými dataprojektory. U těchto projektorů je použita jako zdroj záření běžná 100 – 200 W výbojka. Většina těchto projektorů je vybavena korekcí lichoběžníkového zkreslení.

3.1.2.2 CCD snímače

Použití CCD snímačů je jak u skenerů základnových, kde je snímána stopa laserového svazku, tak u skenerů polárních, kde pomocí zachycené fotografie získáváme barevnou informaci o měřeném objektu. Jedná se tedy o elektronickou součástku sloužící k digitálnímu snímání obrazů. Název vychází z anglického výrazu **C**harge-**C**oupled **D**evice (zařízení s vázanými naboji). CCD využívá fyzikálního jevu zvaného jako fotoefekt, tj. fyzikální jev, při kterém jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření. Emitované elektrony jsou označovány jako fotoelektrony [7].

Činnost CCD se skládá ze 3 fází:

1. Příprava CCD

Dochází ke kompletnímu smazání zbytku předchozího obrazu.

2. Expozice obrazu

Na elektrody se přivede kladné napětí a na CCD se nechá působit světlo.

3. Snímání obrazu

Probíhá odečet počtu nachytaných elektronů a zápis obrazu.

3.1.2.3 Dálkoměry

Měření délky je jednou z nejdůležitějších součástí skenovacích systémů a je založeno na elektronickém určení délky nebo optoelektronickém určení. Všechny elektronické

dálkoměry jsou založeny na vyslání elektromagnetického vlnění a zpětnému odrazu zpět do přijímače umístěného na počátku měřené délky.

3.1.2.3.1 Impulsní určování délky

V momentální době nejrozšířenější způsob určování délky ve skenovacích systémech. Impulsní určování délky je založeno na měření tranzitního času. Vysílač vyšle impuls na odrazný systém v té chvíli začne měření tranzitního času, které se ukončí přijmutím impulsu do přijímače (Obr. 3.7). Největším problémem tohoto druhu dálkoměru je přesné určení tranzitního času. Největší výhodou je velký dosah. Přesnosti určení času 0,1 ns odpovídá přesnost určení délky 15 mm. Základní rovnice pro určení vzdálenosti je [8]:

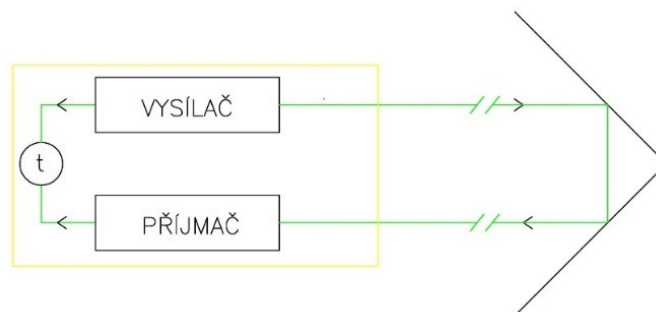
$$d = \frac{c(t_R - t_E)}{2} \quad (3.1)$$

Kde: d ...měřená vzdálenost

c ...rychlost světla v daném prostředí šíření

t_E ...čas vyslání pulsu

t_R ...čas přijetí pulsu



Obr. 3.7: Blokové schéma impulsního dálkoměru [8]

Existují 2 způsoby odečtu tranzitního času, a to časoměrná základna a pomocí časoměrných impulsů.

3.1.2.3.2 Fázové určování délky

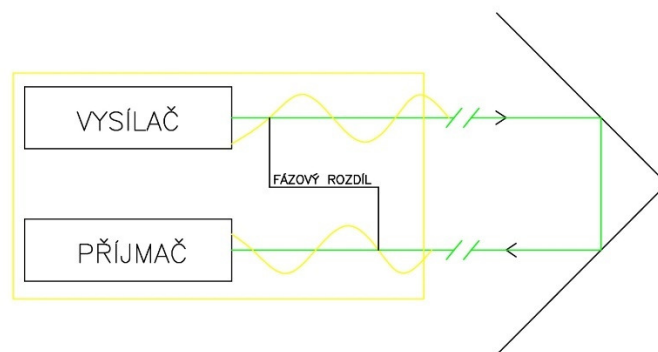
Fázový dálkoměr je založen na měření fázového rozdílu mezi vyslaným a přijatým signálem. Dálkoměr vyšle modulovanou vlnu o určité fázi a vrátí se vlna o jiné fázi. Z takto určeného rozdílu se pak určí měřená délka. Z tohoto vyplývá, že fáze vlny musí být delší než

měřená délka (Obr. 3.8). Běžné dálkoměry používají více různých délek modulovaných vln, z důvodu přesnosti určení fázového doměrku. Rychlost šíření elektromagnetických vln závisí na indexu lomu daného prostředí. Index lomu nejvíce ovlivňuje teplota, tlak, vlhkost a chemické složení prostředí. Fázové dálkoměry jsou používány u přístrojů určených pro přesné práce.

$$d = m \cdot U + \frac{\Delta\Phi}{2 \cdot \pi} \cdot U \quad (3.2)$$

$$U = \frac{\lambda}{2} \quad (3.3)$$

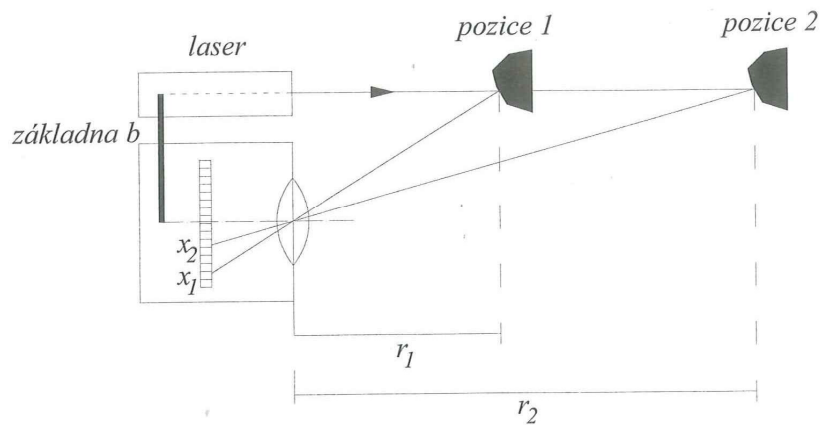
Kde: d vzdálenost mezi přístrojem a cílem,
 m celočíselný počet jednotkových délek na měřené vzdálenosti,
 U jednotková délka fázového dálkoměru,
 $\Delta\Phi$ měřená fáze vlny jednotkové délky v radiánech (fázový rozdíl),
 λ vlnová délka dálkoměru.



Obr. 3.8: Blokové schéma fázového dálkoměru [8].

3.1.2.3.3 Optoelektronické určení délky

Optoelektronické určování délky je založeno na výpočtech v obecném rovinném trojúhelníku, ve kterém je známa délka základny b a k ní jsou měřeny přilehlé úhly. Princip metody je názorně ukázán na (Obr. 3.9).



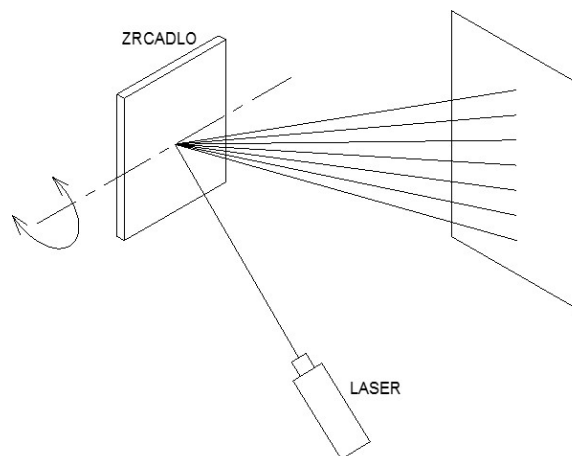
Obr. 3.9: Princip optoelektrického způsobu určení délek [1].

3.1.2.4 Zařízení k rozmítání svazku

Jedna z nejdůležitější konstrukční součástí laserových skenovacích systémů je způsob rozmítání laserového svazku na skenovaný objekt.

3.1.2.4.1 Rozmítání zrcadlem

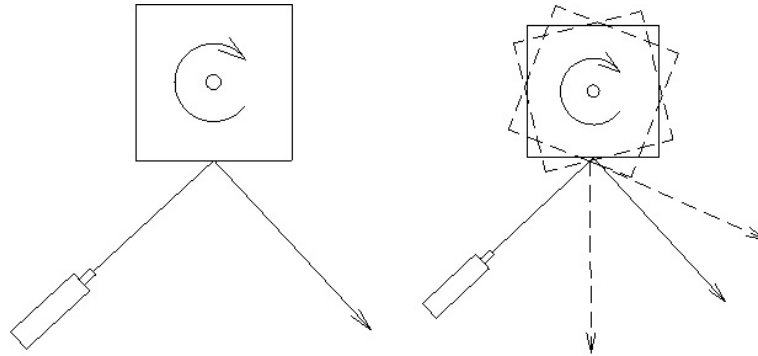
Jedná se o nejjednodušší možnost jak laserový svazek rozmítat. Takto je vytvořen svazek ležící v jedné rovině. Spojením dvou zrcadel dosáhneme vychýlení svazku ve dvou směrech (Obr. 3.10).



Obr. 3.10: Princip rozmítání svazku zrcadlem [1].

3.1.2.4.2 Optickým elementem (hranolem)

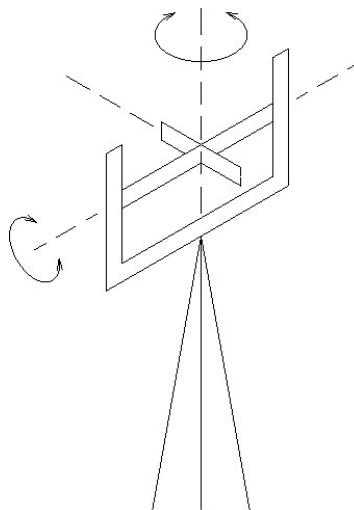
Rozmítání svazků paprsků je realizováno pomocí rotujícího optického elementu (pravidelného n -úhelníku) jehož normála procházející těžištěm je osou rotace (Obr. 3.11).



Obr. 3.11: Princip rozmítání optickým elementem [1].

3.1.2.4.3 Rotace zdroje záření

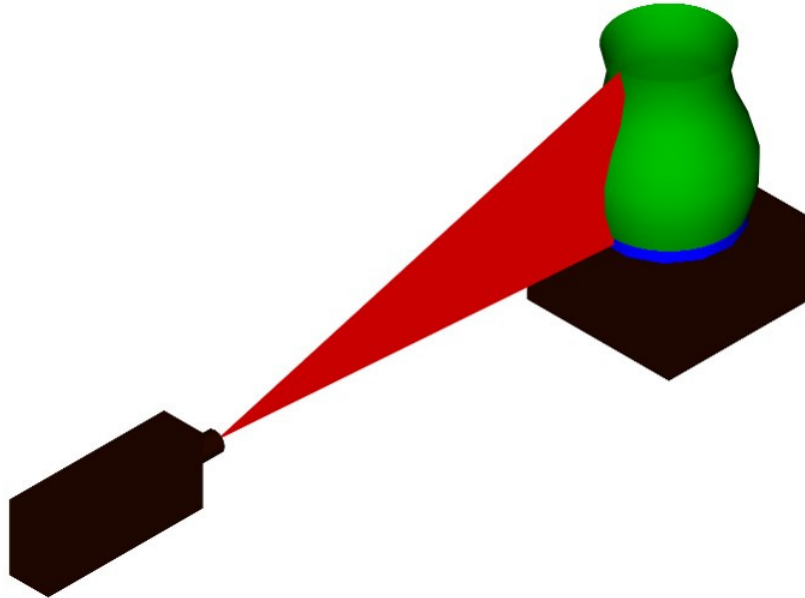
Tento způsob rozmítání svazků paprsků je v dnešní době využíván v rychle se rozvíjející oblasti skenovacích totálních stanic. Využívá systému vertikálních a horizontálních motorů a tím vychylování svazků paprsků ve dvou osách (Obr. 3.12).



Obr. 3.12: Princip rozmítání rotací zdroje záření [1].

3.1.2.4.4 Statickým optickým prvkem

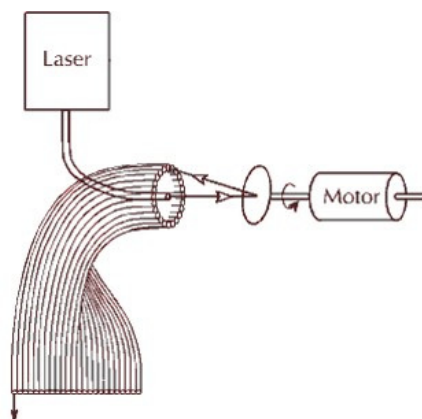
Tato možnost rozmítání laserového svazku vytváří výseč světelné roviny. Obraz této stopy je snímán např. CCD senzorem (Obr. 3.13).



Obr. 3.13: Princip rozmítání statickým optickým prvkem [1].

3.1.2.4.5 Pomocí optických vláken

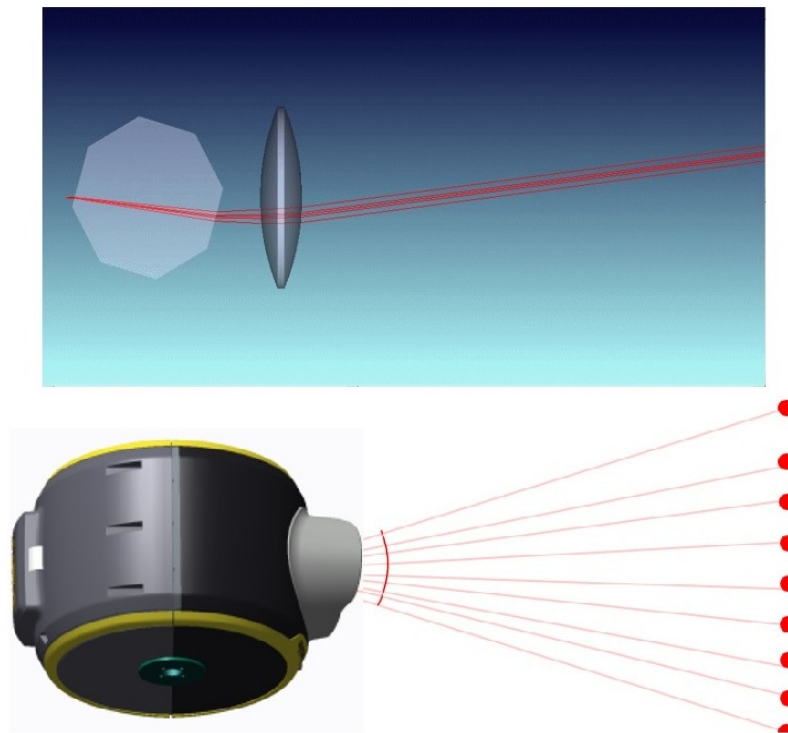
Rozmítání svazku je prováděno pomocí rotujícího zrcadla, které směřuje laserový svazek do vstupu optických vláken uspořádaných do kružnice, které jsou pak rozvinuty do roviny (Obr. 3.14).



Obr. 3.14: Princip rozmítání optickým vláknem [1].

3.1.2.4.6 Pomocí kombinace rotace zařízení a optického elementu

Tento systém je využíván u nové skenovací stanice Trimble CX10. Pro zrychlení skenování systém využívá mimo klasické rotace zařízení rozšíření svazku optickým elementem (Obr. 3.15).



Obr. 3.15: Rozšíření svazku paprsků u Trimble CX10 [4].

3.2 Vlivy působící na přesnost skenovacích systému

Skenovací systémy jsou technicky složité aparatury skládající se z velkého množství jednotlivých součástí. Každá z těchto součástí je však vyrobená s určitou přesností, a to přímo ovlivňuje kvalitu výsledného naskenovaného mračna. Dalším významným faktorem ovlivňujícím kvalitu výsledného mračna je samotný materiál, struktura a geometrický tvar skenovaného objektu. Z výše uvedených poznatků tedy můžeme faktory ovlivňující přesnost skenovaného mračna dělit na vnitřní a vnější [3].

3.2.1 Vnitřní vlivy

Hlavní metoda určování bodů je prostorová polární metoda, jejíž přesnost určení jednotlivého bodu závisí na přesnosti určení vodorovného a zenitového úhlů a přesnosti určení délky. Tyto chyby jsou popsány směrodatnými odchylkami. Dalšími vnitřními

chybami jsou systematické chyby vyplývající ze samotné konstrukce skeneru, jako jsou různé excentricity (např.: excentricita rozmítacího prvku). Tyto chyby mohou dosahovat poměrně významného vlivu na výsledné naskenované mračno. Dalšími systematickými chybami jsou systematické chyby měření délek a úhlů. Systematický charakter má také synchronizace času měření délek a úhlů. Tyto systematické chyby lze potlačit kalibrací systému nikoliv však měřícím postupem. Vliv chyb náhodné složky měření úhlů a délek lze vyjádřit chybovým rozložením určení souřadnic a polohy bodů.

Rovnice pro výpočet souřadnic:

$$x = d * \cos(\omega) * \sin(\zeta)$$

$$y = d * \sin(\omega) * \sin(\zeta)$$

$$z = d * \cos(\zeta) \tag{3.4}$$

Kde: d ...měřená délka

ω ... měřený vodorovný úhel

ζ ...měřený zenitový úhel

Další odvození platí pro souřadnicovou soustavu definovanou skenerem. Tato soustava může být obecně natočená a umístěná v prostoru.

Vztah pro skutečné chyby:

$$\varepsilon_x = \cos(\omega) * \sin(\zeta) * \varepsilon_d - d * \sin(\omega) * \sin(\zeta) * \varepsilon_\omega + d * \cos(\omega) * \cos(\zeta) * \varepsilon_\zeta$$

$$\varepsilon_y = \sin(\omega) * \sin(\zeta) * \varepsilon_d + d * \cos(\omega) * \sin(\zeta) * \varepsilon_\omega + d * \sin(\omega) * \cos(\zeta) * \varepsilon_\zeta$$

$$\varepsilon_z = \cos(\zeta) * \varepsilon_d - d * \sin(\zeta) * \varepsilon_\zeta \tag{3.5}$$

Podle zákona hromadění směrodatných a při znalosti směrodatných odchylek měřených veličin lze odvodit vzorce pro výpočet směrodatných odchylek souřadnic určovaného bodu.

$$\sigma_x^2 = \cos^2(\omega) * \sin^2(\zeta) * \sigma_d^2 + d^2 * \sin^2(\omega) * \sin^2(\zeta) * \sigma_\omega^2 + d^2 * \cos^2(\omega) * \cos^2(\zeta) * \sigma_\zeta^2$$

$$\sigma_y^2 = \sin^2(\omega) * \sin^2(\zeta) * \sigma_a^2 + d^2 * \cos^2(\omega) * \sin^2(\zeta) * \sigma_\omega^2 + d^2 * \sin^2(\omega) * \cos^2(\zeta) * \sigma_\zeta^2$$

$$\sigma_z^2 = \cos^2(\zeta) * \sigma_a^2 + d^2 * \sin^2(\zeta) * \sigma_\zeta^2 \quad (3.6)$$

Pro určení směrodatné odchylky v poloze bodu σ_p , je nutné určit rovnici pro skutečnou chybu polohy bodu ε_p .

$$\varepsilon_p = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2} \quad (3.7)$$

A dle zákona hromadění směrodatných odchylek lze odvodit rovnici polohové přesnosti měřeného bodu:

$$\sigma_p^2 = \sigma_a^2 + d^2 * \sin^2\zeta * \sigma_\omega^2 + d^2 * \sigma_\zeta^2 \quad (3.8)$$

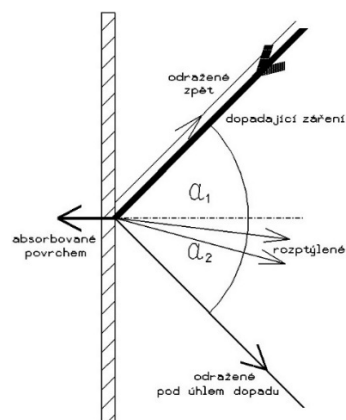
3.2.2 Vnější vlivy

3.2.2.1 Vliv prostředí na průchod svazku

Všechna geodetická terestrická měření jsou ovlivňována prostředím, kterým prochází. Důvodem tohoto ovlivnění jsou změny v přízemních vrstvách atmosféry a tím vzniklé změně indexu lomu prostředí kterým prochází paprsky elektromagnetického záření. Tím se prostředí stává nehomogéním a paprsky pak nejsou přímkami, ale obecnými prostorovými křivkami.

3.2.2.2 Vliv geometrie skenovaných objektů

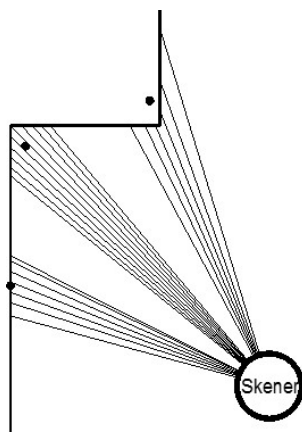
Skenovací systémy využívají pro měření délek elektromagnetické záření odrážející se přímo od skenovaného objektu. Část vyslaného signálu je odražena zpět, část absorbována, část rozptýlená a část odražena dle zákona úhlu dopadu a odrazu (Obr. 3.16).



Obr. 3.16: Dopad elektromagnetického záření na obecný povrch [1].

Výsledná měřená délka přímo závisí na intenzitě elektromagnetického záření odraženého zpět. Při zvyšujícím se úhlu dopadu záření klesá intenzita odraženého signálu, a to může mít za následek nezměření délky, nebo při vícenásobném odrazu chybné změření délky.

Další problematickou částí geometrie skenovaných objektů je měření ostrých hran a přechodů. Jak je uvedeno na (Obr. 3.17) může docházet ke značnému zkreslení měřené délky.



Obr. 3.17: Zkreslení vzdálenosti na ostré hraně [1]

Z obrázku je patrné, že dochází k rozdělení divergencí dálkoměrného svazku a každá jeho část dopadá na jinou část plochy, proto dochází ke zkreslení měřené délky.

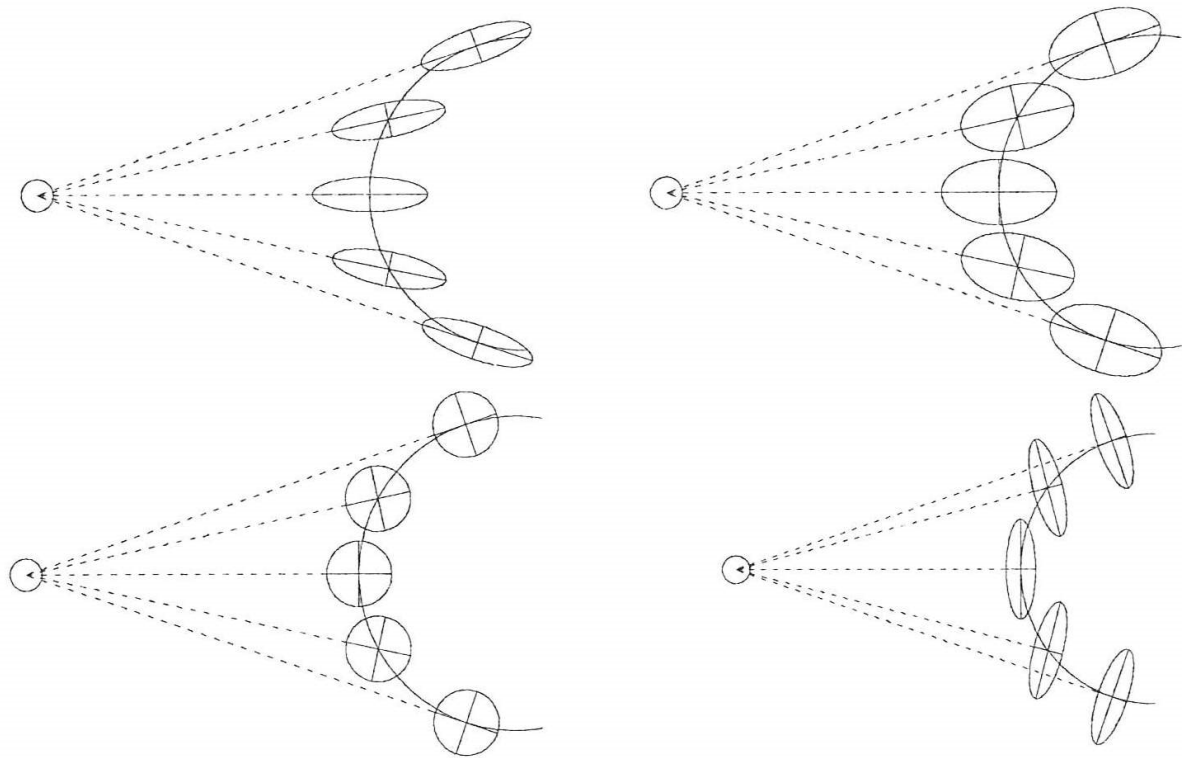
3.2.2.3 Vliv úhlu dopadu na přesnost měřené délky

Vliv úhlu dopadu elektromagnetického záření na skenovaný objekt byl zkoumán v práci vyhotovené na katedře Speciální geodézie, Fakulty stavební ČVUT v Praze. Závěr této práce je konstatování, že pro zkoumané přístroje a pro měřené vzdálenosti od 0 do 40 metrů se tento vliv neprokázal [9].

3.2.2.4 Systematické chyby při měření na objekty s nenulovou křivostí

V rámci grantového projektu GA ČR 103/06/0094 byly zkoumány neodůvodněné proměnné systematické odchylky proložení bodů náhradní plochou koule nebo válcem, a to jak v poloměru, tak i v poloze středu (osy). Uvedený jev má systematický charakter s proměnnou velikostí a je pravděpodobně z převážné části způsoben samotnou podstatou měření na objekty s nenulovou křivostí [10].

Z obrázku (Obr. 3.18) je patrné že měřený bod padne s větší pravděpodobností vně objektu než dovnitř. Z tohoto poznatku tedy vyplývá, že měřená plocha s nenulovou křivostí bude mít systematicky větší poloměr popřípadě osu rotace, nebo střed posunutý blíže k stanovisku měření.



Obr. 3.18: Elipsy chyb měření při měření na plochu s nenulovou křivostí [1]

3.3 Základní měření a zpracování

V následující podkapitole budou uvedeny základní činnosti a kroky potřebné k získání naskenovaného mračna bodů vhodného k dalšímu zpracování.

3.3.1 Signalizace a zaměření vlíčovacích bodů

První a významná činnost velmi ovlivňující výslednou přesnost výsledného měřeného mračna, je volba druhu a rozmístění vlíčovacích bodů (Obr. 3.19). Toto je důležité jak pro samotné propojení jednotlivých stanovisek skenování, tak pro pozdější transformaci celého mračna do referenčního systému. Zaměření vlíčovacích bodů je provedeno konvenčními geodetickými metodami.



Obr. 3.19: Ukázky vřicovacích bodů [4].

3.3.2 Měření

Jedná se o soubor postupů a kroků vedoucí k získání prostorových informací o měřeném objektu. Jedná se o prostorové 3D souřadnice, hodnotu intenzity odraženého signálu a barevnou informaci, která je převzata z pořízené fotografie. Digitální kamera může být součástí skenovacího systému nebo tento údaj může být doplněn při kancelářském zpracování z digitálních fotografií pořízených externě.

Samotný proces skenování zahrnuje především podrobné nastavení skenovacích parametrů. Toto nastavení může být prováděno přímo ve skenovacím systému, nebo v řídicím programu nainstalovaném na ovládacím notebooku nebo tabletu. Většina moderních terestrických systémů je ovládána přímo z přístroje bez nutnosti dalšího externího ovládacího zařízení.

Nastavovanými parametry jsou: výběr skenovací oblasti, hustota skenování, tj. vzdálenost sousedních bodů ve skenovaném mračku. Tuto hodnotu je možné nastavit přímo jako úhlový krok v horizontálním a vertikálním směru nebo jako délkovou hodnotu pro konkrétní vzdálenost. Dalšími doplňkovými parametry je nastavení délkového filtru minimální a maximální měřené vzdálenosti a dále možnost pořizování digitálních fotografií.

Samotný proces skenování pak probíhá automaticky bez zásahu operátora. Důležitou součástí je naskenování vřicovacích bodů, na které má většina skenovacích systémů specializovaný program. Po získání požadovaného mračku bodů na skenovaném objektu a po naskenování vřicovacích bodů jsou získaná data uložena na paměťové médium a poté přenesena do zpracovatelského počítače k dalšímu zpracování.

3.3.3 Vstupní úprava mračen

Surová data pořízena skenovacím systémem se pro podrobné zpracování musí nejdříve upravit. Tato úprava se skládá z následujících kroků. První krok je odstranění nepotřebných dat a chyb, jako jsou například zachycení chodci, body mezi skenerem a skenovaným objektem a chybné body vzniklé z vícenásobných odrazů. Dalším krokem je filtrace dat, kde jsou redukovány náhodné chyby měření.

3.3.4 Registrace mračen

Jedná se o proces prostorové transformace, při kterém dochází ke spojení jednotlivých skenovacích stanovisek do jednoho komplexního mračna a pozdější transformace do definovaného souřadnicového systému.

3.3.4.1 Registrace pomocí vlíčovacích bodů

První možností je transformace jednotlivých stanovisek do jednoho systému za použití vlíčovacích bodů. Tento způsob je nejpracnější, jelikož musíme dbát na to, abychom z každého stanoviska měli zaměřen dostatečný počet vlíčovacích. Vlícovací body jsou nezávisle zaměřeny např. totální stanicí. Výsledky registrace pomocí vlíčovacích bodů dosahují velice kvalitních výsledků.

3.3.4.2 Registrace pomocí překrytu

Jedná se o rychlý moderní postup spojování mračen z jednotlivých stanovisek. Výhodou použití registrace pomocí překrytů je nutnost minimálního počtu vlíčovacích bodů, které se používají jen pro transformaci do globálního systému. Nevýhodou je možná nižší přesnost registrace nebo případné úplné selhání. Pro určení transformačního klíče se používá metoda minimální vzdálenosti prvků v překrytových oblastech.

Pro výpočet transformačních rovnic se využívá algoritmu ICP (Iterative Closest Point), který pracuje se dvěma množinami bodů P a Q , kde P obsahuje body p_i pro $i = 1 \dots n_p$, a Q obsahuje body q_j pro $j = 1 \dots n_q$, přičemž body množiny P se budou transformovat na body množiny Q a jsou dány v souřadnicích x, y, z [11].

Princip algoritmu je takový, že pro každý bod z množiny P se nalezne nejbližší bod z množiny Q . Vypočítá se transformační klíč a provede se transformace. Pokud je hodnota

střední kvadratické vzdálenosti mezi bodem v množinách P a Q větší než zvolená hodnota ε , pokračuje se znovu v iteračním výpočtu. Tj. vypočítá se nový transformační klíč, provede se transformace a opětovně se porovná střední kvadratická vzdálenost s požadovanou hodnotou. Pro výpočet se používá Euklidovská vzdálenost:

$$d(p_i, q_j) = \sqrt{(x_{qj} - x_{pi})^2 + (y_{qj} - y_{pi})^2 + (z_{qj} - z_{pi})^2} \quad (3.9)$$

Jako nejbližší bod k bodu p_i se nalezne takový bod q_j , jehož vzdálenost je od všech bodů množiny Q minimální.

Střední kvadratická vzdálenost d_k je dána vzorcem, dvojice p_i a q_j značí dvojici bodů určených jako nejbližší [1].

$$d_k = \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} d(p_i, q_j)^2} \quad (3.10)$$

Algoritmus konverguje monotónně k lokálnímu minimu d_k , pro určení globálního minima d_k je nutno určit lokální minimum ze všech lokálních minim.

3.3.4.3 Mračna pořízené přímo v referenční soustavě

S rozvojem automatických a multifunkčních totálních stanic, nebo jejich různých mutací, odpadá problém post-processing registrace mračen do jednoho mračna a následně do globálního systému. Jelikož totální stanice umožňují přesné určení stanoviska skeneru a jeho orientace (volné stanoviska, známý bod s orientací, nucené centrace), získáváme pak mračna z jednotlivých stanovisek registrované dohromady a přímo v globálním systému.

3.3.5 Zpracování měření

Po přípravných pracích je získáno očištěné spojené mračno bodů. Pro některé aplikace již toto mračno bodů postačuje k předání. Ve většině případů však musí dojít ke speciálnímu vyhodnocení pro konkrétní účely měření daného objektu.

3.3.5.1 Aproximace objektu matematickými primitivy

Jedním z možných způsobů interpretace výsledků laserového skenování je prokládání mračna bodů jednoduchými geometrickými útvary. Tuto metodu je vhodné použít tehdy, je-li měřený objekt blízko nějakému geometrickému útvaru jako například rovina, válec, koule.

Výhodou takového zpracování je výrazná redukce počtu dat a při znalosti parametrů skenovaných objektů tyto parametry matematických primitiv přímo do modelu zavést (např. průměry potrubí při skenování průmyslových areálů). Dále pro modelování mohou být použity předem definované objekty. Vymodelované objekty jsou pak reprezentovány jen několika konstantami a matematickou rovnicí. Výsledkem takto provedeného zpracování je pak 3D model složený z geometricky definovaných těles. S tímto modelem je pak možno dále pracovat v CAD programech. Existují dvě možnosti prokládání těles.

- Algebraické prokládání: prokládání minimalizuje objem tělesa procházejícího daným bodem.
- Ortogonální prokládání: prokládání minimalizuje vzdálenost bodů od prokládaného tělesa.

3.3.5.2 Drátový model

Tato metoda vyhodnocení se často používá při tvorbě podkladů pro projekt. Hrany objektu jsou vyjádřeny liniemi, křivkami a kružnicovými oblouky. Tento druh výstupu je častý při zpracování zaměření fasád. Úskalím tohoto zpracování je problematická detekce hran objektu. Moderní zpracovatelské programy, např. 3DReshaper [12], však již nabízejí možnost automatické detekce hran a jejich editaci. Samotný drátový model je pak kreslícím programem, kde dochází k jeho začištění a dokreslení.

3.3.5.3 Trojúhelníkové síť

Tento druh zpracování se uplatní nejvíce na složitých a nepravidelných objektech, které není možné s dostatečnou přesností vyjádřit malým počtem geometrických primitiv. Základem této metody je využití trojúhelníkových plošek, které postupně mezi tři body zaplní celou plochu. Prvním krokem všech vyspělých metod je vytvoření trojúhelníkové sítě. Pro plošné objekty (výšková pole) jsou algoritmy založeny na splnění podmínky „Delaunayovy triangulace“. Principem je, aby výsledné trojúhelníky byly co nejbližší rovnostranným a v kružnici opsané jakémukoliv trojúhelníku nesmí ležet žádný další bod. Pro prostorové objekty je nutné použít vyspělé algoritmy konstrukce konvexní obálky ekvivalent Dealunovy triangulace, kde úlohu trojúhelníku přebírá čtyřstěn.

4 SOUČASNÝ STAV

V této kapitole jsou stručně shrnuty dosažitelné informace k řešené problematice.

4.1 Určení rozlišovací schopnosti TLS

Nejvýznamnějším článkem z problematiky určení rozlišovací schopnosti TLS je příspěvek Dr. Lichtiho [13]. Metoda Dr. Lichtiho byla založena na průchodu laserového svazku přes zavěs olovnice. V práci je kladen důraz na rozdíl mezi rozlišením a vzorkováním (zvolený rozestup bodů pro určitou vzdálenost). Možné zvýšení rozlišovací schopnosti pomocí tzv. korelovaného vzorkování (tzn. husté vzorkování), kdy stopa laserového svazku je větší než velikost nastaveného vzorkování. Pro určení rozlišovací schopnosti byl určen parametr EIFOV – effective instantaneous field of view (efektivní okamžité zorné pole). Parametr EIFOV je funkcí velikosti stopy na danou vzdálenost a velikosti vzorkování. Když je vzorkování o mnoho větší než stopa laserového svazku, je rozlišovací schopnost právě rovna parametru EIFOV. To je jediný stav, ve kterém interval vzorkování přesně reprezentuje rozlišení. Pokud je velikost vzorkování přibližně 55% šířky stopy laserového svazku je to jediný stav, kdy je rozlišovací schopností rovna právě velikost stopy laserového svazku.

Závěrem provedených experimentů je, že ne vždy je přínosem příliš převzorkovaný sken, když velikost stopy laserového svazku je mnoho násobně větší. Velká velikosti stopy laserového svazku a malé vzorkování může mít za následek zkreslení úhlové polohy objektu až o jednu polovinu velikosti stopy. Na výslednou rozlišovací schopnost má tedy stejně podstatný vliv velikost stopy laserového svazku stejně jako velikost vzorkování.

Další významnou prací v oblasti rozlišovací schopnosti je práce z univerzity v Boloni a Padově, kde kolektiv autorů Arianna Pesci, Giordano Teza a Elena Bonali publikoval práci na téma „Terrestrial Laser Scanner Resolution: Numerical Simulations and Experiments on Spatial Sampling Optimization“ [14]. V této práci se hlavně pojednává o efektivním využití velikosti vzorkování. Pro úvahy o vzorkování se vychází z Nyquistova-Shannonova teorému [15], kdy minimální zkoumaná velikost detailu by měla být 2x větší než krok vzorkování. V práci je detailně popsán postup výpočtu ideálního vzorkování pro danou vzdálenost, velikost detailu a velikost stopy laserového svazku. Jedním ze závěrů práce je myšlenka, že skenovací systém dokáže detekovat detail o velikosti přibližně 1/3 velikosti stopy laserového svazku. Tato myšlenka se potvrdila i v mnou provedeném experimentu popsáném dále.

4.2 Odstranění délkového šumu z dat TLS

Přesnost laserového skenování je závislá na mnoha faktorech. Nejvýznamnější roli však hraje velikost délkového šumu. Obecně lze říci, že šum má charakter náhodné chyby kolísající okolo střední hodnoty (polohy), o které předpokládáme, že odpovídá správné poloze bodu (posunutě o systematickou chybu měření délky) na povrchu měřeného objektu. Chceme-li zvýšit přesnost laserového skenování, musí být tento šum co nejvíce redukován. V následujících kapitolách budou uvedeny nejvýznamnější metody redukce šumu délek.

4.2.1 Opakované měření délky

Jedná se o nejjednodušší metodu odstranění délkového šumu již ve fázi pořízení skenu. Principem je několikanásobné měření délky. Výsledná délka, ze které jsou vypočítány souřadnice, je aritmetickým průměrem. Tuto redukci šumu používají například některé laserové skenovací systémy od firmy Trimble nebo Leica, např. Leica P20.

4.2.2 Průměrování opakovaných skenů

Tento způsob redukce šumu délky je založen na stejném principu jako výše zmíněný způsob opakovaného měření délky s tím rozdílem, že v tomto případě jsou délky průměrovány z opakovaných skenů. Algoritmus nejprve přepočte data z n skenů o obecně různém počtu bodů (některé body mohou chybět nebo být změřeny jinak vlivem např. prachu, průchodu chodce atp.) z formátu souřadnic X, Y, Z na zprostředkující veličiny, kterými jsou vodorovný úhel φ , zenitový úhel ζ a šikmá délka d . Následně jsou identifikovány sobě odpovídající body a měřené délky průměrovány. Podmínkou aplikace této metody redukce šumu je, že jednotlivé skeny, musí být vytvořeny se stejným nastavením a data nesmějí být transformována. Další podstatnou podmínkou je to, že skener musí měřit po stejných bodech. Toto je velmi omezující podmínka jelikož prakticky jedině skenery firmy Leica ji splňují díky přesnosti nastavení vodorovného směru a zenitového úhlu [16].

4.2.3 Průměrování prostorových polárních souřadnic blízkých bodů

Základem této metody je průměrování prostorových souřadnic blízkých bodů, tj. bodů, které spadají do pomyslného komolého jehlanu [17] nebo v modifikaci metody do pomyslného válce [18]. Parametry tohoto jehlanu (válce) jsou voleny na základně hustoty vzorkování a předpokládané velikosti šumu. U všech bodů, které se nacházejí v jednom válci,

resp. komolém jehlanu, jsou aritmetickým průměrem vypočteny výsledné hodnoty všech tří polárních souřadnic.

4.2.4 Průměrování délek blízkých bodů

Data TLS jsou rozdělena mřížkou na jednotlivé buňky. Velikost mřížky je nastavena minimálně jako dvojnásobek hustoty skenování, tak aby každá buňka obsahovala minimálně 4 body. Horizontální a vertikální uhel je dopočten do středu mřížky a z délek je vypočten aritmetický průměr. Kritériem pro vyloučení délky z výpočtu aritmetického průměru je její oprava od mediánu, která je větší než hodnota směrodatné odchylky měřené délky, ta je dána výrobcem laserového skeneru. Nevýhodou tohoto způsobu redukce šumu je vznik zředěného mračna oproti původnímu [19].

4.2.5 Laser Scanner Super-resolution

Princip této metody vychází z metody super-resolution, která se zabývá zpracováním 2D obrazových dat, kde z několika vstupních obrazů s nižším rozlišením vznikne obraz s vyšším rozlišením. Pro aplikaci 3D laserového skenování je algoritmus upraven. Vstupem je několik téměř identických skenů objektu s nižším rozlišením, které jsou pořízeny z mírně posunutých stanovisek, tím vznikne mračno bodů s velmi vysokou hustotou bodů. Dále je zaveden souřadnicový systém, kde osa z reprezentuje hloubku (směr ke skeneru) a v rovině XY je vytvořena mřížka o zvolených rozměrech, která rozdělí mračno bodů do buněk. Pro každou buňku (její střed) je spočtena výsledná hodnota hloubky, použit je zde Gaussův filtr s mřížkou 5×5 buněk a poté je výsledná hodnota hloubky spočtena váženým průměrem, kde váha je dána vzdáleností jednotlivých bodů od středu buňky. Model v této fázi je stále zatížen jistou mírou šumu, proto je výsledek zlepšován pomocí bilineární interpolace [20].

4.2.6 Prokládání okolních dat polynomickými plochami nultého až čtvrtého řádu

Jak již z názvu vyplývá, tato metoda prokládá okolím vyhlazovaného bodu různé plochy. Příkladem užití tohoto postupu je program Denoiser [21]. Program Denoiser nabízí prokládání okolí bodu pomocí polynomů n -tého řádu. Pro plochy druhého až čtvrtého řádu jsou využívány Čebyševovy polynomy pro zajištění ortogonalita jednotlivých členů a zvýšení stability výpočtů. Výpočet je založen na MNC a také na normě L1 (robustní metoda minimalizující sumy absolutních hodnot oprav), která je vhodná především pro nepravidelné objekty. Pro každý bod je ve výpočtu vybrán zvolený počet nejbližších bodů. Těmito body se

proloží vybraná rovina a na základě původního vodorovného směru a zenitového úhlu se vypočte průsečík paprsku s proloženou rovinou a určí se tak nová vyhlazená velikost délky. Výpočet souřadnic je počítán prostorovou polární metodou s kontrolou, zda oprava (změna délky) nepřekračuje mez $\Delta = \sigma_d \cdot u_p$, která vyplývá z přesnosti dálkoměru. Koeficient spolehlivosti u_p je doporučeno volit 2,5. Bližší informace o algoritmu vyhledávání zvoleného okolí bodu a o proložení okolí plochou nalezneme v [21].

4.2.7 Využití konvolučního filtru

Hlavním předpokladem této metody redukce šumu dat TLS je, že objekt musí být možno popsat spojitými funkcemi. Tyto funkce by měly být stochastické, což je zajištěno obdobně jako například u Kalmanovy filtrace přidáním pseudoměření. Omezením této metody je to, že předpokládá strukturu pravidelné mřížky. Metoda selhává na objektech s velkou křivostí [22].

4.2.8 Non-local průměrování

Metoda „non-local“ (nelokální průměrování) je známá a používána především pro redukci šumu v oblasti obrazových dat. Základní princip spočívá v přepočítání hodnot intenzity daného pixelu pomocí váženého průměru ostatních pixelů v obraze [3]. Pro potřeby geodetické aplikace v oblasti laserového skenování byla tato metoda upravena a publikována v [23]. V celém výpočtu uživatel volí pouze dva parametry. Prvním je velikost okolí, kterým lze upravovat stupeň vyhlazení, a druhou je velikost okolí bodu používaného pro určení parametru podrobnosti, kterým lze regulovat homogenitu výsledného mračna.

4.2.9 Využití vlnkové transformace

Problematikou redukce šumu tzv. „range image“ pomocí vlnkové transformace se zabýval kolektiv autorů: Eddie Smigiel, Emmanuel Alby, Pierre Grussenmeyer ze Štrasburské univerzity v [24]. Aplikace těchto filtračních metod zde byla provedena na spojitém předmětu menších rozměrů (dm^3) a středních rozměrů (m^3). Také v této publikaci se naráží na největší problém aplikace těchto filtračních metod, a to je vytvoření tzv. délkové matice „range image“, což je převod získaných souřadnic X, Y, Z na polární souřadnice φ , ζ , d. Autoři příspěvku poukazují na problematiku okrajových částí při použití metod vlnkové transformace a současně na problematiku non-local means metody a její vhodnosti jen na předměty malého rozsahu.

4.2.10 Komerční software Geomagic Studio

Geomagic Studio od firmy Geomagic je software pro komplexní zpracování dat 3D skenování. Redukce šumu dat TLS je v tomto softwaru založena na statistickém posouzení polohy bodů v mračnu, a pokud bod leží statisticky mimo oblast, je tento bod posunut na vypočtenou správnou polohu. Geomagic obsahuje tři nastavení redukce šumu.

První možnost je tzv. free-form vyhlazení, které snižuje šum s ohledem na zakřivení povrchu, druhou možností je prismatic shapes (konzervativní) vyhlazení, které je vhodné pro pravidelné tvary, zachovává ostrost hran a rohů, rovinnost, poradí si však i s tvary jako je koule, kužel atd. Třetí možností je prismatic shapes (agresivní), která se od předchozí liší vyšší mírou vyhlazení [25].

4.3 Využití TLS v přesném geodetickém monitoringu

Využití technologie laserového skenování je v oblasti geodetického monitoringu velmi rozšířené. TLS je však obecně používáno pro monitoring s menším nárokem na přesnost měřeného posunu (v řádu centimetrů). Důvodem tohoto omezení využitelnosti pro přesnější práce je právě již zmíněná nižší přesnost v měřené délce.

Jednou z nalezených publikací je aplikace TLS na měření posunů skalního masivu „Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner“ [26]. V této publikaci byla využita metoda redukce šumu surových dat metodou nejbližšího souseda. V článku však vůbec není uvedeno, jak došlo v jednotlivých etapách měření skalního masivu k orientaci skeneru, zda byla použita nějaká transformace na identické body či metoda korelace na předchozí skenování. Právě metoda určení orientace skeneru na stanovisku v každé etapě pak má klíčovou roli v přesnosti určení posunů. Další publikací na téma využití TLS pro měření posunu terénu je „Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching“ [27].

Významnou aplikací je sledování zámku vrat plavební komory vodního díla Gabčíkovo [28]. Práce se zabývá sledováním deformace vrat plavební komory při jejím napouštění. Měření bylo prováděno současně laserovým skenerem Cyrax 2500 (Leica HDS 2500) a kontrolně přesnou totální stanicí Leica TC 1800. Rozdíl výšky vodního sloupce v plavební komoře je 19,3 metrů. Dle vyhodnocení etapových měření pomocí TLS bylo dosaženo deformace 40 mm. Tato hodnota byla ověřena klasickým geodetickým měřením.

4.4 Využití digitální pozemní a letecké fotogrammetrie – obrazové skenování

Digitální fotogrammetrie je jedním z nejrychleji se rozvíjejícím oborem v oblasti geodézie. Tento rozvoj je zapříčiněn zdokonalením a dostupností kvalitní výpočetní techniky, fotografických kamer a výrazným pokrokem zpracovatelských softwaru. Řada těchto softwaru je použitelná pro pozemní i leteckou fotogrammetrii jako např.: Agisoft PhotoScan [29].

4.4.1 Pozemní fotogrammetrie

V současnosti je nejrozšířenější metodou digitální pozemní fotogrammetrie tvorba mračna bodů obrazovou korelací. V anglické literatuře je tato digitální fotogrammetrie nazývána image-based modeling and rendering (IBMR). Princip této metody je podrobně popsán v [30]. Důležitou součástí výpočtů je tzv. svazkové vyrovnání. Toto vyrovnání spočívá v současném vyrovnání všech parametrů, tj. pozice a rotace kamer, prvky vnitřní a vnější orientace, distorzí a souřadnice bodů.

Základem je digitální fotoaparát. Modelovaný objekt musí být nasnímán ve velkém počtu snímků ze všech úhlů s výrazným překrytem. Nejrozšířenějšími zpracovatelskými softwary jsou Agisoft PhotoScan [29] a Photomodeler Scanner [31]. Každý ze zpracovatelských softwarů vyžaduje mírně jiný postup fotografování. Na STÚ v Bratislavě již proběhlo první testování aplikace metody IBMR na dokumentaci stavu stavebních objektu pro projektovou dokumentaci [32].

4.4.2 Letecká fotogrammetrie

Výrazný rozmach zaznamenala digitální letecká fotogrammetrie v posledních třech letech s rozvojem prostředků RPAS - Remotely Piloted Aircraft System (vzdáleně řízené letecké systémy). Základem je nálet nejméně ve třech řadách s příčným překrytem alespoň 50% a podélným překrytem 50 - 60%. Princip zpracování digitální letecké fotogrammetrie je velice podobný jako té pozemní, s tím rozdílem, že musíme nalézt vhodný letecký prostředek k nesení fotografické kamery.

4.4.2.1 Koptéry

Jedná se o bezpilotní dálkově řízené kvadrokoptéry či hexakoptéry. Pro dosažení kvalitnějších výsledků je vhodné použití gimbalu, tj. kompenzovaný zavěs kamery.

Výhody:

- Mobilita,
- Nižší výška letu => vyšší rozlišení
- Kolmý start => menší nároky na vzletovou a přistávací plochu

Nevýhody:

- Kratší doba letu => menší pracovní rádius
- Nižší nosnost



Obr. 4.1: Kvadrokoptéra DJI Phantom 4 Pro [33]

4.4.2.2 Pevná křídla (klasická konstrukce letadla)

Výhody:

- Vyšší možná nosnost
- Delší doba letu => větší pracovní rádius

Nevýhody:

- Vyšší výška letu => menší rozlišení
- Delší předletová příprava
- Některé systémy potřebují odpalovací rampu, hlavně ty s větší nosností
- Omezení velikosti přistávací oblasti



Obr. 4.2: Letadlo Mavinci Sirius PRO [34].

4.4.2.3 VTOL – hybridní systémy

VTOL = Vertical Take-Off and Landing, neboli systémy umožňující kolmý start a přistání.

Výhody:

- Vyšší nosnost 7,5 – 12 kg => možnost nést více senzorů najednou
- Delší doba letu => větší pracovní rádius
- Kombinují v sobě výhody obou předchozích kategorií

Nevýhody:

- Některé systémy potřebují odpalovací rampu



Obr. 4.3: VTOL UAV - Albatros [35].

5 ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA

Řešená problematika disertační práce směřuje k určení a zvýšení přesnosti dat laserového skenování a k určení rozlišovací schopností jednotlivých systémů. Práce se skládá z celkem 6 samostatných dílčích témat.

5.1 Použité přístroje a vybavení – charakteristiky přesnosti

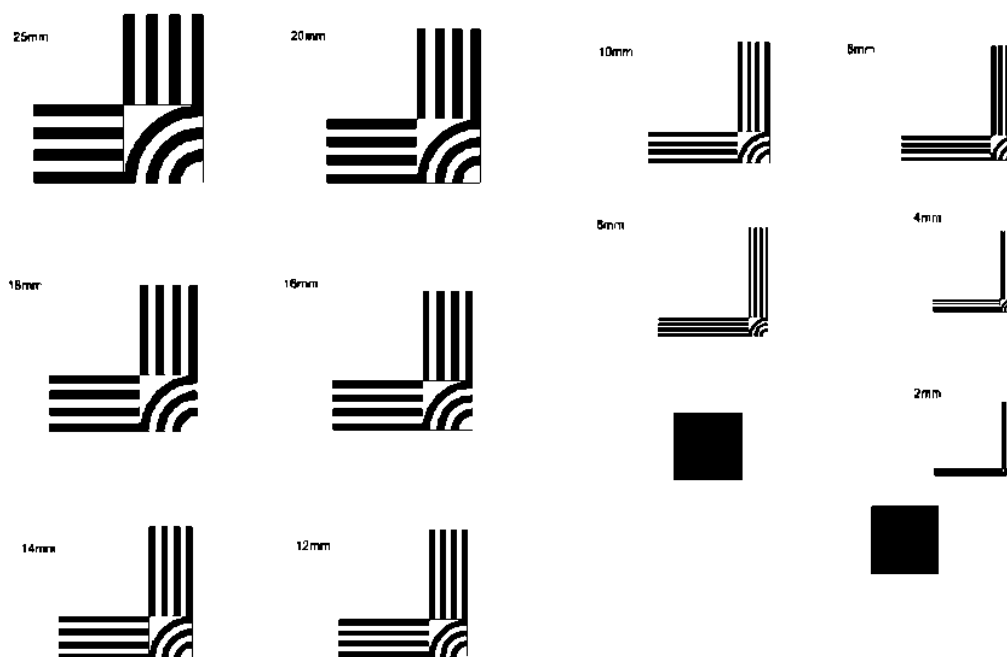
5.1.1 Použité skenery a totální stanice

V rámci celé práce byly použity 4 laserové skenery a 3 totální stanice. Jejich podrobný výčet a popis charakteristik přesnosti je uveden v příloze.

5.1.2 Další vybavení a přípravy

5.1.2.1 Testovací desky 2D

Pro potřeby experimentu určení rozlišovací schopnosti na základě vyhodnocení intenzit byly vyhotoveny na katedře speciální geodézie 2D testovací desky (Obr. 5.1).

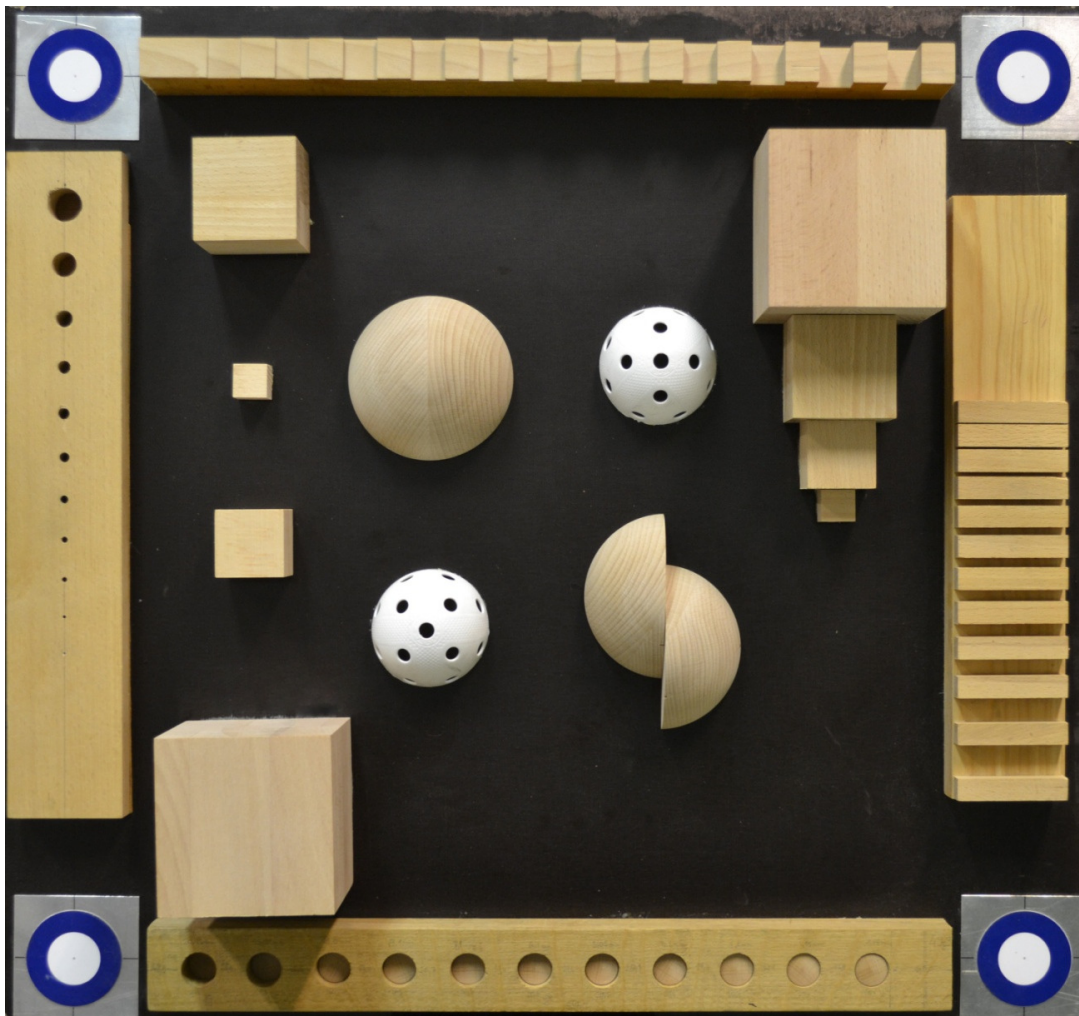


Obr. 5.1: 2D desky s testovacími obrázky

Tloušťky čar a bílých mezer v testovacích obrázcích byly: 25 mm, 20 mm, 18 mm, 16 mm, 14 mm, 12 mm, 10 mm, 8 mm, 6 mm, 4 mm a 2 mm. Dále na testovacím poli byly umístěny 2 kalibrační čtverce 150 mm x 150 mm.

5.1.2.2 Testovací desky 3D

Za účelem testování úspěšnosti metod redukce šumu z dat TLS a určení rozlišovací schopnosti byla na Katedře speciální geodezie vytvořena testovací deska s různou velikostí a křivostí obrazců. Deska má přibližné rozměry 0,65 m x 0,65 m a je z dřevotřísky. V rozích této desky jsou umístěny vřícovací body pro TLS. Tyto body byly přesně určeny totální stanicí a tím realizována souřadnicová soustava testovací desky. Na spojnici vřícovacích bodů jsou umístěny čtyři přípravky sloužící k určení rozlišovací schopnosti TLS. Uprostřed desky jsou umístěny polokoule a krychle z dubového dřeva a poloviny florbalových míčků (Obr. 5.2). Tyto prvky byly holeny záměrně tak, aby představovali jak ostré hrany, tak také přechody z roviny do plochy s určitou křivostí. Velikost hran krychlí je 20 mm, 40 mm, 60 mm a 100 mm, průměr kulových ploch je 100 mm a průměr florbalového míčku je 71 mm.



Obr. 5.2: 3D desky s testovacími obrazci

5.2 Určení rozlišovací schopnosti TLS na základě vyhodnocení intenzit

Cílem experimentu bylo navrhnout postup měření a zpracování získaných dat vedoucí ke zjištění komplexní rozlišovací schopnosti terestrického skenovacího systému. Obecně je rozlišovací schopnost terestrického skenovacího systému složena z několika faktorů, tj. hustoty skenování, přesnosti měření vodorovného směru a zenitového úhlu, přesnosti měření délek a velikosti laserové stopy. Byl tedy navržen experiment na bázi testování fotografických objektivů.

5.2.1 Použité vybavení a přístroj

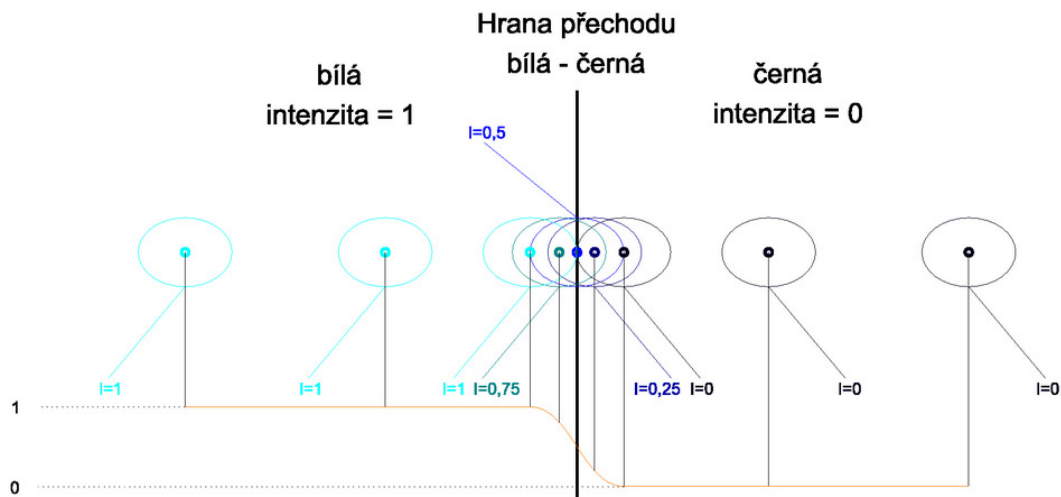
K testování byl využit skener Leica HDS3000 viz. kapitola 5.1 a testovací desky viz. kapitola 5.1.3.1.

5.2.2 Popis experimentu

Měření celého experimentu probíhalo v laboratorních podmínkách za stálé teploty 21°C. Testovací desky byly umístěny svisle, cca 4,50 metru od stanoviska skeneru a to tak, aby střed testovacích desek ležel zhruba ve výšce točné osy skeneru. Skenování bylo provedeno s hustotou 1,2 mm x 1,2 mm. S totožným nastavením a neměnnou orientací bylo provedeno skenování celkem 6-krát a to z důvodu možného pozdějšího průměrování skenů a zjištění jeho vlivu na rozlišovací schopnost skenovacího systému.

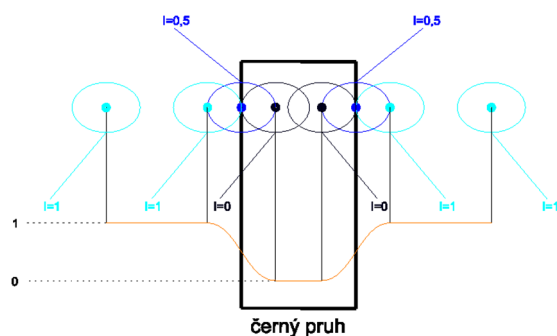
Byly navrženy dva způsoby zpracování získaných dat, a to způsob analytický, který je založený na principu funkce přenosu kontrastu objektu a obrazu. Druhým způsobem je způsob převážně analogový, založený na principu příčných řezů a grafickém znázornění dosažených a daných intenzit.

Základní myšlenka celého experimentu je znázorněna (Obr. 5.3).

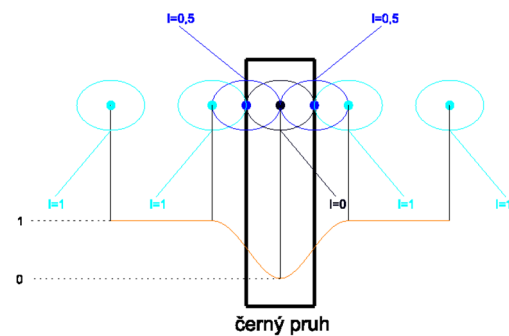


Obr. 5.3: Princip testování

Jak vidíme z obrázku, základním principem je to, že stopa dopadající na rozhraní černé a bílé přebírá hodnotu intenzity odraženého signálu úměrně zasažené ploše na jednu či druhou barvu. Velikost dané stopy je dána rozbíhavostí laserového svazku, umístění stopy je dáno dalšími třemi veličinami, a to přesností určení horizontálního směru a zenitového úhlu a krokem skenování. Z toho tedy vyplývá: Je-li snímáný obrazec tak velký, že se do něj dokáže umístit celá laserová stopa bez ovlivnění intenzity druhou barvou, dokážeme detekovat plnou neovlivněnou intenzitu dané barvy, proto jsme schopni detail o daných rozměrech zachytit a tím je dána rozlišovací schopnost skenovacího systému. Na obrázcích Obr. 5.4 a Obr. 5.5 můžeme vidět dva možné případy, které mohou nastat.



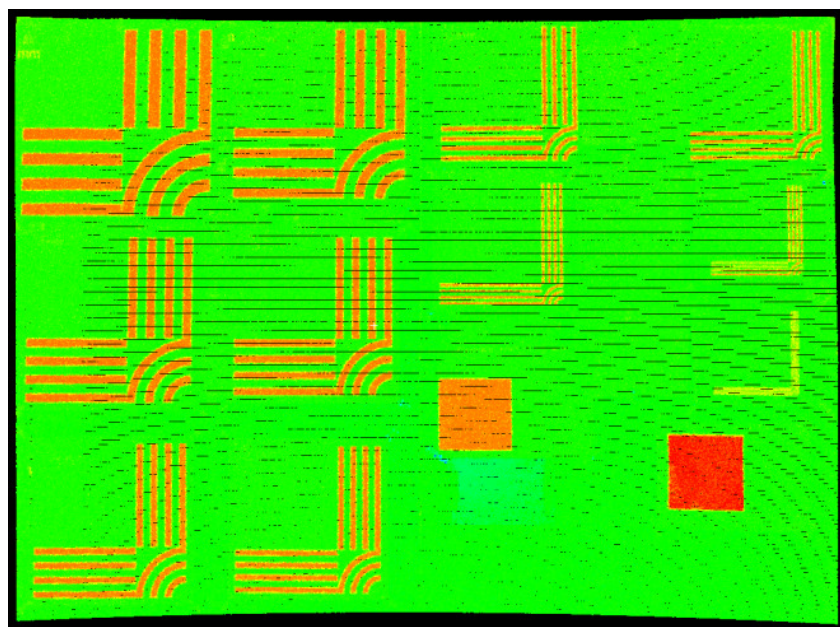
Obr. 5.4: Do černého pruhu padne více bodů – rozlišíme plochu



Obr. 5.5: Do černého pruhu padne jen jeden bod – hraniční situace – práh rozlišovací schopnosti

Při vyhodnocení mohou nastat 3 případy:

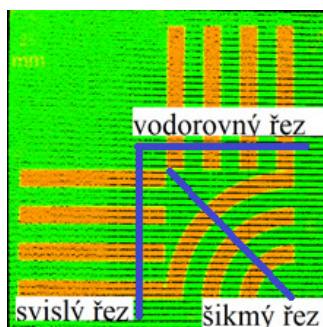
- 1) Na testovací plochu dopadnou body, které nejsou ovlivněny okolní barvou (Obr. 5.4) => **plocha je rozlišena** - v extrémním případě dopadne na testovací plochu bez ovlivnění pouze jeden bod => velikost stopy laserového svazku (Obr. 5.5).
- 2) Na testovací plochu dopadnou body, které jsou ovlivněny okolí barvou, ale rozdíl intenzity je jasně rozpoznatelný => **plocha je detekována**
- 3) Na testovací plochu dopadnou body, které jsou výrazně ovlivněny okolí barvou a rozdíl intenzit není rozpoznatelný a ztrácí se v šumu => **plocha není detekována**



Obr. 5.6: Výsledný sken testovacích desek

Po dokončení skenování bylo zjištěno, že skener Leica HDS 3000 při nastaveném kroku 1,2 mm x 1,2 mm z neznámého důvodu vynechává některé řádky (Obr. 5.6). Již po naskenování bylo vizuálně možno zjistit, že skener detekoval i testovací obrazce o velikosti 2 mm.

Vyhodnocení obou metod zpracování bylo vždy provedeno ve třech řezech pro každou velikost testovacího obrazce. Zpracování mračna bodů a tvorba jednotlivých řezů proběhla v programu Cyclone. Jednotlivé výpočty a grafické znázornění proběhlo v programech Matlab R2011b a Microsoft Excel 2007.



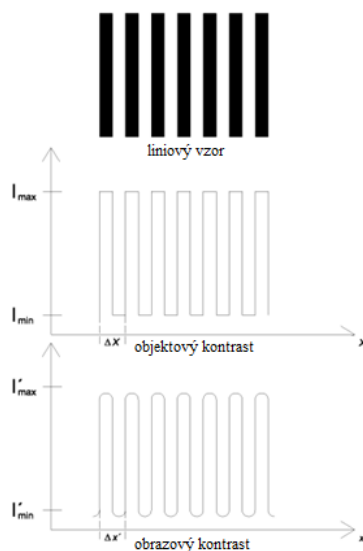
Obr. 5.7: Umístění řezů ve kterých proběhlo vyhodnocení

Naskenované mračno bylo nejprve oříznuto na rozměr testovací desky a pak jím byla proložena rovina a definována nová soustava souřadnic. Tato soustava byla definována tak, že do roviny testovacích desek byla vložena půdorysná rovina XY. Směr osy Z byl směrem ke skeneru. Při této orientaci os byl proveden vodorovný a svislý řez. Posléze byl souřadný systém otočen o 45° a byl vytvořen šikmý řez (Obr. 5.7).

Tvorba řezu proběhla automaticky v programu Cyclon a body v řezu byly vyexportovány v textovém formátu *.pts, který obsahuje informaci o intenzitě, pro další zpracování v programu Matlab. Šířka řezu byla 3mm.

5.2.3 Početní vyhodnocení

Geometrická rozlišovací schopnost filmu nebo obrazového systému je definována schopností rozlišit počet černých a bílých čar o stejném rozestupu, šířkou testovacího pruhu a kontrastem výsledného obrazu (Obr. 5.8). Tímto měřením získáme informaci o obsahu obrazu. Rozlišovací schopnost je vizuálně měřitelný počet linií na milimetr.



Obr. 5.8: Přenos kontrastu mezi objektem a obrazem.

Aktuální rozlišovací schopnost filmu nebo kompletního obrazového systému závisí na kontrastu, tj. s klesajícím kontrastem signálu přenosu je snižovaná rozlišovací schopnost. Kontrastově nezávislá formulace rozlišovací schopnosti je dána kontrastní přenosovou funkcí (CTF) podle [9].

Objektový kontrast K a obrazový kontrast K' jsou funkce minimální a maximální intenzity I z okraje vzoru.

$$K(f) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad K'(f) = \frac{I'_{\max} - I'_{\min}}{I'_{\max} + I'_{\min}} \quad (5.1)$$

Z toho důvodu kontrastní přenos CT prostorové frekvence f vychází ze vzorce:

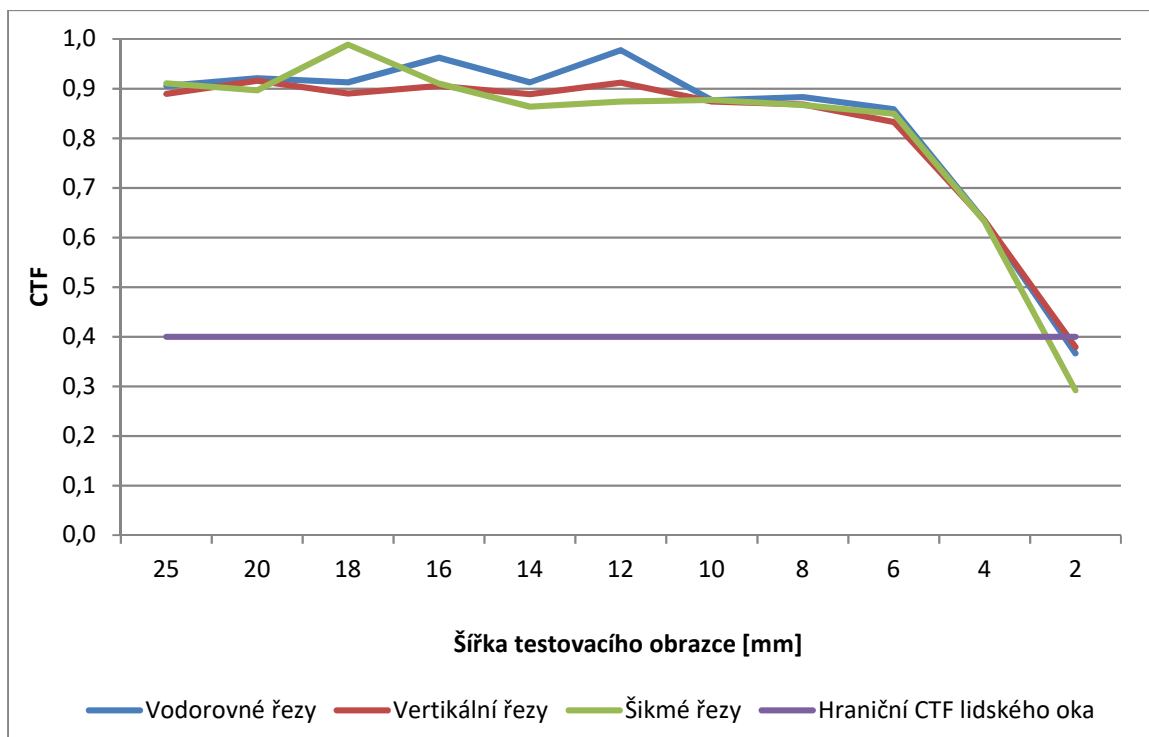
$$CT(f) = \frac{K(f)}{K'(f)} \quad (5.2)$$

Ve většině obrazových systémech CTF kolísá mezi 0 a 1. Hranice vnímání lidského oka je $CTF = 0,4$ [36].

Jelikož v reálných podmínkách nikdy nejsme schopni testovací pole vytvořit z dokonale odrazné a pohltivé plochy, nemůžeme dosáhnout krajních hodnot 0 a 1. Musíme tedy objektovou intenzitu zjistit a vypočítat její průměrnou hodnotou v oblasti, kde nemohlo dojít k ovlivnění druhou barvou. K tomuto účelu slouží kalibrační čtverce [36].

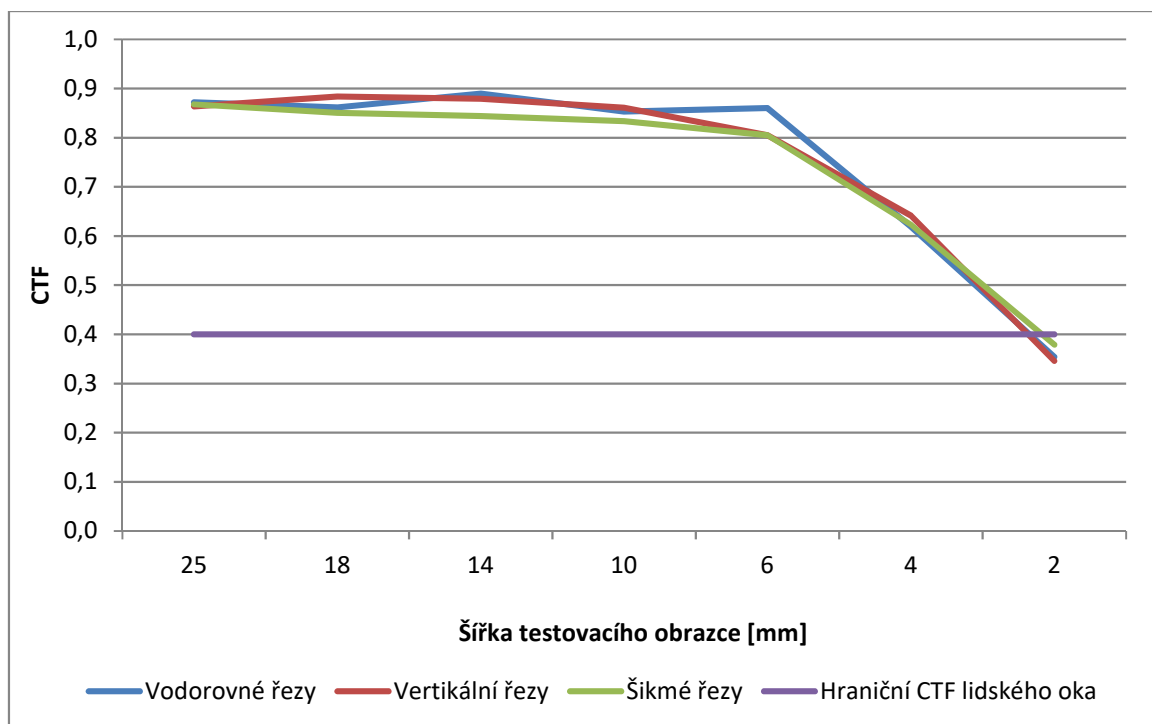
Tab. 5.1: Hodnoty CTF pro jeden sken.

	Vodorovný řez		Svislý řez		Šikmý řez	
	CTF	CTF[%]	CTF	CTF[%]	CTF	CTF[%]
25mm	0,91	91	0,89	89	0,91	91
20mm	0,92	92	0,92	92	0,9	90
18mm	0,91	91	0,89	89	0,99	99
16mm	0,96	96	0,91	91	0,91	91
14mm	0,91	91	0,89	89	0,86	86
12mm	0,98	98	0,91	91	0,87	87
10mm	0,88	88	0,87	87	0,88	88
8mm	0,88	88	0,87	87	0,87	87
6mm	0,86	86	0,83	83	0,85	85
4mm	0,63	63	0,63	63	0,63	63
2mm	0,37	37	0,38	38	0,29	29



Obr. 5.9: Graf průběhu CTF v závislosti na velikosti testovacího obrazce pro jeden sken.

Jak vidíme z grafu průběhu CTF pro jeden sken (Obr. 5.9), k výraznému zlomu dochází na hodnotě 6 mm, což nasvědčuje tomu, že právě 6 mm je hodnota velikosti stopy, a to se rovná rozlišovací schopnosti. Dle předpokladu průměrováním nedošlo ke zlepšení rozlišovací schopnosti, ale jen ke snížení šumu získaných dat (Obr. 5.10).



Obr. 5.10: Graf průběhu CTF v závislosti na velikosti testovacího obrazce pro průměrný sken.

5.2.4 Grafické vyhodnocení

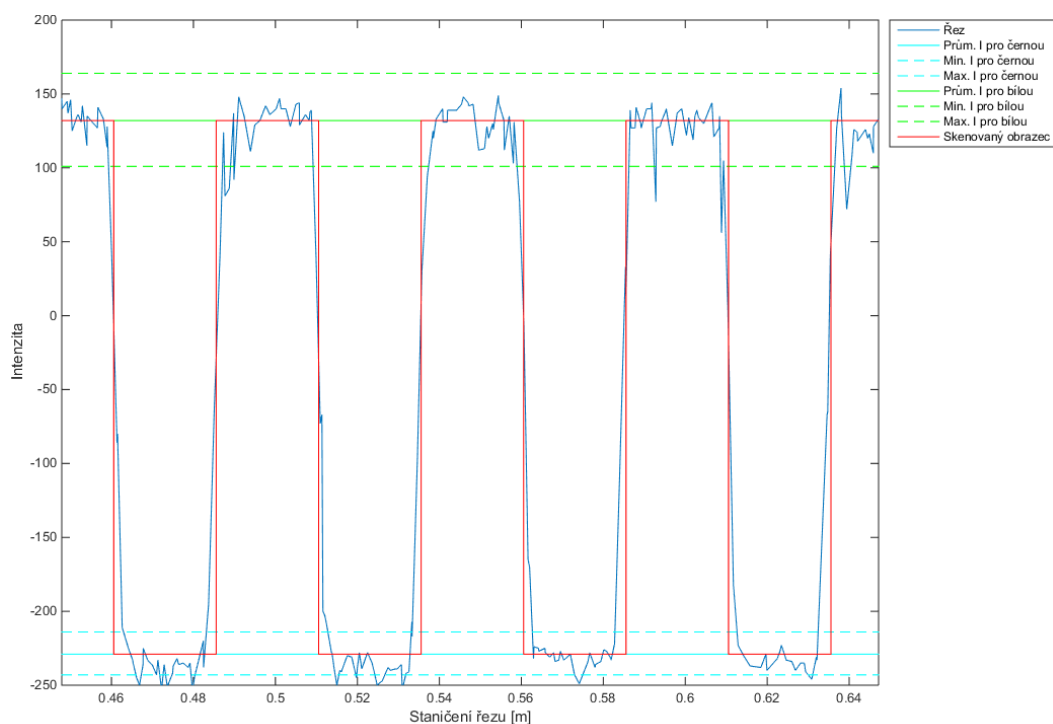
Základem analogové metody zpracování je vynesení staničení v řezu na osu X a získané intenzity na osu Y . Do grafů jsou také vyneseny průměrné intenzity pro bílou a černou barvu a 2,5 násobky jejich směrodatných odchylek. Průměrná intenzita je spočtena jako aritmetický průměr bodu v testovacím obrazci. Za detekované body považujeme ty, které padnou do intervalu:

$$\langle I_{prům} - 2,5\sigma, I_{prům} + 2,5\sigma \rangle$$

Kde $I_{prům}$... průměrná intenzita (5.3)

Jak bylo odvozeno v kapitole 5.1.2., za hranici rozlišovací schopnosti budeme považovat takový rozměr testovacího obrazce, kde v grafu bude jen jeden bod náležící do zmíněného intervalu.

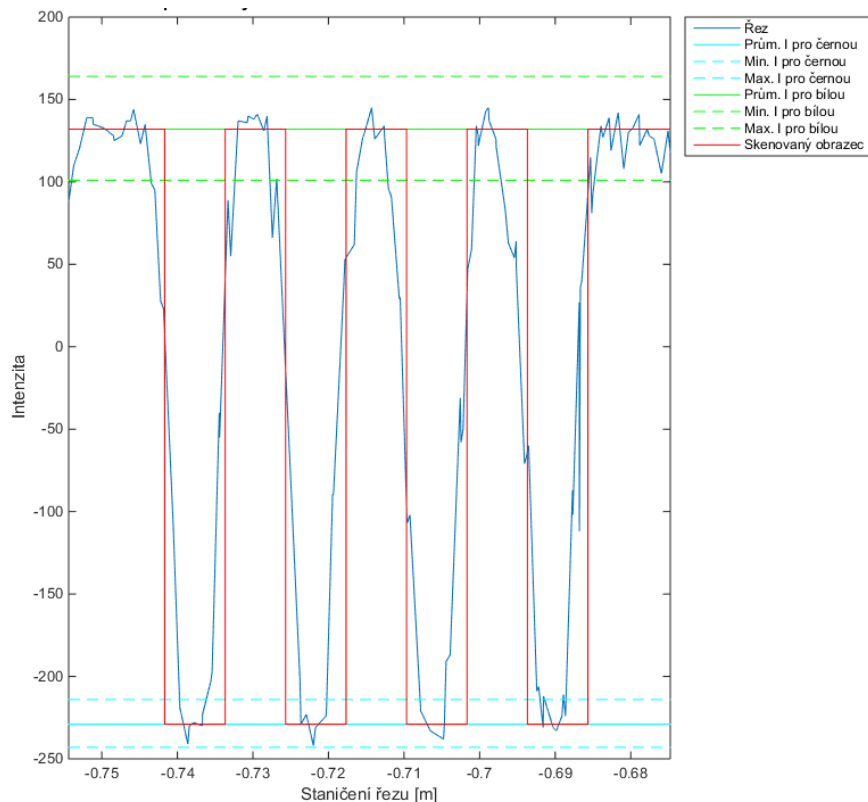
Analogové zpracování bylo provedeno pro všechny rozměry testovacích obrazců a ve všech směrech. Zde si však pro názornost uvedeme jen vodorovné řezy přes obrazce o rozměrech 25 mm, 8mm, 6 mm, 4mm a 2mm (Obr. 5.11, Obr. 5.12, Obr. 5.13, Obr. 5.14 a Obr. 5.15). Zbylé řezy jsou uvedeny na příloženém CD.



Obr. 5.11: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 25mm

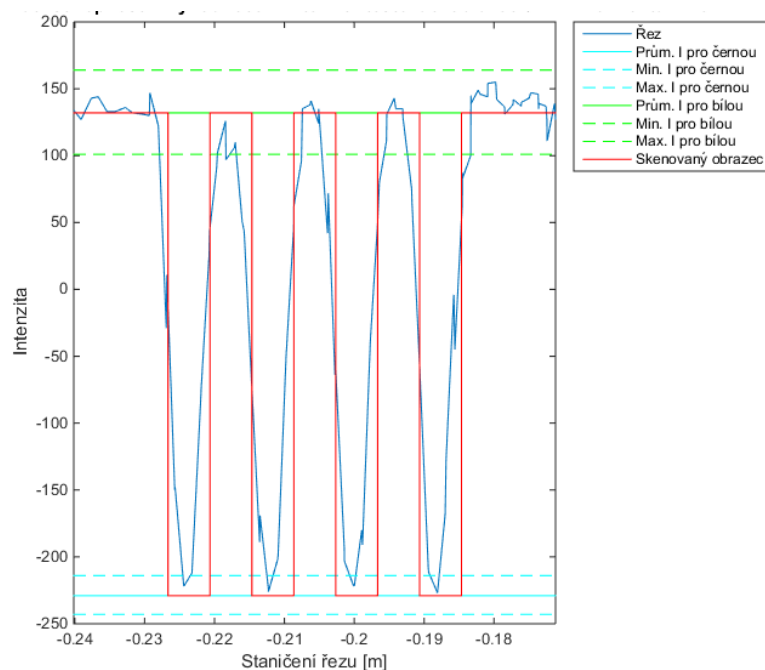
V grafu (Obr. 5.11) dokážeme testovací plochu 25 mm jasně rozlišit.

Při vyhodnocení řezu testovacím obrazcem o tloušťce 8mm (Obr. 5.12) ve většině případů padnou do vymezeného intervalu 3 body. Plochu dokážeme rozlišit.



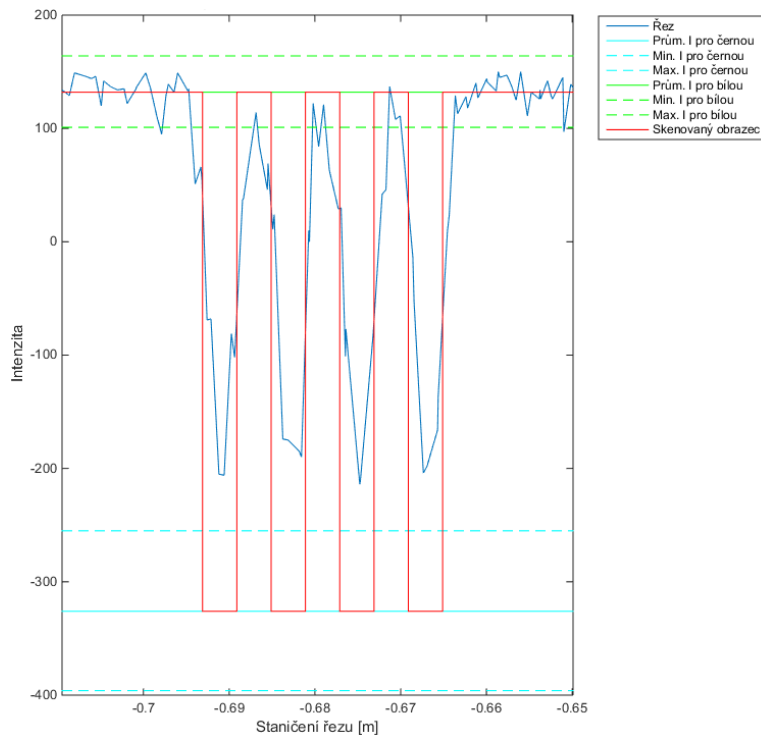
Obr. 5.12: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 8mm

Na velikosti testovacího obrazce 6 mm (Obr. 5.13) je ve většině případů v daném intervalu detekován jen jeden bod. To nasvědčuje tvrzení z analytického výpočtu, že mezní rozlišovací schopnost je 6 mm.



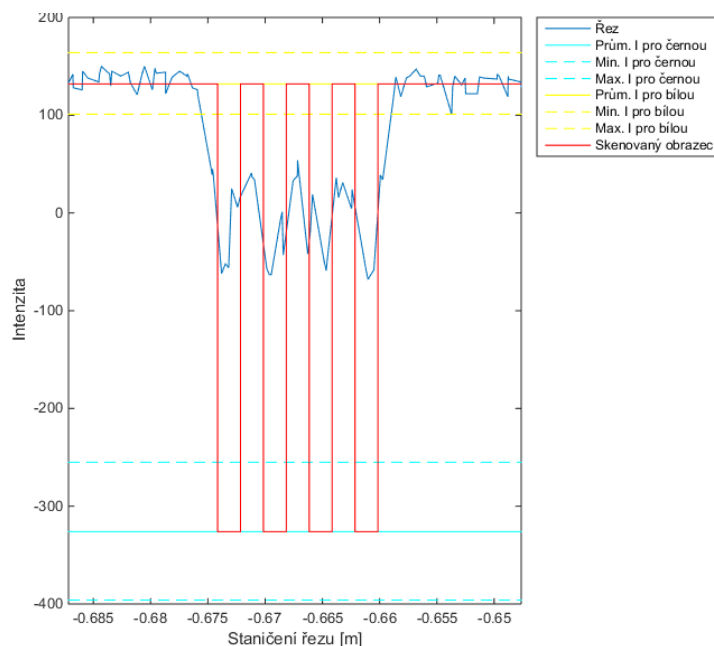
Obr. 5.13: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 6mm

V následujícím případě velikosti testovacího obrazce 4 mm Obr. 5.14 již nedosáhne požadované intenzity ani jeden bod, ale rozdíl intenzit mezi černou a bílou barvou je jednoznačně rozpoznatelný a detekujeme detail o velikosti 4 mm. Rozlišovací schopnost tedy stejně jako podle analytického výpočtu je v intervalu 4 mm až 6 mm.



Obr. 5.14: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 4mm

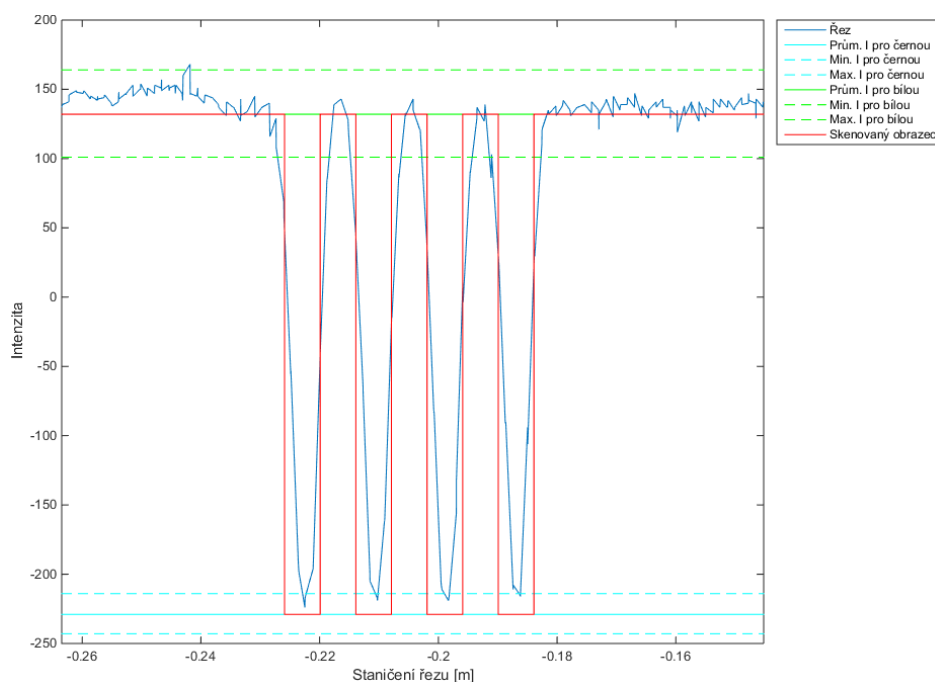
Poslední případ velikosti testované plochy 2 mm je zobrazen na následujícím obrázku Obr. 5.15.



Obr. 5.15 Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 2mm

V obrázku Obr. 5.15. dokážeme jednoznačně rozpoznat rozdíl mezi černou a bílou barvou a z toho tedy vyplývá, že jsme schopni také detekovat detail o velikosti 2 mm i v případě kdy velikost stopy je mnohonásobně větší.

V následujícím obrázku (Obr. 5.16) je znázorněn průměrovaný sken na testovacím obraze o velikosti 6 mm.



Obr. 5.16: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce - horizontální řez – 6mm – průměrovaný řez

Při zpracování průměrného skenu se potvrdilo, že redukce šumu nemá vliv na rozlišovací schopnost a také zde padnul do průměrného intervalu pouze jeden bod.

5.2.5 Shrnutí a závěry

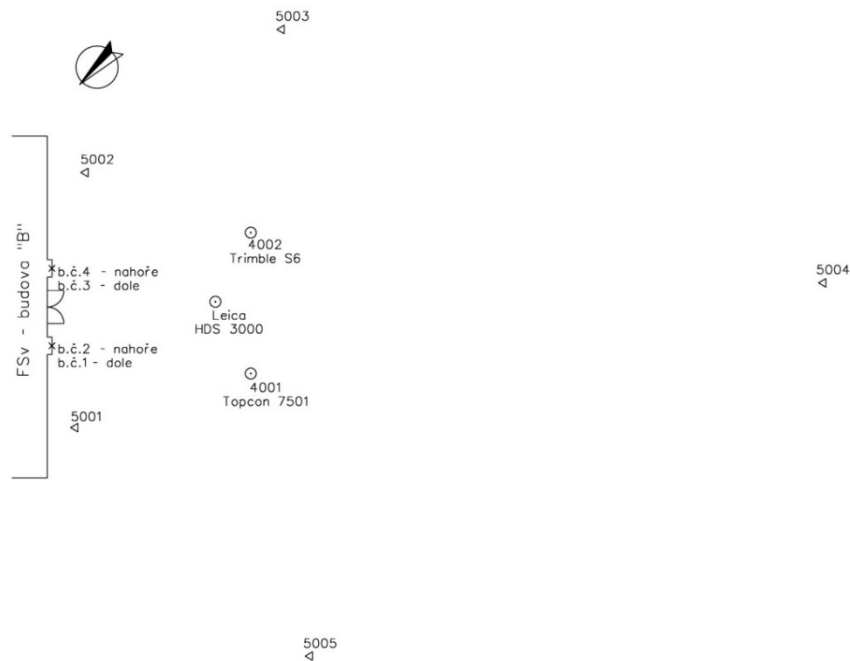
Experimentálně byla určena rozlišovací schopnost terestrického skenovacího systému Leica HDS3000 na základě intenzity odraženého záření. Z výsledků analogového vyhodnocení je viditelné, že jednoznačně dokážeme rozlišit 6 mm, ale také dokážeme detekovat výskyt prvků o velikosti 4 mm a 2 mm, i když nedosáhneme požadované intenzity. Z analytického výpočtu vyplývá, že k výraznému zlomu funkce CTF dochází na 6 mm, z čehož usuzujeme, že se jedná o hodnotu velikosti stopy. Závěrem tedy můžeme říci, že jednoznačně můžeme rozlišit detail o rozměru 6 mm, detekovat však můžeme i výskyt menších objektu, a to, jak vyplývá z analytického výpočtu o rozměru cca 2,5 mm. Získané výsledky potvrzují domněnku uvedenou v [14], že jsme schopni detekovat objekt o velikosti 1/3 velikosti stopy laserového svazku.

5.3 Využití TLS v přesném geodetickém monitoringu

Tato kapitola se zabývá problematikou využití laserového skeneru v oblasti velmi přesného geodetického monitoringu. V kapitole je popsán popis testování a srovnání s klasickou metodou určování vodorovných posunů. Byl navržen postup etapového měření 2 pilířů u bočního vchodu do budovy „B“ Fakulty stavební ČVUT v Praze (Obr. 5.17). Na pilířích byly vylepeny 4 odrazné štítky a 2 totálními stanicemi byla kontrolována stálost sítě 5 vztažných bodů a stálost sledovaných pilířů (Obr. 5.18).



Obr. 5.17: Pohled na měření pilíře s vyznačením kontrolních bodů.



Obr. 5.18: Schématické rozmístění stanoviška skenování, totálních stanic a vztažných bodů.

5.3.1 Použité přístroje a vybavení

Pro testování byl použit laserový skener Leica HDS3000 a totální stanice Trimble S6HP a Topcon GPT-7501. Charakteristiky přesností jsou uvedeny v kapitole 5.1.

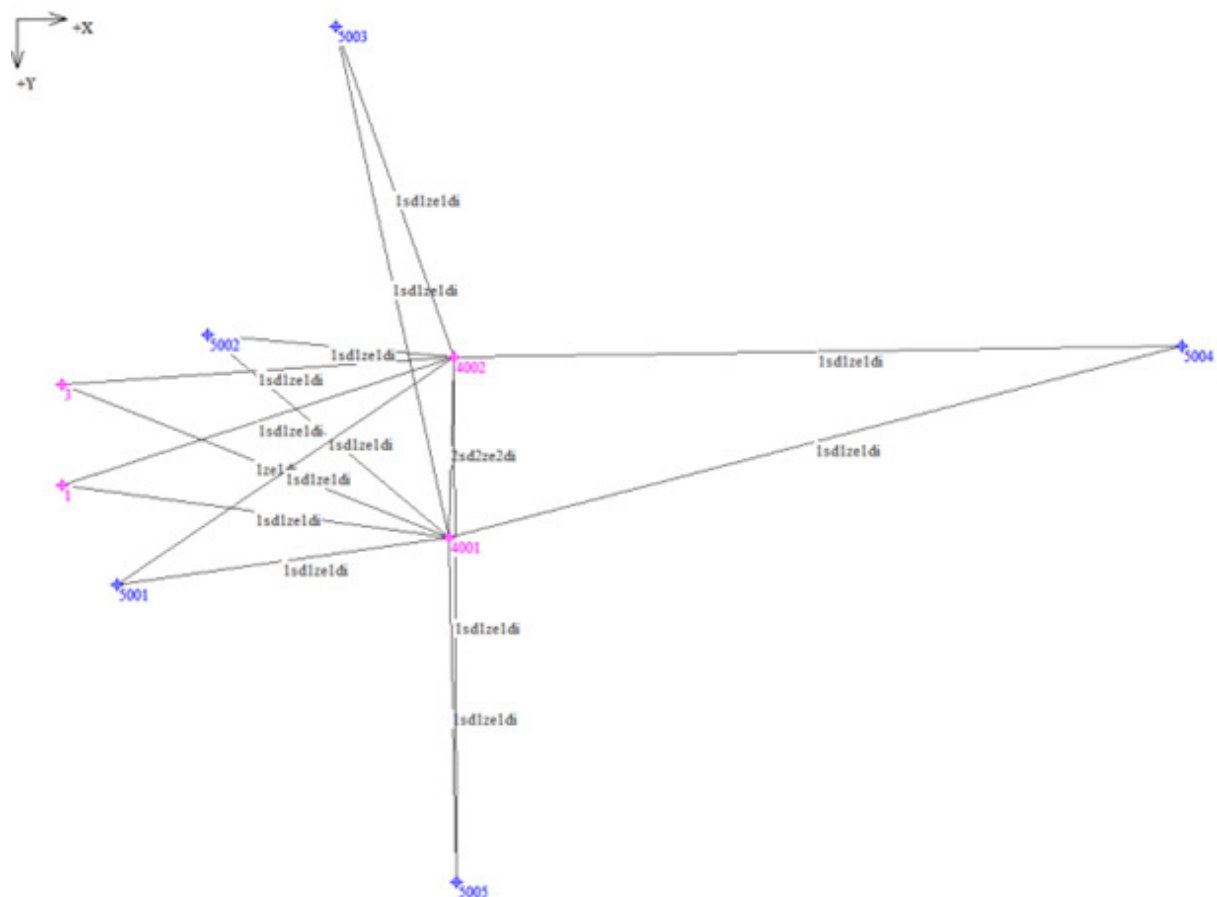
5.3.2 Modelace rozboru přesnosti vodorovného posunu bodů 1-4.

Modelace rozboru přesnosti byla provedena v programu PreciPlaner 3D v 3.1.0. [37]. Při modelaci byla souřadnicová soustava volena tak, aby posun pilíře byl očekáván ve směru osy X, tzn. směrodatná odchylka posunu pak je dána vztahem [38]:

$$\sigma_p = \sigma_x \cdot \sqrt{2} \quad (5.4)$$

Kontrola stálosti sledovaných pilířů byla provedena kritériem mezního rozdílu vodorovného posunu vycházející z vypočtené směrodatné odchylky a dána vztahem:

$$\Delta_p = \sigma_p \cdot u_p \cdot \sqrt{2} \quad (5.5)$$



Obr. 5.19: Schéma sítě pro určení vodorovných posunů

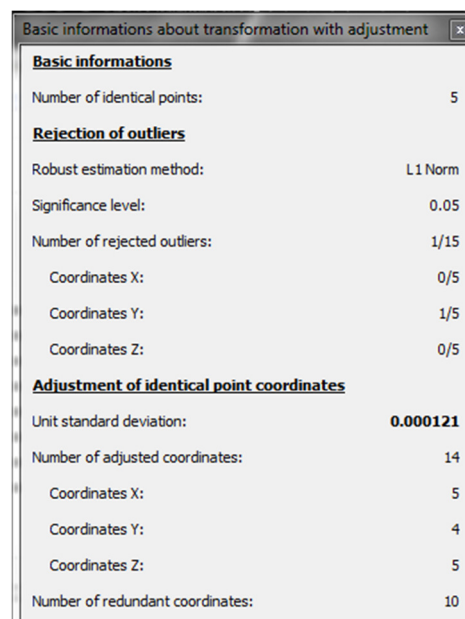
5.3.3 Kontrola stálosti sledovaných pilířů a vztažné sítě

Před samotným měřením pomocí laserového skeneru Leica HDS 3000, byla stabilizována a ze 2 stanovisek ve 3 skupinách zaměřena síť 5 vztažných bodů (Obr. 5.20) s prokladatelnými terči (vlíčovací bod TLS / odrazný štítek) a 4 kontrolní body osazené na dvou sledovaných pilířích. Po dokončení skenování byla znovu kontrolně zaměřena síť vztažných bodů a 4 body na sledovaných pilířích.



Obr. 5.20: Vztažný bod (odrazný štítek)

Výpočet sítě byl proveden v programu EasyNet 2.4. [39]. Síť byla v 0. etapě vyrovnána jako volná a získané souřadnice byly použity pro transformaci výpočtu volné sítě v 1. etapě. Směrodatná odchylka transformace souřadnic 1. etapy na 0. etapu byla 0,0001 m (Obr. 5.21).



Basic informations about transformation with adjustment	
Basic informations	
Number of identical points:	5
Rejection of outliers	
Robust estimation method:	L1 Norm
Significance level:	0.05
Number of rejected outliers:	1/15
Coordinates X:	0/5
Coordinates Y:	1/5
Coordinates Z:	0/5
Adjustment of identical point coordinates	
Unit standard deviation:	0.000121
Number of adjusted coordinates:	14
Coordinates X:	5
Coordinates Y:	4
Coordinates Z:	5
Number of redundant coordinates:	10

Obr. 5.21: Výpis informací o provedené transformaci mezi 0. a 1. etapou

V následující tabulce jsou uvedeny souřadnicové rozdíly na bodech vztažné sítě.

Tab. 5.2.: Hodnoty souřadnicových rozdílů na identických bodech mezi 0. a 1. etapou

Etapa	Bod									
	5001		5002		5003		5004		5005	
	Souřadnicové opravy na identických bodech:									
	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX
0.etapa	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1.etapa	0,0000	0,0000	-0,0002	-0,0001	0,0005	0,0000	-0,0001	0,0002	-0,0003	-0,0001

Z tabulky je patrné, že k porušení stability vztažných bodů nedošlo. Kontrola stálosti 2 sledovaných pilířů proběhla pomocí srovnání naměřeného posunu mezi nultou a první etapou.

Tab. 5.3: Porovnání naměřeného posunu s mezním rozdílem

Číslo bodu	1	2	3	4
Základní etapa	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Posun 1. etapa [m] = p	0,0008	0,0010	0,0008	0,0010
Směrodatná odchylka posunu z modelace [mm]	0,0012	0,0012	0,0013	0,0013
Mezní rozdíl [m] = Δp	0,0030	0,0030	0,0033	0,0033
$p < \Delta p$	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje

Také u pilířů nebyla prokázána nestabilita.

5.3.4 Postup skenování

Stanovisko skenování bylo ve vzdálenosti cca 13 metrů od sledovaných pilířů (Obr. 5.22).



Obr. 5.22: Poloha skeneru vzhledem ke sledovaným pilířům

Skenováno bylo celkem 8. etap (0.-7.etapa). Po každé liché etapě byla změněna poloha stanoviska. Před začátkem skenování pilířů byla v každé etapě naskenována síť vztažných bodů. Skenováno bylo s hustotou 5 mm x 5 mm. Velikost skenovaných částí pilířů byla cca 0,6 m x 3,0 m. Z důvodu zpřesnění měřené délky bylo v každé etapě skenováno vícekrát tj. v 0. etapě 5-krát, ve zbývajících etapách 3-krát.

5.3.5 Zpracování naskenovaných mračen

Před samotným zahájením výpočtu byla provedena analýza, jak přesně lze pomocí skeneru určit souřadnice vztažných bodů. Před vyhodnocením každé etapy byly v dané etapě vyhledány vztažné body a určeny jejich souřadnice v místní síti skeneru. Opakované skenování sledovaných pilířů bylo zpracováno v programu ScanAverager [40] .

5.3.5.1 Určení tvaru a rozměru sítě vztažných bodů

Souřadnice vztažných bodů získané skenerem v každé etapě byly pomocí shodnostní transformace převedeny na souřadnice vztažných bodů získaných z prostorové sítě určené totálními stanicemi v 0. etapě. Rozdíly na identických bodech jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5.4.: Porovnání rozdílů souřadnic na identických bodech k souřadnicím určených prostorovou sítí

Etapa	Bod									
	5001		5002		5003		5004		5005	
	Souřadnicové opravy na identických bodech: [m]									
	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX
Pros. Síť	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0.etapa	0,0005	-0,0006	-0,0010	-0,0002	0,0024	0,0017	-0,0013	0,0000	-0,0007	-0,0009
1.etapa	0,0004	-0,0008	-0,0008	0,0005	0,0030	0,0016	-0,0016	0,0002	-0,0011	-0,0015
	Změna polohy stanoviska									
2.etapa	0,0006	0,0007	-0,0008	-0,0004	0,0018	0,0016	-0,0012	-0,0004	-0,0004	-0,0014
3.etapa	0,0004	0,0007	-0,0007	-0,0003	0,0021	0,0016	-0,0013	-0,0004	-0,0006	-0,0015
	Změna polohy stanoviska									
4.etapa	-0,0001	0,0006	-0,0007	0,0001	0,0035	0,0014	-0,0014	-0,0004	-0,0013	-0,0017
5.etapa	0,0003	-0,0002	-0,0006	0,0004	0,0029	0,0013	-0,0014	0,0000	-0,0012	-0,0016
	Změna polohy stanoviska									
6.etapa	0,0002	-0,0002	-0,0008	0,0002	0,0022	0,0008	-0,0010	0,0002	-0,0007	-0,0010
7.etapa	-0,0001	-0,0002	-0,0009	0,0000	0,0031	0,0011	-0,0009	-0,0001	-0,0012	-0,0008

Z výsledných rozdílů v souřadnicích vztažných bodů určených skenerem jsou patrné rozdíly na bodě 5003. Tyto rozdíly mohou být způsobeny nesymetrickým terčem při proložení z odrazného štítku na vřícovací bod laserového skeneru. Z tohoto důvodu bylo provedeno srovnání souřadnic identických bodů získaných skenerem v jednotlivých etapách. Získané výsledky jsou uvedeny v následující tabulce. Velikost souřadnicových rozdílů nepřesáhla 1,2 mm.

Jako základní souřadnice pro transformaci jednotlivých etap byly použity souřadnice z 0. etapy určené skenerem.

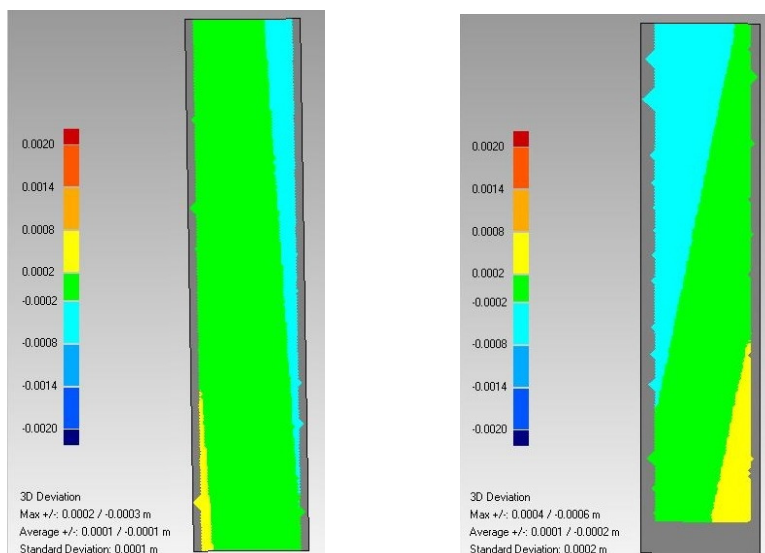
Tab. 5.5.: Porovnání rozdílů souřadnic na identických bodech mezi jednotlivými etapami určenými skenerem

Etapa	Bod									
	5001		5002		5003		5004		5005	
	Souřadnicové opravy na identických bodech: [m]									
	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX
0.etapa	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1.etapa	0,0001	0,0002	-0,0002	-0,0007	-0,0006	0,0001	0,0003	-0,0002	0,0004	0,0005
	Změna polohy stanoviska									
2.etapa	-0,0001	-0,0012	-0,0002	0,0002	0,0006	0,0001	-0,0001	0,0004	-0,0002	0,0005
3.etapa	0,0000	-0,0012	-0,0003	0,0001	0,0003	0,0001	0,0000	0,0004	-0,0001	0,0006
	Změna polohy stanoviska									
4.etapa	0,0006	-0,0011	-0,0003	-0,0003	-0,0011	0,0003	0,0001	0,0004	0,0006	0,0008
5.etapa	0,0002	-0,0004	-0,0003	-0,0006	-0,0005	0,0003	0,0001	0,0000	0,0005	0,0006
	Změna polohy stanoviska									
6.etapa	0,0003	-0,0003	-0,0001	-0,0004	0,0001	0,0009	-0,0003	-0,0002	0,0000	0,0001
7.etapa	0,0006	-0,0003	-0,0001	-0,0002	-0,0007	0,0004	-0,0004	0,0001	0,0005	0,0000

5.3.5.2 Vyhodnocení jednotlivých etap

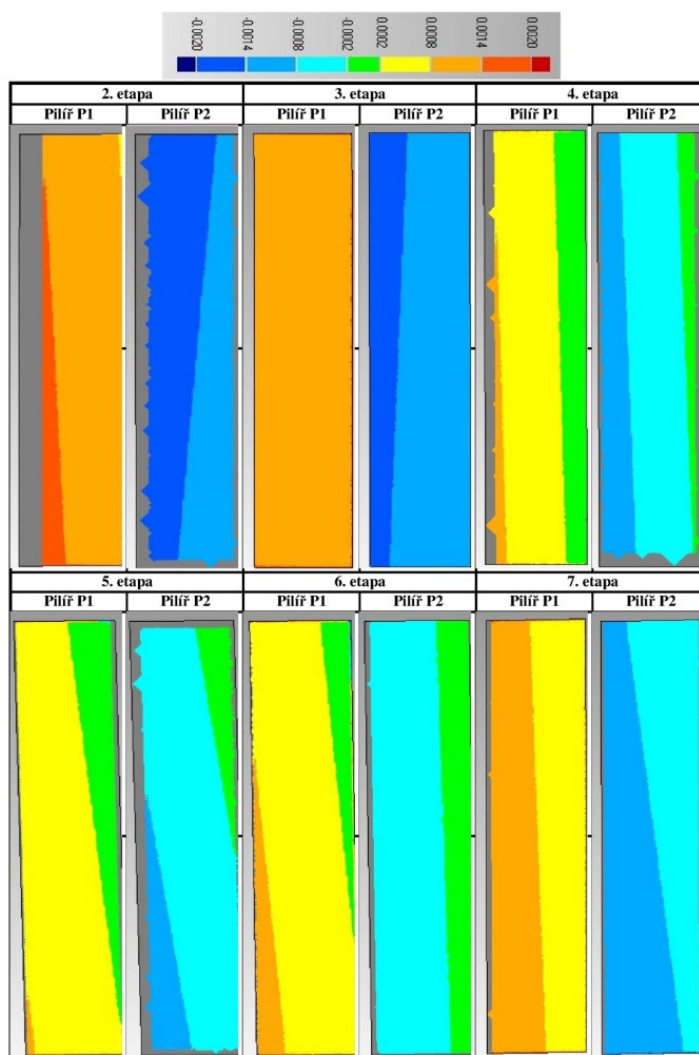
Prvním krokem v každé etapě bylo již zmíněné určení vřícovacích bodů a zprůměrování naskenovaných mračen bodů. V dalším kroku bylo skenované mračno jednotlivých etap přetransformováno do souřadného systému 0. etapy.

Samotné vyhodnocení jednotlivých etap pak probíhalo prostřednictvím vyhodnocení rozdílových modelů ploch skenovaného pilíře a to tak, že zprůměrované mračno bodů bylo proloženo rovinou. Tato rovina byla rozložena na trojúhelníkovou síť, která umožňuje zpracování rozdílového modelu. Jako vztažná síť pro vyhodnocení všech etap byla použita 0. etapa (Obr. 5.23).



Obr. 5.23: Rozdílové modely pilířů P1(vlevo) a P2(vpravo) v 1. etapě

V následujícím obrázku (Obr. 5.24) jsou uvedeny rozdílové modely obou pilířů pro 2. až 7. etapu.



Obr. 5.24: Rozdílové modely pilířů P1(vlevo) a P2(vpravo) v 2. až 7. etapě

V rozdílových modelech bylo dosaženo maximálních rozdílů v intervalu od +2 mm do -2 mm mezi základní a jednotlivou etapou a to ve druhé a třetí etapě (tyto etapy byly pořízeny ze stejného stanoviska). Ve zbývajících etapách byl dosažen maximální rozdíl od +1,4 mm do -1,4 mm. Ve všech etapách bylo splněno kritérium vypočtené z modelace přesnosti v kapitole 5.3.2, proto můžeme konstatovat, že laserový scanner splnil přesnost, která byla dosažena prostorovou sítí. Tento přístup k vyhodnocení by selhával v případě, kdyby nedocházelo k naklánění sledované stěny jako celku, ale docházelo by k jejímu průhybu. Tento problém je možno odstranit rozdělením měřeného pilíře na menší části a srovnávat tyto části postupně. Pro zhodnocení dosažených posunů byl pro oba pilíře a každou etapu vypočten průměrný posun. Tento průměrný posun je udán přímo ke každému rozdílovému modelu v programu Geomagic. Nestabilita pilíře, jak je uvedeno v kapitole 5.3.3 v tabulce Tab. 5.3, nebyla prokázána.

Tab. 5.6.: Výsledky Grubbsova testu odlehlých hodnot

Sledovaný pilíř	Vyhodnocené posuny		Grubbsův test			
			v	v*v	G	Vyhovuje
	etapa	[m]	[mm]	[mm ²]		
1	0.etapa	0,0000	0,0375	0,0014	0,00331	ano
	1.etapa	0,0000	0,0375	0,0014	0,00331	ano
	2.etapa	0,0012	-1,1625	1,3514	0,10272	ano
	3.etapa	0,0017	-1,6625	2,7639	0,1469	ano
	4.etapa	0,0004	-0,3625	0,1314	0,03203	ano
	5.etapa	0,0006	-0,5625	0,3164	0,0497	ano
	6.etapa	0,0007	-0,6625	0,4389	0,05854	ano
	7.etapa	0,0010	-0,9625	0,9264	0,08505	ano
2	0.etapa	0,0000	0,0375	0,0014	0,00331	ano
	1.etapa	-0,0001	0,1375	0,0189	0,01215	ano
	2.etapa	-0,0014	1,4375	2,0664	0,12702	ano
	3.etapa	-0,0013	1,3375	1,7889	0,11818	ano
	4.etapa	-0,0006	0,6375	0,4064	0,05633	ano
	5.etapa	-0,0005	0,5375	0,2889	0,04749	ano
	6.etapa	-0,0003	0,3375	0,1139	0,02982	ano
	7.etapa	-0,0008	0,8375	0,7014	0,074	ano
		Průměr [m]	Kontrola	Suma v*v	Gmax	Gmet
		0,000038	0,0000	11,3175	0,1469	2,44327

Dle výsledku Grubbsova testu ani jedna z vyhodnocených hodnot posunů není odlehlá.

Směrodatná odchylka posunů byla určena pomocí výběrové směrodatné odchylky [38]:

$$s_p = \sqrt{\frac{[v \cdot v]}{n-1}} = 0,9mm \quad (5.6)$$

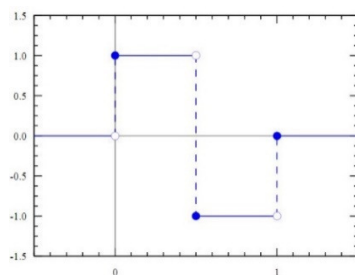
Vypočtená směrodatná odchylka vyhodnocení posunu pilíře je tedy 0,9 mm.

5.3.6 Shrnutí a závěry

V této kapitole bylo stručně představeno využití laserového skenovacího systému s vyšší směrodatnou odchylkou délky k přesným pracím v oblasti geodetického monitoringu. Stabilita sítě a měřených pilířů byla nezávisle kontrolována dvěma totálními stanicemi. Naměřené posuny byly statisticky vyhodnoceny pomocí Grubbsova testu. Výsledná hodnota směrodatné odchylky posunu činí 0,9 mm. Experimentem tedy byla prokázána vhodnost použití testovaného skenovacího systému pro přesný geodetický monitoring.

5.4 Využití vlnkové transformace (Wavelet transform) pro redukci šumu dat v TLS

Teprve až s rozvojem výpočetní techniky v posledních desetiletích se začala vlnková transformace používat pro zpracování obrazových dat. Počátky vlnkové transformace však sahají až do začátku minulého století. Vzniku vlnkové transformace předcházela znalost Fourierovy transformace. První „wavelet“ zkonstruoval maďarský matematik A. Haar v roce 1909 jako alternativní systém k Fourierovým bázím (Haarova vlnka je Daubechiesové vlnkou řádu 1). Největší rozmach vývoj vlnkové transformace zaznamenal v 70. a 80. letech minulého století. V roce 1988 formulovala belgická matematická Ingrid Daubechies kompaktní skupinu vlnek, které známe pod názvem „db“. Postupem času byly realizovány další vlnky, přičemž název vlnky je zpravidla odvozen od jejího tvůrce. V současné době představuje vlnková transformace mocný nástroj pro analýzu a reprezentaci spojitých a diskrétních signálů a to zejména kvůli svým časově-frekvenčním vlastnostem [41], [42], [43]



Obr. 5.25: Ukázka Haarovy vlnky [43].

5.4.1 Popis vlnkové transformace

Základním principem vlnkové transformace je proložení vlnky (waveletu) na část nebo na celý průběh filtrovaného signálu. K tomu je potřeba změnit měřítko ve vodorovné ose (kmitočty), ve svislé ose (úroveň) a posunout vlnku ve vodorovné ose (poloha). Takto vzniknou koeficienty, které signál určují. Parametry se označují jako měřítková funkce (scaling function). Tvar vlnky je popsán tzv. vlnkovou funkcí. Základním kamenem vlnkové transformace jsou tedy předem definované mateřské vlnky (mother wavelet).

5.4.2 Spojitá vlnková transformace

Spojitá vlnková transformace je definována vztahem [44]:

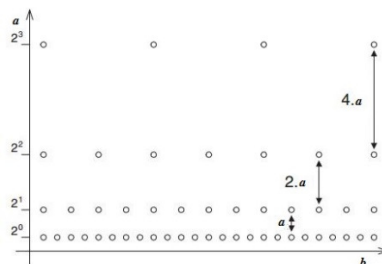
$$y(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (5.7)$$

Ve vzorci 5.7 je uveden časově měřítkový rozklad signálu $x(t)$, kde ψ je vlnka, a je měřítko, b je poloha umístění vlnky na časové ose a t je čas. Konstanta $\frac{1}{\sqrt{a}}$ normalizuje energii vlnky při změně měřítka. Symbol $*$ značí komplexně sdruženou funkci, protože obecně mohou být vlnky komplexní. Kompletní odvození spojitě vlnkové transformace nalezneme v [44].

Charakteristickou vlastností všech vlnkových transformací je, že základní funkční předpis ψ , tzv. mateřská vlnka, je stejný pro všechny vektory (a, b) . Skutečný tvar vlnky však závisí na obou parametrech.

5.4.3 Diskrétní vlnková transformace

Spojitá vlnková transformace produkuje nadbytečné množství dat - vlnkových koeficientů. Vhodným zavedením závislosti mezi parametry a , b , můžeme vytvořit z dané vlnky ortonormální bázi. Takovéto vzorkování nazýváme dyadické.



Obr. 5.26: Dvojková mřížka v prostoru čas-měřítková [45].

$$a=2^m \quad b = 2^m k \quad m, k \in \mathbf{Z} \wedge m > 0 \quad (5.8)$$

$$y(m, k) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi \left(\frac{t-2^m k}{2^m} \right) \quad (5.9)$$

kde m odpovídá měřítku, k poloze. Díky ortonormalitě pak takto volená vlnka umožňuje neredundantní dekompozici signálu, tzv. analýzu s mnoha rozlišeními (multiresolution analysis, decomposition). Tento princip je základem diskrétní vlnkové transformace (Discrete Wavelet Transform, DWT) [46].

5.4.4 Prahování

Proces prahování do sebe zahrnuje úpravu vlnkových koeficientů obsahující nežádoucí šum pomocí předem stanoveného kritéria [47]. V následujícím popisu jsou uvedeny dvě nepoužívanější prahovací techniky, a to tvrdé a měkké prahování [48]. Dalšími možnostmi prahování je prahování hyperbolické a poloměkké [49].

5.4.4.1 Tvrdé prahování

Při aplikaci tvrdého prahování zůstávají koeficienty vlnkové transformace beze změny, jestliže jejich absolutní hodnota je větší než práh λ . Jestliže je jejich absolutní hodnota menší než práh, jsou tyto koeficienty nahrazeny nulami. Nevýhodou tohoto prahování je vznik nežádoucích nespojitostí (Obr. 5.27).

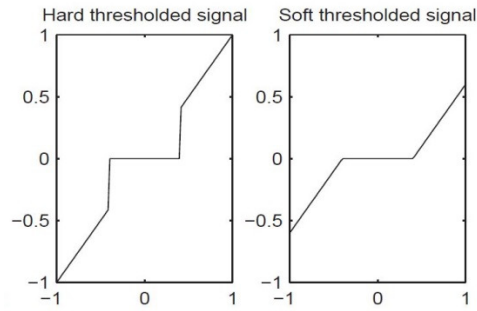
$$T_H(x, \lambda) = \begin{cases} x & \text{pro} & |x| \geq \lambda \\ 0 & \text{pro} & |x| < \lambda \end{cases} \quad (5.10)$$

5.4.4.2 Měkké prahování

Při aplikaci měkkého prahování se nejdříve vynulují elementy, které mají absolutní hodnotu menší, než je stanovený práh λ . Poté se upraví nenulové vlnkové koeficienty směrem k počátku následujícím způsobem: (Obr. 5.27).

$$T_S(x, \lambda) = \begin{cases} x - \lambda & \text{pro} & x \geq \lambda \\ x + \lambda & \text{pro} & x \leq -\lambda \\ 0 & \text{pro} & |x| < \lambda \end{cases} \quad (5.11)$$

Výhodou měkkého prahování je eliminace vzniku nespojitostí během tohoto procesu.



Obr. 5.27: Rozdíl mezi tvrdým a měkkým prahováním [46].

5.4.4.3 Výpočet prahu

Velikost prahu je nutné volit s ohledem na předpokládanou směrodatnou odchylku odstraňovaného šumu. Špatná volba velikosti prahu může vést k odstranění správných hodnot následkem tohoto ztrátu detailů. Pro výpočet prahu bude použita metoda univerzálního (jednotného) prahu. Tento univerzální práh byl odvozen pro aditivní bílý šum s Gaussovým rozdělením a jeho absolutní velikost je v každém pásmu stejná [47].

$$\lambda = \sigma * \sqrt{2 \ln(L)} \quad (5.12)$$

Tento vztah vyjadřuje nejjednodušší způsob výpočtu prahu při známé směrodatné odchylce šumu a velikosti objektu. Často bývá vzorec doplněn o konstantu k , kterou však nelze zjistit jinak než experimentálně.

$$\lambda = \sigma * \sqrt{2 \ln(L)} * k \quad (5.13)$$

Kde L ... je celkový počet bodů (pixelů) v signálu

σ ... směrodatná odchylka šumu

$k \in (0,1)$

5.4.5 Mateřské vlnky

Mateřskou vlnkou (mother wavelet) je označována základní vlnka $\psi_{a,b}(t)$, protože z ní jsou změnou měřítka a posunem podle časové osy odvozeny další vlnky stejného tvaru, ale roztažené (stlačené) a posunuté. V dnešní době je známo přes 400 vlnek. V následujících bodech jsou uvedeny ty nejdůležitější [50].

5.4.5.1 Haarova vlnka

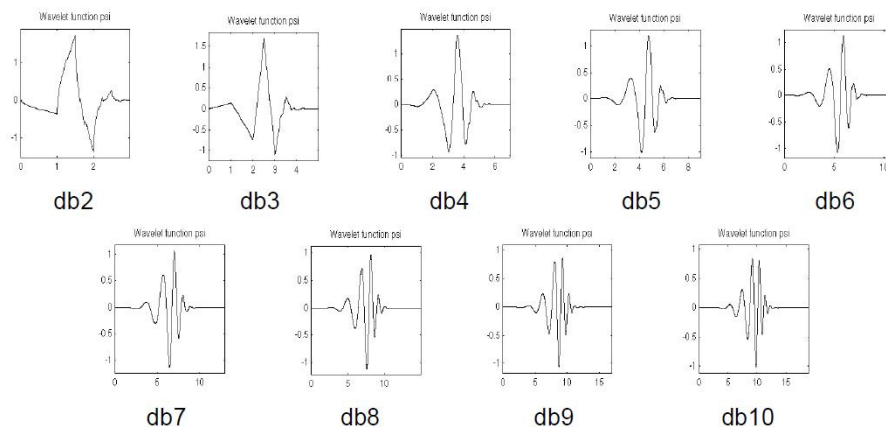
Je nejstarší a nejjednodušší vlnka. Její výhodou je především rychlý výpočet, nevýhodou je pak zejména její nespojitost, která neumožňuje hladkou rekonstrukci signálu. Bývá často nazývána Daubechies řádu 1.

- Vlastnosti:
- asymetrická
 - ortogonální, biortogonální

5.4.5.2 Daubechies vlnky

Jsou rodinou ortogonálních vlnek pojmenovaných podle jejich objevitelky, belgické fyzičky a matematicky Ingrid Daubechies (Obr. 5.28). Nemají explicitní vyjádření a jejich konstrukce je velice složitá.

- Vlastnosti:
- asymetrická
 - ortogonální, biortogonální
 - vlnky mají známý počet nulových momentů

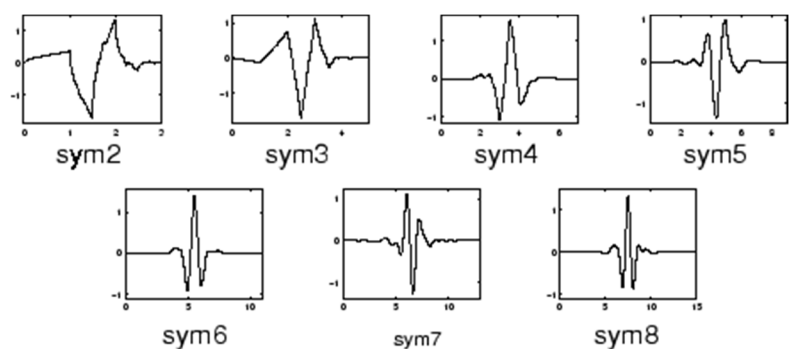


Obr. 5.28: Ukázky Daubechies vlnek [46].

5.4.5.3 Symlet vlnky

Jsou rodinou ortogonálních vlnek vytvořenou matematickou Ingrid Daubechies. Rozdíl vůči Daubechies vlnkám spočívá v tom, že se při jejich konstrukci dbá na co největší symetrii (Obr. 5.29).

- Vlastnosti:
- antisymetrická
 - ortogonální, biortogonální
 - vlnky mají známý počet nulových momentů



Obr. 5.29: Ukázky Symlet vlnek [46].

5.4.5.4 Biorthogonal vlnky

Jsou rodinou symetrických biortogonálních vlnek odvozených v roce 1992. Jejich hlavní aplikací je komprese obrazu. Jsou použity ve standardu komprese obrazu JPEG 2000.

- Vlastnosti:
- symetrická
 - biortogonální (nejsou ortogonální)

5.4.5.5 Coiflet vlnky

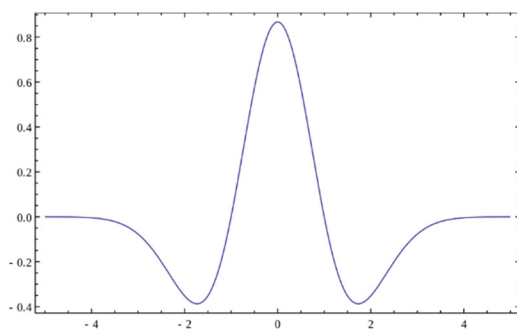
Konstruují se podobně jako Daubechiesové vlnky a stejně tak nemají explicitní vyjádření. Na rozdíl od nich je však při jejich konstrukci kladen zřetel na maximální počet nulových momentů i v měřítkové funkci.

- Vlastnosti:
- asymetrická
 - ortogonální, biortogonální

5.4.5.6 Mexikan hat vlnka

Takto je označována vlnka která je druhou derivací Gaussovy funkce (Obr. 5.30).

- Vlastnosti:
- symetrická
 - není ortogonální ani biortogonální
 - nelze použít pro DWT



Obr. 5.30: Ukázky Mexican hat [46].

5.4.5.7 Morlet vlnka

Vlnka je používána pouze ke spojitě vlnkové transformaci. Dobře detekuje oscilace

- Vlastnosti:
- symetrická
 - nemá kompaktní nosič

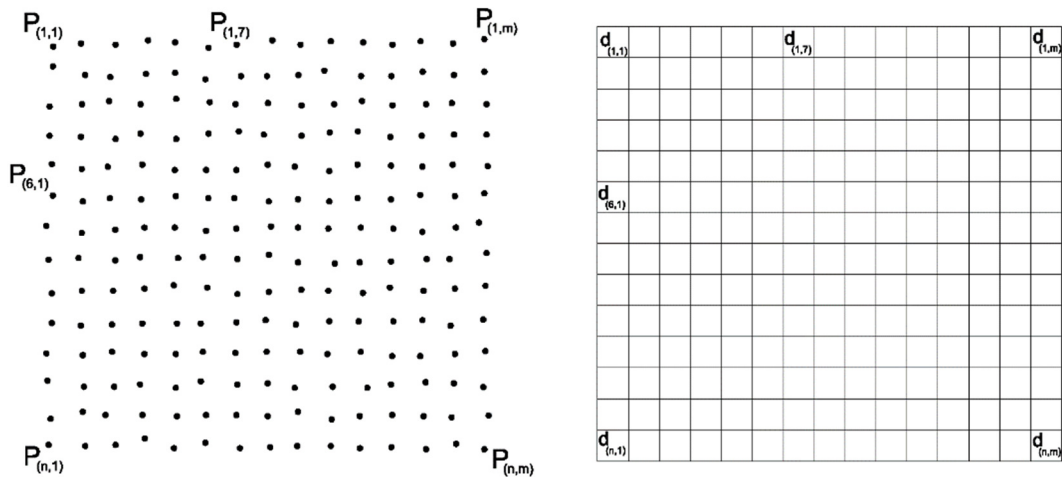
5.4.6 Volba použité vlnky

Pro výběr vlnky neexistují žádná závazná pravidla. Výběr se často provádí zkusmo nebo intuitivně a v závislosti na vlastnostech dané vlnky. Jednou z možností, jak ověřit vhodnost použité vlnky, může být výpočet MSE (Mean Square Error – střední kvadratická chyba). MSE dobře ilustruje opravy jednotlivých pixelů, k nimž dojde vlivem redukce šumu.

$$MSE = \frac{1}{M*N} \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N (\text{odšuměný}(i, k) - \text{originál}(i, k))^2 \quad (5.14)$$

5.4.7 Příprava skenu před redukcí šumu

Pro naši aplikaci byla zvolena diskretní vlnková transformace. Základní myšlenkou pro využití vlnkové transformace pro odstranění délkového šumu ve skenu je převést získané souřadnice X, Y, Z na původní polární souřadnice φ , ζ , d . Pro aplikaci obrazového zpracování (image processing) musíme z dat vytvořit pravidelnou matici, která nám vytvoří délkový obraz (range image). Každá měřená délka zaujímá přesně stanovenou pozici v matici a charakterizuje hodnotu daného pixelu v obraze. Pro vytvoření této matice byl prof. Ing. Martinem Štronerem, Ph.D. vytvořen v programu Scilab program Celleromatrix (Obr. 5.31).



Obr. 5.31: Tvorba matice délkového obrazu

$$P_{(n,m)} = [X_{(n,m)}, Y_{(n,m)}, Z_{(n,m)}] \Rightarrow [\varphi_{(n,m)}, \zeta_{(n,m)}, d_{(n,m)}] \quad (5.15)$$

Po získání seřazeného range image byla provedena aplikace vlnkové transformace v programu MATLAB R2011b, kde je pro 2D DWT přímo implementována funkce *wdencmp* (wavelet denoising or compression). Vstupem do této funkce je zmíněná sestavená matice délek.

Syntaxe v programu Matlab:

`[XC,CXC,LXC,PERF0,PERFL2] = wdencmp('lvd',X,'wname',N,THR,SORH)`

Kde:	XC transformované vstupní hodnoty
	CXC,LXC přídatné výstupní argumenty
	PERF0, PERFL2 normované výstupní hodnoty
	lvd globalní nebo lokální řešení. (použito globální v celém rozsahu)
	X vstupní hodnoty v matici
	wname použitý wavelet
	N počet vzorků signálu (2)
	THR velikost prahu
	SORH druh prahování, měkké nebo tvrdé. (měkké)

Po redukci šumu délek byly získány nové hodnoty měřených délek a následně přepočítány nové souřadnice X' , Y' , Z' .

5.4.8 Testování přínosu na virtuálním skenu

Pro otestování přínosu vlnkové transformace na datech laserového skenování byly v programu PointClouder [51] vytvořeny virtuální bezchybné skeny koule a roviny. Skeny byly vytvořeny v rozlišení 2 mm x 2 mm. Po přepočtu virtuálních souřadnic X , Y , Z na původní polární souřadnice φ , ζ , d , délka d byla uměle zašuměna šumem s normálním rozdělením a velikosti směrodatné odchylky 4 mm.

Z originálního bezchybného skenu byl vytvořen trojúhelníkový model, se kterým následně byly porovnávány jednotlivé modely zbavené délkového šumu a zašuměný model.

Jako kontrolní metoda pro úspěšnost redukce šumu bylo použito prokládání bivariantními Čebyševovými polynomy, jejíž úspěšnost byla dokázána v [21].

5.4.8.1 Virtuální sken koule

Byl vytvořen virtuální sken části koule o poloměru 0,3 m s rozlišením 2 mm x 2 mm o velikosti 133 x 133 bodů. Byly zvoleny 3 kritéria posouzení úspěšnosti odšumovací metody.

- a) dosažené parametry proložení koule
- b) numerické parametry rozdílových modelů
- c) vizuální parametry rozdílových modelů

Dle předchozích zkušeností byly vybrány pro ukázkou 4 druhy mateřských vlnek. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty prvních dvou kritérií pro hodnocení úspěšnosti odšumění pomocí využití vlnkové transformace. Zvoleny byly vlnky Daubechies vlnky 2. a 6. řádu a vlnky Biorthogonal 2.2 a 3.1.

Tab. 5.7.: Srovnání úspěšnosti odšumovacích metod – virtuální sken koule

Metoda odšumění	Parametry proložené koule		Parametry rozdílových modelů		
	Průměr proložené koule [m]	Směrodatná odchylka proložení koule [mm]	Minimální odlehlost [mm]	Maximální odlehlost [mm]	Směrodatná odchylka rozdílového modelu [mm]
Virtuální sken	0,6000	0,0	-	-	-
Sken šum $\sigma=4\text{mm}$	0,5948	3,6	-11,2	10,5	3,5
Čebyšev 2.řád	0,5994	1,5	-5,4	5,4	1,3
Čebyšev 3.řád	0,5976	2,4	-8,0	8,7	2,0
Wavelet - db2	0,6006	0,9	-4,3	5,4	0,9
Wavelet - db6	0,5998	0,9	-3,3	4,1	0,9
Wavelet - bior2.2	0,5995	1,0	-4,6	4,3	0,9
Wavelet - bior3.1	0,5978	2,0	-8,0	10,1	1,9

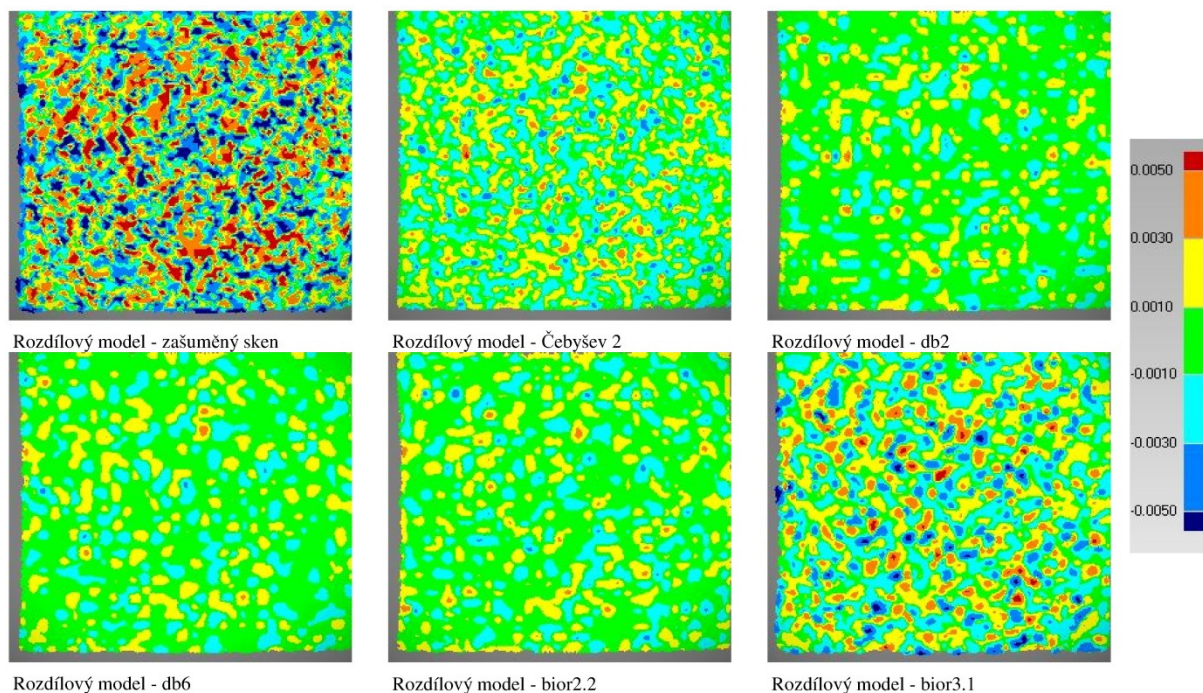
Z tabulky 5.7. vidíme, že nejlepšími výsledky bylo dosaženo za použití mateřské vlnky Daubechies 6. řádu. Tomuto faktu odpovídá i výpočet MSE (Mean Square Error – střední kvadratická chyba) dle vzorce 13. Výsledky MSE pro všechny použité metody jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5.8.: Tabulka výpočtu MSE – virtuální sken koule

Wavelet	db2	db6	bior3.1	bior2.2
MSE	14,79	14,71	16,48	14,79

Z výše uvedených tabulek můžeme konstatovat, že mateřské vlnky z rodiny Biorthogonal nejsou příliš vhodné pro aplikaci na data 3D skenování a je potřeba velmi opatrně vybírat mezi jednotlivými řády. Na špatné výsledky vlnky bior3.1 poukazuje již hodnota MSE. Z uvedených výsledku můžeme konstatovat, že použití vlnkové transformace vede k lepším výsledkům než použití Čebyševových polynomů.

V následujících rozdílových modelech (Obr. 5.32 a Obr. 5.33), můžeme zhodnotit poslední třetí kritérium:



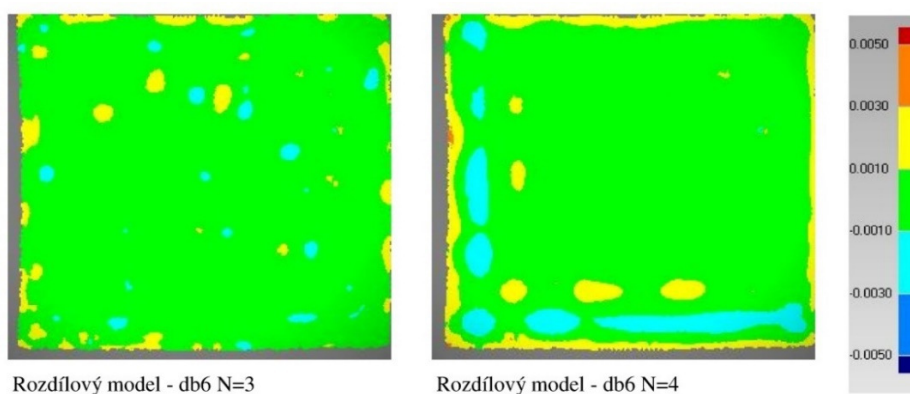
Obr. 5.32: Vybrané rozdílové modely – virtuální sken koule

Také z vizuálního vyhodnocení vyplývá, že mateřské vlnky Daubechies jsou nejvhodnější. Výsledky aplikace vlnkové transformace jsou velice příznivé a jak bylo zmíněno výše, dosahuje metoda vlnkové transformace lepších výsledku než použití Čebyševových polynomů. Zároveň je patrný velký rozdíl mezi bior2.2 a bior3.1.

Další možnosti jak ovlivnit průběh odšumění je zvolit vyšší počet vzorku signálu. Ve všech výše uvedených příkladech byly použity dva vzorky tj. $N=2$. Pro větší vyhlazení můžeme použít vyšší počet, může to však vést ke zkreslení původních dat a ztrátě detailů. V následující tabulce a obrázku jsou uvedeny výsledky se třemi a čtyřmi vzorky signálu.

Tab. 5.9.: Srovnání odšumovacích metod db6 N=3, N=4 – virtuální sken koule

Metoda odšumění	Parametry proložené koule		Parametry rozdílových modelů		
	Průměr proložené koule [m]	Směrodatná odchylka proložení koule [mm]	Minimální odlehlost [mm]	Maximální odlehlost [mm]	Směrodatná odchylka rozdílového modelu [mm]
Wavelet - db6 (N=3)	0,6001	0,5	-2,2	3,2	0,5
Wavelet - db6 (N=4)	0,5998	0,6	-2,3	3,8	0,6



Obr. 5.33: Rozdílové modely db6 N=3, N=4 – virtuální sken koule

Jak z vypočtených parametrů koule a rozdílových modelů, tak z vizuálního porovnání, je patrné, že zavedením více vzorku dojde k zlepšení výsledných modelů (Obr. 5.33). K výraznému zlepšení dochází zavedením třetího vzorku, čtvrtý vzorek již začíná značně znehodnocovat původní data na okrajích testovacího obrazce.

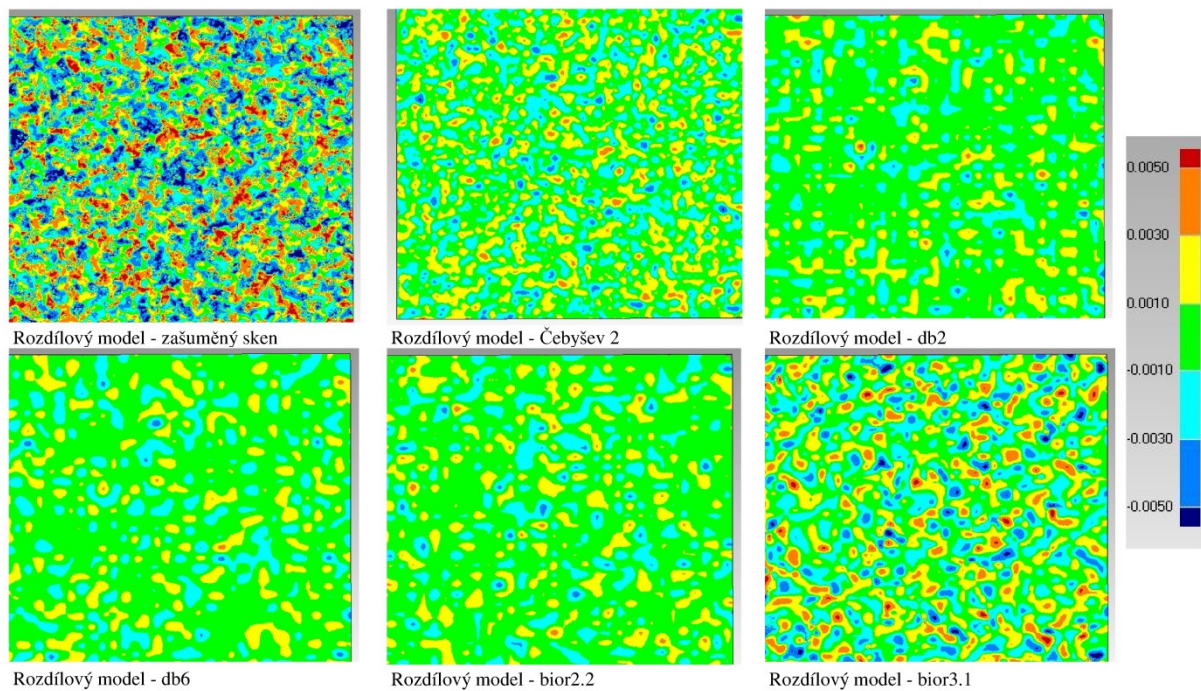
5.4.8.2 Virtuální sken roviny

Byl vytvořen virtuální sken roviny s rozlišením 2 mm x 2 mm o velikosti 129 x 129 bodů. Byly zvoleny stejná kritéria hodnocení úspěšnosti odšumění jako v prvním případě koule. Použité mateřské vlnky byly shodné s prvním případem a přidána vlnka Haar. Tato vlnka by díky své nespojitosti mohla mít uplatnění při odšumění roviny. V následující tabulce jsou opět uvedeny parametry proložení roviny a parametry porovnání rozdílových modelů bezchybné roviny, zašuměné roviny a různých druhů odšumění. Počet vzorků signálu N=2. Jako srovnávací metoda byla použita metoda proložení Čebyševových polynomů druhého stupně.

Tab. 5.10.: Srovnání úspěšnosti odšumovacích metod – virtuální sken roviny

Metoda odšumění	Směrodatná odchylka proložení roviny [mm]	Parametry rozdílových modelů		
		Minimální odlehlost [mm]	Maximální odlehlost [mm]	Směrodatná odchylka rozdílového modelu [mm]
Virtuální sken	0,0	-	-	-
Sken šum $\sigma=4\text{mm}$	3,9	-12,5	12,5	4,1
Čebyšev 2.řád	1,6	-5,8	5,6	1,4
Wavelet - db2	1,0	-5,8	6,7	1,0
Wavelet - db6	1,0	-4,3	4,1	1,0
Wavelet - bior2.2	1,1	-5,3	5,1	1,1
Wavelet - bior3.1	2,2	-9,6	9,3	2,1
Wavelet - haar	1,0	-5,8	4,9	1,0

Také při odšumění roviny dosahuje použití vlnkové transformace výborných výsledků. Stejně jako v prvním případě dosahuje nejlepšího výsledku použití Daubechies 6. řádu. Na následujícím obrázku (Obr. 5.34) je vizuální porovnání.

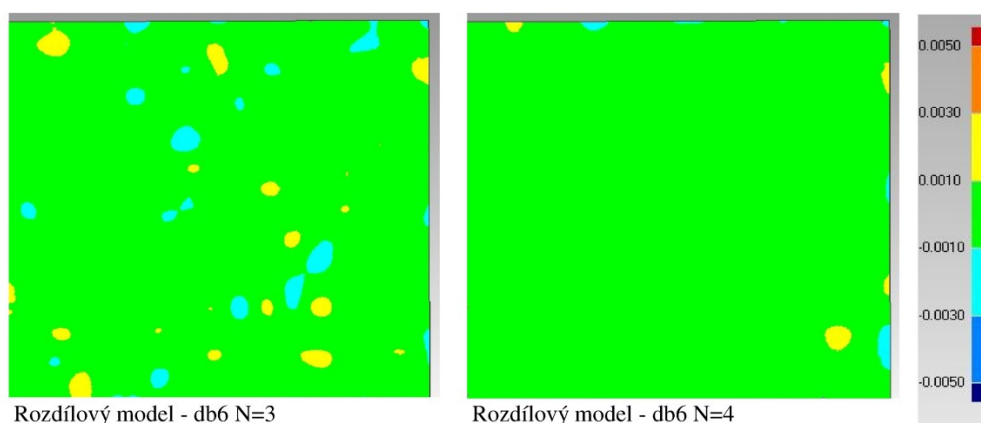


Obr. 5.34: Vybrané rozdílové modely – virtuální sken roviny

Také z vizuálního hlediska dosahuje vlnková transformace výborných výsledků. Také zde můžeme výsledky ještě zlepšit zvýšením počtu vzorku signálu. V následující tabulce a obrázku je opět uveden wavelet db6 pro počet vzorku $N = 3$ a $N = 4$.

Tab. 5.11.: Srovnání odšumovacích metod db6 N=3, N=4 – virtuální sken roviny

Metoda odšumění	Směrodatná odchylka proložení roviny [mm]	Parametry rozdílových modelů		
		Minimální odlehlost [mm]	Maximální odlehlost [mm]	Směrodatná odchylka rozdílového modelu [mm]
Wavelet - db6 (N=3)	0,5	-2,0	2,3	0,5
Wavelet - db6 (N=4)	0,3	-2,1	1,3	0,3



Obr. 5.35: Rozdílové modely db6 N=3, N=4 – virtuální sken roviny

Dle očekávání u roviny dosáhlo zvýšení počtů vzorků výborných výsledků (Obr. 5.35). Další zvyšování počtu vzorků již ale nevede ke snížení šumu, nýbrž k „rozvlnění“ dat.

5.4.8.3 Shrnutí a závěry

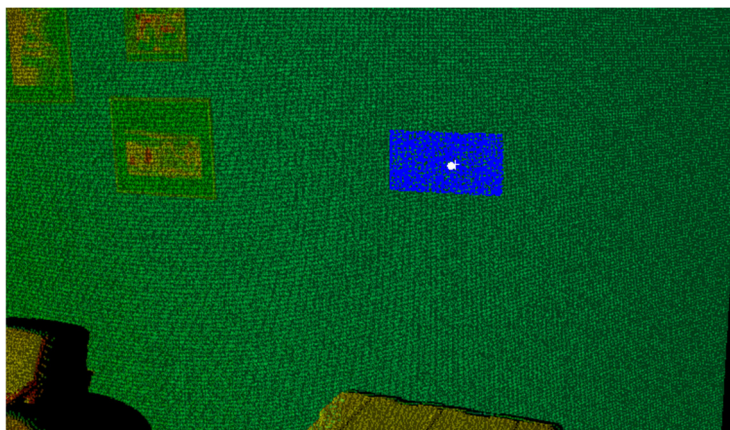
Dle výše uvedených výsledků můžeme jednoznačně konstatovat, že metoda odšumění dat laserového skenování pomocí vlnkové transformace je velice účinná. Velmi důležitá je však volba správné mateřské vlnky, úrovně prahování, druhu prahování a počtu vzorků signálu. S ohledem na dosažené výsledky při testování na virtuálních skenech bylo v následující kapitole přistoupeno k testování na reálném skenu.

5.4.9 Testování přínosu na skutečných skenech

Pro ověření přínosu vlnkové transformace bylo provedeno testování také na skutečných skenech skeneru Leica HDS 3000.

5.4.9.1 Sken interiérové příčky (roviny)

Výřez roviny ze skutečného naskenovaného mračna je prvním příkladem využití vlnkové transformace (Obr. 5.36).



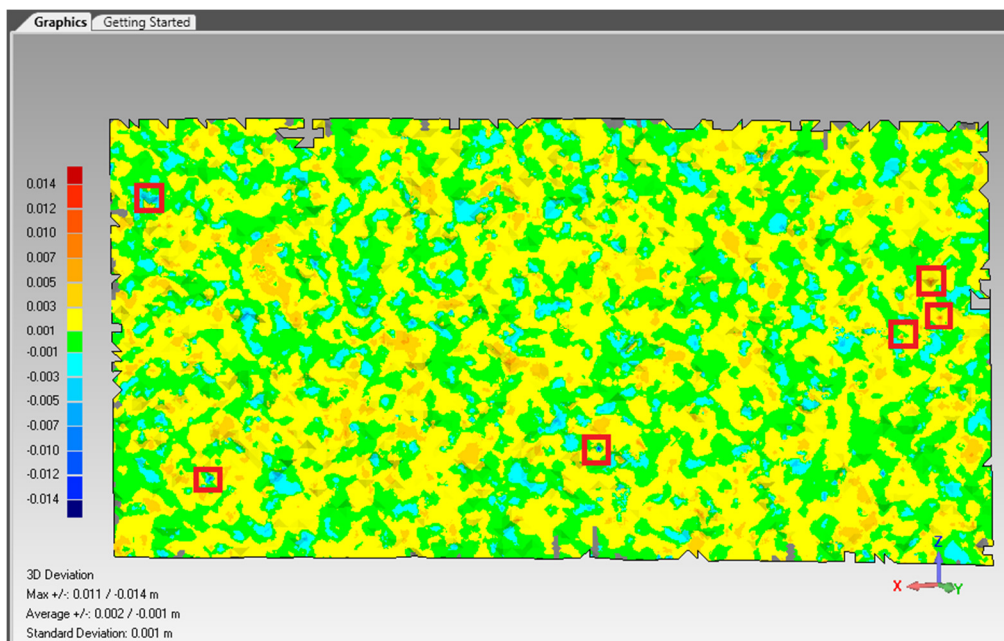
Obr. 5.36: Pořízený výřez roviny o velikosti 210 mm x 420 mm, rozlišení 5 mm x 5 mm.

V následující tabulce jsou shrnuty výsledky proložení roviny jednotlivými mračny bodů a údaje o počtu vytvořených trojúhelníků z daného mračna bodů. Pro reálné skeny byla zkušebně z důvodu podobnosti k vlnkám Daubechies využita vlnka Symlet 8. řádu.

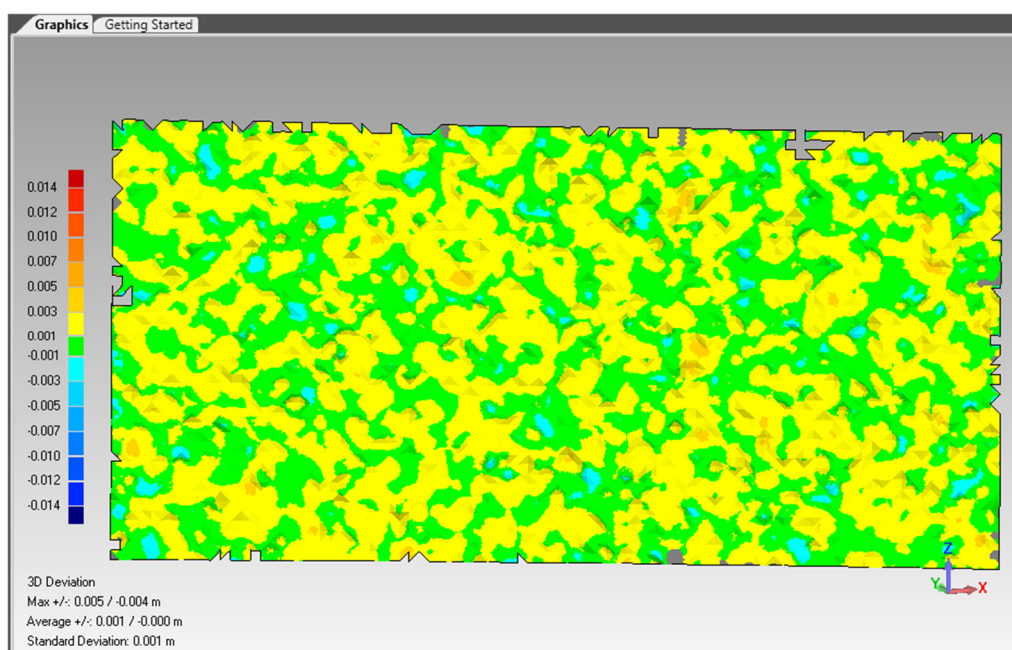
Tab. 5.12.: Tabulka proložené roviny a počtů trojúhelníků – rovina

	Směrodatná odchylka proložení	Odlehlost od roviny min/max	Počet vytvořených Δ
Průměrný sken - 4 skeny	0,001	-0,004 / 0,004	8108
Originální sken	0,002	-0,006 / 0,006	!7866!
Wavelet - db6	0,001	-0,005 / 0,005	8088
Wavelet - sym8	0,001	-0,005 / 0,005	8139
Wavelet - bior3.1	0,001	-0,005 / 0,004	8022
Wavelet - db6 - N2	0,001	-0,002 / 0,002	8219

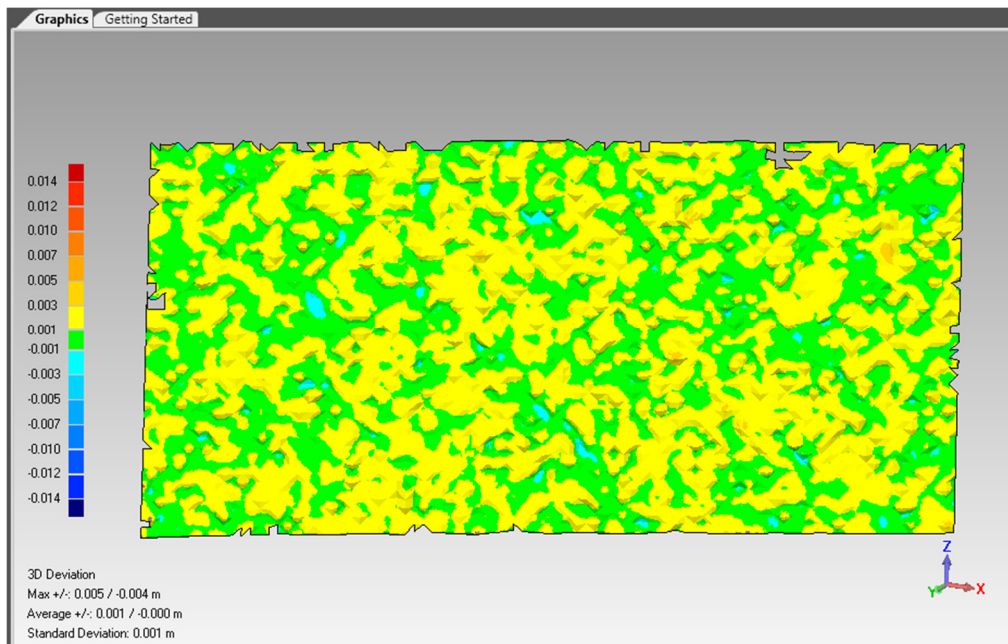
Z tabulky 5.12 vidíme, že použitím vlnkové transformace dojde k mírnému zlepšení. Důležitější a významnější je výrazné zlepšení v počtu vytvořených trojúhelníků. Použitím vlnkové transformace jsou tedy odstraněny lokální maxima a tím nedochází ke vzniku děr v modelu. Jako referenční metodu pro všechny porovnání bereme průměrovaný sken, který, jak je uvedeno v [1] a [40], má prokazatelně vyšší přesnost a z velké části má náhodný šum odstraněn. Pro wavelet db6 byl zkušebně použit počet vzorků signálu $N=2$. Toto dvojité vzorkování může být s výhodou použito při „hledání“ roviny, ale při spojitých útvarech s velkými detaily by mohlo vést k vyhlazení detailů. Pro lepší představu jsou uvedeny rozdílové modely (Obr. 5.37, Obr. 5.38 a Obr. 5.39).



Obr. 5.37: Rozdílový model s vyznačením max. a min. - průměrný sken x originální sken.



Obr. 5.38: Rozdílový model - průměrný sken x Wavelet db6 – N = 1

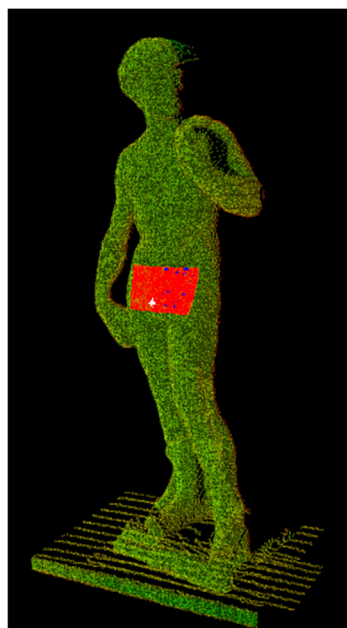


Obr. 5.39: Rozdílový model - průměrný sken x Wavelet db6 – N = 2

Z rozdílových modelů je patrné, že došlo k odstranění lokálních minim a maxim a také k celkově přesnějšímu modelu roviny. Rozdíl mezi rozdílovým modelem při použití vzorkování N = 1 a N = 2 není příliš znatelný.

5.4.9.2 Sken sochy Davida (spojitý útvar)

Jako další útvar pro otestování přínosu vlnkové transformace pro zpřesnění laserového skenování byl použit výřez ze sochy Davida o rozměru 80 mm x 140 mm (Obr. 5.40).



Obr. 5.40: Pořízený výřez ze sochy Davida o velikosti 80 mm x 140 mm, rozlišení 3 mm x 3 mm.

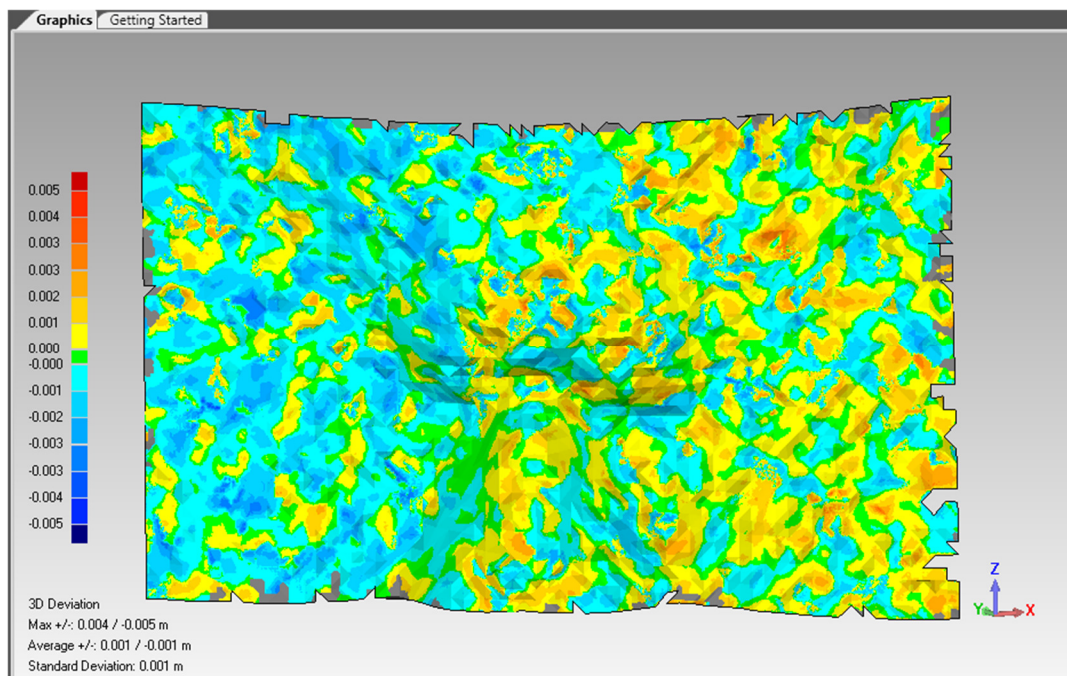
Jelikož se spojitým útvarem nedá proložit jednoznačný útvar, pro posouzení přínosu vlnkové transformace poslouží zjištění minimální a maximální vzdálenosti mezi jednotlivými modely. Jako vztažný model, ke kterému budeme provádět srovnání originálního skenu a jednotlivých druhů waveletů, poslouží opět průměrný sken z 10 skenů.

Tab. 5.13.: Tabulka odlehlosti od průměrného skenu a počtů trojúhelníků –výřez David

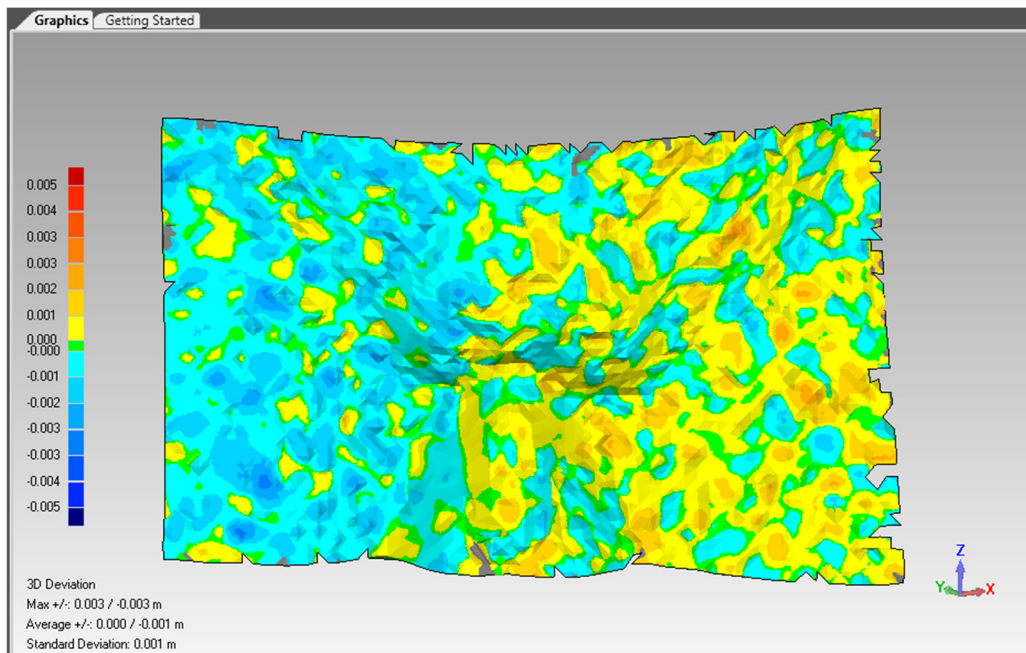
	Odlehlost průměrného skenu min/max [mm]	Počet vytvořených Δ
Průměrný sken - 10 skenů		5486
Originální sken	-0,004 / 0,005	!4736!
Wavelet - db6	-0,003 / 0,003	5462
Wavelet - sym8	-0,003 / 0,003	5477

Z tabulky 5.13. vidíme, že došlo jak k zmenšení odlehlosti od průměrného modelu, tak zároveň k výraznému vzrůstu vytvořených trojúhelníků. Vlnka db6 a sym8 dosáhla přibližně stejných výsledků.

Pro lepší představu o přínosu vlnkové transformace jsou opět uvedeny rozdílové modely odlehlostí jednotlivých modelů (Obr. 5.41 a Obr. 5.42).



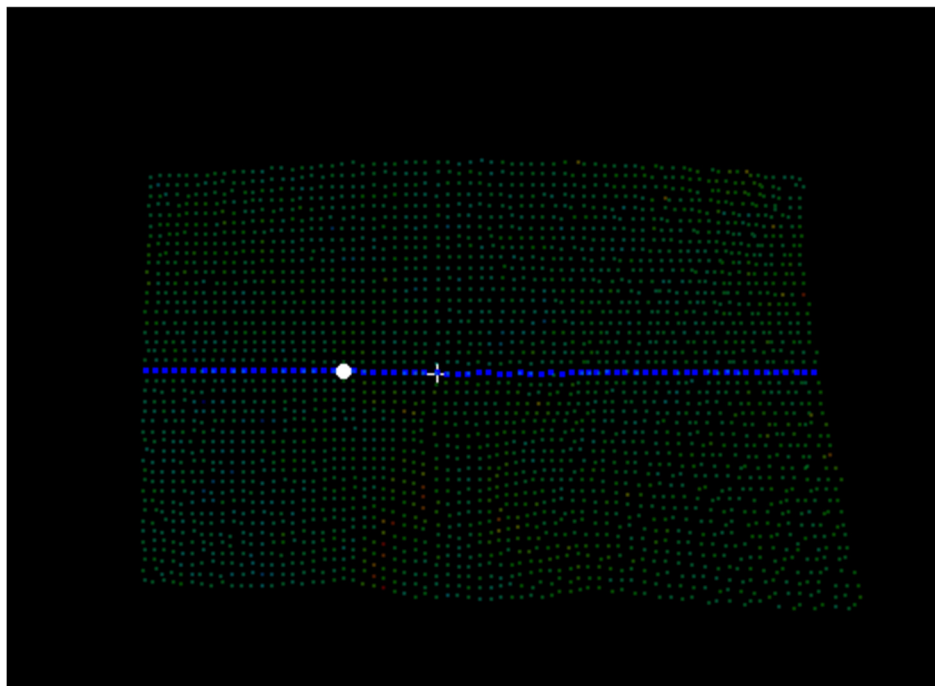
Obr. 5.41: Rozdílový model - průměrný sken x originální sken



Obr. 5.42: Rozdílový model - průměrný sken x Wavelet db6.

Z obrázků Obr. 5.41 a Obr. 5.42 je jasně vidět, že vlnková transformace odstranila všechny lokální maximální a minimální odchylky.

Jako další možnost srovnání úspěšnosti odšumnění pomocí wavelet byl vytvořen řez zkoumaným výřezem. Řez byl veden středem vybraného výřezu (Obr. 5.43 a Obr. 5.44).



Obr. 5.43: Umístění řezu ve vybraném výřezu.



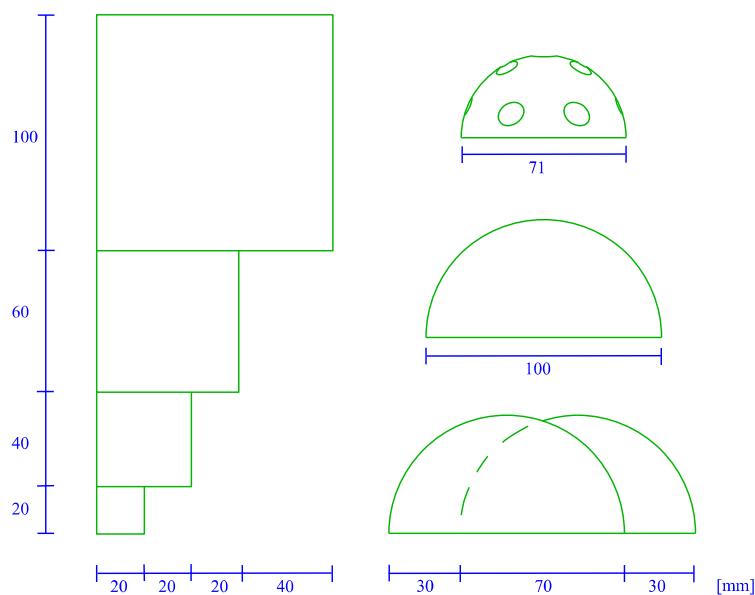
Obr. 5.44: Graf řezu pro jednotlivá mračna bodů.

Z grafu řezů (Obr. 5.44) je vidět, že i na spojitém útvaru ani průměrování z 10 skenů nedokáže odstranit lokální problémy náhodného šumu (viz. šipka v grafu). Obě metody odstranění šumu, a to jak průměrování, tak vlnková transformace, ale velkou část náhodného šumu eliminovaly.

5.4.9.3 Sken testovacích přípravků

Pro testování vlnkové transformace byla využita středová část testovacích desek, kde se nachází celkem osm krychlí - dvě sady, každá obsahující čtyři krychle o hranách 20 mm, 40 mm, 60 mm a 100 mm. Jedna sada je rozmístěna samostatně, druhá tvoří pyramidu. Dalším prvkem je dřevěná polokoule o průměru 100 mm a dvě čtvrtiny koule o stejném průměru, které jsou naproti sobě, ale posunuty o 30 mm, jak je patrné z následujícího obrázku (Obr. 5.45). Posledními testovacími prvky na desce jsou dvě poloviny florbalového míčku, které jsou, jak je patrné z poloh děr v míčku viz obr. 5.6, vůči sobě natočeny o 45°.

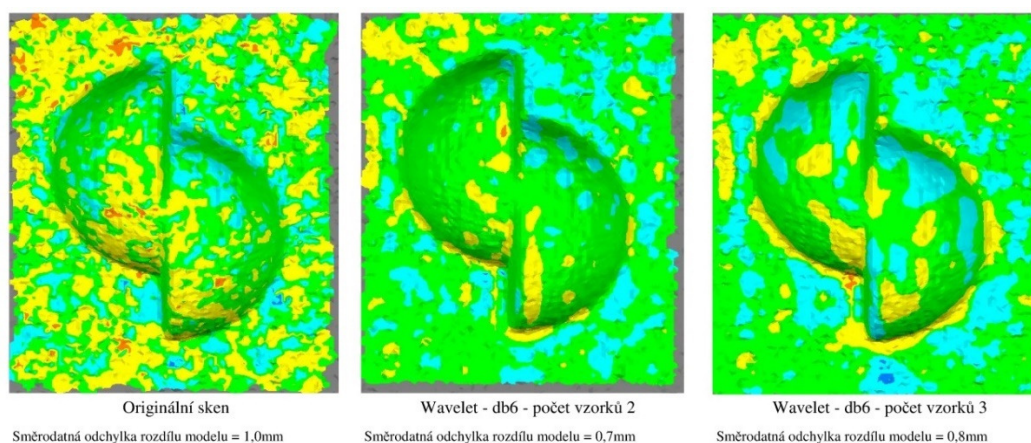
Florbalový míček má průměr 71 mm a průměr jeho děr je 10 mm.



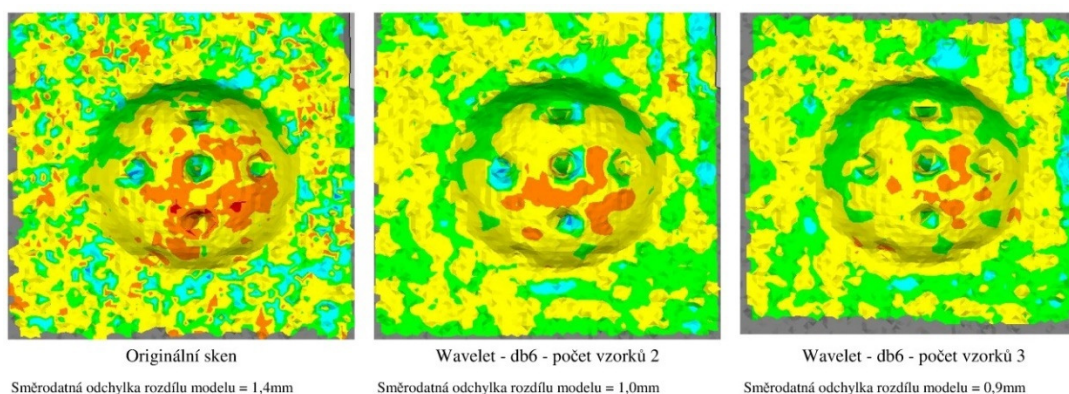
Obr. 5.45: Nárýsy testovacích přípravků.

5.4.9.4 Měření a aplikace vlnkové transformace

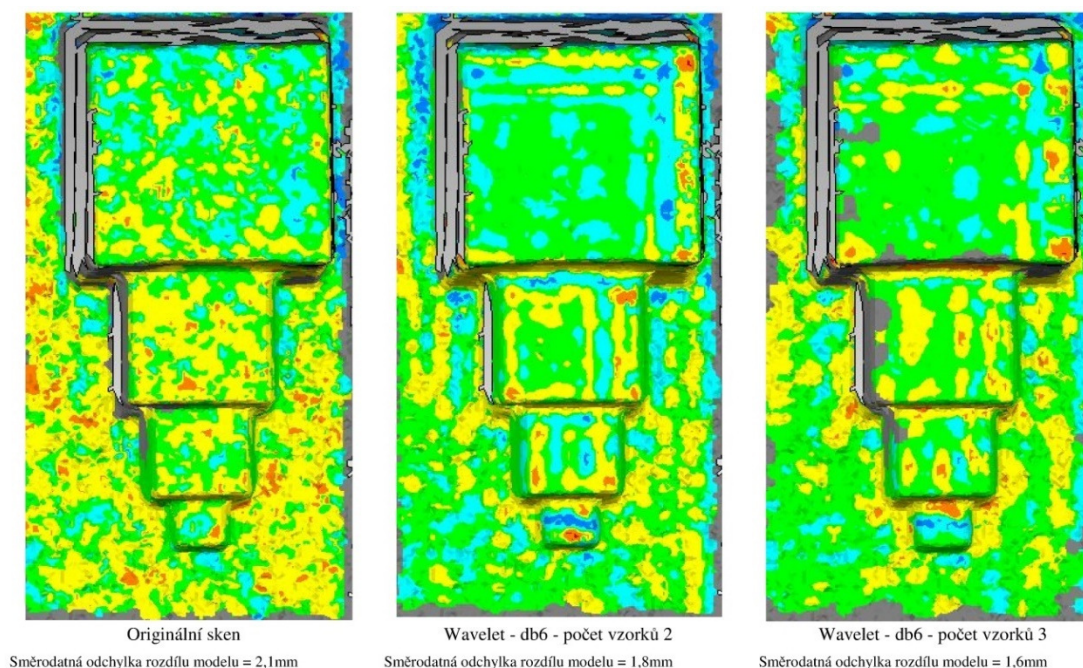
Skenování bylo provedeno již zmíněným skenerem katedry speciální geodézie Leica HDS3000. Skenováno bylo na vzdálenost 5,2 metrů s vzorkováním 2 mm x 2 mm. Dle výsledku testování na virtuálním skenu byla jako mateřská vlnka zvolena Daubechies 6. řádu. Při testování na virtuálních skenech byl přínos testován jen na jednoduchých útvarech. Na testovacích deskách jsou současně jak spojitě, tak nespojitě objekty a razantní přechody mezi nimi. Jako vztažný model byl použit sken pomocí multistanice Leica Nova MS50, která vykazuje minimální délkový šum. Hustota skenování vztažného skenu byla 1 mm x 1 mm. Skeny pořízené skenerem Leica HDS3000 byly na vztažný sken natransformovány pomocí 4 vřícovacích bodů v rozích desky viz. 425.1.2.2. Jednotková směrodatná odchylka transformace byla 0,8 mm. V následujících obrázcích (Obr. 5.46, Obr. 5.47 a Obr. 5.48) jsou uvedeny rozdílové modely jednotlivých vybraných přípravků.



Obr. 5.46: Rozdílové modely čtvrtiny koule.



Obr. 5.47: Rozdílové modely florbalový míček.



Obr. 5.48: Rozdílové modely pyramida z kostek.

Z obrázků (Obr. 5.46, Obr. 5.47 a Obr. 5.48) je patrné zlepšení ve všech uvedených případech. Zlepšení však není tak markantní jako v případech virtuálních skenů.

5.4.10 Zhodnocení využití vlnkové transformace pro redukcí dat v TLS

Při testování na virtuálních skenech dosáhla vlnková transformace vynikajících výsledků, a to jak na virtuálním skenu roviny, tak na virtuálním skenu koule.

Na reálných skenech přínos redukce šumu nenaplnil očekávání z virtuálního skenu. Jedním z pravděpodobných důvodů je jiná charakteristika šumu (jiná směrodatná odchylka) než u virtuálního skenu. Z tohoto důvodu nebyla tolik účinná mateřská vlnka.

Z výše uvedených poznatků můžeme konstatovat, že vlnková transformace je použitelná k odstranění délkového šumu. Velkým problémem a limitujícím faktorem aplikace této matematické metody je tvorba přesné plně pravidelné délkové matice.

5.5 Úspěšnost metod redukce šumu v datech TLS v závislosti na skenované vzdálenosti a zvolené hustotě skenování.

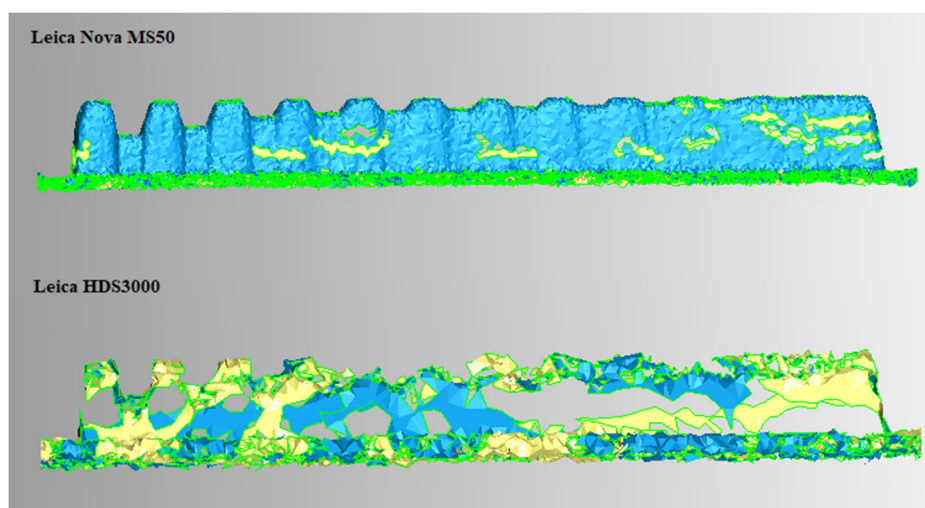
Za účelem testování vlivu metod redukce šumu v datech terestrického skenování a jejich závislosti na vzdálenosti a hustotě skenování byla pořízena data s různou hustotou skenování jmenovitě 2 mm x 2 mm, 4 mm x 4 mm, 6 mm x 6 mm a 8 mm x 8 mm a z různých vzdáleností a to cca 5 m, 12 m, 20 m a 32 m. Pro toto testování byl zvolen dříve zmíněný skener Leica HDS 3000 dostupný na katedře speciální geodézie. Minimální velikost hustoty skenování 2 mm x 2 mm byla zvolena z důvodu, že při větší hustotě mívá skener Leica HDS3000 problém se zápisem naměřených dat.

Jako referenční model pro porovnání úspěšnosti metod odšumění byl pořízen sken multistanicí Leica Nova MS50 při hustotě skenování 1 mm x 1 mm ze vzdálenosti 5 m. Tento přístroj byl volen z důvodu výrazně nižšího šumu v získaných datech (Obr. 5.49).

K vyhodnocení úspěšnosti metod redukce šumu byly využity objekty uvnitř testovacích desek.

Vyhodnocení bylo uvedeno v diplomové práci Jana Bartůňka, která vznikla pod mým vedením [52].

Vzhledem k velkému objemu dat budou v následujících kapitolách představeny pouze ty nejzajímavější případy pro konkrétní vzdálenost a hustotu skenování.



Obr. 5.49: Porovnání kvality původních skenů, vzdálenost skenování 5 metrů.

5.5.1 Použité metody redukce šumu

Pro porovnání závislosti úspěšnosti redukce šumu dat laserového skenování na hustotě a vzdálenosti skenování byl využit jeden komerční a jeden akademický software.

5.5.1.1 Nekomerční software Denoiser

Jedná se o nekomerční software vyvinutý prof. Ing. Martinem Štronerem, Ph.D. na Katedře speciální geodézie. Jak již bylo zmíněno dříve jedná, se o software, který pracuje na principu prokládání matematických ploch skenovanými body a jejich vyhlazení právě k této proložené ploše. Důležitým parametrem tohoto programu je to, že na vstupu musí být data původní netransformovaná. Pro potřeby testování byla provedena redukce šumu následujícími metodami: průměr, rovina, kvadrika, Čebyševův polynom 2. stupně, Čebyševův polynom 3. stupně a Čebyševův polynom 4. stupně a to pomocí vypočtu MNČ a robustní metodou (norma L1). Maximální oprava byla volena jako 10 mm a ostatní parametry byly ponechány v základním nastavení. Z předchozích testování a výsledků byl zvolen počet bodů okolí pro hustotu 2 mm x 2 mm a 4 mm x 4 mm 25 bodů a pro hustotu skenování 6 mm x 6 mm a 8 mm x 8 mm 9 bodů okolí.

5.5.1.2 Komerční software Geomagic Studio

Při výpočtu redukce šumu byla zvolena stejně jako v případě Denoiseru hodnota maximální opravy 10 mm. Byly použity 3 dostupné metody a to Free-form shapes, Prismatic shapes (conservative) a Prismatic shapes (aggressive). Redukce šumu v sw. Geomagic byla provedena pro všechny hustoty na vzdálenost 5 metrů. Více o programu Geomagic je uvedeno v kapitole 4.2.10.

5.5.2 Příprava a zhodnocení metod redukce šumu

Po provedení matematické redukce šumu a očištění mračen byla tato mračna natransformována pomocí sw. XYZTrans přes identické body v rozích testovací desky. Vztažné skeny z multistanice Leica MS50 byly také odšuměny v sw. Denoiser a to metodou průměr s okolím 9 bodů, důvodem je zvýšení počtu trojúhelníků v TIN.

Vyhodnocení přínosu redukce šumu v datech TLS byla prováděna dvěma způsoby, a to: za prvé numericky na základě poklesu směrodatné odchylky a velikosti průměrné kladné a záporné odchylky. Druhým způsobem vizuálním porovnáním rozdílových modelů. Toto vizuální zhodnocení je nedílnou součástí vyhodnocení početního.

Velikosti odchylek v dále uvedených tabulkách jsou vypočteny v programu Geomagic a vztahují se k celé velikosti testovacích desek. Velikosti odchylek uvedené ke konkrétním rozdílovým modelům jsou vztaženy pouze k danému lokálnímu výřezu, proto se jejich hodnoty od hodnot uvedených v tabulkách mohou lišit.

5.5.2.1 Vzdálenost skenování 5 metrů.

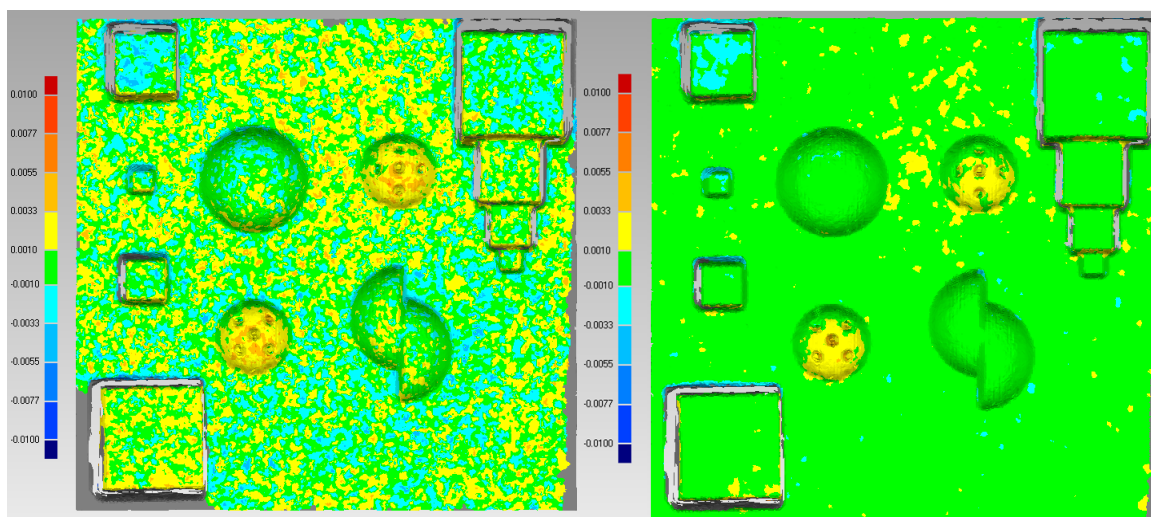
5.5.2.1.1 Hustota skenování 2 mm x 2 mm

Na nejkratší vzdálenosti a při největší hustotě skenování je otestováno 15 druhů redukce šumu. Redukce byla provedena výše uvedenými metodami, a to jak pro výpočet MNČ, tak pro robustní metodu. Číselné porovnání je uvedeno v následující tabulce. Hodnoty odchylek byly vypočteny v programu Geomagic.

Tab. 5.14.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.

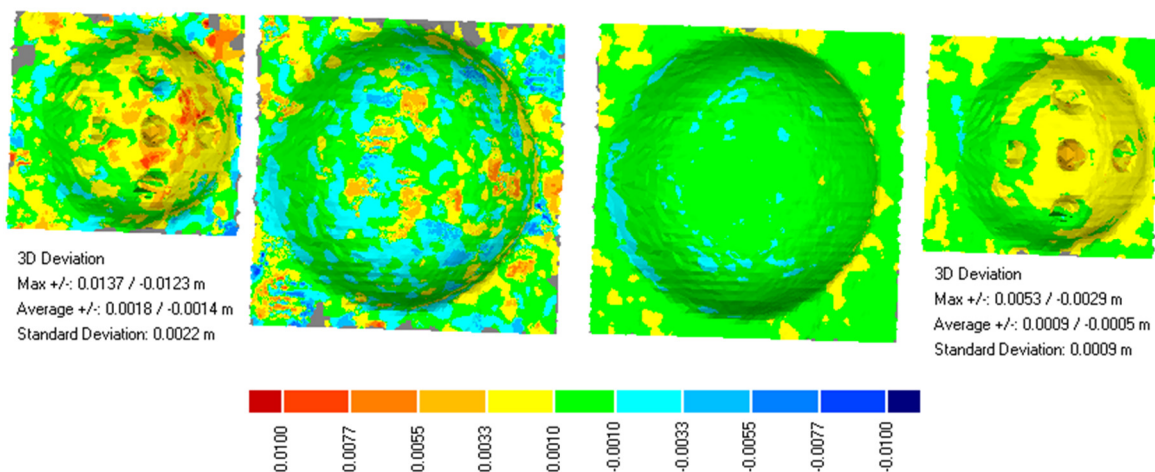
	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,4	1,3	1,7
2	průměr	MNČ	25	0,8	0,7	1,2
3	rovina	MNČ	25	0,8	0,8	1,3
4	kvadrík	MNČ	25	0,9	0,8	1,2
5	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	0,9	0,7	1,1
6	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	0,9	0,7	1,1
7	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,0	1,0	1,5
8	průměr	R	25	0,9	0,7	0,9
9	rovina	R	25	0,8	0,7	1,2
10	kvadrík	R	25	2,0	2,0	2,8
11	Čebyševův pol. 2. řádu	R	25	0,9	0,8	1,3
12	Čebyševův pol. 3. řádu	R	25	1,0	0,8	1,3
13	Čebyševův pol. 4. řádu	R	25	1,1	1,0	1,4
14	Geomagic - Free form shapes			0,9	0,8	1,3
15	Geomagic - Prismatic shapes - conservative			1,1	1,0	1,6
16	Geomagic - Prismatic shapes - aggressive			1,0	0,9	1,4

Nejlépeších výsledků dosáhla metoda průměr, rovina a Čebyševovy polynomy 2. stupně. Nejhoršího výsledku metoda kvadrík, která vedla ke zhoršení původních dat. Srovnání úspěšnosti redukce šumu na Obr. 5.50.



Obr. 5.50: Vlevo neodšuměný sken, vpravo odšuměný průměr (R).

Důvodem selhání metody kvadrika je, že testovaná část desek má hodně rovinných ploch, kde prokládání kvadratickými plochami selhává. Jak je viditelné na následujícím obrázku (Obr. 5.51) ani na kulových plochách nedosáhla metoda kvadrika kvalitních výsledků.



Obr. 5.51: Vlevo kvadrika, vpravo průměr (R).

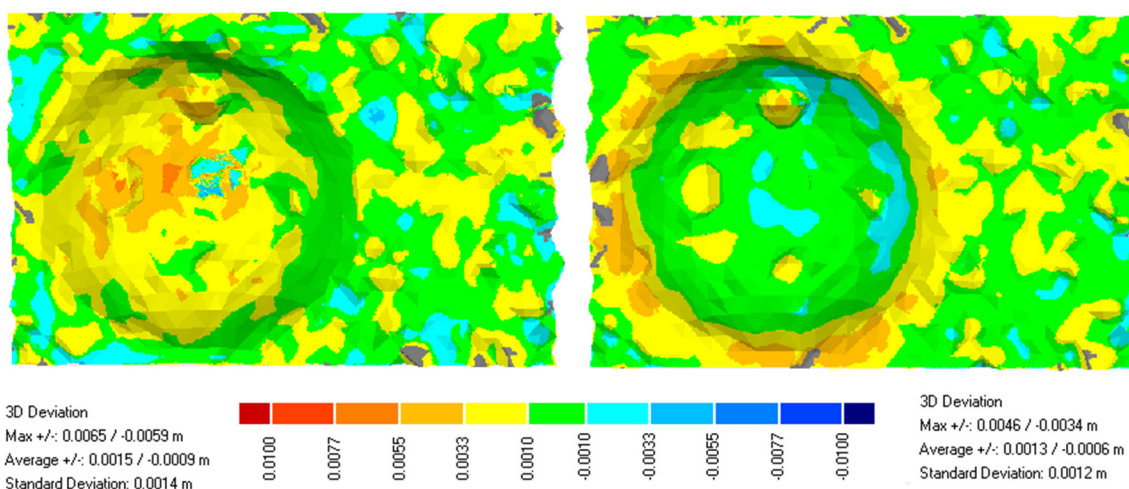
5.5.2.1.2 Hustota skenování 4 mm x 4 mm

Při hustotě skenování 4 mm x 4 mm dochází k výraznému zhoršení rozdílových modelů. Toto výrazné zhoršení je pravděpodobně z části ovlivněno systematickou chybou. Z následující tabulky vyplývá, že nejlepších výsledků redukce šumu dosahuje Čebyševův polynom 4. řádu a metoda průměr (MNC).

Tab. 5.15.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,2	0,8	3,3
2	průměr	MNČ	25	1,0	0,9	1,8
3	rovina	MNČ	25	1,2	0,9	2,9
4	kvadrika	MNČ	25	1,0	0,9	1,8
5	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	1,3	1,0	2,6
6	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	1,1	1,0	2,3
7	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,1	1,1	1,7
8	průměr	R	25	1,0	0,7	2,5
9	rovina	R	25	1,0	0,9	1,9
10	kvadrika	R	25	1,4	1,1	3,1
11	Čebyševův pol. 2. řádu	R	25	1,1	1,0	1,9
12	Čebyševův pol. 3. řádu	R	25	1,4	1,1	3,3
13	Čebyševův pol. 4. řádu	R	25	1,4	1,2	2,9
14	Geomagic - Free form shapes			1,3	0,8	2,9
15	Geomagic - Prismatic shapes - conservative			1,2	1,1	2,2
16	Geomagic - Prismatic shapes - aggressive			1,1	1,0	2,0

Jak již bylo zmíněno, nedílnou součástí vyhodnocení je také grafické srovnání účinnosti redukce šumu. Na následujícím obrázku jsou uvedeny rozdílové modely pro odšumění Čebyševův polynom 4. řádu a průměr MNČ. Z rozdílových modelů je jasně patrné, že i když metoda průměr dosáhla o málo horších výsledku než metoda Čebyševův polynom 4. řádu, dle rozdílových modelů jsou díry na florbalemém míčku daleko lépe vystihnuty (Obr. 5.52).



Obr. 5.52: Vlevo Čebyševův polynom 4.řádu, vpravo průměr (MNČ).

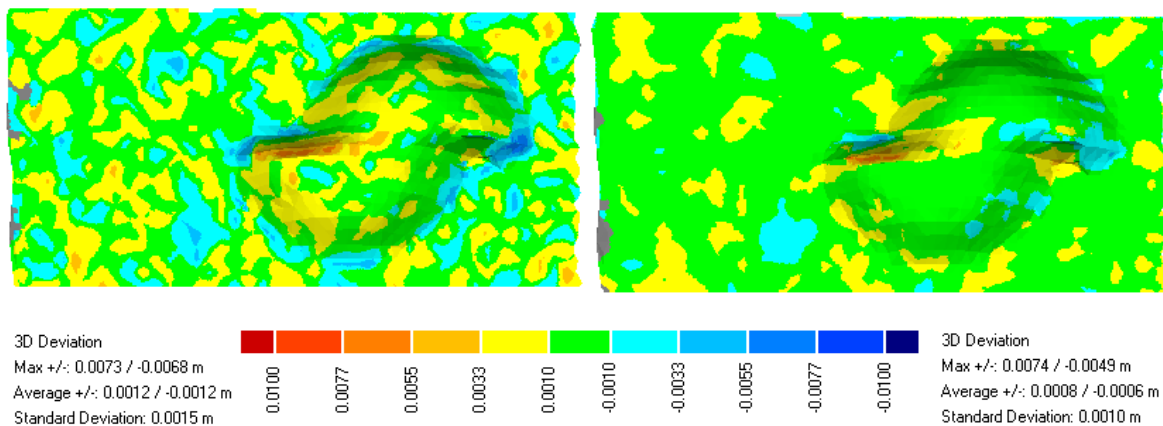
5.5.2.1.3 Hustota skenování 6 mm x 6 mm

Při této hustotě skenování je použito 9 bodů okolí, a to z důvodu, že při nižší hustotě skenování už by vzdálené body neměly žádnou vazbu s odšuměným bodem. Z důvodu snížení počtu bodů okolí nebylo možno aplikovat metodu Čebyševových polynomů 3. a 4. řádu. V následující tabulce jsou uvedeny výsledky jednotlivých metod.

Tab. 5.16.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,5	1,4	1,9
2	průměr	MNČ	9	1,0	0,9	1,5
3	rovina	MNČ	9	1,0	1,3	1,9
4	kvadrík	MNČ	9	1,1	1,0	1,5
5	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	1,3	1,2	1,8
6	průměr	R	9	1,1	1,5	2,2
7	rovina	R	9	1,0	1,0	1,4
8	kvadrík	R	9	1,7	1,6	2,3
9	Čebyševův pol. 2. řádu	R	9	1,4	1,6	2,2
10	Geomagic - Free form shapes			0,9	2,1	3,0
11	Geomagic - Prismatic shapes - conservative			1,2	1,5	2,1
12	Geomagic - Prismatic shapes - aggressive			1,0	2,1	3,1

Nejlépeších výsledku dosahuje metoda průměr (MNČ) a rovina (R). Na následujícím obrázku (Obr. 5.53) je velice dobře patrné, že přínos redukce šumu je výrazný i pro data naskenovaná s menší hustotou. Statisticky nejde o tak výrazné snížení směrodatné odchylky rozdílového modelu, ale vizuálně je zlepšení patrné.



Obr. 5.53: Vlevo neodšuměný, vpravo rovina (R).

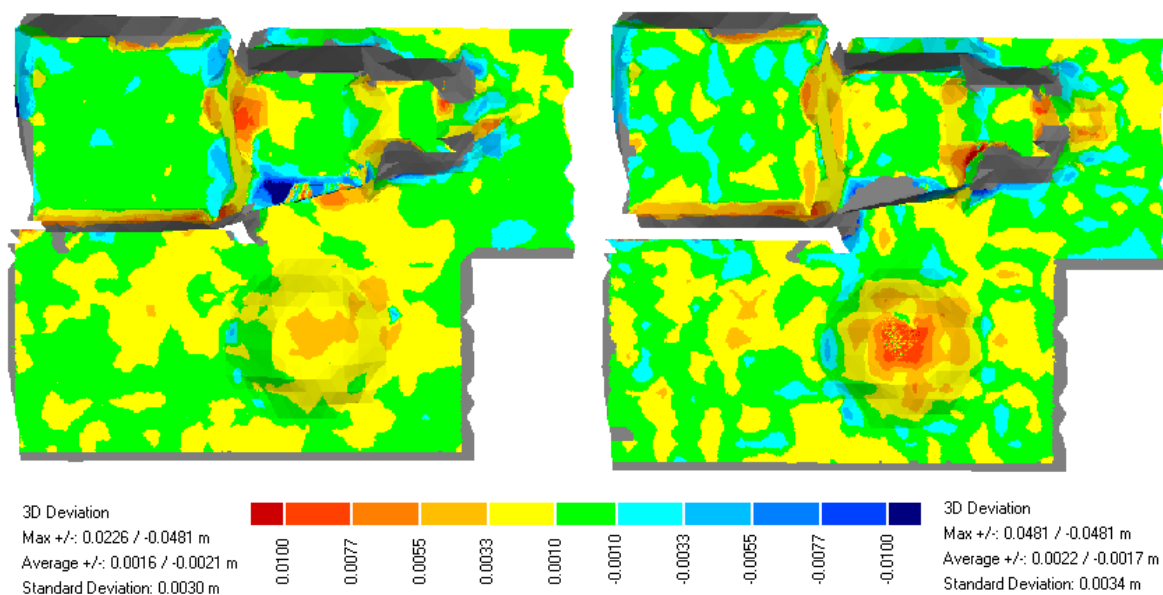
5.5.2.1.4 Hustota skenování 8 mm x 8 mm

Při nízké hustotě skenování 8 mm x 8mm dle očekávání výrazně stoupá směrodatná odchylka rozdílových modelů.

Tab. 5.17: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,8	2,4	3,9
2	průměr	MNČ	9	1,2	2,1	3,3
3	rovina	MNČ	9	1,2	1,9	3,5
4	kvadrík	MNČ	9	1,2	1,5	2,2
5	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	1,5	1,4	2,3
6	průměr	R	9	1,3	1,9	3,1
7	rovina	R	9	1,1	1,4	2,2
8	kvadrík	R	9	1,7	1,9	2,8
9	Čebyševův pol. 2. řádu	R	9	1,6	1,7	2,7
10	Geomagic - Free form shapes			1,1	1,8	3,0
11	Geomagic - Prismatic shapes - conservative			1,5	2,3	3,9
12	Geomagic - Prismatic shapes - aggressive			1,3	2,0	3,6

Nejlépeších výsledků dosahuje kvadrík (MNČ) a rovina (R).



Obr. 5.54: Vlevo rovina R, vpravo Čebyševův polynom 2. řádu.

Z rozdílových modelu na Obr. 5.53 je patrné, že při takto nízké hustotě se již výrazně ztrácí detaily, díry florbalového míčku jsou téměř nerozpoznatelné. Čebyševův polynom 2. řádu dosahuje překvapivě horších výsledků také na kulové ploše florbalového míčku.

Z výsledků uvedených výše pro vzdálenost skenování 5 metrů a hustoty skenování 2 mm x 2 mm až 8 mm x 8 mm můžeme vyslovit závěr, že jako nejlepší metody odšumění lze považovat metodu rovina a průměr, a to jak při proložení metodou MNČ, tak i robustní metodou.

V následujících vyhodnoceních vzdáleností 12 m, 20 m a 32 m budou pro zkoumání vlivu vzdálenosti skenování na úspěšnost metod redukce šumu použity pouze metody rovina, průměr a Čebyševovy polynomy 2. – 4. řádu a metoda proložení MNČ.

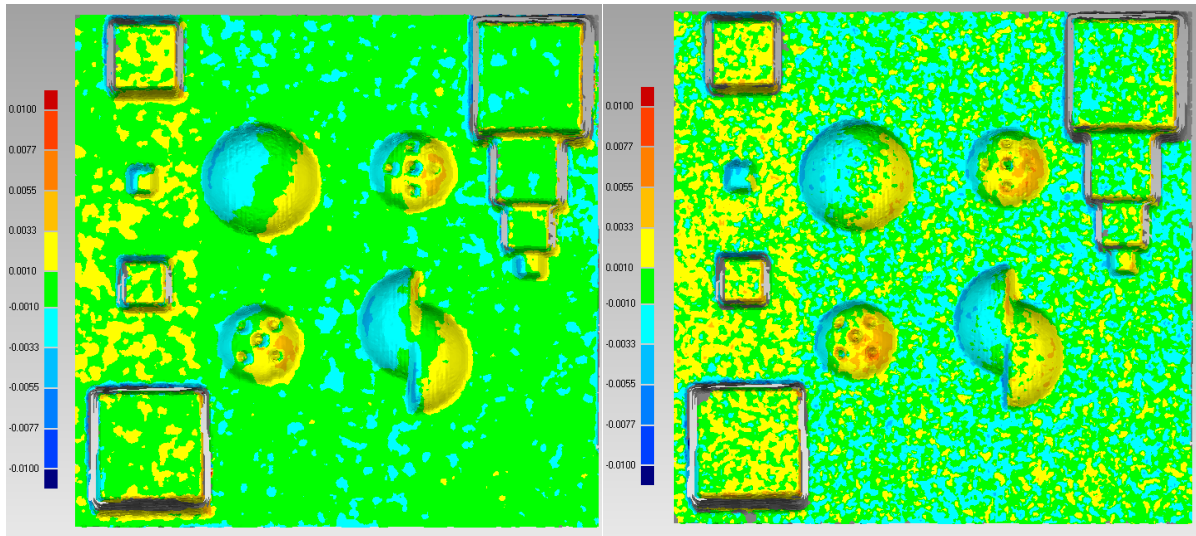
5.5.2.2 Vzdálenost skenování 12 metrů.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny tabulky a rozdílové modely pro vzdálenost skenování 12 metrů.

5.5.2.2.1 Hustota skenování 2 mm x 2 mm

Tab. 5.18.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,6	1,7	2,2
2	průměr	MNČ	25	1,1	1,0	1,7
3	rovina	MNČ	25	1,1	1,0	1,6
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	1,2	1,2	1,8
5	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	1,2	1,1	1,7
6	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,2	1,2	1,6



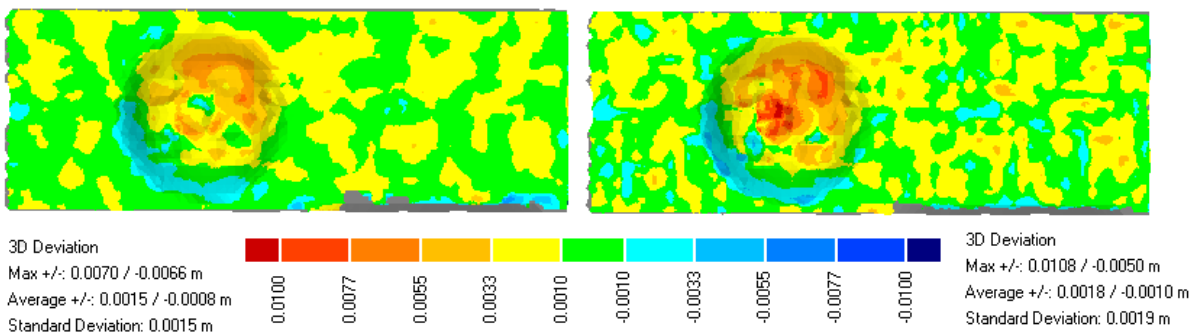
Obr. 5.55: Vlevo rovina (MNČ), vpravo Čebyševův polynom 4. řádu

Z rozdílových modelů (Obr. 5.55) je patrné, že lepšího výsledku dosáhla metoda rovina, i když metoda Čebyševův polynom 4. řádu dosáhla stejné směrodatné odchytky

5.5.2.2.2 Hustota skenování 4 mm x 4 mm

Tab. 5.19.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylna [mm]
1	žádná	-	-	1,8	1,4	2,1
2	průměr	MNČ	25	1,2	1,2	1,6
3	rovina	MNČ	25	1,1	1,5	1,9
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	1,3	1,3	1,8
5	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	1,4	1,2	1,7
6	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,5	1,3	2,0



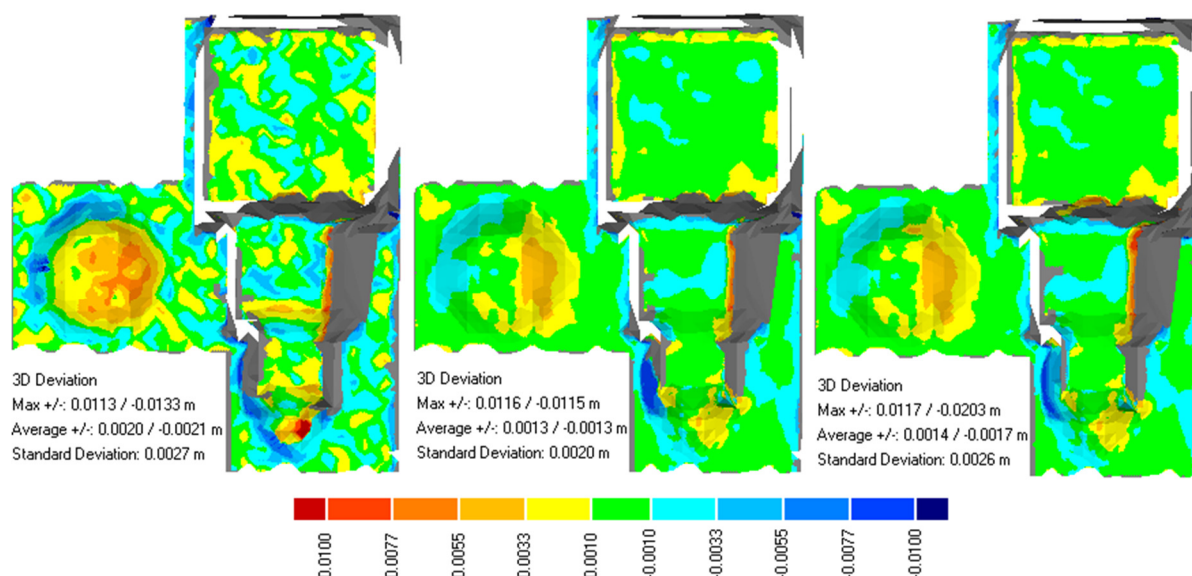
Obr. 5.56: Vlevo Čebyševův polynom 3. řádu, vpravo Čebyševův polynom 4. řádu

Nejllepších výsledku dosáhla metoda průměr. Na obrázku (Obr. 5.56) je zajímavé srovnání metod Čebyševových polynomů 3. a 4. řádu, kde polynom 4. řádu neodstraní lokální maxima na hranách děr ve florbalovém míčku.

5.5.2.2.3 Hustota skenování 6 mm x 6 mm

Tab. 5.20.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,6	1,9	2,5
2	průměr	MNČ	9	1,0	1,1	1,6
3	rovina	MNČ	9	1,0	1,2	1,8
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	1,5	1,5	2,0



Obr. 5.57: Vlevo neodšuměný sken, uprostřed průměr (MNČ), vpravo rovina (MNČ)

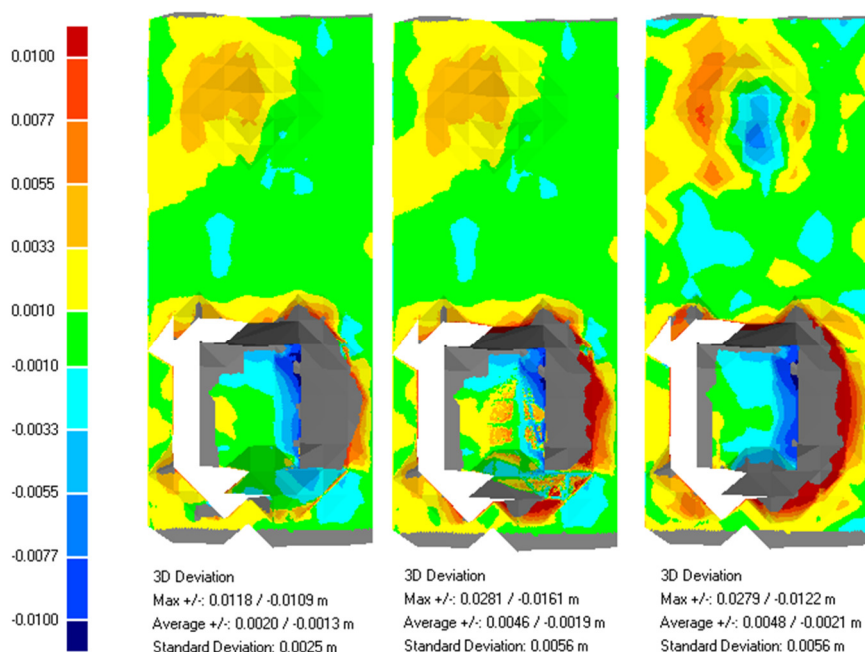
Dle směrodatných odchylek a průměrné kladné a záporné odchylky již přínos metod redukce šumu není tak významný, ale dle rozdílových modelů (Obr. 5.57) je přínos viditelný, a to jak na rovinných plochách, tak na plochách s nenulovou křivostí a na jejich přechodech.

5.5.2.2.4 Hustota skenování 8 mm x 8 mm

Tab. 5.21.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	2,5	2,3	4,3
2	průměr	MNČ	9	1,6	2,0	3,5
3	rovina	MNČ	9	1,7	2,1	3,7
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	2,1	2,1	3,4

Ze samotné podstaty skenování o hustotě skenování 8 mm x 8 mm je problém vytvoření modelu na ostrých hranách. Odšumění se tedy redukuje víceméně na eliminaci maximálních odchylek. Nejlépe si s těmito ostrými přechody poradila metoda průměr (Obr. 5.58). Na obrázku je zobrazena krychle 20 mm a 40 mm.



Obr. 5.58: Vlevo průměr (MNČ), uprostřed rovina (MNČ), vpravo Čebyšev 2.řádu

5.5.2.3 Vzdálenost skenování 20 metrů.

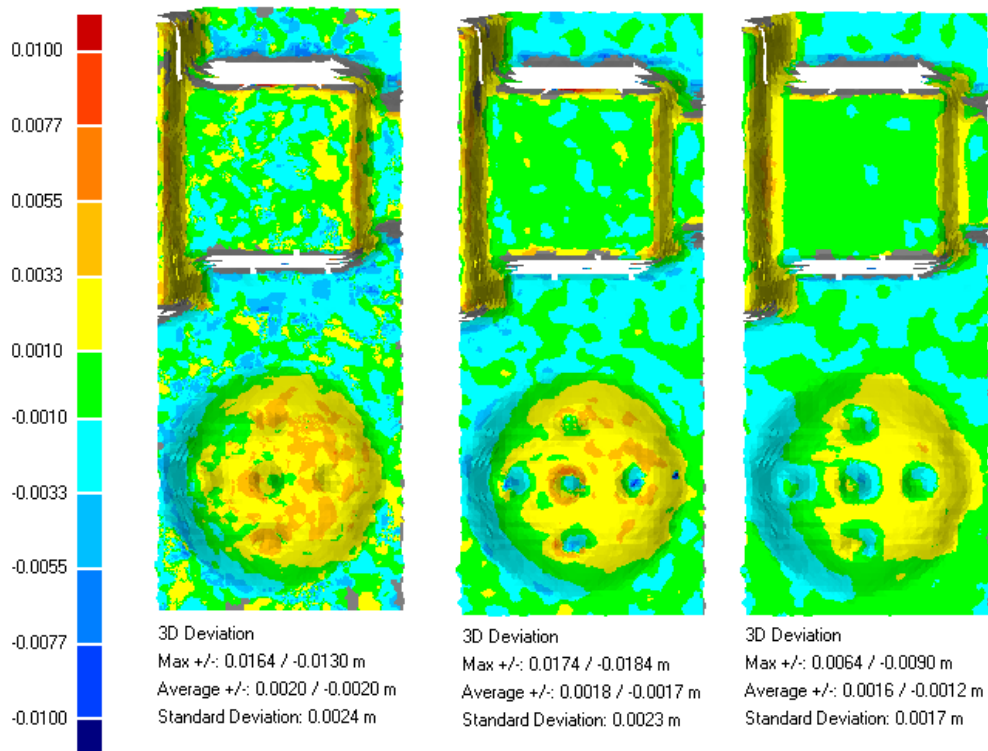
V následujících podkapitolách jsou uvedeny tabulky a rozdílové modely pro vzdálenost skenování 20 metrů.

5.5.2.3.1 Hustota skenování 2 mm x 2 mm

Tab. 5.22.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,3	2,0	2,3
2	průměr	MNČ	25	1,2	1,2	1,4
3	rovina	MNČ	25	1,2	1,4	2,4
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	1,3	1,6	2,6
5	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	1,3	1,4	1,6
6	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,2	1,6	2,1

Jak je z předchozí tabulky patrné, tak výsledky se oproti předchozí skenované vzdálenosti mírně zhoršily. Překvapivé je výrazné zhoršení metody rovina. Další porovnání rozdílových modelu je na Obr. 5.59.



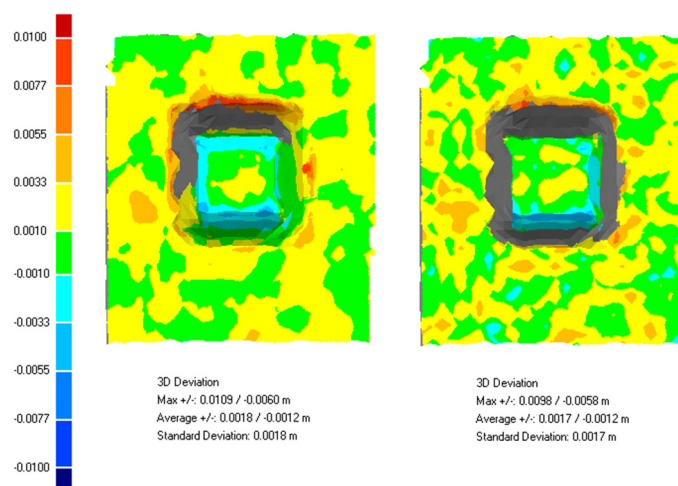
Obr. 5.59: Vlevo neodšuměný, uprostřed Čebyševův polynom 2.řádu, vpravo průměr (MNČ).

5.5.2.3.2 Hustota skenování 4 mm x 4 mm

Tab. 5.23.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,9	1,3	2,1
2	průměr	MNČ	25	1,3	1,2	1,7
3	rovina	MNČ	25	1,3	1,3	1,8
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	1,6	1,3	2,0
5	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	1,5	1,3	2,0
6	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,7	1,2	1,9

V obrázku (Obr. 5.60) jsou porovnány rozdílové modely detailu okolí druhé nejmenší krychle. Z rozdílových modelů je patrné, že vyšší stupeň polynomu hůře redukuje šum na rovinných plochách.

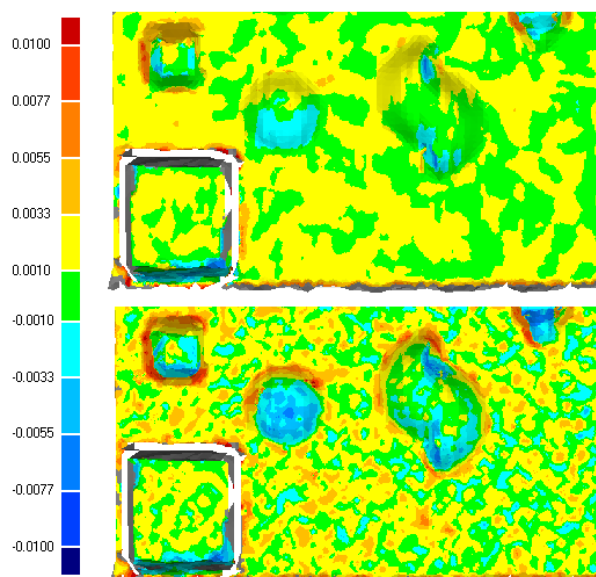


Obr. 5.60: Vlevo Čebyševův polynom 2.řádu, vpravo Čebyševův polynom 4.řádu.

5.5.2.3.3 Hustota skenování 6 mm x 6 mm

Tab. 5.24.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	2,3	1,6	2,7
2	průměr	MNČ	9	1,7	1,9	2,8
3	rovina	MNČ	9	2,0	2,0	3,8
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	2,0	1,6	2,4



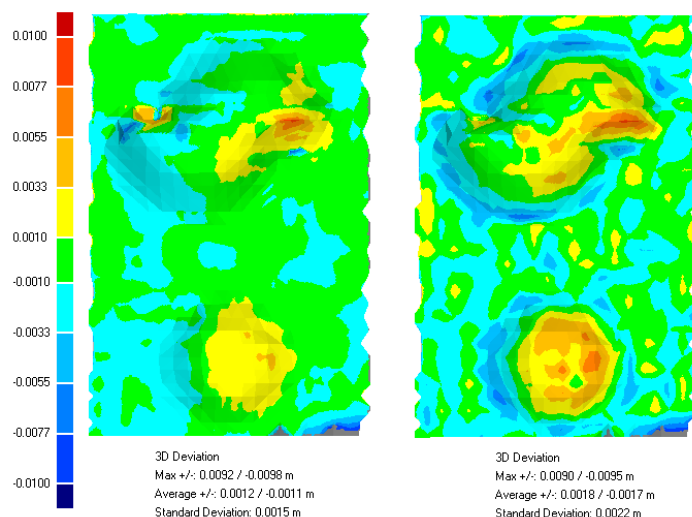
Obr. 5.61: Nahore rovina (MNČ), dole neodšuměný sken.

Z tabulky 5.24. vidíme, že statisticky odšumovací metody výsledky rozdílových modelů zhoršují. Na obrázku (Obr. 5.61). však můžeme pozorovat jednoznačné zlepšení. Na obrázku je uvedena spodní část přípravků a to krychle, kulové plochy i florbalový míček. Důvodem, proč výsledky z grafického a statistického pohledu k sobě nekorrespondují, je situace na ostrých přechodech, kde metoda odšumění rovina zvýrazní maximální odchylky, což je patrné i v tabulce.

5.5.2.3.4 Hustota skenování 8 mm x 8 mm

Tab. 5.25.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,8	2,7	3,8
2	průměr	MNČ	9	1,3	1,6	2,8
3	rovina	MNČ	9	1,3	1,6	2,8
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	1,7	2,0	2,5



Obr. 5.62: Vlevo průměr (MNČ), vpravo Čebyševův polynom 2. řádu.

Z výše uvedeného lze konstatovat, že i zde má statisticky nejlepší výsledky metoda Čebyševův polynom, nicméně opět lze z grafického znázornění (Obr. 5.62) zjistit, že si lépe poradí pouze s maximálními odchylkami a celkově je sken lépe vyhlazen metodami průměr a rovina.

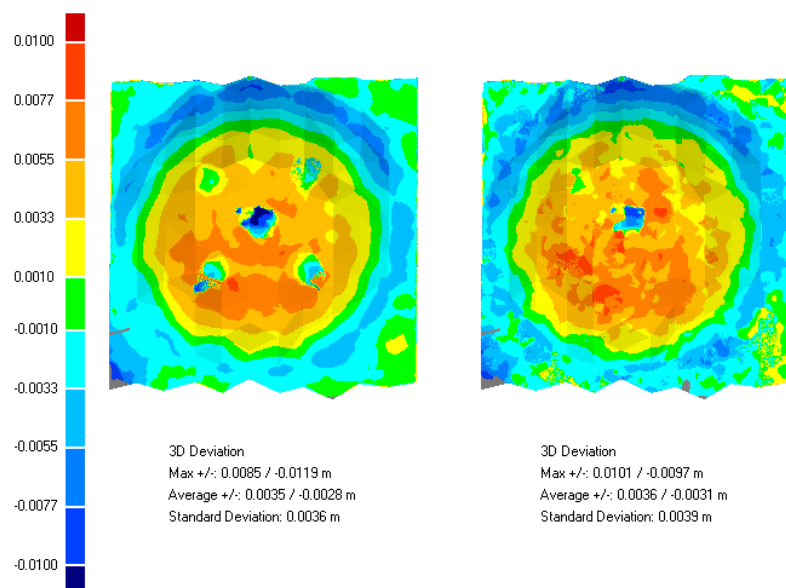
5.5.2.4 Vzdálenost skenování 32 metrů.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny tabulky a rozdílové modely pro vzdálenost skenování 32 metrů.

5.5.2.4.1 Hustota skenování 2 mm x 2 mm

Tab. 5.26.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,6	1,7	2,1
2	průměr	MNČ	25	1,1	1,3	1,9
3	rovina	MNČ	25	1,1	1,3	1,8
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	1,3	1,4	1,9
5	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	1,2	1,6	2,4
6	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,3	1,5	2,0



Obr. 5.63: Vlevo Čebyševův polynom 3. řádu, vpravo neodšuměný sken.

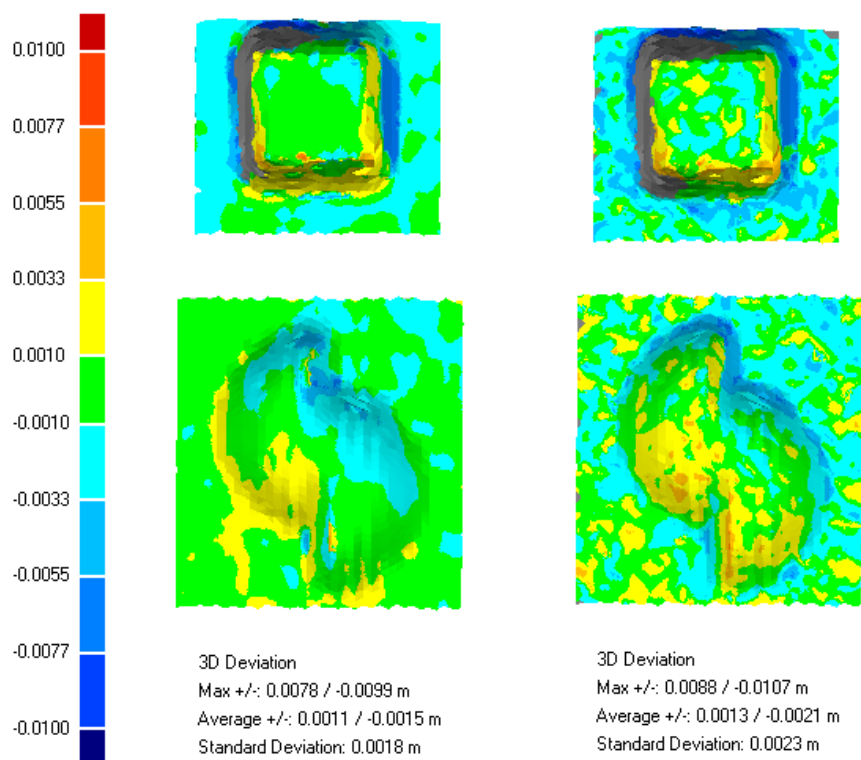
Z číselného vyhodnocení vyplývá, že metoda Čebyševův polynom 3. řádu zhoršuje původní data. Z rozdílového modelu pak jednoznačně vidíme, že odšuměný sken je podstatně kvalitnější a na florbalovém míčku dokážeme poměrně jasně určit jednotlivé díry (Obr. 5.63).

5.5.2.4.2 Hustota skenování 4 mm x 4 mm

Tab. 5.27.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,6	1,9	2,6
2	průměr	MNČ	25	1,1	1,4	2,3
3	rovina	MNČ	25	1,3	1,5	2,4
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	25	1,4	1,7	2,7
5	Čebyševův pol. 3. řádu	MNČ	25	1,4	1,7	2,5
6	Čebyševův pol. 4. řádu	MNČ	25	1,4	1,7	2,4

Na obrázku (Obr. 5.64) se nachází detail druhé největší krychle a dvou čtvrtin koule, které jsou vůči sobě posunuty.



Obr. 5.64: Vlevo rovina (MNČ), vpravo neodšuměný sken.

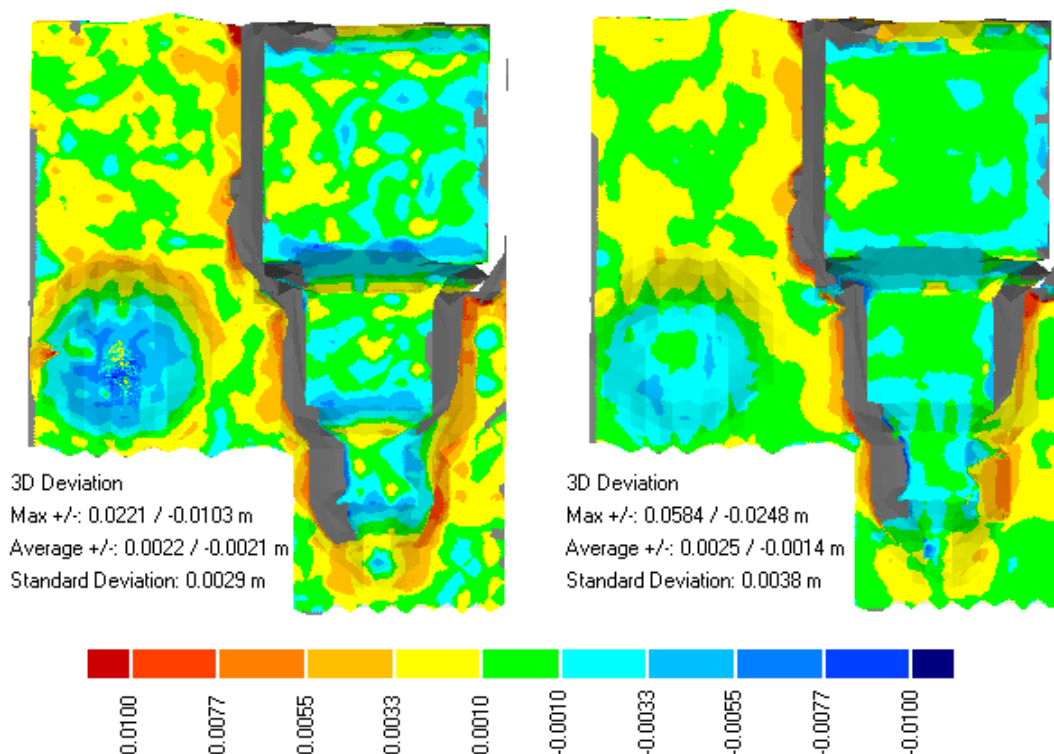
Metody rovina a průměr dosahují prakticky stejných výsledků. I když statisticky zlepšení není výrazné, dle obrázku (Obr. 5.64) je zlepšení odšuměného modelu prokazatelné.

5.5.2.4.3 Hustota skenování 6 mm x 6 mm

Tab. 5.28.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	2,1	1,7	2,9
2	průměr	MNČ	9	1,6	1,1	2,3
3	rovina	MNČ	9	1,5	1,2	2,4
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	1,8	1,6	2,3

Statisticky dosahují všechny metody odšumění srovnatelných výsledků.



Obr. 5.65: Vlevo Čebyševův polynom 2.řádu, vpravo průměr (MNČ).

Z rozdílových modelů (Obr. 5.65) však získáme závěr jako v minulých případech, vyhlazení metodou Čebyševův polynom odstraní hlavně lokální maxima a minima, ale hůře se vyrovnává s vyhlazením rovných ploch.

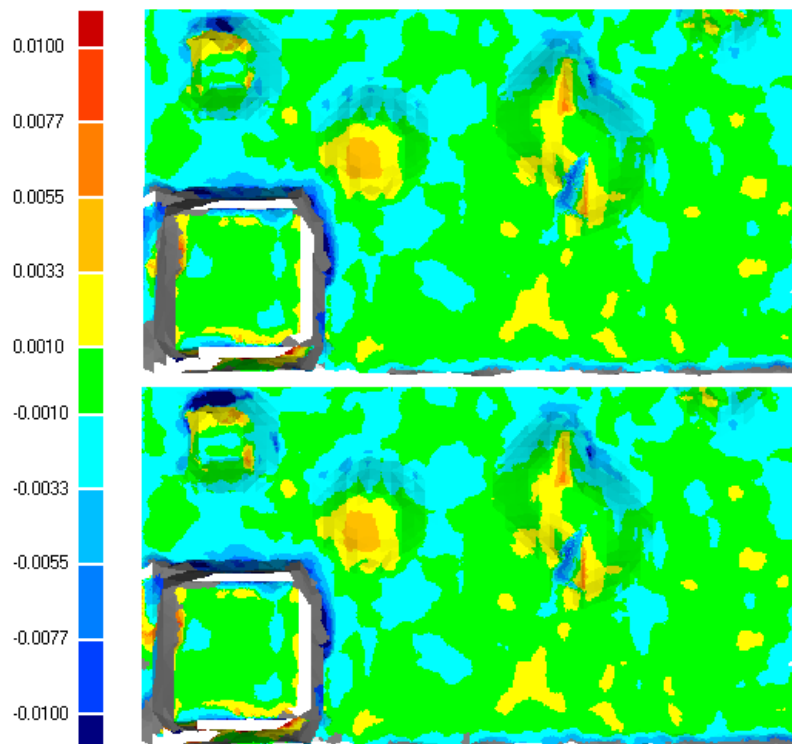
5.5.2.4.4 Hustota skenování 8 mm x 8 mm

Tab. 5.29.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.

	metoda odšumění	MNČ / robustní metoda (R)	počet bodů okolí	průměrná kladná odch. [mm]	průměrná záporná odch. [mm]	směrodatná odchylka [mm]
1	žádná	-	-	1,9	2,6	3,3
2	průměr	MNČ	9	1,5	1,8	2,7
3	rovina	MNČ	9	1,5	2,3	4,8
4	Čebyševův pol. 2. řádu	MNČ	9	1,8	2,4	3,2

Ze statistického hlediska dosahují metody rovina a průměr výrazně odlišné výsledky. Metoda rovina má problém s maximálními odchylkami, kvůli kterým dochází k velmi

výraznému snížení směrodatné odchylky rozdílového modelu. Po vizuální stránce (Obr. 5.66) však obě metody dosahují srovnatelných výsledků, jak je uvedeno v následujícím obrázku.

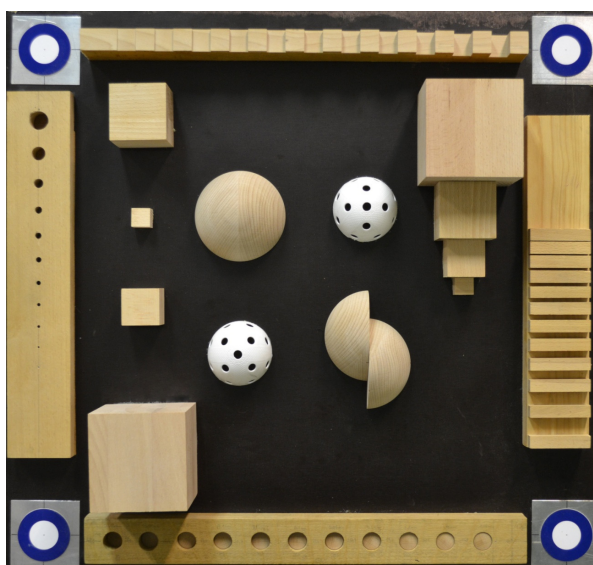


Obr. 5.66: Nahoře rovina (MNČ), dole průměr (MNČ).

5.5.3 Zhodnocení úspěšnosti redukce šumu dat

Náplní tohoto experimentu bylo zhodnotit přínos metod redukce šumu dat a jejich závislost na hustotě a vzdálenosti skenování. Z výsledků bylo zjištěno že je nutné dbát na správné zvolení počtu bodů okolí v závislosti na hustotě skenování. Pro tuto práci byly zvoleny dvě velikosti bodu okolí, a to: 25 bodů pro hustoty skenování 2 mm x 2 mm a 4 mm x 4 mm. Pro hustoty skenování 6 mm x 6 mm a 8 mm x 8 mm pak 9 bodů okolí. Z výsledku je patrné, že vzdálenost skenování nemá na úspěšnost metod redukce šumu vliv a výsledky jsou srovnatelné pro všechny měřené vzdálenosti. Metoda prokládání kvadriky a odšumění komerčním softwarem Geomagic Studio nepřináší prokazatelné zlepšení. V některých případech dokonce dochází k zhoršení původních dat. U metod založených na prokládání Čebyševbových polynomů nastává omezení v použití polynomů 3. a 4. řádu v počtu bodů okolí. Minimální počet bodů okolí je pro 3. a 4. řád 25 bodů, z tohoto důvodu nemohly být polynomy aplikovány na hustoty skenování 6 mm x 6 mm a 8 mm x 8 mm. Redukce šumu

pomocí Čebyševových polynomů dosahuje výborných výsledků v eliminaci maximálních kladných a záporných odchylek. Po grafickém zhodnocení je však patrné, že tato metoda není schopna odstínit šum na plochách s nulovou křivostí (vytváří „vlnky“). Dle původního předpokladu dosahuje nejlepších výsledků rovina a proti prvotním předpokladům také metoda průměr, která z logiky věci není nejvhodnější, přesto při vysoké hustotě skenování a malém počtu bodů okolí dosahuje kvalitních výsledků. Jak vidíme na následujícím obrázku (Obr. 5.67) testovací desky obsahují velké množství rovinných ploch, které výrazně ovlivňují statistické výsledky směrodatných odchylek a napomáhají lepším výsledkům metody průměr.



Obr. 5.67: 3D desky s testovacími obrázky

Po přezkoumání výsledku byl znovu posouzen význam volby výpočtu proložení a to porovnání přínosu metody nejmenších čtverců nebo robustní metody normou L1. V následující tabulce je uveden progres metody výpočtu robustní metodou při zmenšující se hustotě skenování.

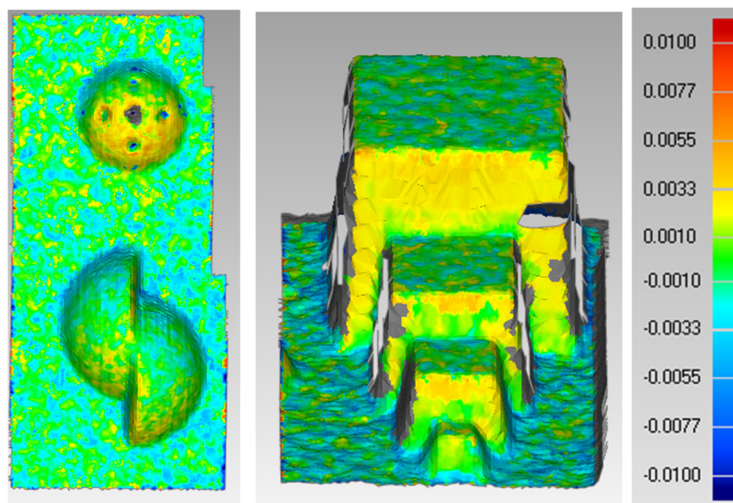
Tab. 5.30.: Srovnání úspěšnosti metod redukce šumu podle hustoty skenu na vzdálenost 5 m.

pořadí	2 mm x 2 mm		4 mm x 4 mm		6 mm x 6 mm		8 mm x 8 mm	
	metoda	sm. odch. [mm]	metoda	sm. odch. [mm]	metoda	sm. odch. [mm]	metoda	sm. odch. [mm]
1	průměr R	0,9	průměr MNČ	1,8	rovina MNČ	1,3	rovina R	2,2
2	průměr MNČ	1,2	rovina R	1,9	rovina R	1,4	průměr R	3,1
3	rovina R	1,2	průměr R	2,5	průměr MNČ	1,5	průměr MNČ	3,3
4	rovina MNČ	1,3	rovina MNČ	2,9	průměr R	2,2	rovina MNČ	3,5

Z předchozí tabulky je patrné zlepšování vhodnosti použití robustní metody výpočtu a použití proložení rovinou. Závislosti úspěšnosti volby metody výpočtu redukce šumu dat laserového skenování bude věnována následující kapitola 5.5.4.

5.5.4 Závislost použité metody výpočtu prokládání

V následující kapitole je porovnána účinnost redukce šumu na hranách a ostrých přechodech. Pro tento účel bylo provedeno na dvou výřezech skupin přípravků. Na následujícím obrázku (Obr. 5.68) vidíme rozdílové modely neodšuměných skenů testovacích výběrů.



Obr. 5.68: Rozdílové modely testovacích výběrů – hustota skenování 2 mm x 2 mm

Pro nezávislé zhodnocení metody výpočtu proložení byla v programu Denoiser odšuměna data ze vzdálenosti skenování 20 metrů. Redukce šumu byla provedena metodami *průměr* a *rovina*. Počty bodů okolí byly použity stejně jako v předchozím případě a to tak, že pro hustoty skenování 2 mm x 2 mm a 4 mm x 4 mm 25 bodů okolí a pro 6 mm x 6 mm a 8 mm x 8 mm pak 9 bodů okolí. Navíc oproti předchozím případům byla redukce šumu pro dvě nejhustější mračna provedena také se 49 body okolí a pro zbývající dvě mračna s 25 body okolí.

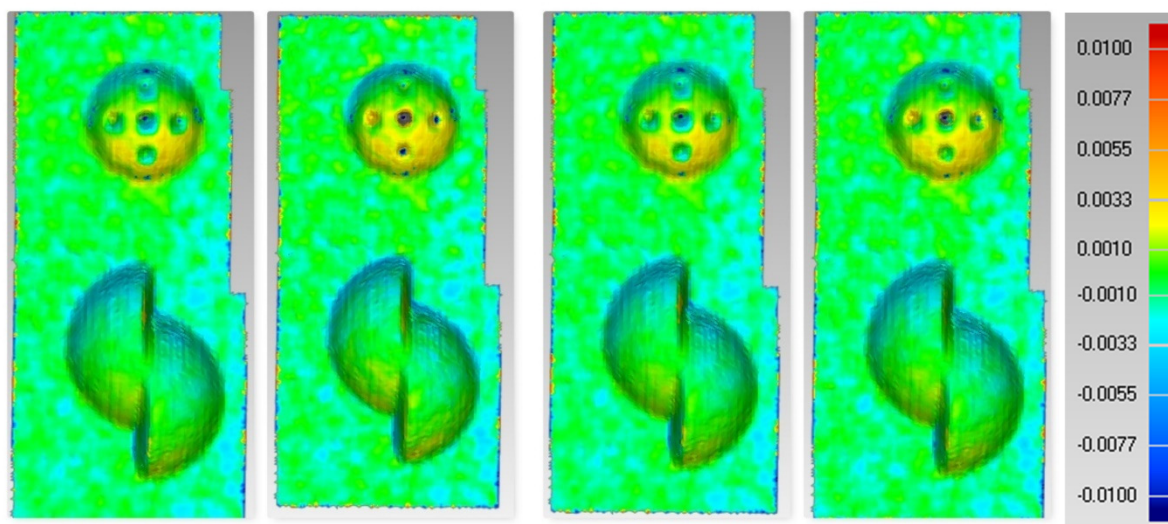
Zhodnocení úspěšnosti je prováděno graficky z rozdílových modelů, protože změny směrodatných odchylek jsou minimální, a proto dostatečně nerepresentují progres úspěšnosti metody proložení.

Jako referenční model pro porovnání úspěšnosti metod odšumění byl pořízen sken multistanicí Leica Nova MS50 při hustotě skenování 1 mm x 1mm.

Bylo provedeno celkově 104 rozdílových modelů a v následujících kapitolách budou představeny jen ty nejzajímavější výsledky. Zbytek rozdílových modelů je přiložen na CD.

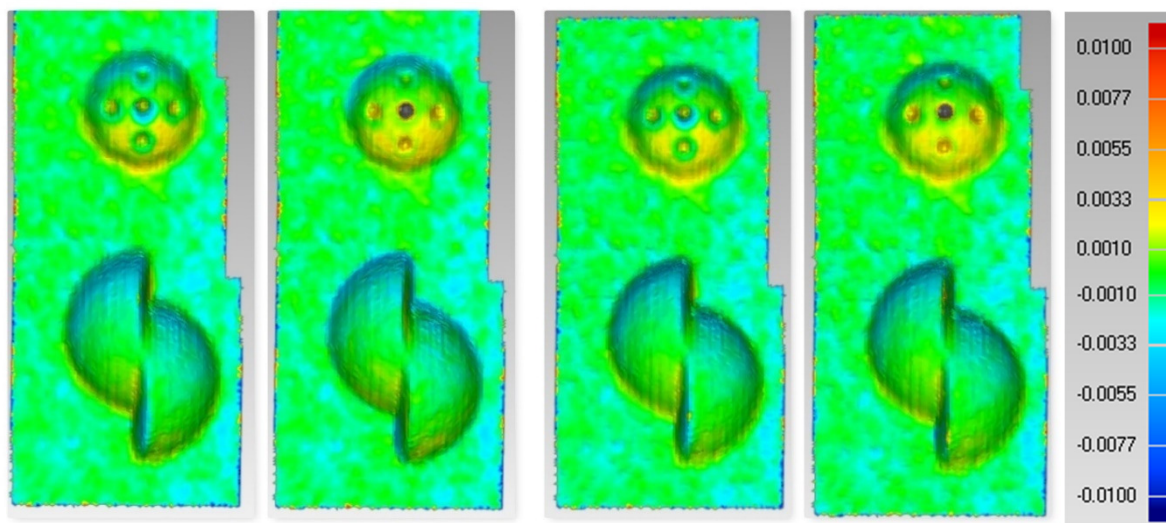
5.5.4.1 Hustota skenování 2 mm x 2 mm

Při velké hustotě skenování a relativně malém počtu bodů okolí se rozdíly mezi metodami výrazně neprojevují (Obr. 5.69).



Obr. 5.69: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25

Pro objektivnější posouzení přínosu robustní metody výpočtu proložení byl zvýšen počet bodů okolí na 49 bodů (Obr. 5.70).

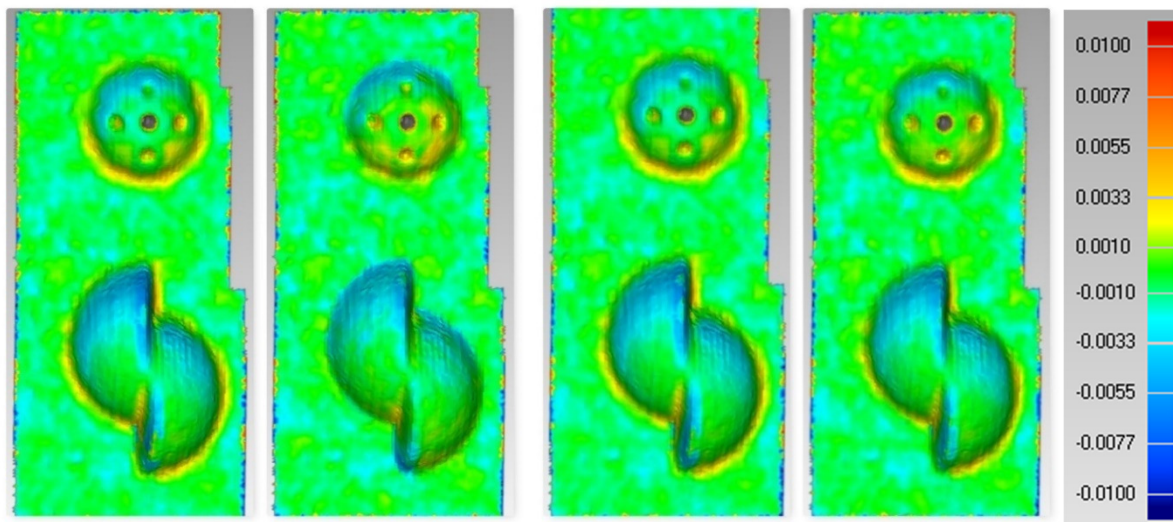


Obr. 5.70: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 49

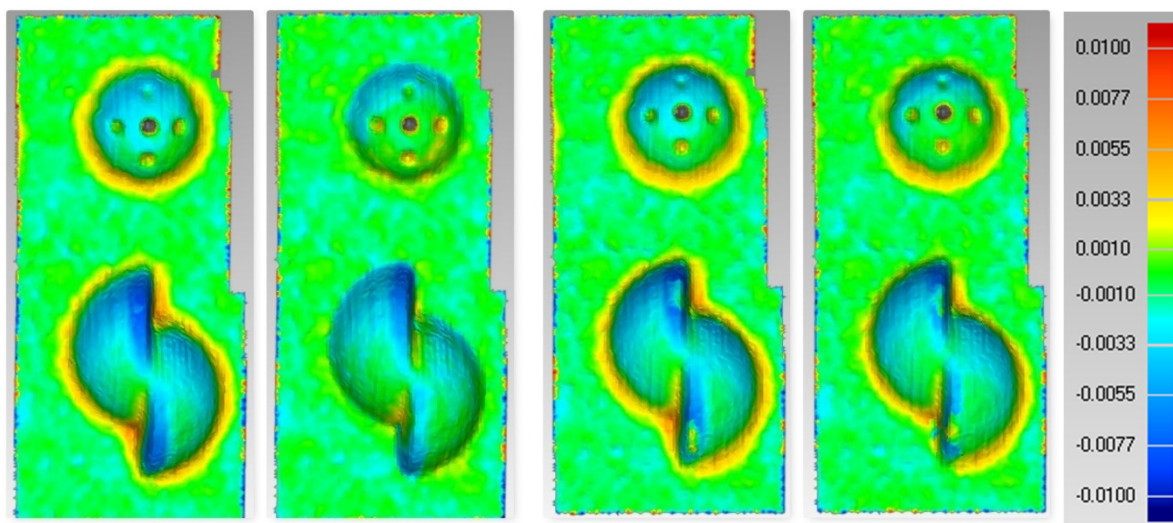
Při hustotě skenování 2 mm x 2 mm se rozdíl mezi metodami výpočtu příliš neprojevil.

5.5.4.2 Hustota skenování 4 mm x 4 mm

Při hustotě skenování 4 mm x 4 mm již je přínos robustní metody viditelný. Na ostrých přechodech mezi plochami s nulovou a nenulovou křivostí nedochází k nežádoucímu zaoblení těchto přechodů (Obr. 5.71).

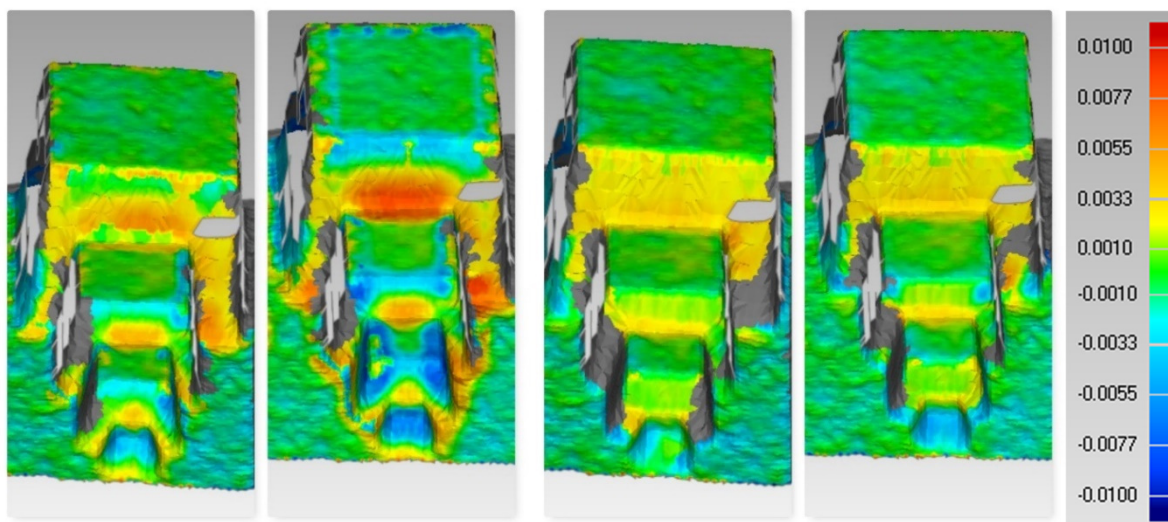


Obr. 5.71: Rozdílové modely zleva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25



Obr. 5.72: Rozdílové modely zleva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 49

Dle Obr. 5.72. dosahuje metoda *průměr R* s počtem bodů okolí 49 dosáhla velmi podobných výsledků jako *průměr R* s počtem bodů okolí 25. Přínos robustní metody je tedy hlavně to, že metoda není tolik náchylná ke špatně zvolenému počtu bodů okolí.

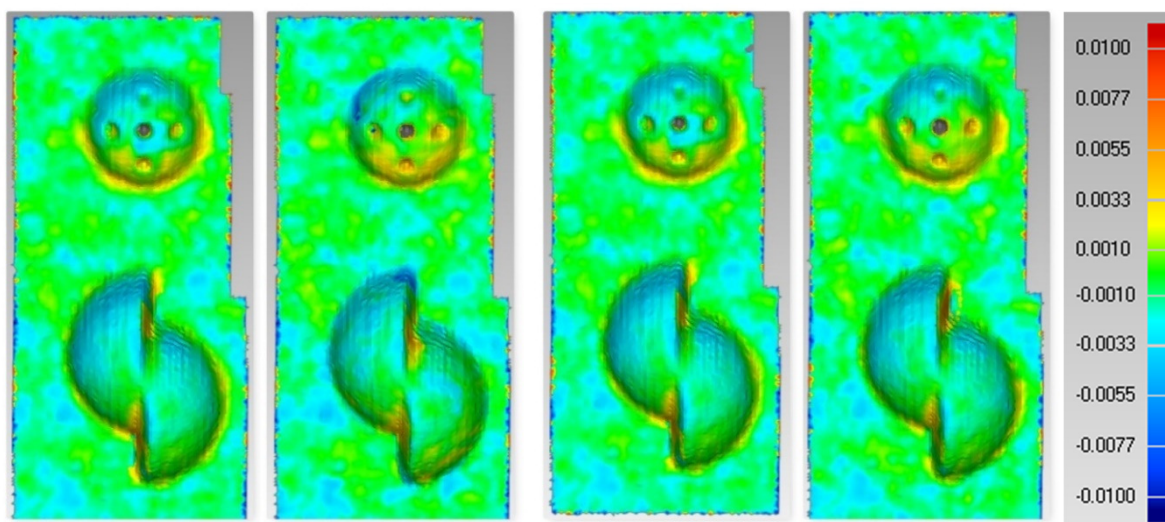


Obr. 5.73: Rozdílové modely zleva průměr MNČ, průměr MNČ – počet bodů okolí 49, průměr R, průměr R – počet bodů okolí 49

Výše zmíněný závěr podporují i výsledky z druhého testovacího výřezu (Obr. 5.73), kde robustní metoda dosáhla významně lepších výsledků a není tolik závislá na volbě počtu bodů okolí.

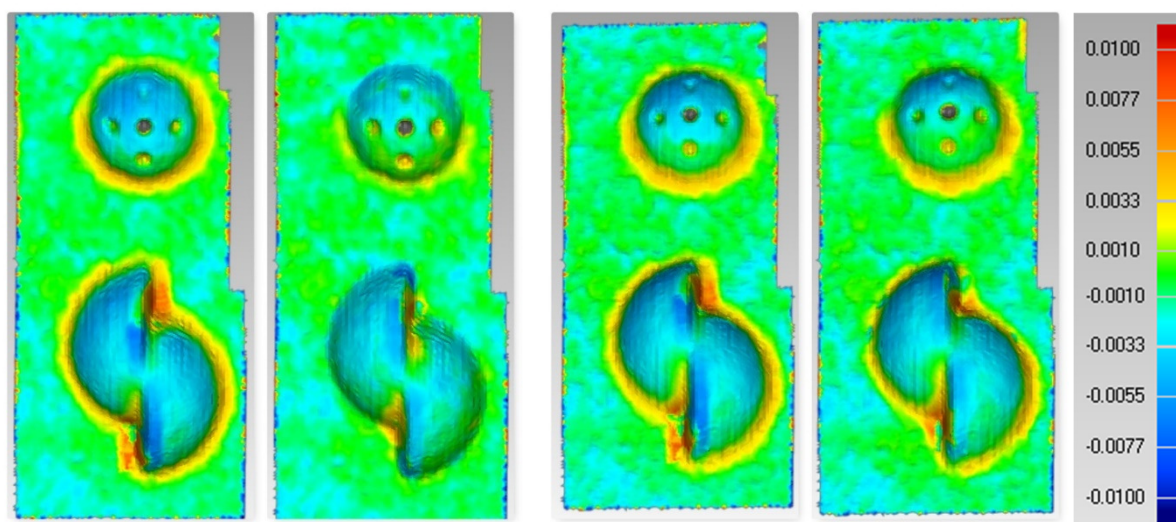
5.5.4.3 Hustota skenování 6 mm x 6 mm

Na obrázku Obr. 5.74. je patrné že pro vhodně zvolený počet bodů okolí dosahují obě metody výpočtu téměř shodné výsledky.



Obr. 5.74: Rozdílové modely zleva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 9

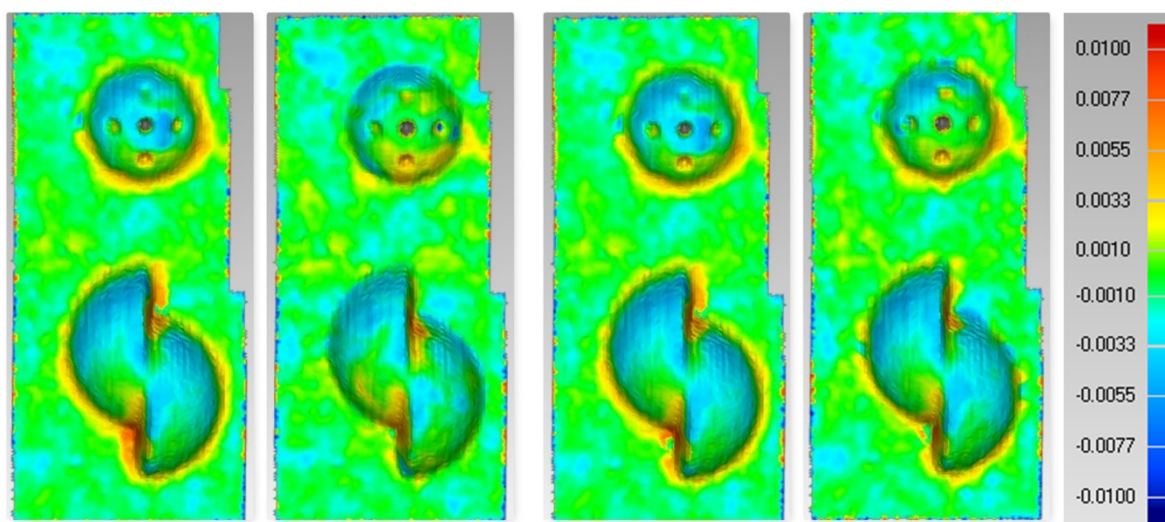
Při zvýšení počtu bodů okolí na 25 bodů je však přínos robustní metody výpočtu znatelný. I při tomto vyšším počtu bodů okolí metoda nezkruskuje hrany a současně právě díky většímu počtu bodů okolí lépe redukuje šum v rovinných plochách (Obr. 5.75).



Obr. 5.75: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25

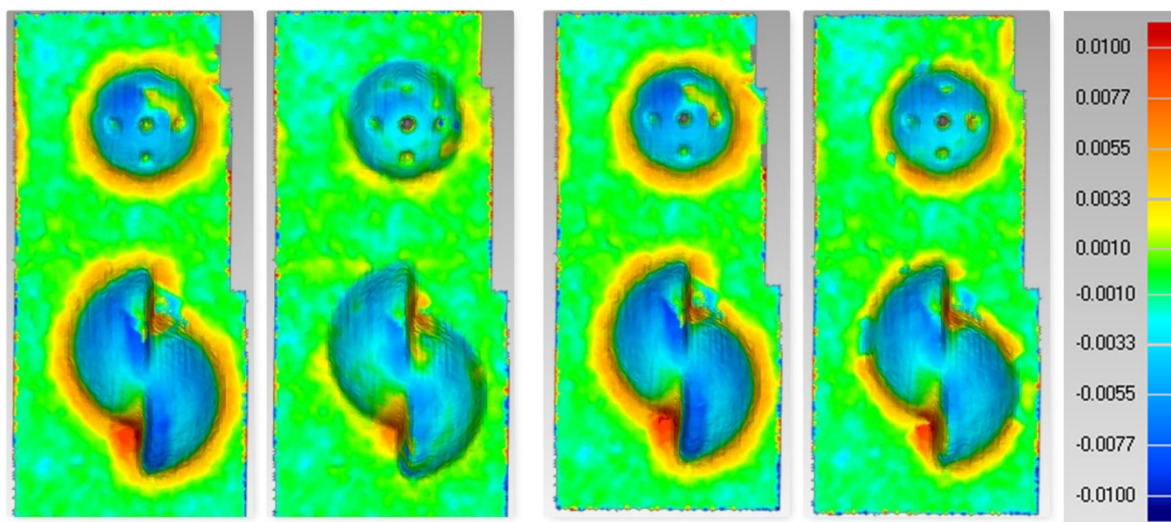
5.5.4.4 Hustota skenování 8 mm x 8 mm

Při snižující se hustotě skenování a nastavení již minimálního počtu bodů okolí (9 bodů) je očekáván přínos robustní metody již při základním odšumění.



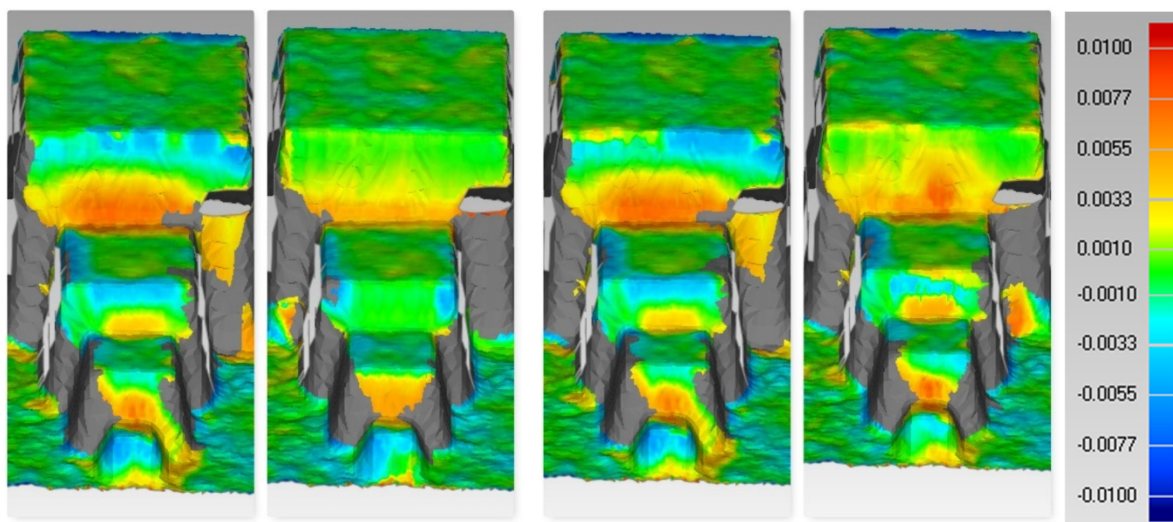
Obr. 5.76: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 9

Již na okolí 9 bodů je znatelně lepší výsledek robustní metody (Obr. 5.76). Tak jako v předchozích případech bylo provedeno otestování ještě s větším okolím. Tak jako v předchozích případech se prokázal přínos robustní metody (Obr. 5.77).



Obr. 5.77: Rozdílové modely zleva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25

Ještě výrazněji je přínos robustní metody vidět na druhém testovacím výřezu, kde se nacházejí ostré hrany přechodů mezi jednotlivými kostkami (Obr. 5.78).



Obr. 5.78: Rozdílové modely zleva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 9

Při použití robustní metody nedochází k nežádoucí deformaci hran. Navzdory očekávání dosahuje i při hustotě skenování 8 mm x 8 mm lepších výsledků metoda průměr.

5.6 Určení absolutní rozlišovací schopnosti terestrických skenerů

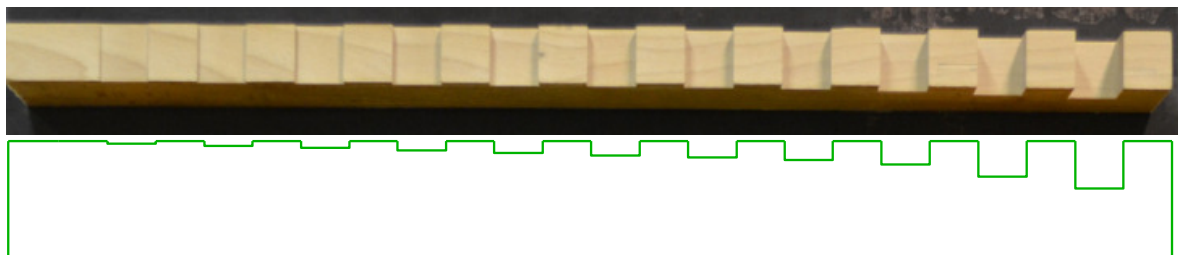
Testování rozlišovací schopnosti bylo provedeno na čtyřech terestrických skenerech a na jedné multistanici. Testování bylo provedeno na testovacích deskách popsanych v kapitole 5.1 na dvou přípravných na okraji desky. Vyhodnocení této kapitoly je převzato z diplomové práce Ing. Bartůňka [52], která vznikla pod mým vedením.

5.6.1 Testovací přípravky

Všechny přípravky jsou vyrobeny z důvodu kvalitní odrazivosti, dobré životnosti a opracovatelnosti z dubového dřeva.

5.6.1.1 Testovací přípravek „A“

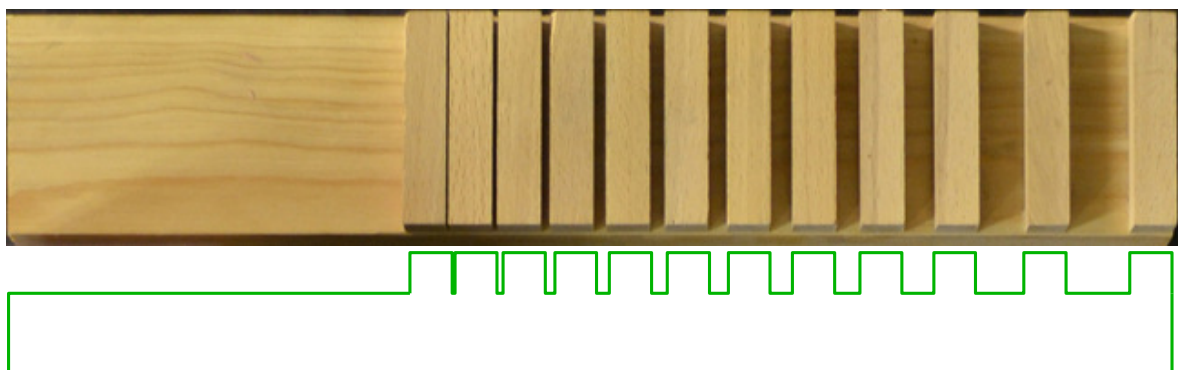
Přípravek má jedenáct různě hlubokých prohlubní, které mají ortogonální půdorys. Šířka přípravku je 24 mm a velikost prohlubní je 20 mm. Hloubka prohlubní zleva: 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 10 mm, 15 mm a 20 mm (Obr. 5.79).



Obr. 5.79: Testovací přípravek "A" a jeho příčný řez - různě hluboké prohlubně (ortogonální)

5.6.1.2 Testovací přípravek „C“

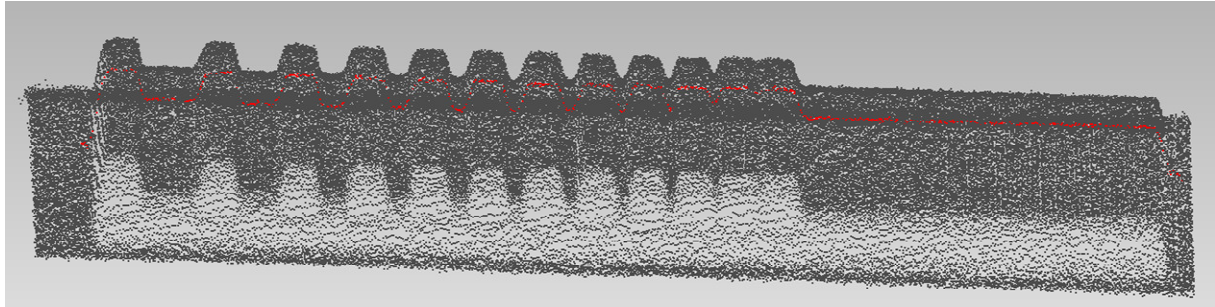
Přípravek má jedenáct zmenšujících se mezer. Šířka celého přípravku je 69 mm, hloubka mezer je 13 mm. Šířka mezer se mění, zleva 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 6 mm, 7 mm, 8 mm, 10 mm, 15 mm a 20 mm (Obr. 5.80).



Obr. 5.80: Testovací přípravek "C" a jeho příčný řez - různě široké prohlubně (ortogonální)

5.6.2 Postup vyhodnocení rozlišovací schopnosti

Příprava vyhodnocení rozlišovací schopnosti byla provedena v programu Geomagic Studio, ve kterém byl vybrán řez daným přípravkem a ten exportován do textového formátu (Obr. 5.81).



Obr. 5.81: Výběr řezu testovacím přípravkem

Takto získané souřadnice řezu byly vyneseny do grafu společně s vzorem testovacího přípravku. Umístění získaného řezu na vzor testovacího obrazce je provedeno přes identické body, umístěné v rozích desky. Z důvodu nedokonalého umístění přípravku rovnoběžně (kolmo) k vřícovacím bodům je potřeba provést dotransformaci.

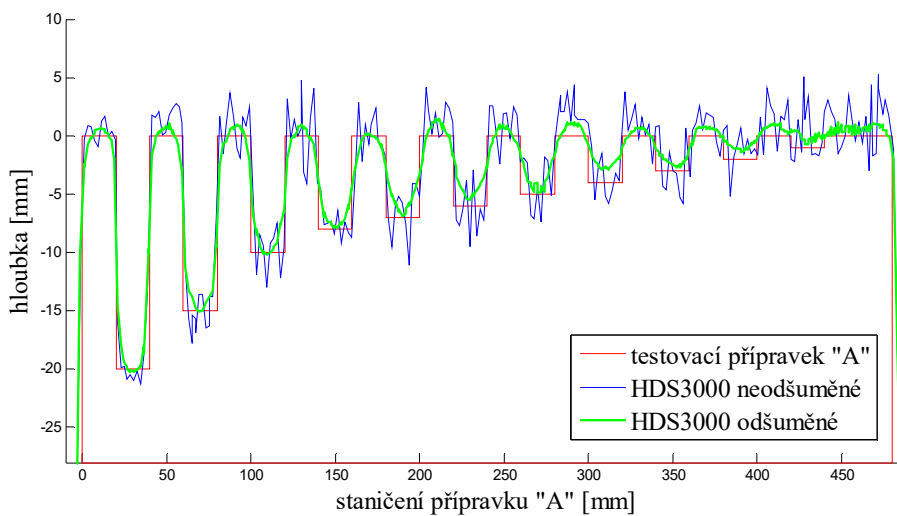
Skenování bylo provedeno ze vzdálenosti 5 metrů, protože vycházíme z předpokladu, že při požadavku na vysokou přesnost modelu skenovaného objektu budeme stát v jeho relativní blízkosti.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.2 pro 2D rozlišovací schopnost můžeme rozlišovací schopnost rozdělit na dvě varianty, a to **rozlišení detailu** a **detekce detailu**.

- **Rozlišení detailu:** rozpoznání detailu tak, že z mračna bodů lze detail jednoznačně identifikovat a body mračna se vyskytují alespoň ve 2/3 hloubky, potažmo velikosti detailu, přičemž šum nezaujímá více než 1/3 z hloubky, potažmo velikosti detailu.
- **Detekce detailu:** detail je detekován ve chvíli, kdy lze nerovinnost v datech jednoznačně odlišit od šumu v datech.

5.6.3 Rozlišovací schopnost Leica HDS3000 a Leica HDS3000 po redukcí šumu

5.6.3.1 Vyhodnocení přípravek „A“

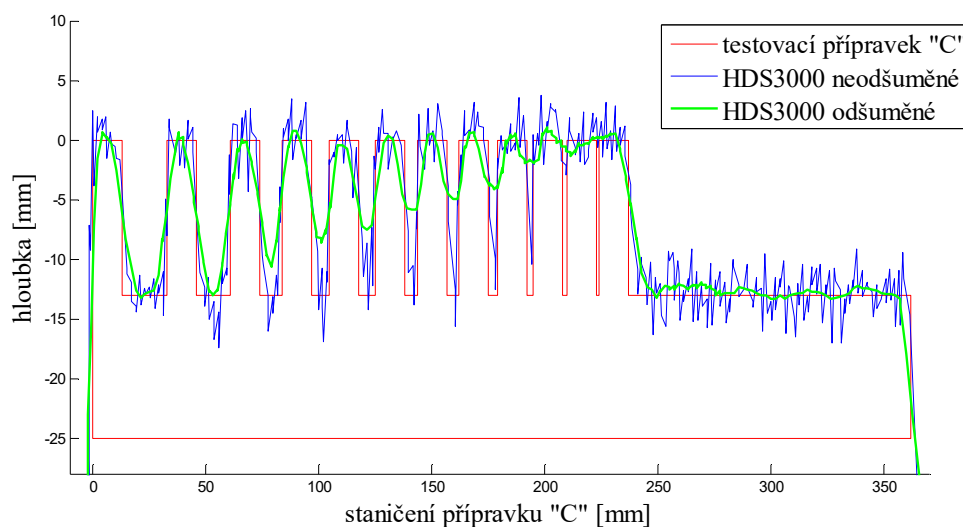


Obr. 5.82: Porovnání rozlišovací schopnosti, HDS3000, přípravek „A“

Na obrázku Obr. 5.82 je patrné, že u neodšuměného skenu lze jednoznačně detekovat detail o hloubce 3 mm, u méně hlubokých prohlubní se již ztrácí v šumu. Rozlišení hloubky je vzhledem k velikosti šumu možné až od hloubky prohlubně 4 mm.

U odšuměného skenu (použit sw. Denoiser [21] - metoda průměr a 25 bodů okolí) lze detekovat i nejmenší prohlubeň s hloubkou 1 mm (první zprava) a rozlišit detail hloubky prohlubně je možné u 2 mm hluboké prohlubně. Odšuměním původního skenu dochází v hloubkové složce k výraznému zlepšení rozlišovací schopnosti

5.6.3.2 Vyhodnocení přípravek „C“



Obr. 5.83: Porovnání rozlišovací schopnosti, HDS3000, přípravek „C“

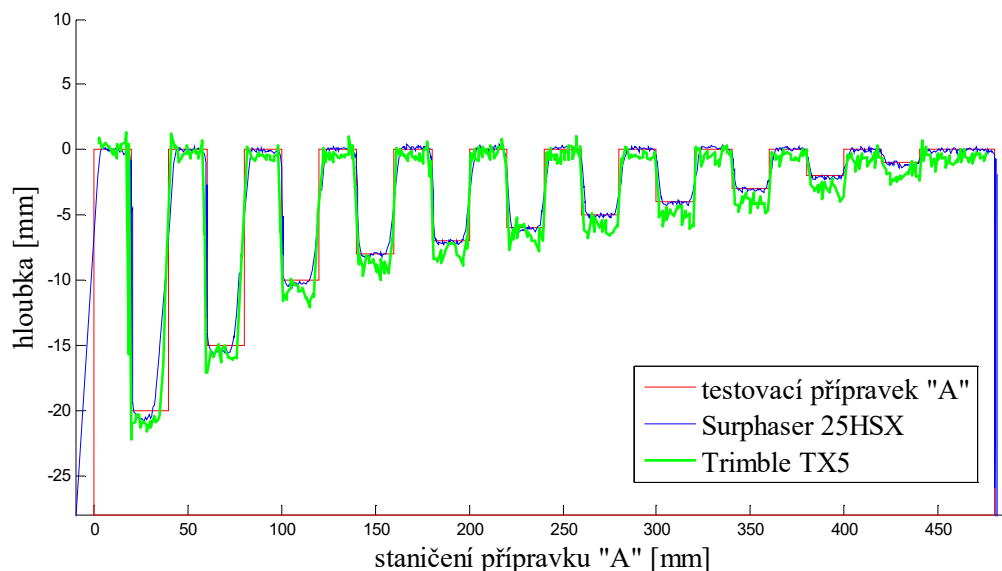
U neodšuměného skenu je jednoznačně rozlišena mezera o šířce 3 mm a detekována mezera o šířce 2 mm (Obr. 5.83).

U odšuměného skenu lze také detekovat mezeru o šířce 2 mm, jednoznačně rozlišit však mezeru o šířce 10 mm. Důvodem zhoršení rozlišovací schopnosti je to, že metoda průměr 25 bodů okolí počítá na plošce 10 mm x 10 mm a není si proto schopna poradit s ostrými přechody. U prohlubně šířky 6 mm, detekujeme právě jeden bod na dně prohlubně, což nasvětšuje tomu, že právě 6mm je velikost laserové stopy skeneru Leica HDS3000.

5.6.4 Rozlišovací schopnost Trimble TX5 a Surphaser 25HSX

V následující kapitole jsou uvedeny rozlišovací schopnosti skenerů s nejmenším šumem v tomto testování.

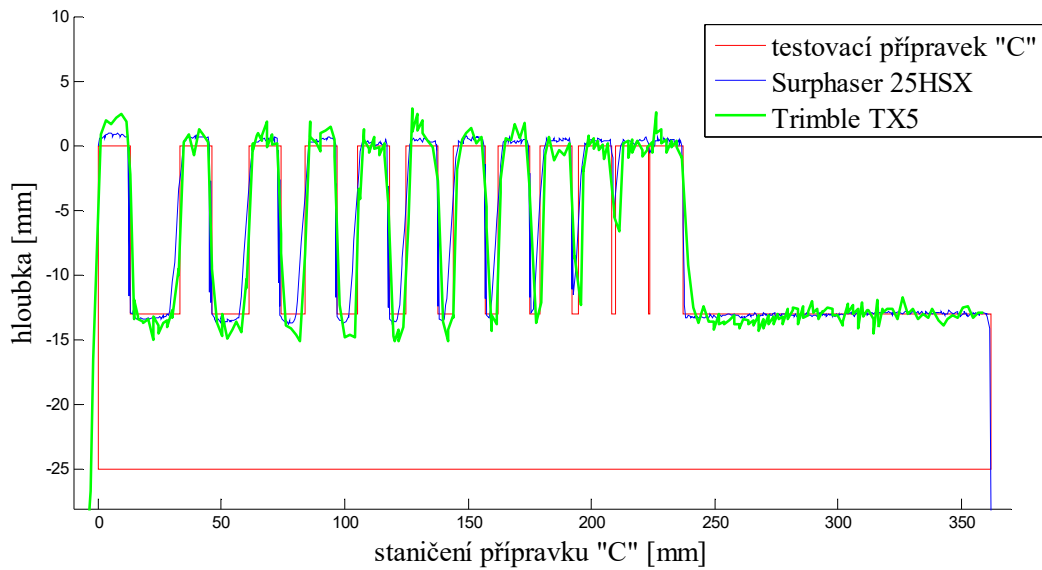
5.6.4.1 Vyhodnocení přípravek „A“



Obr. 5.84: Porovnání rozlišovací schopnosti, Surpahser 25HSX, Trimble TX5, přípravek „A“

U obou skenerů jde jednoznačně rozlišit i detekovat prohlubně o hloubce 1 mm. Jediným rozdílem je, že skener Surphaser má minimální délkový šum (Obr. 5.84).

5.6.4.2 Vyhodnocení přípravek „C“

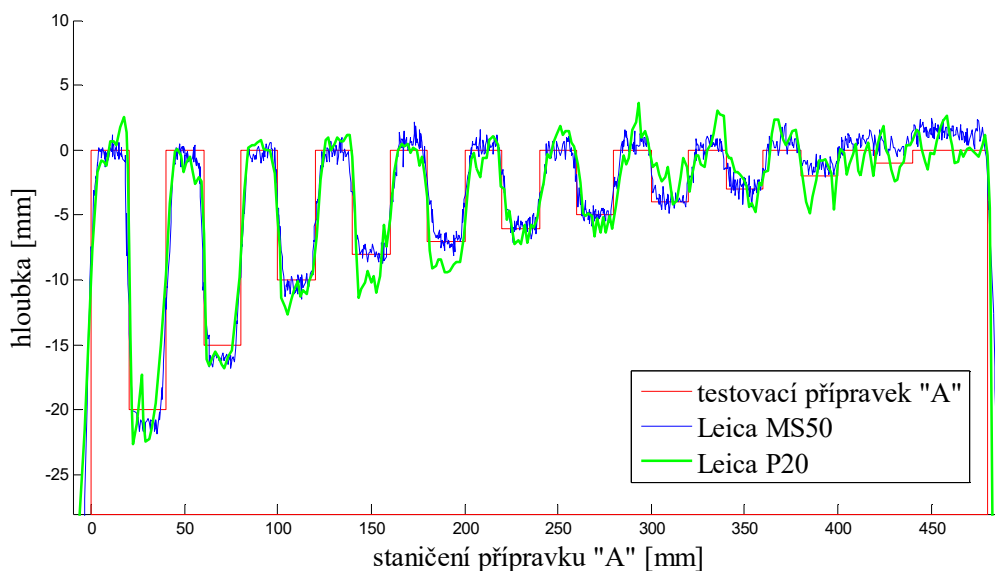


Obr. 5.85: Porovnání rozlišovací schopnosti, Surpahser 25HSX, Trimble TX5, přípravek „C“

Na testovacím přípravku „C“ (Obr. 5.85), opět oba skenery dosáhly shodných výsledků a detekována je prohlubeň o šířce 2 mm, rozlišená pak prohlubeň o šířce 3 mm. Z vyhodnocení také vyplývá, že oba skenery mají velikost laserové stopy 4 mm.

5.6.5 Rozlišovací schopnost Leica Nova MS50 a Leica P20

5.6.5.1 Vyhodnocení přípravek „A“

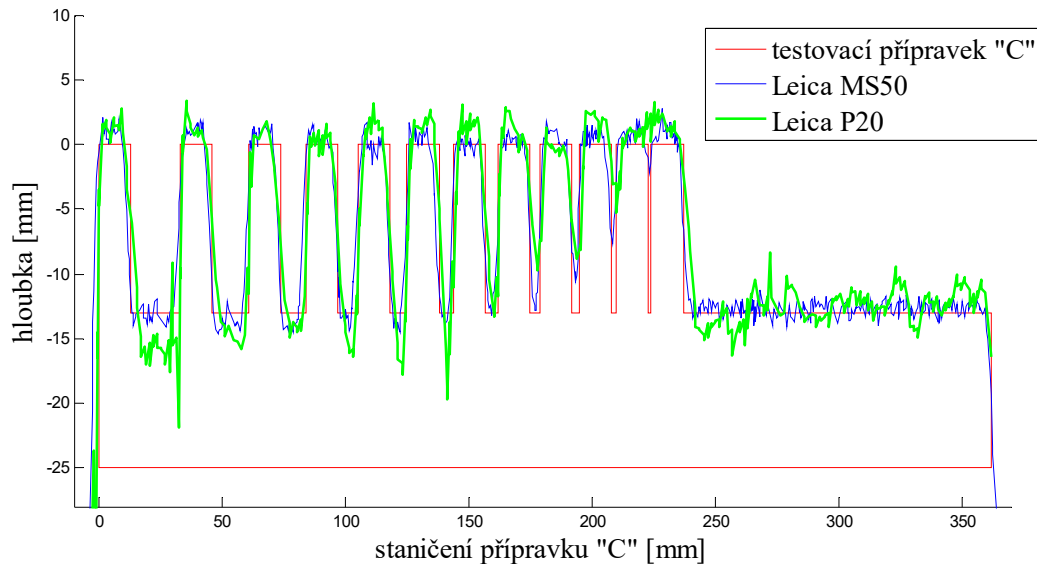


Obr. 5.86: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica MS50, Leica P20, přípravek „A“

Na obrázku Obr. 5.86 lze u multistanice Leica Nova MS50 jednoznačně detekovat prohlubeň o hloubce 2 mm. Prohlubeň 1mm se již ztrácí v šumu. Rozlišit pak lze prohlubeň o

hloubce 3 mm. U skeneru Leica ScanStation P20 lze detekovat prohlubeň o hloubce 3 mm, rozlišení je možné vzhledem k vyššímu šumu pro prohlubeň o hloubce 4 mm.

5.6.5.2 Vyhodnocení přípravek „C“



Obr. 5.87: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica MS50, Leica P20, přípravek „C“

Při vyhodnocení multistanice Leica MS50 na testovacím přípravku „C“, lze jednoznačně rozlišit prohlubeň o šířce 3 mm a detekovat prohlubeň o šířce 1mm. U skeneru Leica P20 dokážeme jednoznačně rozlišit prohlubeň o šířce 4mm a detekovat prohlubeň o šířce 2mm (Obr. 5.87).

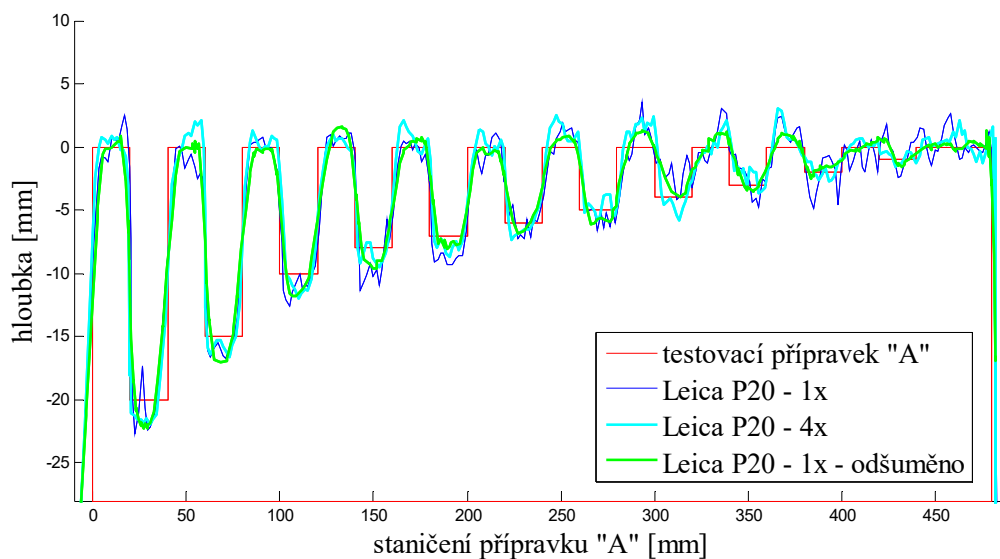
Velikost laserových stop jsou určeny jako 4 mm pro Leica MS50 a 5 mm pro Leica P20.

5.6.6 Rozlišovací schopnost Leica P20 po redukci šumu

Skener Leica P20 podporuje při pořizování skenovaného mračna několikanásobné měření délky pro eliminaci šumu, jak bylo popsáno v kapitole 4.2.1.

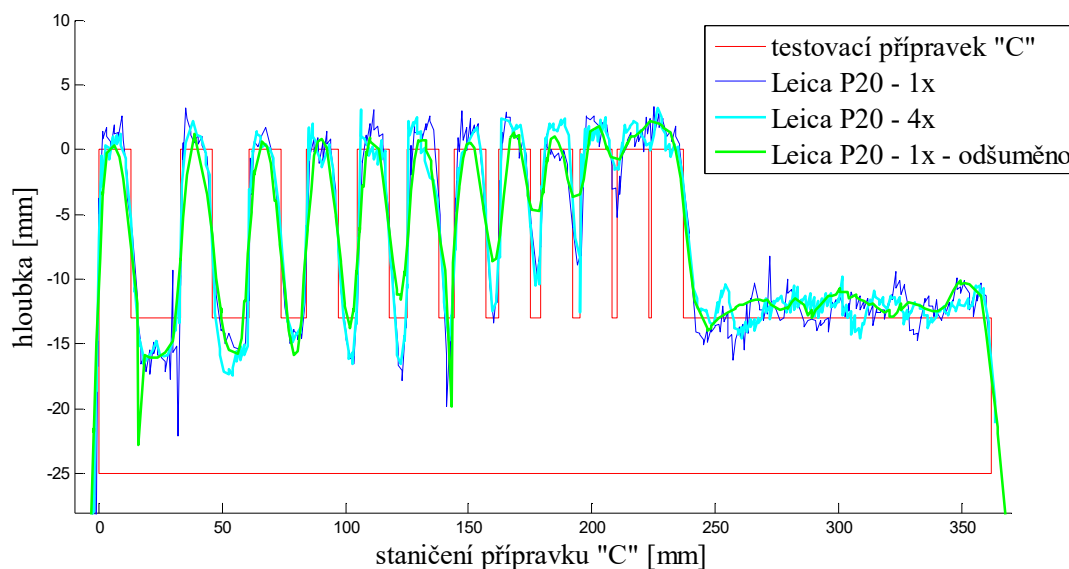
5.6.6.1 Vyhodnocení přípravek „A“

Při použití metod odšumění a to opakovaného měření délky a odšumění (sw. Denoiser [21] - metoda průměr a 25 bodů okolí) došlo ke zlepšení rozlišovací schopnosti. Obě metody redukce šumu dosáhly velmi podobných výsledku, a to detekce prohlubně hloubky 1 mm a rozlišení 2mm. Výhodou opakovaného měření délky oproti odšumění metodou průměr je, že nedochází k žádné ztrátě detailu nechtěným vyhlazením (Obr. 5.88).



Obr. 5.88: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica P20 - odšuměno, přípravek „A“

5.6.6.2 Vyhodnocení přípravek „C“



Obr. 5.89: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica P20 - odšuměno, přípravek „C“

Detekování mezer se oproti skenu bez opakovaného měření vzdáleností s detekcí mezery o šířce 2 mm a rozlišením mezery o šířce 4 mm zlepšuje jen graficky, kde je pozorovatelné zmírnění šumu (Obr. 5.89). U mezer o šířce 6 mm, 7 mm a 20 mm, kde lze pozorovat poměrně vysokou nepřesnost určení délky. Tato nepřesnost zůstává i při čtyřnásobném měření vzdálenosti a má systematický charakter (neočekávaně zvětšuje

hloubku mezer) a přesahuje i více než dvojnásobně deklarovanou přesnost v poloze jednoho bodu, která je 3 mm.

5.6.7 Zhodnocení rozlišovací schopnosti

První testovaný skener byl skener Leica HDS3000. Na testovacím přípravku "A" (mění se hloubka prohlubně) je graficky vidět, že metoda odšumění má velký přínos, detekce prohlubně se zlepšila z hloubky 3 mm na 1 mm a rozlišení z hloubky 6 mm na 2 mm. V případě testovacího přípravku "C" (mění se šířka prohlubně) způsobuje redukce šumu metodou *průměr* na užších mezerách nežádoucí vyhlazení, a proto poměrně výrazně klesá rozlišení těchto mezer ze šířky 3 mm na 10 mm. U širších mezer, které již lze rozlišit je patrné, že redukce šumu vytváří na dně mezery vyhlazení ve tvaru mísky. Velikost stopy laserového svazku je určena na 6 mm.

Dalším testovaným skenerem byl Surphaser 25HSX. Na testovacím přípravku "A" dosahují výsledky tohoto skeneru s přehledem nejlepších hodnot. Rozlišení prohlubně o hloubce 1 mm je naprosto jednoznačné. Výsledkem z testovacího přípravku "C" je rozlišení detailu o velikosti 3 mm a velikost stopy je určena na 4 mm.

Skener Trimble TX5 na testovacím přípravku "A" rozliší prohlubeň o hloubce 1 mm, na testovacím přípravku "C" rozliší mezeru o šířce 3 mm velikost stopy je pak 4 mm.

Multistanice Leica Nova MS50 u obou testovacích přípravků rozliší detail o velikosti 3 mm. Velikost stopy určená z přípravku „C“ je 4 mm.

Posledním testovaným skenerem je Leica ScanStation P20, kde na testovacím přípravku "A" bylo možné rozlišit prohlubeň o hloubce 4 mm a na testovacím přípravku "C" bylo možné rozlišit mezeru o šířce 4 mm. Velikost stopy je 4 mm. V případě skeneru Leica ScanStation P20 bylo také testováno zlepšení rozlišovací schopnosti vlivem redukce šumu zabudovaným opakovaným měřením délky a v sw. Denoiser [21] metodou průměr s 25 body okolí. U testovacího přípravku "A" lze pozorovat zlepšení rozlišení hloubky 2 mm. U testovacího přípravku "C" lze pozorovat zlepšení pouze graficky, číselné hodnoty rozlišení se nemění. U mezer o šířce 6 mm, 7 mm a 20 mm, kde lze pozorovat poměrně vysokou nepřesnost určení délky. Tato nepřesnost zůstává i při čtyřnásobném měření vzdálenosti a má systematický charakter (neočekávaně zvětšuje hloubku mezer) a přesahuje i více než dvojnásobně deklarovanou přesnost v poloze jednoho bodu, která je 3 mm.

5.7 Využití mračna bodů získaného pomocí RPAS

V dnešní době je jedním z nejvíce rozvíjejících se odvětví geodzie letecká fotogrammetrie. Za rychlým rozvojem letecké fotogrammetrie stojí rozmach bezpilotních letadel, dronů a vrtulníků. Výsledek letecké fotogrammetrie není ovlivněn pouze vhodným výběrem kvality snímkovací aparatury a nosičem aparatury, ale také správnou volbou zpracovatelského softwaru. Nedílnou součástí leteckých prací je také splnění všech legislativou stanovených povinností. V našem případě bylo z důvodu doby možného letu rozhodnuto pro koncepci klasického letadla. V dnešní době je nabízena řada komerčních kompletních řešení. V následující kapitole budou uvedena vybraná komerční řešení.

5.7.1 Přehled komerčních řešení

V následující tabulce je uvedeno srovnání nejdostupnějších komerčních systémů pro bezpilotní leteckou fotogrammetrii.

Tab. 5.31.: Srovnání komerčních systémů UAV pro leteckou fotogrammetrii

typ	Trimble UX5	Mavinci Sirius	Ebee		AeroMapper EV2
cena	619 tis Kč	900 tis Kč	438 tis Kč	508 tis Kč	275 tis Kč
kamera	Sony a5100	Panasonic GX1	Canon S110	Sony WX220	Sony a5100
vým.objektiv	ANO	ANO	NE	NE	ANO
rozlíšení snímače	24,3 MP	16 MP	12,1 MP	18,2 MP	24,3 MP
velikost snímače	23,5/15,6 mm	17,3/13 mm	7,44/5,58 mm	6,17/4,55 mm	23,5/15,6 mm
plocha snímače	366,6 mm ²	224,9 mm ²	41,52 mm ²	28,07 mm ²	366,6 mm ²
velikost px	0,015 μm	0,014 μm	0,003 μm	0,0015 μm	0,015 μm
typ snímače	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
stabilizátor	NE	NE	ANO	ANO	NE
objektiv					
ohnisková vzdálenost	15 mm	14 mm	24-120 mm	10 mm	Asi 15 mm
světelnost		2,5	2-5,9	3,3-5,9	
fix ostření	ANO	ANO	NE	NE	ANO
kapacita baterie	6000 mAh	5300 mAh	2150 mAh	2150 mAh	24000 mAh
maximální doba letu	50 min	45 min	50 min	50 min	60 min
šířka/délka	100/65 cm	163/122 cm	96/xx cm	96/xx cm	200/114 cm
hmotnost	2,5 kg	2,7 kg	0,7 kg	0,7 kg	4,5 kg
rozlíšení	2,4 – 24 cm	1,6 – 20 cm			2,2 - 15,6 cm
výška letu	75 – 750 m	59 – 750 m			85-600 m

Všechna tato komerční řešení obsahují řadu výhod i nevýhod. Technicky vynikající systém Mavinci Sirius výrazně převyšuje svou cenou ostatní systémy. Technicky i cenově zajímavý systém AeroMapper EV2 bohužel nemá české zastoupení a bylo by nutné systém

objednat z Kanady. Levnější systémy Ebee mají velice nekvalitní fotografické kamery a objektivy. Po zvážení všech výhod a nevýhod bylo zvoleno řešení vlastního výzkumu a vývoje systému pro bezpilotní fotogrammetrii, protože ani jeden z nabízených systému nesplňoval současně požadavky na kvalitu a cenu. Vlastní výzkum a vývoj probíhal ve spolupráci s Geodetickou kanceláří Nedoma & Řezník, s.r.o., která je investorem celého projektu.

5.7.2 Součásti systému Skywalker 2015/1830

Jako nosič fotografické komory byl vybrán model bezpilotního letadla Skywalker 2015/1830 (Obr. 5.90). Po splnění všech zákonných povinností obdrželo letadlo od Úřad pro civilní letectví (ÚCL) imatrikulaci OK-X017W.

5.7.2.1 Bepilotní letoun typu Skywalker 2015/1830 (OK-X017W) a dálkové ovládání Spektrum DX7s / přijímač AR8000

V následující tabulce Tab. 5.32 budou uvedeny základní parametry letounu Skywalker.

Tab. 5.32.: Parametry letounu Skywalker 2015/1830

kamera	Panasonic GX1	
výměnný objektiv	ANO	
rozlíšení	rozlíšení	16 Mpix
velikost	velikost	17,3 mm/13 mm
plocha snímače	plocha snímače	224,9 mm ²
velikost px	velikost px	0,014 μm
typ snímače	typ snímače	CMOS
stabilizátor	stabilizátor	NE
objektiv		
f	f	15 mm
světelnost	světelnost	1,7
fix focus	fix focus	ANO
pohonny akumulátor	5 Ah, 14,8 V	
maximální doba letu	50 min	
rozpětí křídel/délka/výška	1830/1270/260 mm	
Plocha křídla	41,06 dm ³	
hmotnost	3,0 kg	
rozlíšení	20 mm – 200 mm	
výška letu	59,5 m – 750 m	
pohonná soustava	elektromotor Foxy 2820-7, 450W	
vrtule	APC 305 x 150 mm	
regulator otaček	Foxy, max. proudová zatížitelnost – 45 A	



Obr. 5.90: Letadlo Skywalker 2015/1830

5.7.2.1 Autopilot Pixhawk

Tab. 5.33.: Autopilot Pixhawk

Prvek	Typ	Popis
Telemetrie	3DR Radio v2	Spojení mezi pozemní stanicí a Pixhawk, 433 Mhz, splňující směrnici ETSI EN300 2207.2.3, pro automatický let
Napětí sítě	Autopilot 180A	Kontrola napětí sítě v letadle
GNSS	3DR Ublox + Compass	GPS modul s digitálním kompasem
Manuální ovládání	AR8000	Přijímač pro manuální ovládání
Manuální ovládání	Spektrum DX7s	Dálkové ovládání pro manuální let

5.7.2.2 Doprovodný software Mission Planner pro plánování mise

Open source program Mission Planner nainstalovaný na přenosném počítači (tabletu), ke kterému je připojen radiomodem pro přenos telemetrických a letových dat. Program umožňuje nastavit letový plán pro letecké snímkování. Program umožňuje oboustrannou komunikaci s letadlem a detailní poletový rozbor provozních parametrů (Obr. 5.92).

5.7.3 Legislativní povinnosti

V následujícím obrázku Obr. 5.91 je uvedeno procesní schéma vydání povolení k leteckým činnostem prováděným bezpilotními letadly [53].



Obr. 5.91: Schéma vydání povolení k leteckým činnostem [53].

5.7.4 Letecké a výpočetní práce

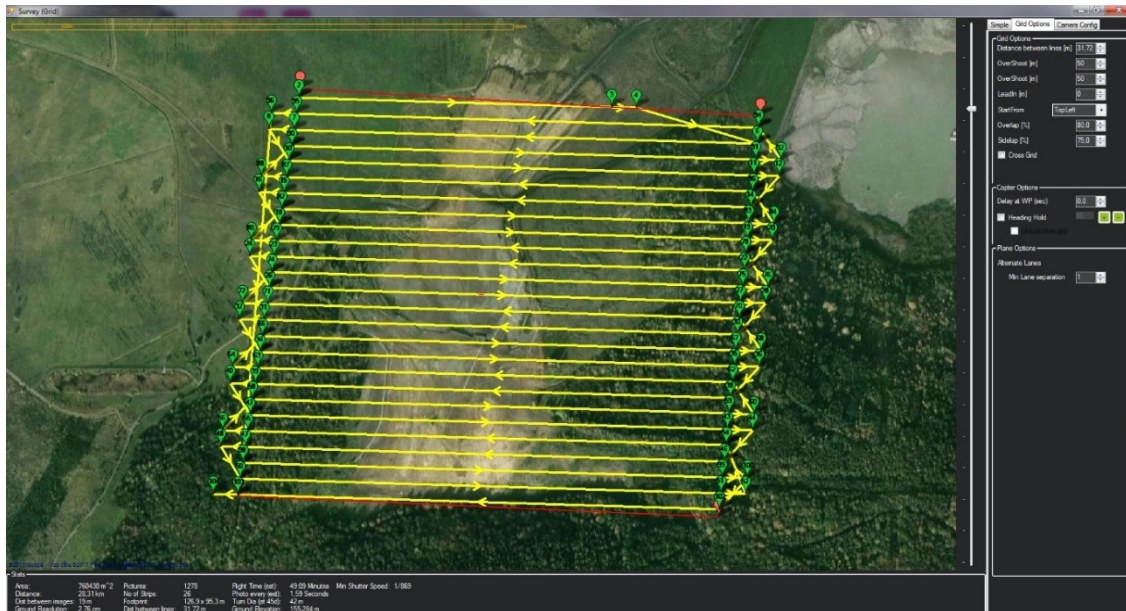
5.7.4.1 Terénní práce

Před samotným zahájením letecké mise je potřeba v kanceláři nachystat plán letu. Tento letový plán vychází z rozměru snímkané lokality a jejího přibližného výškové členění.

Terénní práce začínají složením letadla z transportní bedny a jeho předletové kontroly stanovené pokynem ÚCL. Při předletové přípravě jsou po snímkané lokalitě umístěny vřícovací body. Tyto vřícovací body jsou později zaměřeny například technologií GNSS.

Pro terénní práce jsou potřeba dva pracovníci. Samotné letecké práce začínají odhozením nastartovaného letadla do vzduchu, kde první kontrolu převezme pilot a letadlo

začne stoupat. Po testování všech zařízení potřebných k letu je letadlo přepnuto do pozice autopilota a nastoupá do jednotlivých letových řad. Pomocná obsluha zatím sleduje telemetrické letové údaje na přenosném tabletu a pilotovi hlásí případné poklesy napětí v akumulátoru. Pilot po celou dobu snímkování musí mít letadlo na dohled.



Obr. 5.92: Ukázka naplánované letecké mise v programu Mission Planner.

5.7.4.2 Kancelářské zpracování

Po dokončení terénních leteckých prací jsou staženy pořízené fotografie. Celý další výpočet je proveden v programu Agisoft PhotoScan [29]. K výpočtu se používá metoda Structure from Motion. Tato metoda vznikla v 80. letech 20. století v závislosti na rozvoji moderních počítačů a je založena na principu průsekové fotogrammetrie. Základním předpokladem je to, že daný objekt je zachycen na více snímcích najednou. Prvky vnitřní orientace nemusí být předem známy a jsou zahrnuty do výpočtu. Jelikož předmětem této disertační práce není zkoumání algoritmu tvorby mračna bodů obrazovou korelací, bude v následujícím textu pouze stručně uveden postup výpočtů. Blíže je popis např. v [30].

V prvním kroku je nalezení spojovacích bodů mezi snímky díky metodě The scale invariant feature transform – SIFT. Algoritmus nalezne významné body na základě určení lokálních extrémů v obraze. Poté dochází k odfiltrování nestabilních bodů, což jsou body, které nejsou dostatečně kontrastní ke svému okolí či body ležící podél hran. U bodů, které nebyly odstraněny, jsou následně vypočítány deskriptory. Deskriptory specificky charakterizují jednotlivé body ve snímku a na základě jejich charakteristik jsou vyhledány

odpovídající body na různých snímcích. Po získání sady bodů, které se nacházejí na několika snímcích (minimálně na 2) je možné zpětně vypočítat prvky vnitřní a vnější orientace kamery.

Výpočet 3D souřadnic bodů hustého mračna je proveden pomocí Patch-based Multi-view stereo (PMVS), kde každý bod je reprezentován jako malá obdélníková ploška neboli patch. Tyto patche jsou získány na základě korelace z pixelu v původním obraze. Algoritmus je realizován jako *match* (propojovací) skládající se z dvou kroků, a to z expanzního a filtračního procesu, začínající řídkým souborem klíčových bodů, kdy se iterativně přidávají noví sousedé. Poté jsou aplikovány dva filtrační kroky na rekonstruovaný patch ke zvýšení viditelnosti a odfiltrování chybných *match* (propojení) [30].

5.7.5 Aplikace na nezpevněné povrchy

5.7.5.1 Popis lokality testování

Lokalitou prvního testování je sesuvné území Rabenov. Toto území je částí vnějších výsypků bývalého povrchového hnědouhelného dolu Chabařovice (Obr. 5.93).



Obr. 5.93: Výřez mapy se zobrazením sledovaného území.

Lokalita se nachází 5 km jihozápadně od města Ústí nad Labem. Sledovaná oblast má plochu cca 40 ha. Těžba zde byla zahájena v roce 1977 a uhlí těžené v dole Chabařovice patřilo k nejlepším v republice díky nízkému obsahu síry. Utlum těžby začal v roce 1994 a samotné ukončení těžby pak v dubnu 1997. V dubnu 1999 byl Ministerstvem životního prostředí schválen „Generel rekultivací do ukončení komplexní revitalizace území dotčeného těžební činností Palivového kombinátu Ústí, s. p.“. Na základě tohoto plánu probíhají v současnosti rekultivační práce oblasti, které zajišťuje palivový kombinát. Již od počátku 90.

let minulého století se na svahu projevovaly četné zádrhy a lokální sesuvy, proto je celý svah dlouhodobě sledován klasickými geodetickými metodami viz. [54].

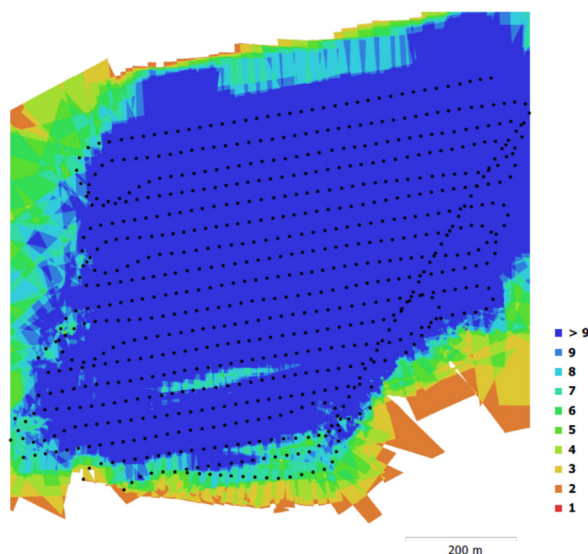
5.7.5.2 Parametry letecké mise

Letecké práce probíhaly 1.4.2017 v dopoledních hodinách. Začátek vegetačního období byl volen záměrně z toho důvodu, že sledované území má v té době minimální vegetační pokrývku a současně již jsou vrstvy atmosféry dostatečně teplé, aby nedocházelo k prudkým teplotním změnám v rámci jednotlivých vrstev. Celé sledované území bylo nalétnuto dvakrát nezávisle s přistáním letadla. V následující tabulce 5.34. jsou uvedeny parametry leteckých misi.

Tab. 5.34.: Parametry letecké mise

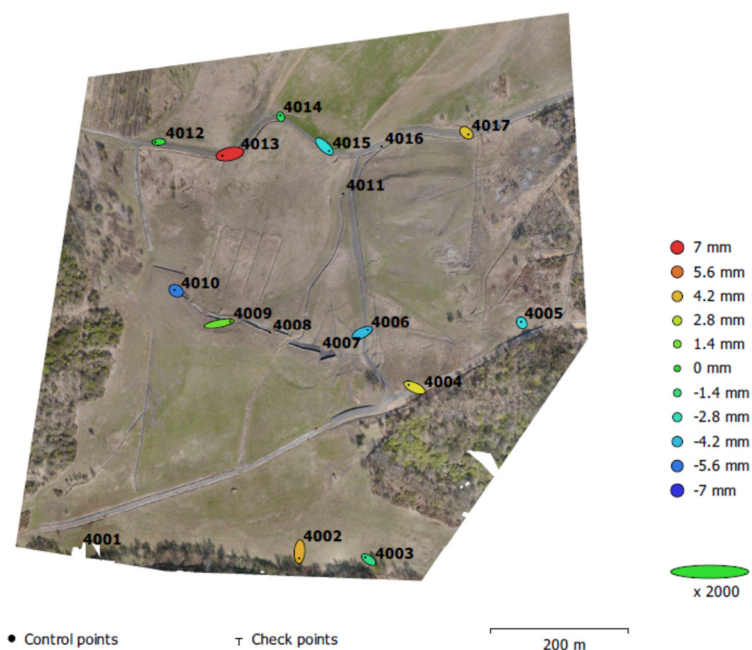
Velikost snímkové lokality	760 430 m ²
Výška letu nad terénem	155 - 284 m
Nalétnutá vzdálenost	28,31 km
Vzdálenost mezi snímky	19 m
Velikost pixlu na zemi	2,76 cm
Počet snímků	1278
Vzdálenost mezi letovými řadami	31,72 m
Čas letu	49:09 minut
Interval snímkování	1,59 sekund

Výpočet byl proveden v programu Agisoft Photoscan. V následující tabulce jsou uvedeny parametry výpočtu celé snímkové lokality. Celá lokalita byla rovnoměrně pokryta 17 vlíčovacími body zaměřenými metodou GNSS v režimu RTK v síti referenčních stanic VRS NOW ČR. Na následujícím obrázku Obr. 5.94. jsou detailně zakresleny jednotlivé letové řady a počty snímků na kterých jsou zobrazeny jednotlivé body.



Obr. 5.94: Pozice kamer a obrazové překryty.

Z obrázku Obr. 5.94. je patrné, že každý bod zájmového území je zobrazen nejméně na 8 snímcích. Na následujícím obrázku Obr. 5.95. jsou zobrazeny elipsy chyb na jednotlivých vlíčovacích bodech. Z celkového počtu 17 vlíčovacích bodů jich bylo do výpočtu použito 12. Bod 4001 nebyl použit z důvodu, že byl zobrazen pouze na 3 snímcích a body 4007, 4008, 4011 a 4016 byly díky osvětlení světlého podkladu hůře rozpoznatelné.



Obr. 5.95: Elipsy chyb dosažené na identických bodech.

V následující tabulce 5.35. jsou uvedeny odchylky na použitých identických bodech při výpočtu vlíčování v programu Agisoft Photoscan. Směrodatné odchylky na identických bodech byly nastaveny na hodnotu 5 mm.

Tab. 5.35.: Souřadnicové odchylky na identických bodech

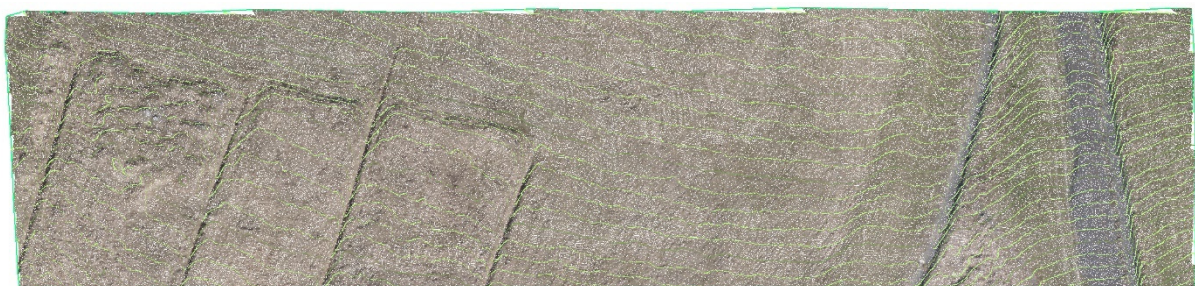
č.b.	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔZ [mm]	Δ prostorová [mm]
4002	-0,65	-9,55	4,43	10,55
4003	-4,86	3,36	-1,78	6,17
4004	-8,56	4,00	3,56	10,10
4005	-0,95	1,73	-3,57	4,08
4006	7,82	4,49	-4,27	9,98
4009	16,05	3,20	1,17	16,41
4010	-2,25	1,33	-5,49	6,08
4012	-4,97	-0,21	-0,29	4,98
4013	-10,80	-2,39	6,93	13,06
4014	-0,55	1,86	-1,07	2,21
4015	6,83	-6,49	-3,47	10,04
4017	2,69	-2,31	3,99	5,34
Celkem	7,17	4,19	3,82	9,14

V následujícím obrázku Obr. 5.96. je zobrazeno výsledné ortofoto s velikostí pixelu 25 mm pro průměrnou výšku.



Obr. 5.96: Výřez ortofotomapy sesuvného území.

Pro ověření přesnosti a použitelnosti mračna bodů, vzniklého obrazovou korelací z letecké fotogrammetrie pro potřeby sledování sesuvných území, byl vybrán výřez území o rozloze 220 m x 50 m a cca 800 000 bodů mračna s průměrnou hustotou 60,8 bodů na m² (Obr. 5.97).

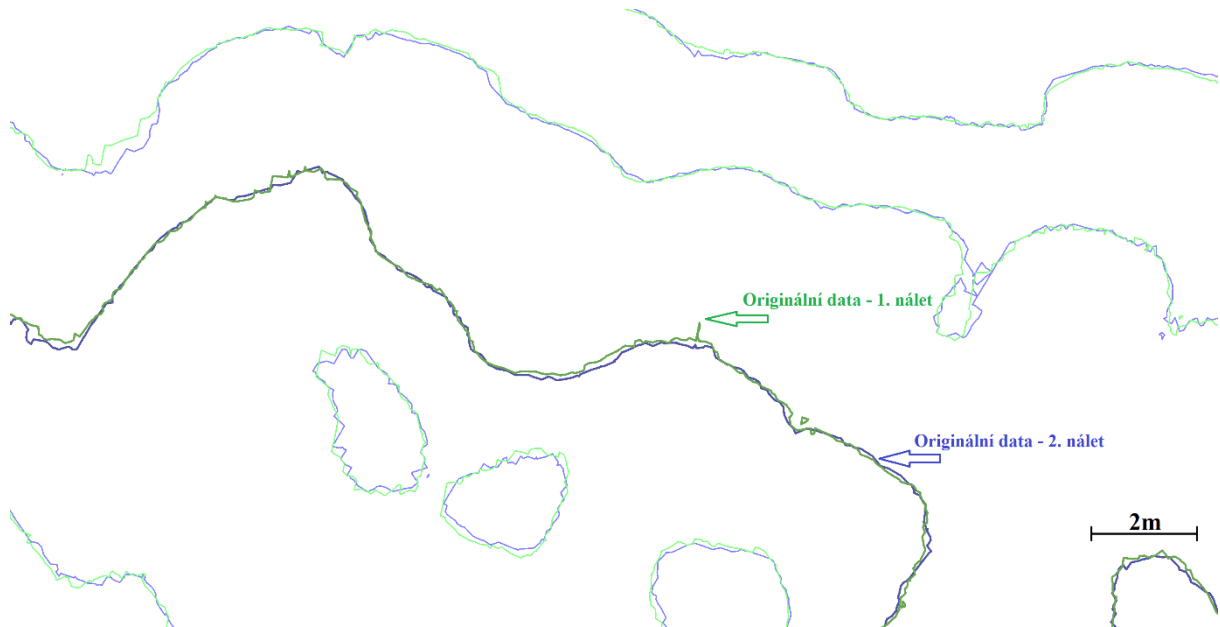


Obr. 5.97: Výřez mračna bodů testovacího území.

5.7.5.3 Volba metody redukce „šumu“

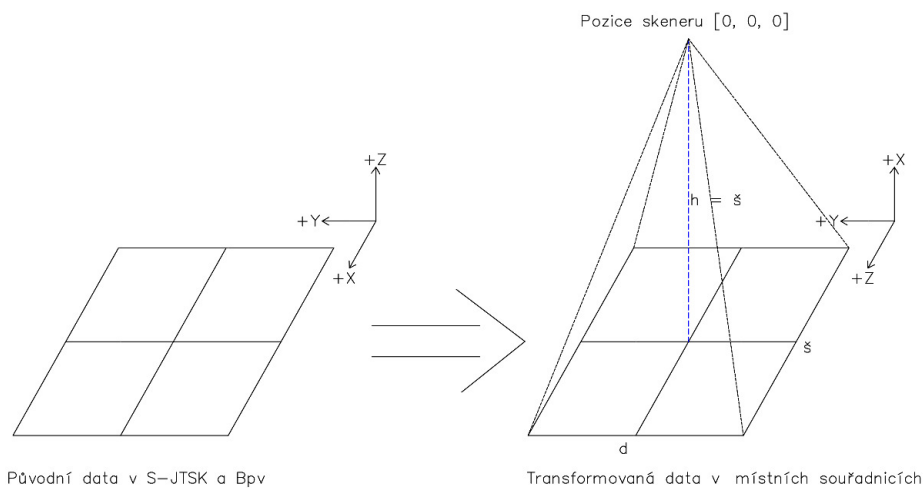
V případě mračna bodů vzniklého obrazovou korelací z letecké fotogrammetrie, nelze pojem šum chápat ve stejném významu jako při přímém měření pozemním či leteckým

skenerem. V podstatě se nejedná o šum, ale o výraznou nehomogenitu vypočteného mračna. Jednou z možností, jak se této nehomogenitě zbavit je redukce počtu bodů v mračnu. Tato redukce však může vést ke zbytečné ztrátě detailu. V následujícím obrázku jsou zobrazeny vrstevnice z originálního vypočteného mračna. Na vrstevnicích můžeme jasně pozorovat jejich nehomogenitu a z toho vyplývající poruchy v průběhu vrstevnic (Obr. 5.98).



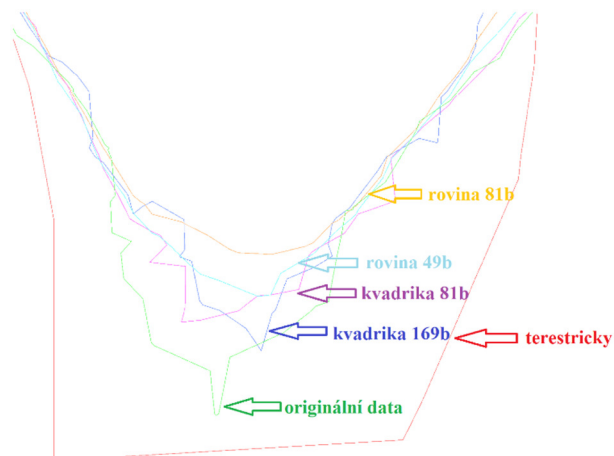
Obr. 5.98: Srovnání vrstevnicových modelů z dvou náletů.

Pro redukci šumu a vyhlazení dat mračna z letecké fotogrammetrie bude využito sw. Denoiser [21]. Aby bylo možné aplikovat sw. Denoiser je potřeba s mračnem bodů udělat několik úprav. Jedná se o posun mračna tak aby střed mračna ležel pod virtuálním skenerem a záměnu souřadnic, tak, aby filtrovaná vzdálenost byla v ose X. Tyto úpravy jsou uvedeny v následujícím schématu (Obr. 5.99).



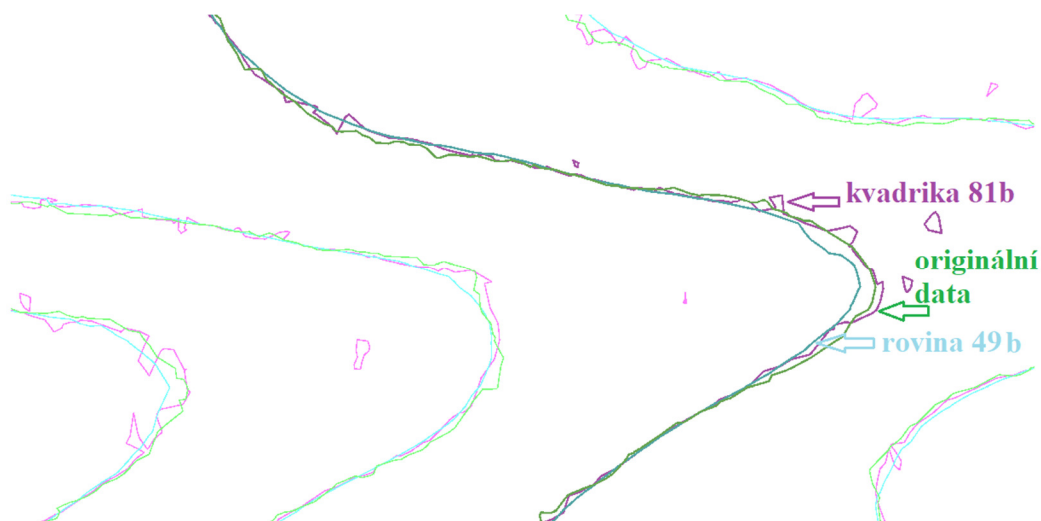
Obr. 5.99: Schéma transformace mračna bodů v S-JTSK a Bpv do místní soustavy.

Po úpravě dat do místní souřadnicové soustavy byly provedeny čtyři filtrace. Z předešlých zjištění byla jako metoda výpočtu použita robustní metoda. Filtrace byly provedeny metodou *rovina* 49 bodů a 81 bodů okolí a *kvadrík* 81 bodů a 169 bodů okolí. V následujícím obrázku Obr. 5.100. je graficky zobrazena úspěšnost jednotlivých metod redukce šumu.



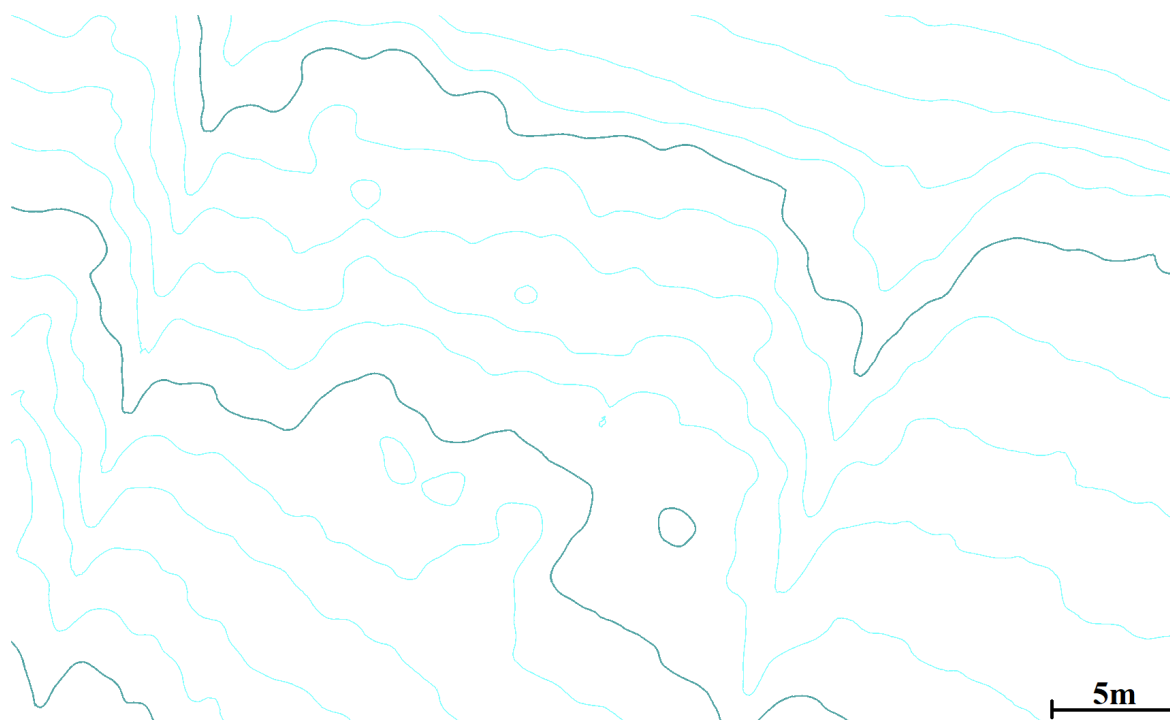
Obr. 5.100: Grafické srovnání metod redukce šumu – detail.

Nejpříznivějších výsledků dosáhla metoda *rovina* 49 bodů a *kvadrík* 81 bodů, které budou dále porovnávány. Metoda *rovina* 49 bodů dosahuje výborných výsledků vyhlazení, ale současně již více oddaluje filtrovaná data od původních. U metody *kvadrík* 169 bodů již paradoxně nedochází k většímu vyhlazení než u 81 bod okolí a vrstevnice jsou více „zubaté“. V následujícím obrázku Obr. 5.101. je detailněji porovnávána úspěšnost redukce šumu *rovina* 49 bodů a *kvadrík* 81 bodů.



Obr. 5.101: Grafické srovnání metod redukce šumu.

Z obrázku Obr. 5.101. je jasné patrné, že lepších výsledku vyhlazení dosahuje metoda *rovina* 49 bodů. Metoda *kvadrík* 81 bodů ponechává větší nehomogenitu dat a vytváří zdánlivě nesmyslné vrstevnice. Další výhodou metody *rovina* 49 bodů oproti metodě *kvadrík* 81 bodů je její výrazně menší výpočetní náročnost, kdy je doba výpočtu přibližně 2x kratší.



Obr. 5.102: Ukázka vrstevnicového plánu po redukci šumu – *rovina* 49 bodů.

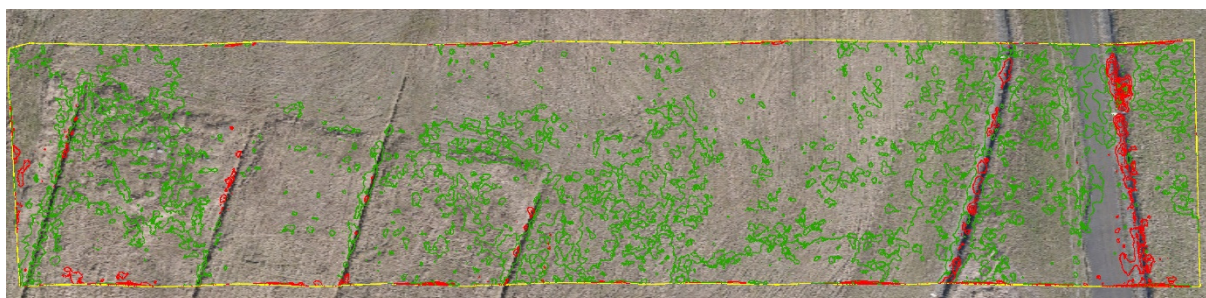
5.7.5.4 Porovnání dvou nezávislých leteckých misí

Jak již bylo uvedeno výše, sledované území bylo nalétnuto dvakrát nezávisle s přistáním letadla a novým naplánování letecké mise tak, abychom mohli simulovat dvojí měření například s ročním rozestupem. Jednou z možností porovnání jednotlivých mračen je vytvoření digitálního povrchu terénu a srovnání bilance násypu a výkopu. Celkově by násypy a výkopy mezi jednotlivými povrchy měly být co nejnižší a vzájemná bilance by se měla blížit nule. V následující tabulce jsou uvedeny bilance mezi náletem č.1 a č.2. Výpočet byl proveden v programu AutoCAD Civil 3D 2017.

Tab. 5.36.: Bilance výkopů a násypů mezi náletem č. 1 a č. 2.

	násyp [m ³]	průměrná záporná odchylka [m]	výkop [m ³]	průměrná kladná odchylka [m]	bilance [m ³]	celková průměrná odchylka [m]
originální data	-36,9	-0,004	135,1	0,013	98,2	0,010
rovina 49b	-27,3	-0,003	116,3	0,012	89,0	0,009
kvadrík 81b	-29,1	-0,003	123,3	0,012	94,2	0,009

Jako referenční je brán model z prvního náletu a k němu porovnáván model z náletu č.2. Celková plocha, na které je prováděno testování je 10 031 m². V bilanci násypu a výkopu převažuje výkop nad násypem a z toho vyplývá, že model z druhého náletu je celkově níže než z prvního náletu. Použitím metod redukce šumu dojde k mírnému zlepšení odlehlosti modelů. Na následujícím obrázku Obr. 5.103. je vrstevnicově znázorněn rozdílový model mezi náletem č. 1 a č. 2. a metodu redukce šumu *rovina 49* bodů okolí.



Obr. 5.103: Vrstevnicový rozdílový model odšuměných mračen z prvního a druhého náletu – *rovina 49b*.

Červeně znázorněná místa na rozdílovém modelu dosahují odchylek mezi modely více než 50 mm. Zelené vrstevnice znázorňují nulové odchylky mezi modely. Jak je patrné z podloženého ortofota, odchylky větší než 50 mm se nacházejí pouze na dnech příkopu. Místa znázorněná na okrajích testované oblasti vznikají na základě chybně vygenerovaného modelu terénu na hranách testovací oblasti.

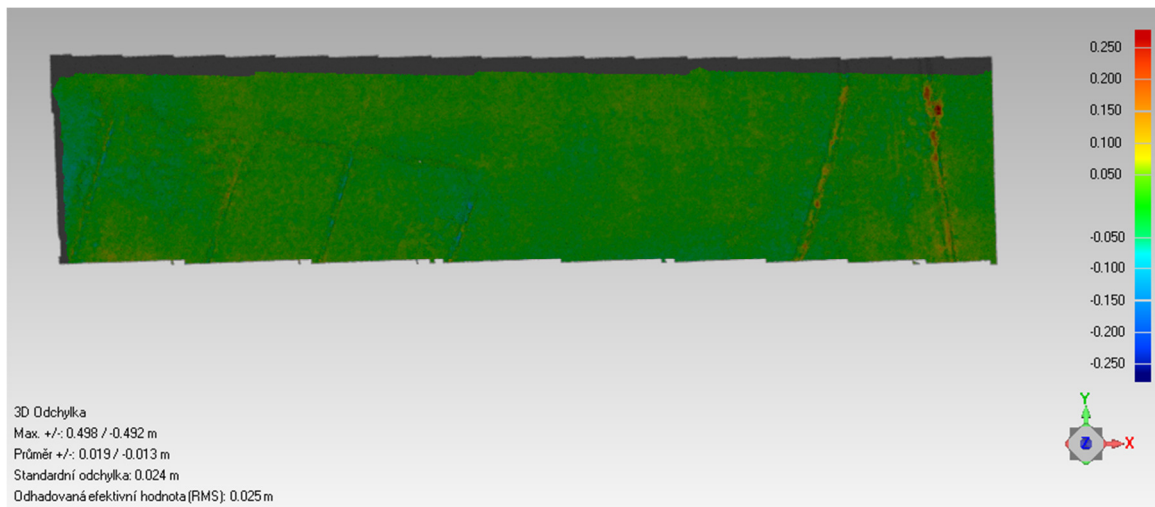
Druhou možností srovnání je vytvoření klasického rozdílového modelu v programu Geomagic Studio a grafická interpretace odchylek mezi oběma modely. V následující tabulce jsou uvedeny průměrné kladné a záporné odchylky a standardní odchylka rozdílového modelu.

Tab. 5.37.: Parametry rozdílových modelů mezi náletem č. 1 a č. 2.

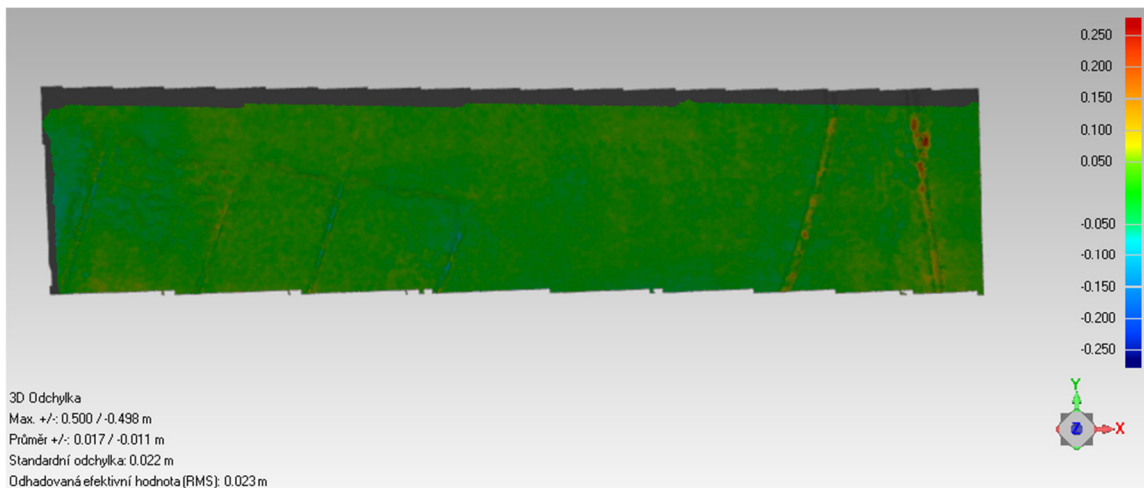
	průměrná záporná odchylka [m]	průměrná kladná odchylka [m]	standardní odchylka [m]
originální data	-0,013	0,019	0,024
<i>rovina 49b</i>	-0,011	0,017	0,022
kvadrík 81b	-0,011	0,017	0,021

Z výsledku rozdílových modelů také vidíme, že dochází k mírnému zlepšení modelů při použití metod redukce šumu. Mírné rozdíly ve výsledcích získaných z sw. AutoCAD a Geomagic Studio jsou způsobeny mírně rozlišným způsobem vypočtu trojúhelníkové sítě.

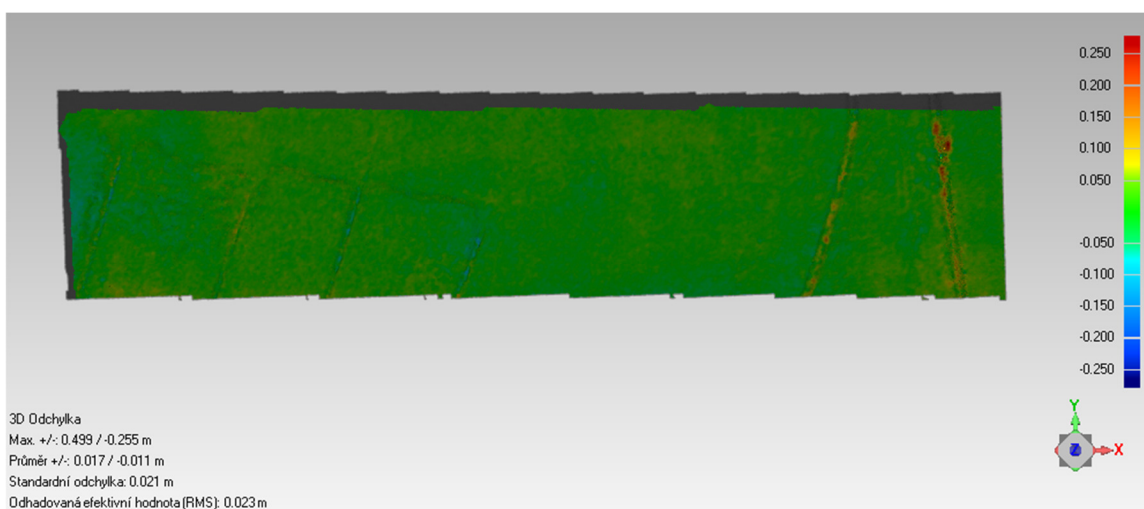
V sw. AutoCAD je k terénu více přístupováni také z geomorfologického hlediska. Na následujících obrázcích jsou uvedeny hypsometrické modely mračen z náletů č. 1 a č. 2.



Obr. 5.104: Rozdílový model originálních mračen z prvního a druhého náletu.



Obr. 5.105: Rozdílový model odšuměných mračen z prvního a druhého náletu – rovina 49b.

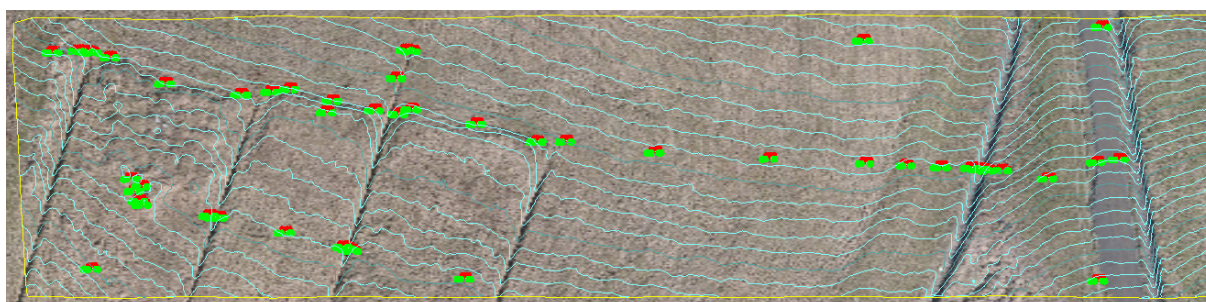


Obr. 5.106: Rozdílový model odšuměných mračen z prvního a druhého náletu – kvadrík 49b.

Také dle vyhodnocení v sw. Geomagic Studio (Obr. 5.104, Obr. 5.105 a Obr. 5.106), je patrné, že k největším odchylkám dochází na dně příkopu podél cesty. Z rozdílových modelů je však patrné, že většina testovacího území dosahuje odchylky mezi modely je obou náletů do 50 mm.

5.7.5.5 Porovnání s terestrickým měřením

Celá oblast testovacího území byla ve stejný den zaměřena pomocí klasického terestrického měření metodou GNSS v režimu RTK. Na testovacím území bylo vybráno 46 kontrolních bodů, které byly zaměřeny terestricky a v jednotlivých modelech odečteny výšky.



Obr. 5.107: Rozmístění kontrolních bodů.

Jedná se o body na jednom profilu doplněné o body rovnoměrně rozložené po testovacím území. Na předchozím obrázku Obr. 5.107. je uvedeno rozmístění kontrolních bodů. V následujících tabulkách 5.38. a 5.39. je uvedena ukázka z porovnání 46 vybraných kontrolních bodů.

Tab. 5.38.: Ukázka odchylek na kontrolních bodech – nálet č. 1.

Nálet č.1										
číslo bodu	terestricky	původní data	v [m]	v^*v	rovina 49 bodů	v [m]	v^*v	kvadrata 81 bodů	v [m]	v^*v
5273	208,35	208,41	0,06	0,00	208,40	0,05	0,00	208,40	0,05	0,00
5289	208,43	208,38	-0,05	0,00	208,37	-0,06	0,00	208,37	-0,06	0,00
5290	214,00	213,92	-0,08	0,01	213,92	-0,08	0,01	213,92	-0,08	0,01
5291	213,97	213,90	-0,07	0,00	213,90	-0,07	0,00	213,90	-0,07	0,00
5297	214,19	214,18	-0,01	0,00	214,19	0,00	0,00	214,18	-0,01	0,00
5298	212,35	212,52	0,17	0,03	212,51	0,16	0,03	212,51	0,16	0,03
5299	212,20	212,20	0,00	0,00	212,19	-0,01	0,00	212,19	-0,01	0,00
5300	211,35	211,72	0,37	0,14	211,73	0,38	0,14	211,73	0,38	0,14
.
.
5408	216,21	216,57	0,36	0,13	216,66	0,45	0,20	216,62	0,41	0,17
5409	217,05	217,09	0,04	0,00	217,08	0,03	0,00	217,10	0,05	0,00
Suma v^*v				0,58			0,69			0,65
průměrná odchylka [m]			0,05			0,05			0,05	
minimální odchylka [m]			-0,09			-0,12			-0,10	
maximální odchylka [m]			0,37			0,45			0,41	
Směrodatná odchylka modelu [m]				0,113			0,123			0,119

Tab. 5.39.: Ukázka odchylek na kontrolních bodech – nálet č. 2.

Nálet č.2											
číslo bodu	terestricky	původní data	v [m]	v^*v	rovina 49 bodů	v [m]	v^*v	kvadrata 81 bodů	v [m]	v^*v	
5273	208,35	208,40	0,05	0,00	208,37	0,02	0,00	208,37	0,02	0,00	
5289	208,43	208,35	-0,08	0,01	208,36	-0,07	0,00	208,36	-0,07	0,00	
5290	214,00	213,86	-0,14	0,02	213,87	-0,13	0,02	213,87	-0,13	0,02	
5291	213,97	213,88	-0,09	0,01	213,88	-0,09	0,01	213,88	-0,09	0,01	
5297	214,19	214,18	-0,01	0,00	214,18	-0,01	0,00	214,18	-0,01	0,00	
5298	212,35	212,46	0,11	0,01	212,47	0,12	0,01	212,48	0,13	0,02	
5299	212,20	212,21	0,01	0,00	212,18	-0,02	0,00	212,18	-0,02	0,00	
5300	211,35	211,68	0,33	0,11	211,69	0,34	0,12	211,68	0,33	0,11	
.	
.	
5408	216,21	216,58	0,37	0,14	216,62	0,41	0,17	216,59	0,38	0,14	
5409	217,05	217,04	-0,01	0,00	217,04	-0,01	0,00	217,05	0,00	0,00	
Suma v^*v				0,55					0,62	0,56	
průměrná odchylka [m]			0,03					0,03	0,03		
minimální odchylka [m]			-0,14					-0,18	-0,13		
maximální odchylka [m]			0,37					0,41	0,38		
Směrodatná odchylka modelu [m]				0,110					0,116	0,110	

Z tabulek 5.38. a 5.39. je patrné, že výsledky obou náletů jsou téměř stejné. Body v ploše jsou určeny s přesností desítek milimetrů. Vypočtená směrodatná odchylka modelů je mezi 110 mm a 120 mm. Vyhlazením mračna dochází k mírnému zhoršení výsledku na dně příkopů. Problém nastává v úzkých příkopech, kde jsou body vypočteného mračna výše než body terestrického měření, což potvrzuje výrazně větší maximální odchylka než minimální. Jako vztažná metoda zhodnocení je použito terestrické měření metodou GNSS, které má právě metoda obrazového skenování nahradit. Nejpravděpodobnějším důvodem toho, proč u obou náletů jsou průměrné odchylky kladné, je existence minimální vegetace na sledovaném povrchu. Záměrně bylo měření prováděno 1. dubna, kdy je vegetace ještě minimální, ale vzdušné vrstvy jsou již dostatečně prohráté tak, aby nedocházelo k výrazným poryvům letadla během letu.

Druhým způsobem porovnání s terestrickým měřením je již výše zmíněné porovnání digitálních modelů terénu bilancí násypů a výkopů. V následující tabulce 5.40. je tato bilance uvedena s tím, že jako vztažný povrch je využit model terénu z terestrického měření vzniklý ze všech bodů měření (770 bodů na sledovaném sesuvném území).

Výsledky bilance násypů a výkopů potvrzují výsledky testování na kontrolních bodech a nasvědčují tomu, že druhý nálet je globálně o přibližně 20 mm níže.

Tab. 5.40.: Bilance násypů a výkopů při srovnání s terestrickým měřením.

	násyp [m ³]	průměrná kladná odchylka [m]	výkop [m ³]	průměrná záporná odchylka [m]	bilance [m ³]	celková průměrná odchylka [m]
Nálet č.1						
originální data	605,3	0,059	-488,8	-0,048	116,5	0,011
rovina 49b	599,2	0,059	-484,1	-0,048	115,1	0,011
kvadrík 81b	601,4	0,059	-487,0	-0,048	114,5	0,011
Nálet č.2						
originální data	558,1	0,052	-642,0	-0,060	-83,8	-0,008
rovina 49b	547,5	0,051	-641,0	-0,060	-93,5	-0,009
kvadrík 81b	554,0	0,051	-640,1	-0,059	-86,2	-0,008

Z výše uvedených tabulek a rozdílových modelů je patrné, že metoda obrazového skenování dosahuje na spojitých plochách terénu přesnosti do 50 mm globálně ve srovnání s metodou GNSS – RTK. Problém nastává v úzkých příkopech, kde metoda selhává. Obecně lze však říci, že metoda obrazového skenování má dostatečnou přesnost pro sledování pohybů a sesuvů výsypek a rekultivací povrchových lomů, kde jsou očekávány posuny v rámci stovek milimetrů. Navíc při etapovém sledování technologií letecké fotogrammetrie, a z toho odvozeného obrazového skenování je dosaženo ještě lepších výsledků, jak bylo dokázáno v kapitole 5.7.5.4. Nedílnou součástí zhodnocení je také ekonomická a časová náročnost měření. Celá lokalita sesuvného území Rabenov byla ve dvoučlenné skupině během 4 hodin nalétnutá třikrát i se stabilizací a zaměřením vlíčovacích bodů. Oproti tomu klasické RTK měření trvalo dvojicí měřičů s dvěma aparaturami 9 hodin a byla zaměřena pouze zhruba třetina sledovaného území.

5.7.6 Aplikace na zpevněné povrchy

V předchozí kapitole 5.7.5. byla aplikace obrazového skenování vyzkoušena na nezpevněném spojitém terénu. Pro ověření účinnosti a kvality obrazového skenování na zpevněných površích bylo provedeno kontrolní měření na živičných odstavných plochách SSÚD Rudná. Po rekonstrukci SSÚD v roce 2015 bylo provedeno podrobné zaměření finální pokládky konstrukčních vrstev živičné plochy. Terestrické měření bylo provedeno polární metodou multistanicí Leica Nova MS50 a připojeno na základní vytyčovací síť stavby. V říjnu 2017 bylo provedeno snímkování za účelem vytvoření ortofoto snímku SSÚD pro potřeby ŘSD. Při výpočtu ortofota vzniklo mračno bodů, ze kterého byl použit testovací výřez.

5.7.6.1 Parametry letecké mise a volba redukce šumu

Parametry letecké mise byly nastaveny tak, aby velikost pixelu výsledného ortofota byla menší než 25 mm. Zájmová lokalita SSÚD byla vždy zobrazena na nejméně 9 snímcích. V následující tabulce 5.41 jsou uvedeny základní parametry letecké mise.

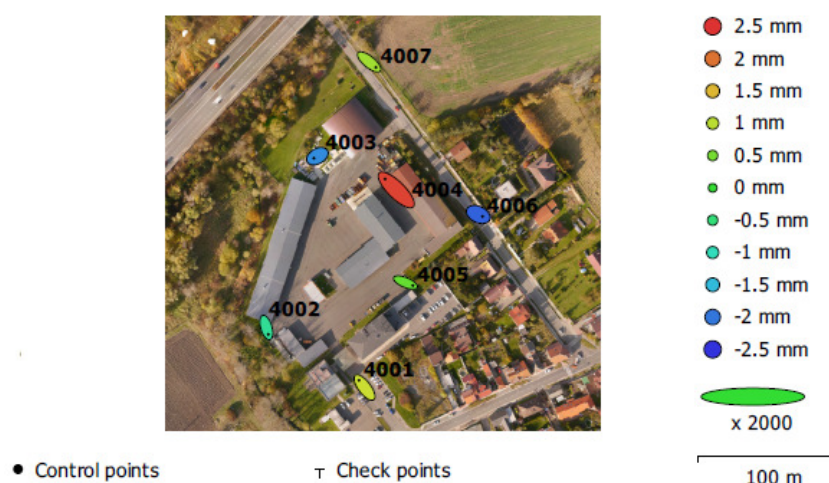
Tab. 5.41.: Parametry letecké mise.

Velikost snímkové lokality	223 000 m ²
Výška letu nad terénem	150 m
Vzdálenost mezi snímky	19 m
Velikost pixelu na zemi	24 mm
Počet snímků	168
Vzdálenost mezi letovými řadami	30,34 m
Čas letu	22:04 minut
Interval snímkování	1,60 sekund

V následující tabulce 5.42 a na obrázku 5.92. jsou uvedeny odchylky na vlíčovacích bodech. Vlícovací body byly zaměřeny totální stanicí ze základní vytyčovací sítě (Obr. 5.108).

Tab. 5.42.: Souřadnicové odchylky na identických bodech.

č.b.	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔZ [mm]	Δ prostorová [mm]
4001	-3,95	5,23	1,12	6,65
4002	1,41	-4,91	-0,75	5,17
4003	-2,58	-1,44	-1,87	3,50
4004	-8,01	7,91	2,36	11,50
4005	5,30	-2,15	0,36	5,73
4006	2,98	-1,39	-2,17	3,94
4007	4,84	-3,95	0,80	6,30
Total	4,61	4,44	1,53	6,58



Obr. 5.108: Elipsy chyb dosažené na identických bodech.

Jako metody redukce šumu byly použity již výše zmíněné metody *rovina* 49 bodů okolí a *rovina* 81 bodů okolí. Metoda kvadrík nebyla využita z důvodů nevhodnosti pro filtraci na rovinných plochách.



Obr. 5.109: Ortofoto SSÚD Rudná s vyznačením testovacího území.

Testovací výřez území o rozloze cca 1 500 m² a cca 175 000 bodů mračna s průměrnou hustotou 117 bodů na m² (Obr. 5.109). Tento testovací výřez byl volen záměrně z toho důvodu, že se jedná o největší ucelenou plochu se změnou spádu živичného povrchu, tj. nachází se zde úžlabí.

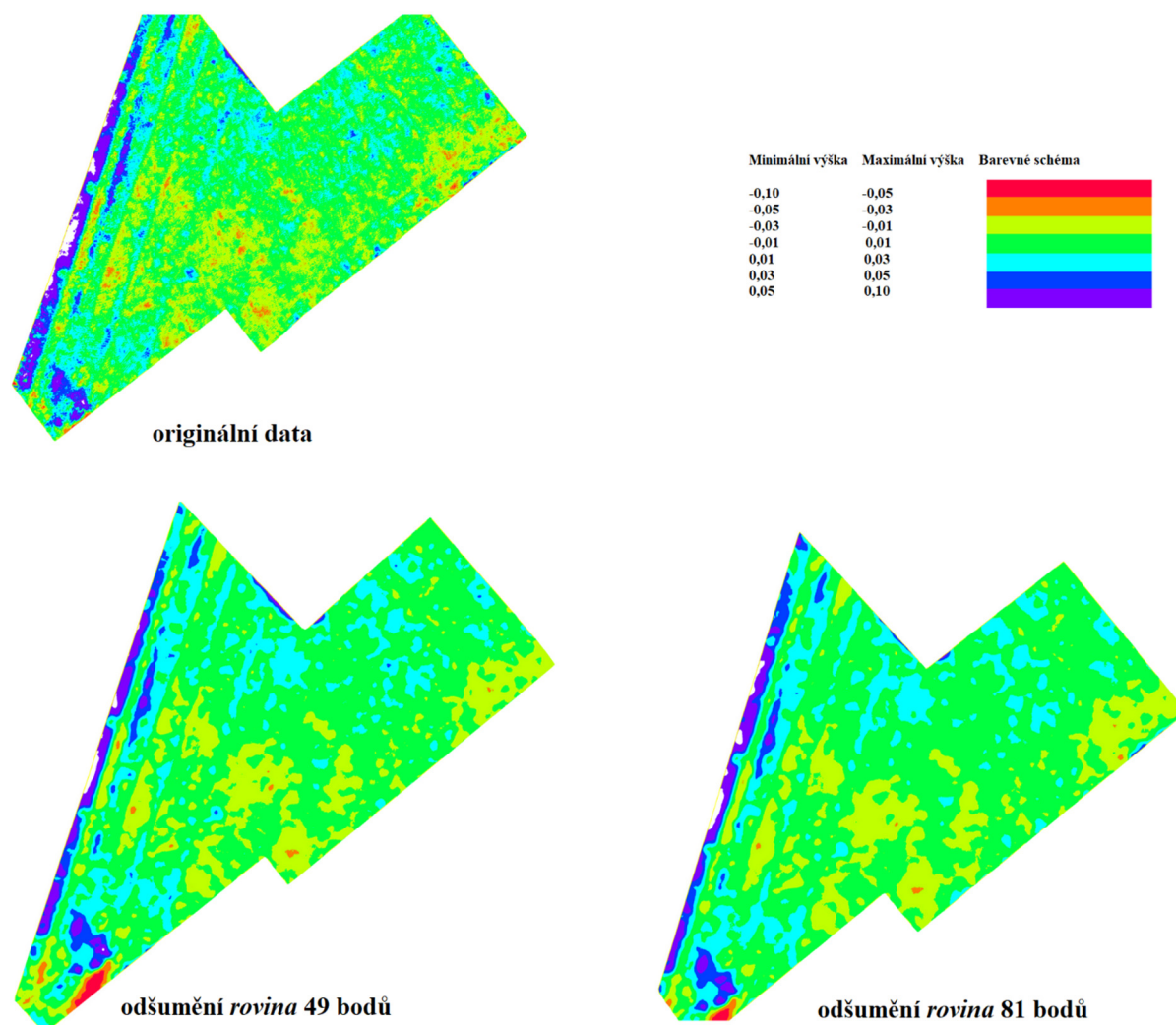
5.7.6.1 Porovnání s terestrickým měřením

Jak již bylo zmíněno dříve, byl povrch získaný z obrazového skenování porovnán s terestrickým měřením provedeným po pokládce. V následující tabulce 5.43. jsou uvedeny bilance násypů a výkopů a vypočtené průměrné kladné a záporné odchylky.

Tab. 5.43.: Bilance násypů a výkopů při srovnání s terestrickým měřením

	násyp [m ³]	průměrná kladná odchylka [m]	výkop [m ³]	průměrná záporná odchylka [m]	bilance [m ³]	celková průměrná odchylka [m]
originální data	12,8	0,009	-7,8	-0,005	5,0	0,003
rovina 49b	10,8	0,007	-6,6	-0,004	4,2	0,003
rovina 81b	10,8	0,007	-6,5	-0,004	4,3	0,003

Celková průměrná odchylka mezi terestrickým měřením a modelem získaným z dat obrazového skenování na zpevněných plochách je 3 milimetry. V následujících hypsometrických modelech je zobrazeny rozdílové modely porovnání obrazového skenování se vztažným terestrickým měřením.



Obr. 5.110: Rozdílové modely obrazového skenování s terestrickým měřením

Na rozdílových modelech zobrazených na obrázku Obr. 5.110. vidíme úspěšnost redukce šumu v mračnu a odstranění většiny lokálních minim a maxim. Fialový pruh na levé straně rozdílových modelů, tj. odchylky od +0,05 m do +0,10 m vznikl vlivem blízkosti skladovací garáže výšky cca 7 metrů, která ovlivnila výpočet obrazového mračna. Když výpočet mračna není ovlivněn blízkými, výrazně výškově odlišnými předměty, je kvalita vypočteného mračna na velice dobré úrovni a odchylky od terestrického modelu se pohybují v rámci desítek milimetrů.

6 ZÁVĚR

V prvním experimentu byla určena rozlišovací schopnost terestrického skenovacího systému Leica HDS3000 na základě vyhodnocení intenzit odraženého paprsku. Experiment je založen na bázi testování fotografických objektivů. Z výsledků analogového vyhodnocení je patrné, že jednoznačně dokážeme zachytit detail o velikosti 6 mm, ale také dokážeme zaznamenat výskyt prvků o velikosti 4 mm i když nedosáhneme požadované intenzity. Z analytického výpočtu vyplývá, že k výraznému zlomu funkce CTF dochází na 6 mm, z čehož usuzujeme, že se jedná o hodnotu velikosti stopy. Při výpočtu bylo zjištěno, že skener dokáže detekovat i výskyt objektů o velikosti 2 mm. Z dosažených výsledků tedy můžeme říci, že jednoznačně můžeme rozlišit detail o rozměru 6 mm, detekovat však můžeme i výskyt menších objektu, a to jak vyplývá z analytického výpočtu o rozměru cca 2,5 mm. Získané výsledky potvrzují domněnku uvedenou v [14], že jsme schopni detekovat objekt o velikosti 1/3 velikosti stopy laserového svazku.

V další kapitole bylo stručně představeno využití laserového skenovacího systému s vyšší směrodatnou odchylkou délky k přesným pracím v oblasti geodetického monitoringu. Stabilita sítě a měřených pilířů byla nezávisle kontrolována dvěma totálními stanicemi. Naměřené posuny byly statisticky vyhodnoceny pomocí Grubbsova testu. Výsledná hodnota směrodatné odchylky posunu činí 0,9 mm. Experimentem bylo prokázáno, že i přes nižší apriorní přesnost dálkoměru staršího testovaného skenovacího systému, je možno tento systém možno použít pro přesný geodetický monitoring. Celkově však lze říci, že pro oblast monitoringu jsou lépe využitelné rychle se rozvíjející multistanice, jejichž výhodou je okamžitá přesná orientace stanoviska a výstup přímo orientovaného mračna.

V kapitole 5.4. je popsán princip a účel vlnkové transformace. Tato transformace se s výhodou používá k odstranění vysokofrekvenčního šumu. Významná aplikace vlnkové transformace je například v oblasti redukce šumu v datech EKG, či hlavně v oblasti filtrace obrazu. Právě z aplikace v oblasti „odšumění obrazu“ vychází úvaha o vhodnosti při použití této filtrační metody v oblasti laserového skenování. Testování bylo nejprve zkušebně provedeno na virtuálních skenech roviny a části kulové plochy. Ze skenované plochy musí být vytvořen „range image“, tj. pravidelná matice měřených délek, kde právě jeden člen matice je vyplněn konkrétní délkou. Byl vytvořen virtuální sken, do kterého byl přidán náhodný délkový šum se směrodatnou odchylkou 4 mm. Po aplikaci filtrace pomocí vlnkové transformace byl šum redukován na minimum a směrodatné odchylky prolezení koule nebo

roviny klesly z cca 4 mm pro zašumněný sken, na cca 1,0 mm pro odšumněný sken pomocí Daubecheis vlnky 2. řádu. Dle výsledků na virtuálních skenech, kde redukce šumu metodou vlnkové transformace dosáhla výborných výsledků, bylo následně přistoupeno k testování na reálných skenech, a to na skenu interiérové přičky a také na části sochy Davida (spojitý útvar). Také na reálných skenech bylo dosaženo dobrých výsledků redukce šumu. Výsledky vlnkové transformace jsou srovnatelné s průměrovaným skenem, jehož přínos byl prezentován např. v [40]. Z uvedených poznatků můžeme konstatovat, že vlnkova transformace je použitelná k odstranění délkového šumu. Limitujícím faktorem aplikace této matematické metody je tvorba přesné plné pravidelné délkové matice, protože většina moderních skenerů nezachovává pravidelnou mřížku a délkovou matici tak není možno vytvořit bez ztráty dat.

Náplní dalšího experimentu bylo zhodnotit přínos metod redukce šumu dat a jejich závislost na hustotě a vzdálenosti skenování. Z výsledků bylo zjištěno, že je nutné dbát správného zvolení počtu bodů okolí v závislosti na hustotě skenování. Pro tuto práci byly zvoleny dvě velikosti bodu okolí, a to: 25 bodů pro hustoty skenování 2 mm x 2 mm a 4 mm x 4 mm. Pro hustoty skenování 6 mm x 6 mm a 8 mm x 8 mm pak 9 bodů okolí. Z výsledku je patrné, že vzdálenost skenování nemá na úspěšnost metod redukce šumu vliv a výsledky jsou srovnatelné pro všechny měřené vzdálenosti. Metoda prokládání *kvadriky* a odšumění komerčním softwarem Geomagic Studio nepřináší prokazatelné zlepšení, v některých případech dokonce dochází k zhoršení původních dat. U metod založených na prokládání *Čebyševových polynomů* nastává omezení v použití polynomů 3. a 4. řádu v počtu bodů okolí. Minimální počet bodů okolí je pro 3. a 4. řád 25 bodů, z tohoto důvodu nemohly být polynomy aplikovány na hustoty skenování 6 mm x 6 mm a 8 mm x 8 mm. Redukce šumu pomocí *Čebyševových polynomů* dosahuje výborných výsledků v eliminaci maximálních kladných a záporných odchylek. Po grafickém zhodnocení je však patrné, že tato metoda není schopna odstínit šum na plochách s nulovou křivostí (vytváří „vlnky“). Dle původního předpokladu dosahuje nejlepších výsledků *rovina* a proti prvotním předpokladům také metoda *průměr*, která z logiky věci není nejvhodnější, přesto při vysoké hustotě skenování a malém počtu bodů okolí dosahuje kvalitních výsledků. Testovací desky obsahují velké množství rovinných ploch, které výrazně ovlivňují statistické výsledky směrodatných odchylek a napomáhají lepším výsledkům metody *průměr*. Po přezkoumání výsledku byl znovu posouzen význam volby výpočtu proložení, a to porovnání přínosu metody nejmenších čtverců nebo robustní metody normou L1. Z výsledků uvedených v kapitole 5.5.4. je patrné ,

že při vhodně zvoleném počtu bodů okolí dosahují oba výpočty velice podobných výsledků. Z rozdílových modelů je však viditelné, že při nesprávném zvolení počtu bodů okolí dosahuje výpočet pomocí robustní metody normou L1 výrazně lepších výsledků a nedochází k nežádoucímu „zkosení“ hran. Také při tomto testu, navzdory očekávání, dosahuje lepších výsledků metoda *průměr* než *rovina*.

Další kapitola se zabývá určením rozlišovací schopnosti terestrických skenerů na 3D testovacích přípravcích. Prvním testovaným skenerem byl skener Leica HDS3000. Na testovacím přípravku "A" (mění se hloubka prohlubně) je graficky vidět, že metoda odšumění má velký přínos, detekce prohlubně se zlepšila z hloubky 3 mm na 1 mm a rozlišení z hloubky 6 mm na 2 mm. V případě testovacího přípravku "C" (mění se šířka prohlubně) způsobuje redukce šumu metodou *průměr* na užších mezerách nežádoucí vyhlazení, a proto poměrně výrazně klesá rozlišení těchto mezer ze šířky 3 mm na 10 mm. U širších mezer, které již lze rozlišit, je patrné, že redukce šumu vytváří na dně mezery vyhlazení ve tvaru misky. Velikost stopy laserového svazku je určena na 6 mm. Dalším testovaným skenerem byl Surphaser 25HSX. Na testovacím přípravku "A" dosahují výsledky tohoto skeneru s přehledem nejlepších hodnot. Rozlišení prohlubně o hloubce 1 mm je naprosto jednoznačné. Výsledkem z testovacího přípravku "C" je rozlišení detailu o velikosti 3 mm a velikost stopy je určena na 4 mm. Skener Trimble TX5 na testovacím přípravku "A" rozliší prohlubeň o hloubce 1 mm, na testovacím přípravku "C" rozliší mezeru o šířce 3 mm, velikost stopy je pak 4 mm. Multistanice Leica Nova MS50 u obou testovacích přípravků rozliší detail o velikosti 3 mm. Velikost stopy určená z přípravku „C“ je 4 mm. Posledním testovaným skenerem je Leica ScanStation P20, kde na testovacím přípravku "A" bylo možné rozlišit prohlubeň o hloubce 4 mm a na testovacím přípravku "C" bylo možné rozlišit mezeru o šířce 4 mm. Velikost stopy je 4 mm. V případě skeneru Leica ScanStation P20 bylo také testováno zlepšení rozlišovací schopnosti vlivem redukce šumu zabudovaným opakovaným měřením délky a v sw. Denoiser [21] metodou *průměr* s 25 body okolí. U testovacího přípravku "A" lze pozorovat zlepšení rozlišení hloubky 2 mm. U testovacího přípravku "C" lze pozorovat zlepšení pouze graficky, číselné hodnoty rozlišení se nemění.

Posledním řešeným projektem byla aplikace rychle se rozvíjejících modelů RPAS pro geodetický monitoring sesuvného území. V práci byl popsán vlastní vývoj bezpilotního leteckého prostředku, administrativní povinnosti, plánování a provedení letecké mise a samotný výpočet výsledného mračna bodů. Mračno bodů vzniká na základě obrazové

korelace. Pro správný výpočet obrazové korelace je nutnost, aby každý bod povrchu byl zachycen na několika snímcích. V popsaném případě to bylo vždy minimálně 8 snímků. Experiment byl proveden na sesuvném území Rabenov. Testování bylo provedeno mezi dvakrát nezávisle provedenými nálety a výpočty dvou nezávislých mračen a také mezi modelem terénu vzniklým z leteckého mračenja a klasickým terestrickým měřením provedeným aparaturou GNSS v režimu RTK. Jako metoda redukce nehomogenity mračenja bodů získaného z obrazové korelace byla zvolena aplikace sw. Denoiser [21]. Pro možnost aplikace sw. Denoiser musela být provedena transformace do místní soustavy. Z výsledků výpočtů rozdílových modelů terénu mezi prvním a druhým náletem byla určena průměrná odlehlost 10 mm pro původní data a 9 mm pro data po redukci šumu metodou rovina 49 bodů okolí. Při porovnání s klasickým terestrickým měřením byly odhaleny největší odchylky na dnech úzkých příkopů, kde obrazová korelace selhává a jsou zde dosaženy odchylky až 0,5 m. Pro testovací území o rozloze 11 000 m² byla provedena kontrola na 46 bodech zaměřených terestricky. Průměrná odchylka mezi náletem č.1 a terestrickým měřením činila 0,050 m a mezi náletem č.2 a terestrickým měřením pak 0,030 m. Na závěr bylo ještě provedeno testování na zpevněných plochách v areálu SSÚD Rudná, kde na testované ploše 1 500 m² byla dosažena celková průměrná odchylka 0,003 m mezi terestrickým měřením totální stanicí a mračenem z RPAS. Na základě uvedených výsledků a na základě ekonomické náročnosti a rychlosti můžeme konstatovat, že prostředky RPAS a výpočet mračenja bodů pomocí obrazové korelace jsou vhodné k pravidelnému sledování posunů sesuvných území. Další výhodou je vznik aktuálního ortofota ve vysokém rozlišení, kde je možno jednoznačně identifikovat drobná lokální poškození. Sledované sesuvné území Rabenov bude opět nalétnuto na přelomu března a dubna 2018 a vyhodnoceny posuny.

7 BIBLIOGRAFIE

- [1] Štroner, M. - Pospíšil, J.: Terestrické skenovací systémy. Praha: ČVUT v Praze, 2008. 185 stran. ISBN 978-80-01-04141-3.
- [2] Cuiwei, L. - Chongxun, Z. - Changfeng, T.: Detection of ECG characteristic points using wavelet transforms. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1995, ISSN 0018-9294.
- [3] Štroner, M. - Pospíšil, J. – Koska, B. – Křemen, T. – Urban, R. – Smítka, V. – Třasák, P.: 3D skenovací systémy Praha: Čvut v Praze, 2013, p. 394, ISBN 978-80-01-05371-3.
- [4] GEOTRONICS PRAHA, Reklamní prezentace: skenovací systémy, Praha, 2017.
- [5] Wikipedia: Laser. Dostupné online z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>. 26.11.2017.
- [6] WikiSkripta: Laser. Dostupné online z <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Laser>. 26.11.2017.
- [7] Wikipedia: Fotoelektrický jev. Dostupné online z https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotoelektrick%C3%BD_jev. 26.11.2017.
- [8] Rüeger, J. M.: Electronic distance measurement: an introduction. 3rd totally rev. ed. New York: Springer-Verlag, c1990. ISBN 03-875-1523-2.
- [9] Třasák, P.: Vliv úhlu dopadu dálkoměrného svazku na velikost směrodatné odchylky délky měřené bezhranolovým dálkoměrem. In: Juniorstav 2011. Brno: FA VUT, 2011, ISBN 978-80-214-4232-0.
- [10] Štroner, M. - Pospíšil, J.: Systematic Geometrical Errors of Scanning Spherical Surfaces. Survey Review, vol. 43, no. 323, p. 731-742, 2011.
- [11] Besl, P. - McKay, N.: A method for Registration of 3D Shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Maschine Inteligence (PAMI), p. 239-256, 1992, ISSN 0162-8828.
- [12] Firemní literatura: 3DReshaper Dostupné online z: <http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produkty/221/3dreshaper>. 26.11.2017.
- [13] Lichti, D.: A resolution measure for terrestrial laser scanners, p. 6., Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology Perth, 2004. Dostupné online z Dostupné z: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm5/papers/552.pdf>.
- [14] Pesci, A. – Teza, G. – Bonali, E.: Terrestrial Laser Scanner Resolution: Numerical Simulations and Experiments on Spatial Sampling Optimization. 2011, s. 18. Dostupné online z: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/1/167>.
- [15] Wikipedia: Shannonův teorém. Dostupné online z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Shannon%C5%AFv_teor%C3%A9m. 26.11.2017.

- [16] Smítka, V. - Štroner, M.: Zvýšení přesnosti 3D skenování průměrováním opakovaných skenů. Geodetický a kartografický obzor. 2012, roč. 58, č. 6, s. 121-128. ISSN 0016-7096.
- [17] Schultz, T.: Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Berlin: Technical University of Berlin, 2007. [Disertační práce].
- [18] Schultz, T. – Ingensand, H. – Steiner, M.: Laser scanning and noise reduction applied to 3D road surface analysis. In. Geometh-data. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Dostupné online z: http://webarchiv.ethz.ch/geometh-data/downloads/Schulz_Road_O3D_Vienna.pdf 26.11.2017.
- [19] Bornaz, L. – Rinaudo, F.: Terrestrial laser scanner data processing. In. CiteSeerX. The College of Information Sciences and Technology, The Pennsylvania State University. Dostupné online z: https://www.researchgate.net/profile/Leandro_Bornaz/publication/228972484_Terrestrial_laser_scanner_data_processing/links/0deec516bb363a80ba000000.pdf 26.11.2017.
- [20] Kil, Y., J. – Mederos, B. – Amenta, N.: Laser Scanner Super-resolution. In: Euographics Symposium on Point-Based Graphics, Boston, USA, 2006. Dostupné online z: <https://pdfs.semanticscholar.org/d741/c6eef0ecbfbd15295518082824a62b6b0cd3.pdf>
- [21] Štroner, M. – Smítka, V.: Denoiser 1.3. [Software splňující podmínky RIV]. 2012. Dostupné online z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/Denoiser/index.html>
- [22] Lesparre, J.: Noise reduction by range image filtering, Delft University of Technology, 2009. Dostupné online z: http://lr.home.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_RS/Optical_and_Laser_Remote_Sensing/Publications/Papers/010-2009/doc/Noise_reduction_Vienna.pdf 26.11.2017
- [23] Shall, O. – Belyaev, A. – Seidel, H.: Feature-preserving Non-local denoising of Static and Time-varying Range Data,“ Proceedings of the 2007 ACM symposium on Solid and physical modeling, ISBN 978-1-59593-666-0, p. 217-222, 2007.
- [24] Smigiel, E. – Alby, E. – Grussenmeyer, P.: TLS Data Denoising By Range Image Processing. The Photogrammetric Record, Volume 26, June 2011, s. 171-189.
- [25] 3D SYSTEM, Knowledge Base of Geomagic Studio. Dostupné online z: <https://www.3dsystems.com/software>. 26.11.2017.
- [26] Abellán, A. - Jaboyedoff, M. - Oppikofer, T. - Vilaplana, J. M.: Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 365-372. Dostupné online z: <https://doi.org/10.5194/nhess-9-365-2009>.
- [27] Monserrat, O. – Crosetto, M.: Deformation measurement using terrestrial laser scanning

data and least squares 3D surface matching, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 63, Issue 1, January 2008, s. 142-154.

- [28] Schäfer T. – Weber, T. – Kyrinovič, P. - : Deformation Measurement using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo, INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, November 11 – 13, 2004. Bratislava.
- [29] Agisoft Photoscan, Dostupné online z: <http://www.agisoft.com/>. 26.11.2017.
- [30] Šedina, J.: Diplomová práce porovnání 3D skenovacích metod s mračenem bodů, vytvořeným obrazovou korelací v digitální fotogrammetrii, ČVUT v Praze, 2012, [Diplomová práce]
- [31] PHOTOMODELER, Dostupné online z: <http://www.photomodeler.com/index.html>. 26.11.2017.
- [32] Marčiš, M.: Možnosti metody IBMR pri dokumentácii skutočného stavu stavebných objektov, Studentská vědecká konference Telč 2017.
- [33] DJI, Dron DJI Phantom 4 PRO. Dostupné online z: https://store.dji.com/shop/phantom-series?from=menu_products. 27.11.2017.
- [34] Mavinci. Dostupné online z: <http://www.mavinci.de/>. 27.11.2017.
- [35] Veronte VTOL. Dostupné online z: <https://products.embention.com/veronte/uav-autopilot/hybrid-vtol-uav>. 27.11.2017.
- [36] Luhman, T.: Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications, Dunbeath: Whittles Publishing, 2006, pp. 510, ISBN 0-470-10633-6.
- [37] Štroner, M.: Vývoj softwaru na plánování přesnosti geodetických měření PreciSPlanner 3D. Stavební obzor. 2010, roč. 19, č. 3, s. 92-95. ISSN 1210-4027.
- [38] Bohm, J.- Radouch, V. - Hampacher, M.: Teorie chyb a vyrovnávací počet, sv. 2. vydání, Praha: Geodetický a kartografický podnik, 1990, ISBN 80-7011-056-2.
- [39] Třasák, P.: sw. EasyNet 2.4. Dostupné online z: <http://adjustsolutions.cz/easynet/>. 27.11.2017.
- [40] Smítka, V. - Štroner, M.: Scanaverager - software pro průměrování opakovaných skenů. In: Juniorstav 2012. Brno: FA VUT, 2012, díl 1, s. 1-6. ISBN 978-80-214-4393-8.
- [41] J40 Pláněk, J.: Filtrační metody pro zpracování mr obrazů Brno: FEEC VÚT v Brně, 2008. [Diplomová práce].
- [42] Vargic, R.: Wavelety a banky filtrů, Bratislava: FEI STU v Bratislavě, 2003. [Disertační práce].

- [43] Wikipedia: Vlnková transformace. Dostupné online z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnkov%C3%A1_transformace. 26.11.2017.
- [44] Addison, P. S.: The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance, New Your: Taylor & Francis, 2002, p. 353 s. ISBN 9780750306928.
- [45] Šmíd, R.: Úvod do vlnkové transformace. Dostupné online z: <http://measure.feld.cvut.cz/groups/diag/download/Wavelet-intro8859.pdf> . 27.11.2017.
- [46] Misiti, M. – Misiti, Y. - Oppenheim, G. – Poggi, J.:THE MATHWORKS, Inc. Wavelet Toolbox,“ 1996. Dostupné online z: http://feihu.eng.ua.edu/NSF_TUES/w7_1a.pdf. 27.11.2017.
- [47] Švihlík, J.: Advanced techniques for image noise suppression, Praha: ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická,, 2008. [Disertační práce].
- [48] Anisimova, E. – Bednář, J. – Páta, P.: Zpracování obrazu pomocí vlnkové, Elektrovue, Svazek 15, Číslo 4, ISSN 1213-1539, 2013, pp. 238-246.
- [49] Wikipedia: Odstranění šumu. Dostupné online z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Odstranění_šumu. 27.11.2017.
- [50] Wikipedia: Vlnky. Dostupné online z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vlnka>. 27.11.2017.
- [51] Štroner, M.: Vývoj softwaru na zpracování mračen bodů PointClouder. Stavební obzor. 2007, roč. 16, č. 4, s. 113-115. ISSN 1210-4027.
- [52] Bartuněk, J.: Testování odšumění a rozlišovací schopnosti dat 3D skenování. 2015. [Diplomová práce].
- [53] Úřad pro civilní letectví: Letadla bez pilota na palubě. Dostupné online z: <http://www.caa.cz/letadla-bez-pilota-na-palube>. 27.11.2017.
- [54] Braun, J.: Geodetický monitoring sesuvného území. 2010. [Diplomová práce].

8 VLASTNÍ PUBLIKACE

- [1*] Braun, J. - Jašek, P.: Testing Distance Meters in Depending on the Rotation of Reflecting Target. In: 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, Volume 17, Issue 22, Geodesy and Mine Surveying.. Albena, 27.06.2017 - 06.07.2017. Sofia:, s. 585-592. sv. 17. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7408-02-7.
- [2*] Jašek, P.: Užitný vzor: Stabilizační systém totální stanice, zejména pro potřeby přesného monitoringu kanalizační stoky. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra speciální geodézie, Praha 6, CZ. 28018. 31.03.2015.
- [3*] Jašek, P.: Reduce Noise of Laser Scanning Data. In: 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014, Conference Proceedings vol. III. Albena, 17.06.2014 - 26.06.2014. 2014, s. 275- 282. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7105-12-4.
- [4*] Jašek, P. - Štroner, M.: Denoising of Laser Scanning Data Using Wavelet [online]. Geoinformatics. 2014, 9 (12), s. 41-47. ISSN 1802-2669. Dostupné z: http://geoinformatics.fsv.cvut.cz/gwiki/Geoinformatics_FCE_CTU/_/Volumes
- [5*] Jašek, P. - Štroner, M.: Denoising of Laser Scanning Data using Wavelet. In: INGEO 2014. Praha, 03.04.2014 - 04.04.2014. Praha: České vysoké učení technické v Praze, s. 27-32. ISBN 978-80-01-05469-7.
- [6*] Jašek, P. Určení rozlišovací schopnosti laserového skeneru Leica HDS 3000. Studentská vědecká konference Telč 2012., ISBN 978-80-01-05134-4.
- [7*] Jašek, P. Geodetic monitoring during the reconstruction of the historical building. Aktualne Problemy w Geodezji Inzynieryjnej. Warszawa, 14.03.2013 - 16.03.2013. Politechnika Warszawska. 2013, s. 36. ISBN 978-83-61576-25-9.
- [8*] Jašek, P. Návrh a realizace geodetického monitoringu historické budovy. In: Interdisciplinární mezinárodní vědecká konference doktorandů a odborných asistentů QUAERE 2013. Hradec Králové, 20.05.2013 - 24.05.2013. Magnanimitas. 2013, s. 2722-2731. ISBN 978-80-905243-7-8.
- [9*] Smítka, V. - Jašek, P.: Redukce šumu u dat laserového skenování. Studentské vědecké konference, Telč 2012 ISBN 978- 80-01-05134-4.
- [10*] Jašek, P. Geodetický monitoring při rekonstrukci a dostavbě historické budovy. Juniorstav 2013 / 15. odborná konference doktorského studia. Brno, 07.02.2013. VUT v Brně, Fakulta stavební. 2013, s. 1-13. ISBN 978-80-214-4669-4.
- [11*] Braun, J. - Jašek, P: The use of a digital level instrument for the load test of a balcony. Geodesy, Cartography and Geographic Information Systems 2012. Geodézia, kartografia a geografické informačné systémy 2012. Tatranská Lomnica, 24.10.2012 - 25.10.2012. Berg Faculty TU Košice. 2012, s. 1-7. ISBN 978-80-553-1173-9.
- [12*] Jašek, P. Určení rozlišovací schopnosti terestrického skenovacího systému na základě vyhodnocení intenzit. Juniorstav 2013 / 14. odborná konference doktorského studia..

Brno, 26.01.2012. VUT v Brně, Fakulta stavební. 2012, s. 1-9. ISBN 978-80-214-4393-8.

[13*] Braun, J. - Jašek, P.: Využití digitálního nivelačního přístroje při zatěžovací zkoušce balkónu. Stavební obzor. 2012, 21(7), s. 224-227. ISSN 1210-4027.

[14*] Braun, J. - Jašek, P.: Využití nivelačního přístroje Leica DNA03 při zatěžovací zkoušce balkónu. XVIII. Mezinárodní česko-slovensko-polské geodetické dny. Karlova Studánka, 17.05.2012 - 19.05.2012. Praha: Český svaz geodetů a kartografů. 2012, s. 1-11. Dostupné z: <http://csgk.fce.vutbr.cz/Oakce/A67/>

9 PŘÍLOHY

9.1 Seznam obrázků

Obr. 3.1: Zorné pole kamerového skeneru [1].	14
Obr. 3.2: Zorné pole panoramatického skeneru [1].	14
Obr. 3.3: FARO Freestyle skener [4].	15
Obr. 3.4: Schéma prostorového protínání [1].	15
Obr. 3.5: Schéma prostorové polární metody	16
Obr. 3.6: Schéma principu laseru [6].	17
Obr. 3.7: Blokové schéma impulsního dálkoměru [8]	19
Obr. 3.8: Blokové schéma fázového dálkoměru [8].	20
Obr. 3.9: Princip optoelektrického způsobu určení délek [1].	21
Obr. 3.10: Princip rozmítání svazku zrcadlem [1].	21
Obr. 3.11: Princip rozmítání optickým elementem [1].	22
Obr. 3.12: Princip rozmítání rotací zdroje záření [1].	22
Obr. 3.13: Princip rozmítání statickým optickým prvkem [1].	23
Obr. 3.14: Princip rozmítání optickým vláknem [1].	23
Obr. 3.15: Rozmítání svazku paprsků u Trimble CX10 [4].	24
Obr. 3.16: Dopad elektromagnetického záření na obecný povrch [1].	26
Obr. 3.17: Zkreslení vzdálenosti na ostré hraně [1]	27
Obr. 3.18: Elipsy chyb měření při měření na plochu s nenulovou křivostí [1].	28
Obr. 3.19: Ukázky vřícovacích bodů [4].	29
Obr. 4.1: Kvadrokoptéra DJI Phantom 4 Pro [33]	39
Obr. 4.2: Letadlo Mavinci Sirius PRO [34].	40
Obr. 4.3: VTOL UAV - Albatros [35].	40
Obr. 5.1: 2D desky s testovacími obrazci.	41
Obr. 5.2: 3D desky s testovacími obrazci	42
Obr. 5.3: Princip testování	44
Obr. 5.4: Do černého pruhu padne více	44
Obr. 5.5: Do černého pruhu padne jen jeden bod – hraniční situace – práh rozlišovací schopnosti.	44
Obr. 5.6: Výsledný sken testovacích desek.	45
Obr. 5.7: Umístění řezů ve kterých proběhlo vyhodnocení	46
Obr. 5.8: Přenos kontrastu mezi objektem a obrazem.	46
Obr. 5.9: Graf průběhu CTF v závislosti na velikosti testovacího obrazce pro jeden sken.	48
Obr. 5.10: Graf průběhu CTF v závislosti na velikosti testovacího obrazce pro průměrný sken.	48
Obr. 5.11: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 25mm.	49
Obr. 5.12: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 8mm ...	50
Obr. 5.13: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 6mm ...	50
Obr. 5.14: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 4mm ...	51
Obr. 5.15 Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce – horizontální řez – 2mm	51
Obr. 5.16: Graf průběhu získaných intenzit testovacího obrazce - horizontální řez – 6mm – průměrovaný řez.	52
Obr. 5.17: Pohled na měřené pilíře s vyznačením kontrolních bodů.	53
Obr. 5.18: Schématické rozmístění stanoviska skenování, totálních stanic a vztažných bodů.	53
Obr. 5.19: Schéma sítě pro určení vodorovných posunů	54
Obr. 5.20: Vztažný bod (odrazný štítek)	55
Obr. 5.21: Výpis informací o provedené transformaci mezi 0. a 1. etapou	55

Obr. 5.22: Poloha skeneru vzhledem ke sledovaným pilířům.....	56
Obr. 5.23: Rozdílové modely pilířů P1(vlevo) a P2(vpravo) v 1. etapě	59
Obr. 5.24: Rozdílové modely pilířů P1(vlevo) a P2(vpravo) v 2. až 7. etapě	59
Obr. 5.25: Ukázka Haarovy vlnky [43].....	61
Obr. 5.26: Dvojková mřížka v prostoru čas-měřítková [45].....	62
Obr. 5.27: Rozdíl mezi tvrdým a měkkým prahováním [46].....	64
Obr. 5.28: Ukázky Daubechies vlnek [46].....	65
Obr. 5.29: Ukázky Symlet vlnek [46].....	66
Obr. 5.30: Ukázky Mexican hat [46].....	66
Obr. 5.31: Tvorba matice délkového obrazu.....	67
Obr. 5.32: Vybrané rozdílové modely – virtuální sken koule.....	70
Obr. 5.33: Rozdílové modely db6 N=3, N=4 – virtuální sken koule.....	71
Obr. 5.34: Vybrané rozdílové modely – virtuální sken roviny	72
Obr. 5.35: Rozdílové modely db6 N=3, N=4 – virtuální sken roviny.....	73
Obr. 5.36: Pořízený výřez roviny o velikosti 210 mm x 420 mm, rozlišení 5 mm x 5 mm.....	74
Obr. 5.37: Rozdílový model s vyznačením max. a min. - průměrný sken x originální sken..	75
Obr. 5.38: Rozdílový model - průměrný sken x Wavelet db6 – N = 2	75
Obr. 5.39: Rozdílový model - průměrný sken x Wavelet db6 – N = 2	76
Obr. 5.40: Pořízený výřez ze sochy Davida o velikosti 80 mm x 140 mm, rozlišení 3 mm x 3 mm.....	76
Obr. 5.41: Rozdílový model - průměrný sken x originální sken.....	77
Obr. 5.42: Rozdílový model - průměrný sken x Wavelet db6.	78
Obr. 5.43: Umístění řezu ve vybraném výřezu.	78
Obr. 5.44: Graf řezu pro jednotlivá mračna bodů.	79
Obr. 5.45: Nárýsy testovacích přípravků.	79
Obr. 5.46: Rozdílové modely čtvrtiny koule.	80
Obr. 5.47: Rozdílové modely florbalový míček.....	80
Obr. 5.48: Rozdílové modely pyramida z kostek.....	81
Obr. 5.49: Porovnání kvality původních skenů, vzdálenost skenování 5 metrů.	82
Obr. 5.50: Vlevo neodšuměný sken, vpravo odšuměný průměr (R).....	85
Obr. 5.51: Vlevo kvadratika, vpravo průměr (R).....	85
Obr. 5.52: Vlevo Čebyševův polynom 4.řádu, vpravo průměr (MNČ).	86
Obr. 5.53: Vlevo neodšuměný, vpravo rovina (R).....	87
Obr. 5.54: Vlevo rovina R, vpravo Čebyševův polynom 2. řádu.....	88
Obr. 5.55: Vlevo rovina (MNČ), vpravo Čebyševův polynom 4. řádu.....	90
Obr. 5.56: Vlevo Čebyševův polynom 3. řádu, vpravo Čebyševův polynom 4. řádu	90
Obr. 5.57: Vlevo neodšuměný sken, uprostřed průměr (MNČ), vpravo rovina (MNČ).....	91
Obr. 5.58: Vlevo průměr (MNČ), uprostřed rovina (MNČ), vpravo Čebyšev 2.řádu	92
Obr. 5.59: Vlevo neodšuměný, uprostřed Čebyševův polynom 2.řádu, vpravo průměr (MNČ).	93
Obr. 5.60: Vlevo Čebyševův polynom 2.řádu, vpravo Čebyševův polynom 4.řádu.	94
Obr. 5.61: Nahoře rovina (MNČ), dole neodšuměný sken.	95
Obr. 5.62: Vlevo průměr (MNČ), vpravo Čebyševův polynom 2. řádu.	96
Obr. 5.63: Vlevo Čebyševův polynom 3. řádu, vpravo neodšuměný sken.....	97
Obr. 5.64: Vlevo rovina (MNČ), vpravo neodšuměný sken.	98
Obr. 5.65: Vlevo Čebyševův polynom 2.řádu, vpravo průměr (MNČ).	99
Obr. 5.66: Nahoře rovina (MNČ), dole průměr (MNČ).....	100
Obr. 5.67: 3D desky s testovacími obrazci.....	101
Obr. 5.68: Rozdílové modely testovacích výběrů – hustota skenování 2 mm x 2 mm.....	102

Obr. 5.69: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25.....	103
Obr. 5.70: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 49.....	103
Obr. 5.71: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25.....	104
Obr. 5.72: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 49.....	104
Obr. 5.73: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr MNČ – počet bodů okolí 49, průměr R, průměr R – počet bodů okolí 49.....	105
Obr. 5.74: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 9.....	105
Obr. 5.75: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25.....	106
Obr. 5.76: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 9.....	106
Obr. 5.77: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 25.....	107
Obr. 5.78: Rozdílové modely z leva průměr MNČ, průměr R, rovina MNČ, rovina R – počet bodů okolí 9.....	107
Obr. 5.79: Testovací přípravek "A" a jeho příčný řez - různě hluboké prohlubně (ortogonální).....	108
Obr. 5.80: Testovací přípravek "C" a jeho příčný řez - různě široké prohlubně (ortogonální).....	108
Obr. 5.81: Výběr řezu testovacím přípravkem.....	109
Obr. 5.82: Porovnání rozlišovací schopnosti, HDS3000, přípravek „A“.....	110
Obr. 5.83: Porovnání rozlišovací schopnosti, HDS3000, přípravek „C“.....	110
Obr. 5.84: Porovnání rozlišovací schopnosti, Surpahser 25HSX, Trimble TX5, přípravek „A“.....	111
Obr. 5.85: Porovnání rozlišovací schopnosti, Surpahser 25HSX, Trimble TX5, přípravek „C“.....	112
Obr. 5.86: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica MS50, Leica P20, přípravek „A“.....	112
Obr. 5.87: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica MS50, Leica P20, přípravek „C“.....	113
Obr. 5.88: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica P20 - odšuměno, přípravek „A“.....	114
Obr. 5.89: Porovnání rozlišovací schopnosti, Leica P20 - odšuměno, přípravek „C“.....	114
Obr. 5.90: Letadlo Skywalker 2015/1830.....	118
Obr. 5.91: Schéma vydání povolení k leteckým činnostem [53]......	119
Obr. 5.92: Ukázka naplánované letecké mise v programu Mission Planner.....	120
Obr. 5.93: Výřez mapy se zobrazením sledovaného území.....	121
Obr. 5.94: Pozice kamer a obrazové překryty.....	122
Obr. 5.95: Elipsy chyb dosažené na identických bodech.....	123
Obr. 5.96: Výřez ortofotomapy sesuvného území.....	124
Obr. 5.97: Výřez mračna bodů testovacího území.....	124
Obr. 5.98: Srovnání vrstevnicových modelů z dvou náletů.....	125
Obr. 5.99: Schéma transformace mračna bodů v S-JTSK a Bpv do místní soustavy.....	125
Obr. 5.100: Grafické srovnání metod redukce šumu - detail.....	126
Obr. 5.101: Grafické srovnání metod redukce šumu.....	126
Obr. 5.102: Ukázka vrstevnicového plánu po redukci šumu – rovina 49 bodů.....	127
Obr. 5.103: Vrstevnicový rozdílový model odšuměných mračen z prvního a druhého náletu – rovina 49b.....	128

Obr. 5.104: Rozdílový model originálních mračen z prvního a druhého náletu.....	129
Obr. 5.105: Rozdílový model odšuměných mračen z prvního a druhého náletu – <i>rovina</i> 49b.	129
Obr. 5.106: Rozdílový model odšuměných mračen z prvního a druhého náletu – <i>kvadrík</i> 49b.	129
Obr. 5.107: Rozmístění kontrolních bodů.....	130
Obr. 5.108: Elipsy chyb dosažené na identických bodech.....	133
Obr. 5.109: Ortofoto SSÚD Rudná s vyznačením testovacího území.....	134
Obr. 5.110: Rozdílové modely obrazového skenování s terestrickým měřením	135

9.2 Seznam tabulek


Tab. 5.1: Hodnoty CTF pro jeden sken.....	47
Tab. 5.2.: Hodnoty souřadnicových rozdílů na identických bodech mezi 0. a 1. etapou.....	56
Tab. 5.3: Porovnání naměřeného posunu s mezním rozdílem	56
Tab. 5.4.: Porovnání rozdílů souřadnic na identických bodech k souřadnicím určených prostorovou sítí.....	57
Tab. 5.5.: Porovnání rozdílů souřadnic na identických bodech mezi jednotlivými etapami určenými skenerem	58
Tab. 5.6.: Výsledky Grubbsova testu odlehlých hodnot	60
Tab. 5.7.: Srovnání úspěšnosti odšumovacích metod – virtuální sken koule.....	69
Tab. 5.8.: Tabulka výpočtu MSE – virtuální sken koule.....	69
Tab. 5.9.: Srovnání odšumovacích metod db6 N=3, N=4 – virtuální sken koule.....	71
Tab. 5.10.: Srovnání úspěšnosti odšumovacích metod – virtuální sken roviny.....	72
Tab. 5.11.: Srovnání odšumovacích metod db6 N=3, N=4 – virtuální sken roviny	73
Tab. 5.12.: Tabulka proložené roviny a počtů trojúhelníků – rovina.....	74
Tab. 5.13.: Tabulka odlehlosti od průměrného skenu a počtů trojúhelníků –výřez David	77
Tab. 5.14.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.	84
Tab. 5.15.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.	86
Tab. 5.16.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.	87
Tab. 5.17: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 5 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.	88
Tab. 5.18.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.	89
Tab. 5.19.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.	90
Tab. 5.20.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.	91
Tab. 5.21.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 12 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.	92
Tab. 5.22.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.	93
Tab. 5.23.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.	94
Tab. 5.24.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.	94
Tab. 5.25.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 20 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.	95
Tab. 5.26.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 2 mm x 2 mm.	96
Tab. 5.27.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 4 mm x 4 mm.	97
Tab. 5.28.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 6 mm x 6 mm.	98
Tab. 5.29.: Srovnání úspěšnosti redukce šumu jednotlivých metod, vzdálenost 32 m, hustota skenování 8 mm x 8 mm.	99
Tab. 5.30.: Srovnání úspěšnosti metod redukce šumu podle hustoty skenu na vzdálenost 5 m.	101

Tab. 5.31.: Srovnání komerčních systému UAV pro leteckou fotogrammetrii	116
Tab. 5.32.: Parametry letounu Skywalker 2015/1830.....	117
Tab. 5.33.: Autopilot Pixhawk	118
Tab. 5.34.: Parametry letecké mise	122
Tab. 5.35.: Souřadnicové odchylky na identických bodech.....	123
Tab. 5.36.: Bilance výkopů a násypů mezi náletem č. 1 a č. 2.	127
Tab. 5.37.: Parametry rozdílových modelů mezi náletem č. 1 a č. 2.	128
Tab. 5.38.: Ukázka odchylek na kontrolních bodech – nálet č. 1	130
Tab. 5.39.: Ukázka odchylek na kontrolních bodech – nálet č. 2	131
Tab. 5.40.: Bilance násypů a výkopů při srovnání s terestrickým měřením	132
Tab. 5.41.: Parametry letecké mise	133
Tab. 5.42.: Souřadnicové odchylky na identických bodech.....	133
Tab. 5.43.: Bilance násypů a výkopů při srovnání s terestrickým měřením	134


9.3 Použité vybavení

9.3.1 Skenery


9.3.1.1 Leica HDS3000

Vlastník:	Katedra spec. geodézie, FSv ČVUT	
Výrobní číslo:	P-865	
Rok výroby:	2006	
Dosah:	134 m	
Zorné pole:	360° x 270°	
Max. rychlost skenování:	4 000 bodů/s	
Max. hustota skenování:	1,2 mm	
Úhlová přesnost:	3,8 mgon	
Délková přesnost (na 50 m):	4 mm	
Polohová přesnost (na 50 m):	6 mm	


9.3.1.2 Surphaser 25HSX

Vlastník:	Katedra geomatiky, FSv ČVUT	
Výrobní číslo:	BS-SCHSX025858	
Rok výroby:	2011	
Dosah:	70 m	
Zorné pole:	360° x 270°	
Max. rychlost skenování:	až 1 200 000 bodů/s	
Max. hustota skenování:	10 mm	
Úhlová přesnost:	/	
Délková přesnost (na 50 m):	< 1 mm	
Polohová přesnost (na 50 m):	< 1 mm	

9.3.1.3 Leica ScanStation P20


Vlastník:	Arcadis Czech Republic s.r.o.	
Výrobní číslo:	1840051	
Rok výroby:	2012	
Dosah:	120 m	
Zorné pole:	360° x 270°	
Max. rychlost skenování:	1 000 000 bodů/s	
Max. hustota skenování:	4 mm	
Úhlová přesnost:	2,5 mgon	
Délková přesnost (na 50 m):	0,7/2,8 mm (bílá/černá)	
Polohová přesnost (na 50 m):	3 mm	

9.3.1.4 Trimble TX5

Vlastník:	Geotronics Praha, s.r.o.	
Výrobní číslo:	LLS061203231	
Rok výroby:	2013	
Dosah:	120 m	
Zorné pole:	360° x 300°	
Max. rychlost skenování:	až 976 000 bodů/s	
Max. hustota skenování:	8 mm	
Úhlová přesnost:	/	
Délková přesnost (na 50 m):	2 mm	
Polohová přesnost (na 50 m):	2 mm	


9.3.2 Totální stanice a multistanice

9.3.2.1 Leica MS 50


Vlastník:	GK Nedoma&Řezník, s.r.o.	
Výrobní číslo:	368677	
Rok výroby:	2014	
Dosah:	300 m - 1 000 m*	
Zorné pole:	360° x 312°	
Max. rychlost skenování:	1 000 bodů/s	
Max. hustota skenování:	1 mm	
Úhlová přesnost:	0,3 mgon	
Délková přesnost (na 50 m):	0,6 mm - 1,0 mm*	
Polohová přesnost (na 50 m):	0,6 mm - 1,0 mm*	
Hz - směr:	0,3 mgon	
V - úhel:	0,3 mgon	
Délka - hranol:	1 mm + 1,5 ppm * D	
Délka - bez hranol:	2 mm + 2 ppm * D	

*Závisí na rychlosti skenování

9.3.2.2 Trimble S6 HP

Vlastník	Katedra spec. geodézie, FSv ČVUT	
Výrobní číslo:	92120086	
Rok výroby:	2008	
Směrodatná odchylka :		
Hz - směr:	0,3 mgon	
V - úhel:	0,3 mgon	
Délka - hranol:	1 mm + 1 ppm * D	
Délka - bez hranol:	3 mm + 2 ppm * D	

9.3.2.3 Topcon GPT – 7501

Vlastník	Katedra spec. geodézie, FSv ČVUT	
Výrobní číslo:	7W1317	
Rok výroby:	2009	
Směrodatná odchylka :		
Hz - směr:	0,3 mgon	
V - úhel:	0,3 mgon	
Délka - hranol:	2 mm + 2 ppm * D	
Délka - bez hranol:	5 mm	

9.4 Tabulky odchylek na identických bodech sesuvného území Rabenov

9.4.1 Nálet č.1

Nálet č.1										
číslo bodu	terestricky	původní data	v [m]	v*v	rovina 49 bodů	v [m]	v*v	kvadrík 81 bodů	v [m]	v*v
5273	208.35	208.41	0.06	0.00	208.40	0.05	0.00	208.40	0.05	0.00
5289	208.43	208.38	-0.05	0.00	208.37	-0.06	0.00	208.37	-0.06	0.00
5290	214.00	213.92	-0.08	0.01	213.92	-0.08	0.01	213.92	-0.08	0.01
5291	213.97	213.90	-0.07	0.00	213.90	-0.07	0.00	213.90	-0.07	0.00
5297	214.19	214.18	-0.01	0.00	214.19	0.00	0.00	214.18	-0.01	0.00
5298	212.35	212.52	0.17	0.03	212.51	0.16	0.03	212.51	0.16	0.03
5299	212.20	212.20	0.00	0.00	212.19	-0.01	0.00	212.19	-0.01	0.00
5300	211.35	211.72	0.37	0.14	211.73	0.38	0.14	211.73	0.38	0.14
5301	211.36	211.60	0.24	0.06	211.63	0.27	0.07	211.64	0.28	0.08
5302	212.27	212.18	-0.09	0.01	212.18	-0.09	0.01	212.18	-0.09	0.01
5303	212.05	212.04	-0.01	0.00	212.05	0.00	0.00	212.05	0.00	0.00
5304	212.14	212.17	0.03	0.00	212.17	0.03	0.00	212.17	0.03	0.00
5305	212.61	212.66	0.05	0.00	212.67	0.06	0.00	212.66	0.05	0.00
5306	211.81	211.81	0.00	0.00	211.82	0.01	0.00	211.82	0.01	0.00
5307	212.20	212.21	0.01	0.00	212.21	0.01	0.00	212.21	0.01	0.00
5308	212.49	212.47	-0.02	0.00	212.48	-0.01	0.00	212.47	-0.02	0.00
5314	212.89	212.81	-0.08	0.01	212.83	-0.06	0.00	212.83	-0.06	0.00
5317	212.78	212.83	0.05	0.00	212.84	0.06	0.00	212.83	0.05	0.00
5318	213.08	213.16	0.08	0.01	213.17	0.09	0.01	213.17	0.09	0.01
5319	213.38	213.33	-0.05	0.00	213.33	-0.05	0.00	213.33	-0.05	0.00
5327	212.29	212.21	-0.08	0.01	212.20	-0.09	0.01	212.21	-0.08	0.01
5328	211.35	211.37	0.02	0.00	211.37	0.02	0.00	211.37	0.02	0.00
5329	211.21	211.35	0.14	0.02	211.34	0.13	0.02	211.34	0.13	0.02
5333	213.31	213.44	0.13	0.02	213.44	0.13	0.02	213.44	0.13	0.02
5334	213.39	213.50	0.11	0.01	213.51	0.12	0.01	213.50	0.11	0.01
5336	213.37	213.52	0.15	0.02	213.52	0.15	0.02	213.52	0.15	0.02
5337	213.57	213.68	0.11	0.01	213.69	0.12	0.01	213.68	0.11	0.01
5346	213.88	213.90	0.02	0.00	213.91	0.03	0.00	213.91	0.03	0.00
5360	217.67	217.71	0.04	0.00	217.73	0.06	0.00	217.71	0.04	0.00
5361	217.86	217.85	-0.01	0.00	217.86	0.00	0.00	217.85	-0.01	0.00
5362	218.25	218.40	0.15	0.02	218.39	0.14	0.02	218.40	0.15	0.02
5363	218.51	218.47	-0.04	0.00	218.47	-0.04	0.00	218.47	-0.04	0.00
5364	217.97	217.99	0.02	0.00	218.00	0.03	0.00	217.99	0.02	0.00
5374	213.90	213.94	0.04	0.00	213.95	0.05	0.00	213.95	0.05	0.00
5375	214.30	214.38	0.08	0.01	214.37	0.07	0.00	214.38	0.08	0.01
5381	214.09	214.10	0.01	0.00	214.10	0.01	0.00	214.09	0.00	0.00
5382	214.14	214.18	0.04	0.00	214.18	0.04	0.00	214.18	0.04	0.00
5384	215.28	215.28	0.00	0.00	215.29	0.01	0.00	215.30	0.02	0.00
5386	214.34	214.45	0.11	0.01	214.44	0.10	0.01	214.44	0.10	0.01
5403	217.17	217.09	-0.08	0.01	217.07	-0.10	0.01	217.08	-0.09	0.01
5404	216.60	216.77	0.17	0.03	216.78	0.18	0.03	216.77	0.17	0.03
5405	216.87	216.87	0.00	0.00	216.87	0.00	0.00	216.87	0.00	0.00
5406	216.88	216.92	0.04	0.00	216.93	0.05	0.00	216.92	0.04	0.00
5407	217.02	216.95	-0.07	0.00	216.90	-0.12	0.01	216.92	-0.10	0.01
5408	216.21	216.57	0.36	0.13	216.66	0.45	0.20	216.62	0.41	0.17
5409	217.05	217.09	0.04	0.00	217.08	0.03	0.00	217.10	0.05	0.00
Suma v*v				0.58			0.69			0.65
průměrná odchylka [m]			0.05			0.05			0.05	
minimální odchylka [m]			-0.09			-0.12			-0.10	
maximální odchylka [m]			0.37			0.45			0.41	
Směrodatná odchylka modelu [m]				0.113			0.123			0.119

9.4.2 Nálet č.2

Nálet č.2										
číslo bodu	terestricky	původní data	v [m]	v^*v	rovina 49 bodů	v [m]	v^*v	kvadratika 81 bodů	v [m]	v^*v
5273	208.35	208.40	0.05	0.00	208.37	0.02	0.00	208.37	0.02	0.00
5289	208.43	208.35	-0.08	0.01	208.36	-0.07	0.00	208.36	-0.07	0.00
5290	214.00	213.86	-0.14	0.02	213.87	-0.13	0.02	213.87	-0.13	0.02
5291	213.97	213.88	-0.09	0.01	213.88	-0.09	0.01	213.88	-0.09	0.01
5297	214.19	214.18	-0.01	0.00	214.18	-0.01	0.00	214.18	-0.01	0.00
5298	212.35	212.46	0.11	0.01	212.47	0.12	0.01	212.48	0.13	0.02
5299	212.20	212.21	0.01	0.00	212.18	-0.02	0.00	212.18	-0.02	0.00
5300	211.35	211.68	0.33	0.11	211.69	0.34	0.12	211.68	0.33	0.11
5301	211.36	211.60	0.24	0.06	211.61	0.25	0.06	211.60	0.24	0.06
5302	212.27	212.21	-0.06	0.00	212.20	-0.07	0.00	212.21	-0.06	0.00
5303	212.05	212.05	0.00	0.00	212.05	0.00	0.00	212.05	0.00	0.00
5304	212.14	212.17	0.03	0.00	212.16	0.02	0.00	212.16	0.02	0.00
5305	212.61	212.65	0.04	0.00	212.66	0.05	0.00	212.66	0.05	0.00
5306	211.81	211.79	-0.02	0.00	211.81	0.00	0.00	211.80	-0.01	0.00
5307	212.20	212.20	0.00	0.00	212.19	-0.01	0.00	212.20	0.00	0.00
5308	212.49	212.46	-0.03	0.00	212.46	-0.03	0.00	212.46	-0.03	0.00
5314	212.89	212.80	-0.09	0.01	212.83	-0.06	0.00	212.81	-0.08	0.01
5317	212.78	212.84	0.06	0.00	212.84	0.06	0.00	212.83	0.05	0.00
5318	213.08	213.13	0.05	0.00	213.15	0.07	0.00	213.15	0.07	0.00
5319	213.38	213.29	-0.09	0.01	213.30	-0.08	0.01	213.31	-0.07	0.00
5327	212.29	212.17	-0.12	0.01	212.18	-0.11	0.01	212.18	-0.11	0.01
5328	211.35	211.33	-0.02	0.00	211.33	-0.02	0.00	211.33	-0.02	0.00
5329	211.21	211.32	0.11	0.01	211.32	0.11	0.01	211.32	0.11	0.01
5333	213.31	213.44	0.13	0.02	213.44	0.13	0.02	213.44	0.13	0.02
5334	213.39	213.48	0.09	0.01	213.49	0.10	0.01	213.48	0.09	0.01
5336	213.37	213.51	0.14	0.02	213.51	0.14	0.02	213.51	0.14	0.02
5337	213.57	213.65	0.08	0.01	213.68	0.11	0.01	213.67	0.10	0.01
5346	213.88	213.86	-0.02	0.00	213.87	-0.01	0.00	213.87	-0.01	0.00
5360	217.67	217.72	0.05	0.00	217.74	0.07	0.00	217.72	0.05	0.00
5361	217.86	217.88	0.02	0.00	217.87	0.01	0.00	217.87	0.01	0.00
5362	218.25	218.41	0.16	0.03	218.40	0.15	0.02	218.41	0.16	0.03
5363	218.51	218.47	-0.04	0.00	218.47	-0.04	0.00	218.47	-0.04	0.00
5364	217.97	218.00	0.03	0.00	218.00	0.03	0.00	218.00	0.03	0.00
5374	213.90	213.93	0.03	0.00	213.93	0.03	0.00	213.93	0.03	0.00
5375	214.30	214.39	0.09	0.01	214.38	0.08	0.01	214.38	0.08	0.01
5381	214.09	214.10	0.01	0.00	214.09	0.00	0.00	214.10	0.01	0.00
5382	214.14	214.18	0.04	0.00	214.19	0.05	0.00	214.19	0.05	0.00
5384	215.28	215.30	0.02	0.00	215.30	0.02	0.00	215.30	0.02	0.00
5386	214.34	214.42	0.08	0.01	214.42	0.08	0.01	214.42	0.08	0.01
5403	217.17	217.08	-0.09	0.01	217.07	-0.10	0.01	217.08	-0.09	0.01
5404	216.60	216.76	0.16	0.03	216.77	0.17	0.03	216.74	0.14	0.02
5405	216.87	216.85	-0.02	0.00	216.86	-0.01	0.00	216.85	-0.02	0.00
5406	216.88	216.92	0.04	0.00	216.91	0.03	0.00	216.91	0.03	0.00
5407	217.02	216.92	-0.10	0.01	216.84	-0.18	0.03	216.89	-0.13	0.02
5408	216.21	216.58	0.37	0.14	216.62	0.41	0.17	216.59	0.38	0.14
5409	217.05	217.04	-0.01	0.00	217.04	-0.01	0.00	217.05	0.00	0.00
Suma v^*v				0.55			0.62			0.56
průměrná odchylka [m]			0.03			0.03			0.03	
minimální odchylka [m]			-0.14			-0.18			-0.13	
maximální odchylka [m]			0.37			0.41			0.38	
Směrodatná odchylka modelu [m]				0.110			0.116			0.110

9.5 Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD jsou v jednotlivých adresářích umístěny soubory týkající se dílčích částí disertační práce.

V *kořenovém adresáři* je umístěn soubor s úplným zněním disertační práce ve formátu PDF.

Adresář *5.2_Určení rozlišovací schopnosti TLS na základě vyhodnocení intenzit* obsahuje měřená data, zdrojové kódy a kompletní grafy analogového vyhodnocení.

Adresář *5.3_Využití TLS v přesném geodetickém monitoringu* obsahuje měřená data a vyhodnocení experimentálních měření.

Adresář *5.4_Využití vlnkové transformace (Wavelet transform) pro redukci šumu dat v TLS* obsahuje měřená data a zdrojové kódy výpočtu vlnkové transformace.

Adresář *5.5_Úspěšnost metod redukce šumu* obsahuje měřená data a vyhodnocení experimentálních měření.

Adresář *5.6_Určení absolutní rozlišovací schopnosti terestrických skenerů* obsahuje měřená data ze všech skenerů a vyhodnocení rozlišovací schopnosti.

Adresář *5.7_Využití mračna bodů získaného pomocí RPAS* obsahuje z obou lokalit měřená data, výkresy se zpracováním a originální ortofota.