

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Adam Pták

ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVA DAT Z 3D SKENOVÁNÍ
PRO DOKUMENTACI VOZIDEL

Bakalářská práce

2019



K622..... Ústav soudního znalectví v dopravě

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Adam Pták

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – DOS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Zpracování a úprava dat z 3D skenování pro dokumentaci vozidel**

Název tématu (anglicky): Processing and Adjustment of Data from 3D Scanning for Vehicle Documentation

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- metody 3D skenování
- principy zpracování získaných prostorových dat
- metody slučování, úpravy a čištění získaných dat
- zhodnocení vlivu úprav dat na výslednou vypovídající hodnotu modelu



Rozsah grafických prací: dle zadání vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: ŠTRONER, Martin. 3D skenovací systémy. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3.
3D systems. Geomagic Design X:User Guide. USA, 2013.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Svatý

Datum zadání bakalářské práce:

11. října 2018

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce:

26. srpna 2019

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.

vedoucí

Ústavu soudního znalectví v dopravě



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.

děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Adam Pták

jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 11. října 2018

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu panu Ing. Zdeňkovi Svatému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce.

Dále mé poděkování patří všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24.8.2019



.....
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVA DAT Z 3D SKENOVÁNÍ PRO DOKUMENTACI VOZIDEL

Bakalářská práce

2019

Adam Pták

ABSTRAKT:

Tato bakalářská práce se ve svém úvodu zabývá metodami 3D skenování. V této části je uveden základní přehled a dělení skenovacích systémů včetně problematiky samotného procesu skenování. V dalších částech práce jsou popsány teoretické základy zpracování a úpravy naměřených dat. Tyto teoretické poznatky jsou následně aplikovány na konkrétních datech naskenovaného vozidla formou praktických ukázek. Pro účely této bakalářské práce byla veškerá data zpracována v programu Geomagic Design X a v programu Scene. V poslední části je řešena otázka vlivu zpracování a úpravy dat na výsledný model vozidla.

KLÍČOVÁ SLOVA: 3D skenování, měření dat, zpracování dat, bodové mračno, triangulace, Geomagic Design X

ABSTRACT:

This bachelor thesis deals with 3D scanning methods in its introduction. This section provides a basic overview and classification of scanning systems, including the issues of the scanning process. The theoretical basis of the processing and modification of the measured data are described in the following parts of the work. This theoretical knowledge is then applied to specific data of the scanned vehicle in the form of practical demonstrations. For this bachelor thesis, all data were processed in the program Geomagic Design X and the Scene program. The last part deals with the issue of the effect of data processing and modification on the resulting vehicle model.

KEY WORDS: 3D scanning, measuring data, data processing, point cloud, triangulation, Geomagic Design X

Obsah

1	Úvod	8
2	Metody 3D skenování	9
2.1	3D skenování.....	9
2.1.1	Popis skenování	9
2.1.2	Skenovací systém	9
2.2	Základní typy skenerů.....	10
2.2.1	Kontaktní skenery.....	10
2.2.1.1	Destruktivní skenery	10
2.2.1.2	Nedestruktivní skenery	11
2.2.2	Bezkontaktní skenery	11
2.2.2.1	Aktivní metoda.....	12
2.2.2.2	Pasivní metoda.....	12
2.2.3	Hybridní skenery.....	12
2.3	Dělení 3D skenovacích systémů.....	12
2.3.1	Dělení podle zorného pole	12
2.3.2	Dělení podle umístění skeneru	13
2.3.3	Dělení podle principu	13
2.3.4	Dělení podle dosahu.....	15
2.3.5	Dělení podle přesnosti a rychlosti	15
2.3.6	Příklady konkrétních skenerů.....	15
2.4	Přesnost a chyba měření	15
2.5	Metody určování prostorových dat	17
2.5.1	Metoda prostorového protínání vpřed	17
2.5.2	Prostorová polární metoda.....	17
2.5.3	Určování délky.....	18
2.6	Proces měření skenovacím systémem	18
2.6.1	Rekognoskace objektu měření	19
2.6.2	Volba stanovisek měření	19
2.6.3	Vlícovací body	22
3	Principy zpracování získaných prostorových dat	23
3.1	Program na zpracování dat.....	23
3.2	Reprezentace dat	24
3.3	Vstupní úpravy mračen bodů	24
3.3.1	Odstranění nepotřebných nebo chybných dat.....	24

3.3.2	Filtrace dat.....	24
3.3.3	Redukce naměřených dat.....	24
3.4	Spojování jednotlivých mračen bodů	25
3.4.1	Spojování jednotlivých skenů pomocí vlčovacíků bodů.....	25
3.4.2	Spojování jednotlivých skenů na základě překrytu.....	27
3.4.2.1	ICP algoritmus.....	27
3.4.2.2	Typy ICP algoritmů.....	28
3.5	Filtrace dat.....	28
3.5.1	Průměrování sférických souřadnic blízkých bodů	29
3.5.2	Průměrování délek blízkých bodů	30
3.6	Zpracování dat z měření.....	31
3.6.1	Aproximace objektů matematickými primitivami.....	31
3.6.2	Triangulace.....	31
3.6.2.1	Trojúhelníková síť.....	31
3.6.2.2	Delaunayova triangulace	31
3.6.2.3	Základní dělení algoritmů	32
3.6.3	Redukce prvků trojúhelníkových sítí	33
3.6.3.1	Redukce vrcholů.....	33
3.6.3.2	Redukce hran	33
3.6.3.3	Vertex clustering.....	34
3.6.4	Oprava modelu	34
4	Metody slučování, úpravy a čištění dat.....	35
4.1	Program na zpracování dat.....	35
4.2	Postup zpracování dat	35
4.3	Importování dat.....	35
4.3.1	Praktická ukáзка	36
4.4	Hrubé očištění dat.....	37
4.4.1	Praktická ukáзка	38
4.5	Zarovnání bodových mračen	39
4.5.1	Praktická ukáзка	39
4.6	Čištění dat	40
4.6.1	Filtrování šumu	41
4.6.2	Vzorkování	41
4.6.3	Vyhlazení.....	41
4.6.4	Praktická ukáзка	42
4.7	Triangulace.....	44

4.7.1	2D triangulace	44
4.7.2	3D triangulace	44
4.7.3	Konstrukce polygonové sítě	45
4.7.4	Sestavení HD sítě.....	45
4.7.4.1	Praktická ukázka	45
4.8	Úprava polygonové sítě	47
4.8.1	Přeložené Poly-facety	47
4.8.2	Zavěšené Poly-facety a Malé Clustery.....	47
4.8.3	Malé Poly-facety	48
4.8.4	Ostatní nástroje na úpravu sítě	48
4.8.5	Praktická ukázka	48
5	Zhodnocení vlivu úpravy dat na výslednou vypovídající hodnotu modelu	51
5.1	Měření odchylky pomocí Accuracy Analyzer.....	51
5.2	Přesnost zarovnání mračen	51
5.2.1	Zarovnání pomocí vybraných bodů.....	51
5.2.2	Zarovnání pomocí referenčních sfér	52
5.3	Vliv redukce šumu a vyhlazení.....	54
5.4	Porovnání polygonové sítě vůči bodovému mračnu	55
5.5	Zhodnocení úprav.....	56
6	Závěr.....	57
7	Seznam použitých zdrojů	59
8	Seznam obrázků	63
9	Seznam tabulek.....	65
10	Seznam příloh.....	66

Seznam použitých zkratek

2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
CMM	Coordinate Measuring Machine
INS	Inertial Navigation System
GNSS	Global Navigation Satellite System
CCD	Charge-coupled Device
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
NURBS	Non-uniform Rational Basis Spline
CSG	Constructive Solid Geometry
ICP	Iterative Closest Point
RGB	Red-Green-Blue
AVG	Average
RMS	Root Mean Square
SD	Standard Deviation

1 Úvod

S rozvojem měřicích a výpočetních zařízení vznikají nové příležitosti, které nám umožňují provádět měření, jejichž výsledkem je obraz reálného světa v počítačové podobě. Využití vytvořených modelů lze najít v oborech, mezi které patří například strojírenství, stavebnictví, herní průmysl nebo lékařství. Samostatnou část tvoří oblast věd, které využívají technologické postupy při zjišťování, případně prokazování a vyšetřování skutečností v rámci trestního práva. V tomto případě může 3D skenování zaznamenat velmi přesné informace o konkrétní situaci a poskytnout tak podklady pro další vyšetřování. Na rozdíl od strojírenství si ovšem vystačíme s přesností, která se pohybuje v řádu milimetrů. Této skutečnosti následně odpovídá i volba vhodného skenovacího systému.

V rámci této bakalářské práce bude řešena problematika zpracování a úpravy dat vozidla z 3D skenování. V první části této práce je uveden základní přehledem 3D skenovacích systémů včetně metod skenování a jejich dělení podle různých kritérií. Je zde rozebráno téma přesnosti měření a v neposlední řadě, je také popsán samotný proces skenování s ohledem na úskalí, která mohou nastat při dokumentaci vozidla s podrobnějším zaměřením na vliv tvaru a materiálových vlastností povrchu vozidla na způsob skenování.

Druhá část práce se již zabývá zpracováním a úpravou dat na teoretické úrovni, ve které jsou popsány základní principy a myšlenky řady algoritmů. Ty jsou následně aplikovány ve třetí části, kde je popsán postup zpracování konkrétních dat vozidla v programu Geomagic Design X. V této kapitole byl zvolen přístup, kdy jsou nejprve uvedeny obecné informace, které jsou posléze aplikovány na příslušných datech. Vzhledem ke skutečnosti, že byla předmětná data naskenována skenerem Focus 3D 120 od společnosti FARO, je v práci několikrát zmíněn i program Scene od téže společnosti.

Předmětem poslední části práce je zhodnocení vlivu úpravy dat na výsledný model. Základní myšlenkou je porovnávat mezi sebou data v různých fázích zpracování. Veškeré měření statistických veličin je provedeno v programu Geomagic Design X.

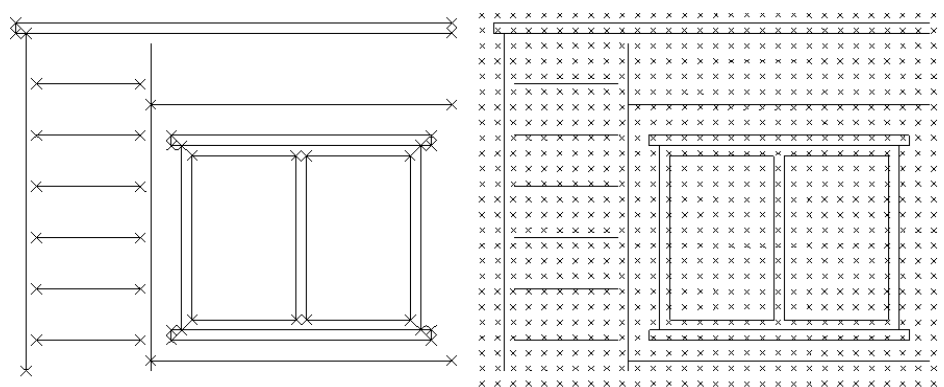
Cílem práce je v prvních částech uvést teoretickou stránku 3D skenování a zpracování dat. V dalších částech je cílem ukázat postup zpracování konkrétních dat, včetně zhodnocení provedených úprav na výsledný model. Výstupem je model, který představuje polygonová síť zachycující celou karosérii vozidla v dostatečné přesnosti a rozsahu pro následné aplikace, např.: analýze dopravních nehod či vyhodnocení dynamických nárazových testů.

2 Metody 3D skenování

2.1 3D skenování

2.1.1 Popis skenování

3D skenování je označení procesu určování prostorových souřadnic bodů zájmového objektu, které se ukládají do paměti. V případě pojmu laserové skenování se můžeme setkat s definicí „způsob detekce objektu pomocí pohyblivého laserového paprsku, jehož stopy na povrchu objektu jsou uspořádány v řádcích nebo rastru.“ [41] Skenování je charakteristické tzv. neselektivním určováním bodů (viz obrázek 1). To je specifické tím, že uživatel nevybírám, jak je tomu v případě klasické geodézie (selektivní určování), body zájmu (rohy, hrany apod.), nýbrž je povrch zájmového objektu určen body v určité hustotě na určité oblasti, která je závislá na parametrech použitého zařízení. Výběr a práce se „zájmovými“ body se následně provádí v příslušných programech určených pro zpracování dat. [22] [25] [38]



Obrázek 1 - Selektivní a neselektivní určování bodů [1]

Mezi hlavní znaky 3D skenování patří především velké množství bodů (mračna bodů). Řádově se jedná o miliony bodů, přičemž jejich počet je ovlivněn nastavenými parametry skenování, které jsou omezeny parametry použitého zařízení. Dalšími charakteristickými znaky je vysoká rychlost pořizování dat a související časová náročnost následného zpracování dat. [25]

2.1.2 Skenovací systém

Skenovací systém se podle [1] skládá z následujících komponent:

- 3D skener (měřící zařízení včetně fotoaparátu, GPS, IMU¹ atd.)
- Řídící jednotka
- Program pro řízení skenování (obsažen v řídicí jednotce)
- Program pro zpracování dat
- Příslušenství (stativ, baterie atd.)

¹ IMU – zařízení obsahující gyroskopy a akcelerometry, určující úhlové prvky vnější orientace vůči referenčnímu souřadnicovému systému nezávisle na prostorové poloze senzoru [40]

2.2 Základní typy skenerů

Skenery lze obecně rozdělit do několika základních kategorií, které se vyznačují především způsobem, jakým samotné skenování probíhá (jakým způsobem se získávají prostorové souřadnice). Základní rozdíl je především v tom, jestli při skenování dochází ke kontaktu měřicí techniky s cílovým objektem, či nikoliv. Dle tohoto kritéria dělíme skenery na **kontaktní** a **bezkontaktní** (non-kontaktní). [4] [5] [10]

2.2.1 Kontaktní skenery

Kontaktní skenery jsou zejména charakteristické tím, že během skenování dochází ke kontaktu s měřeným objektem. Přesnost kontaktních skenerů se pohybuje v řádu mikrometrů, a proto nachází využití v oblastech, kde je dbáno na vysokou přesnost (např.: strojírenství). Nevýhodou tohoto typu skenerů je především rychlost, se kterou jsou schopny skenovat (nejrychlejší skenery dosahují rychlosti kolem 100 Hz). Kontaktní skenery se dělí na destruktivní a nedestruktivní. Tyto kategorie jsou podrobněji popsány níže. [5] [10]

Při skenování vozidla s cílem zachycení celé karoserie, kterou s ohledem na požadovanou přesnost v řádu několika milimetrů reprezentuje řádově několik milionů bodů, je použití kontaktních skenerů nedostatečné a je nutné použít bezkontaktní metodu, kterou jsme schopni zaznamenat dostatečný počet bodů. Kontaktní skenery lze využít například při skenování jistých součástí vozidla, u kterých je při zpracování kladen důraz na vysokou přesnost.

2.2.1.1 Destruktivní skenery

Základní vlastností tohoto typu skenerů je fakt, že je vzorek skenováním zničen. Výhodou těchto skenerů je to, že dokáží zaznamenat **vnější**, a především **vnitřní** geometrii předmětu. Z toho vyplývá, že můžeme získávat informace o předmětu se složitými tvary a dutinách uvnitř objektu, což je hlavní důvod, proč se destruktivní skenery využívají.

Před samotným skenováním je objekt zalit materiálem, který zaplní dutiny uvnitř objektu a zároveň zabezpečí dostatečný kontrast barvy vůči materiálu objektu. V průběhu skenování je vzorek pevně upevněn na platformě. Následně je iteračně opakován proces, kdy je frézou odfrézována velmi tenká vrstva objektu, který je poté naskenován. Tento postup pokračuje do té doby, než je odfrézován a nasnímán celý objekt. Naskenované roviny (vrstvy) jsou následně transformovány do prostoru a vznikne trojrozměrná reprezentace objektu. [10]

2.2.1.2 Nedestruktivní skenery

Nedestruktivní skenery jsou vybaveny pevnou platformou pro uchycení objektu a ramenem, na jehož konci je umístěna sonda (obrázek 2). Rameno je zpravidla robotické nebo je ovládáno manuálně. Při kontaktu sondy s objektem jsou zaznamenány polohové souřadnice ramena x , y , z , tj. informace o poloze v rovině (souřadnice x a y) a výšce (souřadnice z) v dané souřadné soustavě. Tyto body tvoří výsledné bodové mračno, které se následně používá při tvorbě výsledného modelu.

Tyto skenery se označují jako „Coordinate Measuring Machines“ pod zkratkou „CMM“. Používají se například ve strojnictví na kontrolu přesnosti výrobků v průběhu výroby. Vzhledem k materiálové povaze strojních výrobků a sondy skeneru je prakticky vyloučeno zničení nebo případná deformace skenovaného objektu. Přesnost těchto skenerů se pohybuje v řádu několika mikrometrů. [4] [5]



Obrázek 2 - Robotické měřící rameno se sondou [17]

2.2.2 Bezkontaktní skenery

Tyto skenery jsou charakteristické tím, že při skenování nedochází ke kontaktu měřící techniky s objektem. Tím je zajištěno, že nedojde k deformaci, která by ovlivnila, znehodnotila nebo dokonce zničila objekt v důsledku styku sondy s objektem. V porovnání s kontaktními skenery mají tyto schopnost snímat podstatně vyšší rychlostí (množství se pohybuje v řádu tisíců a milionů bodů za sekundu), avšak dosahovaná přesnost je nižší. [4] [5]

Výsledné bodové mračno je vzhledem ke svému rozlišení (vlastnost udávající, jak podrobně jsou detaily mračnem bodů zachyceny) a přesnosti (jak moc vystihuje reálný objekt) vhodné pro počítačovou rekonstrukci předmětu. [5]

Pokud je potřeba skenovat objekt s vysokou přesností (v řádu mikrometrů), je nutné využít kontaktní metodu (viz kapitola 2.2.1).

2.2.2.1 Aktivní metoda

Při použití aktivní metody skener emituje určitý typ záření a následně detekuje jeho odraz od objektu. Jako možné typy záření se používá například světlo, ultrazvuk nebo rentgenové záření. [4] [5]

2.2.2.2 Pasivní metoda

Skenery založené na pasivní metodě neemitují žádné záření, naopak jsou odkázány na odrazu jiného záření od objektu. Většina těchto skenerů snímá viditelné světlo, neboť je snadno snímatelné. Není zde potřeba použít speciální hardwarové vybavení, v mnoha případech postačuje digitální fotoaparát. Z těchto důvodů může být použití pasivní metody relativně finančně nenáročné. [4] [5]

2.2.3 Hybridní skenery

Tento typ skenerů se vyznačuje tím, že kombinuje více než jednu skenovací metodu. Cílem je využít výhod, kterými se jednotlivé skenery vyznačují. [4]

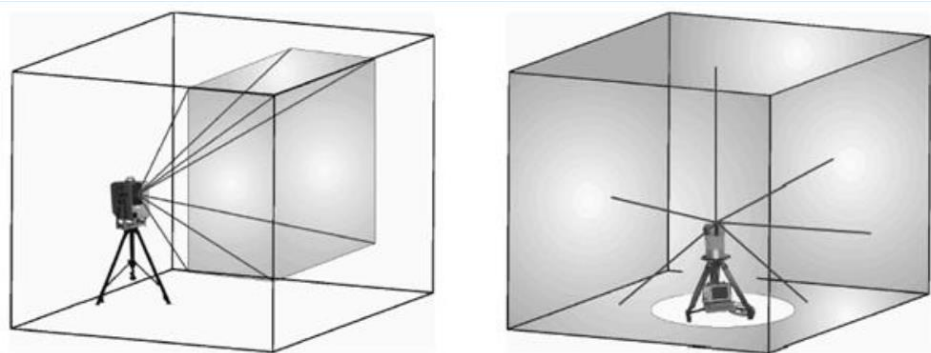
2.3 Dělení 3D skenovacích systémů

Dělení skenovacích systémů je založeno na řadě kritérií. V předchozí kapitole (2.2) byly uvedeny základní typy skenerů podle toho, jakým způsobem jsou získávány prostorové souřadnice objektu (kontaktně, bezkontaktně). V této kapitole budou rozděleny především bezkontaktní skenery, a to na základě jejich charakteristických vlastností.

2.3.1 Dělení podle zorného pole

Podle tohoto kritéria se skenovací systémy dělí na **kamerové** a **panoramatické**. Toto dělení vychází z tvaru zorného pole, které je během skenování snímáno (obrázek 3). Hranice zorného pole jsou vymezeny maximálním úhlovým rozdílem krajních výstupních paprsků. Tento úhlový rozdíl je udáván ve stupních, a to jak ve vodorovném (horizontálním) směru, tak ve směru svislém (vertikálním). Tvar zorného pole do značné míry souvisí se způsobem, jakým je laserový paprsek naváděn do pravidelné sítě bodů (rastru) na skenovaném objektu.

V případě kamerového skeneru je zorné pole podobné jako u fotoaparátů. V případě panoramatických skenerů je pomocí servomotorů otáčeno během skenování celým skenerem, tudíž je zachyceno skoro celé okolí skeneru. Tyto skutečnosti je potřeba brát do úvahy zejména při volbě stanovisek (polohy skeneru během skenování, viz kapitola 2.6.2). Zatímco kamerový skener je vhodné využít zejména při skenování vzdálených objektů, tak panoramatický skener je vhodnější při skenování blízkých objektů, případně interiérů. Výsledné bodové mračno je také charakteristické nerovnoměrnou hustotou bodů, která je způsobena tím, jak se rozmítán paprsek (např.: pomocí rotujícího zrcadla). [1] [3] [13]



Obrázek 3 - Kamerový (vlevo) a panoramatický (vpravo) skener [13]

V případě, kdy skenujeme celé vozidlo, je vhodnější použít skener s panoramatickým zorným polem, který zajistí, že bude naskenováno i okolí vozidla (zachycení bodů, pomocí kterých se budou následně bodová mračna transformována). Během skenování je skener umístěn v relativně krátké vzdálenosti od vozidla, tudíž použití skeneru s kamerovým zorným polem není vhodné.

2.3.2 Dělení podle umístění skeneru

Toto dělení je založeno na tom, jestli je skener během skenování umístěn takovým způsobem, že je v neměnné poloze vůči zemi. Případně jestli se během skenování pohybuje. V prvním případě hovoříme o **statickém** systému, v opačném případě o **kinematickém** systému, který se během skenování neustále pohybuje vůči a zemi a vůči měřenému objektu. Tyto skenery vyžadují senzory pro určení polohy.

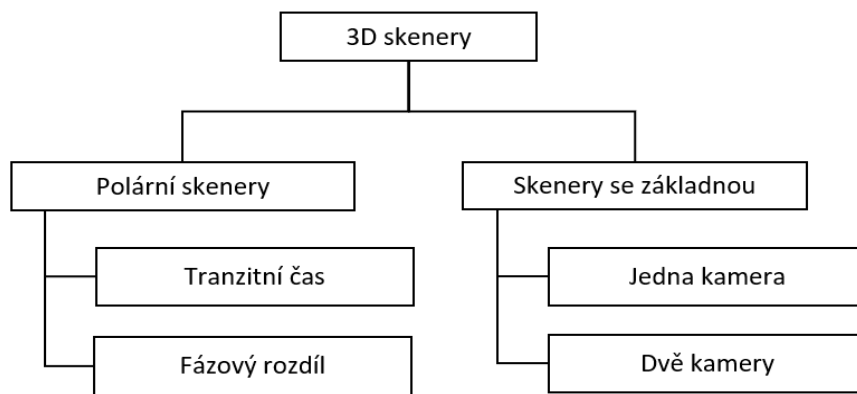
Kinematický systém se využívá zejména při získávání prostorových dat velkých území, pro skenování „klasických“ objektů (části vozidel, menší strojní součástky apod.) se používají ruční skenery, které lze také označit jako kinematické. Zpravidla jsou jako nosiče skenerů používány pro skenování rozsáhlých území letadla nebo helikoptéry. V rámci menších území se využívají automobily nebo jsou skenery přizpůsobeny tak, aby byly snadno přenositelné (např.: umístění v batohu).

Kinematický systém tvoří laserový skener, INS/GNSS² jednotku k určení polohy a orientace, řídicí jednotka a kamera. [1] [43] [45]

2.3.3 Dělení podle principu

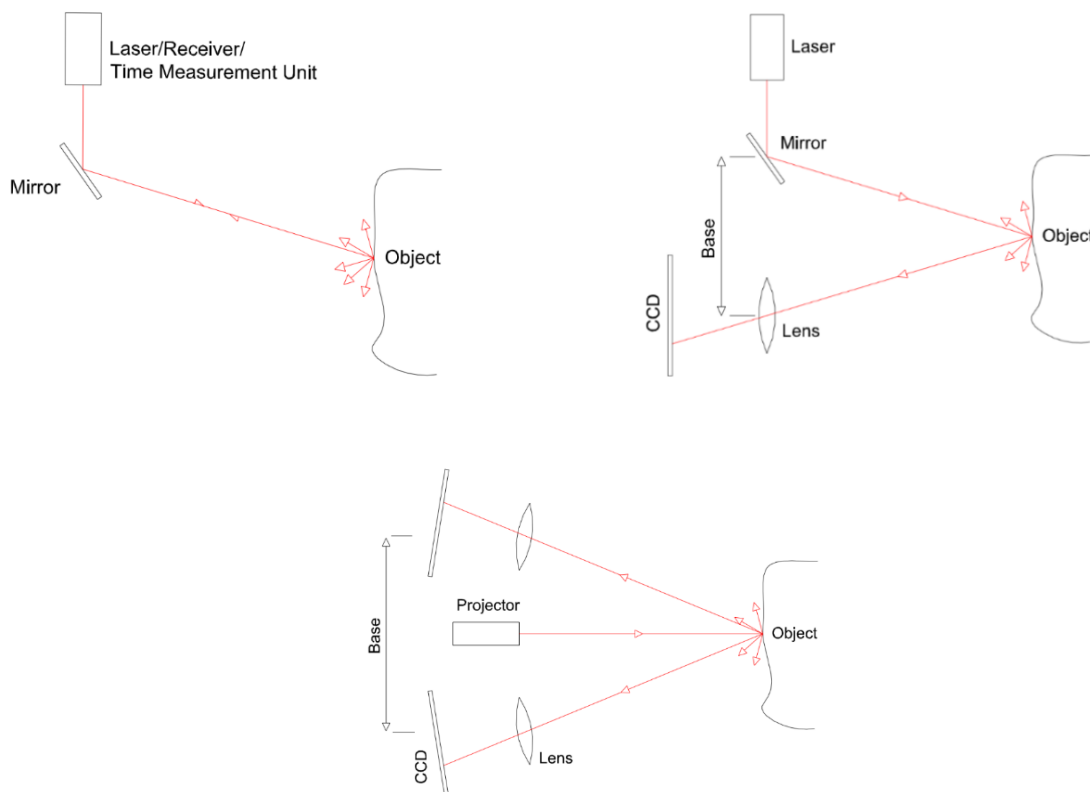
Podle [1] se 3D skenery dělí na základě principu měření. Toto rozdělení je uvedeno na následujícím obrázku 4.

² INS/GNSS – inerciální navigační systémy / globální družicový polohový systém



Obrázek 4 - Rozdělení skenerů podle měřícího principu [1]

V případě polárního skeneru je vzdálenost měřená přímo, a to při využití měření tranzitního času nebo fázového rozdílu. V případě „jedno kamerového“ skeneru je základna tvořena rotujícím zrcátkem a na straně druhé CCD³ kamerou. V případě „dvou kamerového“ skeneru je základna tvořena dvěma CCD kamerami a projektorem, který vytváří světelný řez, případně se použije laserový paprsek. Schémata těchto skenerů jsou zobrazena na obrázcích 5; 6 a 7. [1] [18]



Obrázek 5; 6; 7 – Schéma polárního, jedno kamerového a dvou kamerového skeneru [18]

³ CCD – charge coupled device – typ obrazového senzoru skládající se z velkého počtu citlivých fotobuněk [39]

2.3.4 Dělení podle dosahu

Podle dosahu lze obecně rozdělit skenery do dvou skupin, a to na skenery s krátkým dosahem a dlouhým dosahem. V prvním případě je dosah skenerů maximálně v řádu metrů, v případě druhém se dosah pohybuje kolem stovek metrů až několika kilometrů. Příklady skenerů s dlouhým dosahem jsou uvedeny v tabulce 2. [1] [4]

2.3.5 Dělení podle přesnosti a rychlosti

V tabulce 1 je uvedeno podle [1] dělení do čtyřech skupin. Zatímco kategorie R3 a R4 by se daly vztáhnout na kontaktní skenery, tak u laserových skenerů se rychlost pohybuje i v řádu milionu bodů za sekundu. U přesnosti při měření vzdálenosti se obvykle udává směrodatná odchylka, která se skládá z konstantní hodnoty a hodnoty **ppm**. Tato hodnota je proměnná v závislosti na velikosti měřené délky a představuje miliontinu celku. [44]

Tabulka 1 - Dělení skenerů podle rychlosti [1]

Skupina	Rychlost
R1 – velmi vysoká rychlost	více jak 100 000 bodů za sekundu
R2 – vysoká rychlost	5 000 – 100 000 bodů za sekundu
R3 – střední rychlost	100 – 5 000 bodů za sekundu
R4 – nízká rychlost	do 100 bodů za sekundu

2.3.6 Příklady konkrétních skenerů

V tabulce 2 jsou uvedeny příklady skenerů podobné kategorie a jejich základní vlastnosti z hlediska dosahu, rychlosti a přesnosti.

Tabulka 2 - Základní specifikace vybraných skenerů [12] [19] [23]

	Leica RTC360	FARO Focus 350	Riegl VZ-400i
Rychlost	až 2 000 000 bodů za sekundu	až 976 000 bodů za sekundu	Až 500 000 bodů za sekundu
Přesnost	1,0 mm + 10 ppm	±1 mm (při vzdálenosti 10 až 25 m)	5 mm
Dosah	0,5 m až 130 m	0,6 m až 350 m	0,5 m až 770 m

2.4 Přesnost a chyba měření

Na přesnost a s tím související chybu měření má vliv řada faktorů. V první řadě ovlivňuje přesnost způsob určení vzdálenosti a přesnost, se kterou se určují úhly. Schopnost přesně určovat tyto veličiny je závislá na kalibraci a na kvalitě daného skeneru. V některých případech je tato schopnost ovlivněna vnějším prostředím (měření v interiéru nebo exteriéru).

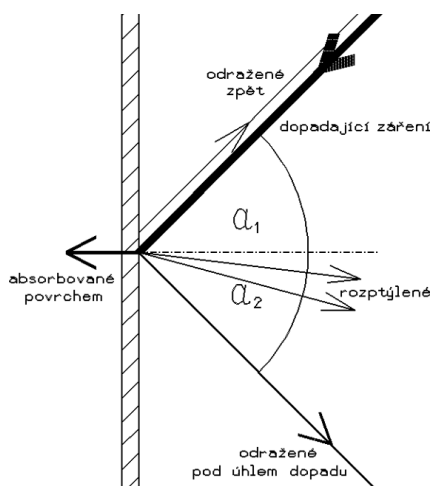
Značný vliv na přesnost měření má také geometrie měřených objektů. Základem je „kolmý odraz“ paprsku od povrchu, protože intenzita záření odražená od povrchu je pro skenování

klíčová. Pokud totiž dráha paprsku svírá s normálou povrchu velký úhel, tak dochází ke snížení intenzity paprsku v důsledku odrazení paprsku jiným směrem než zpět do skeneru. Problematika odrazu paprsku v závislosti na geometrii povrchu je znázorněna na obrázku 5.

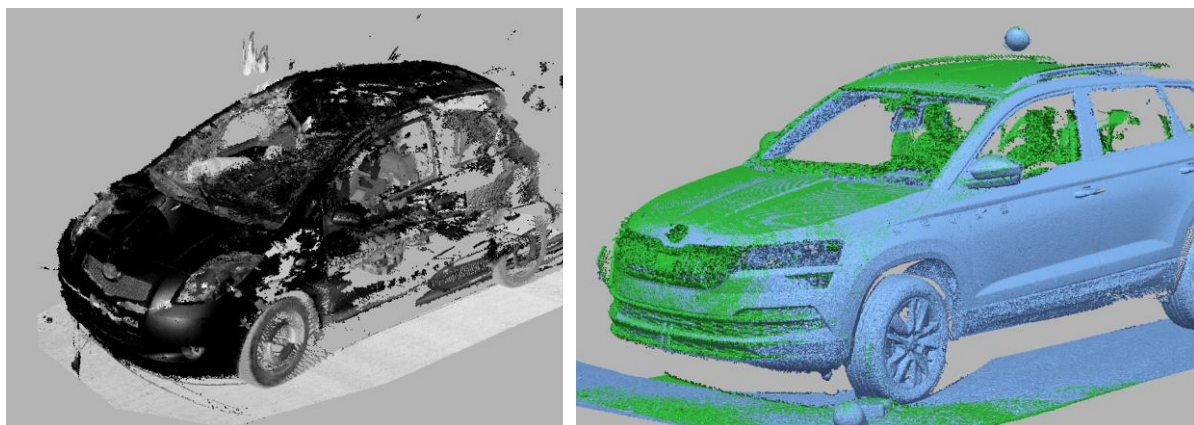
S intenzitou odraženého paprsku souvisí do značné míry i schopnost materiálu absorbovat záření, respektive na schopnosti odrážet záření (reflektivita).

Povrchy s vysokou reflektivitou jsou především matné se světlou barvou. V případě tmavých, lesklých povrchů je docíleno vysoké reflektivity pouze při malých úhlech dopadu paprsku na povrch. [1] [3] [35]

Z hlediska skenování vozidel je vhodné povrch natřít matnou barvou, čímž se docílí vyšší reflektivity povrchu (zejména při větších úhlech dopadu paprsku na povrch). Natřením nicméně vznikne nerovnoměrná vrstva povrchu. Tato nerovnoměrnost je ovšem vzhledem ke své velikosti vzhledem ke skenovanému objektu (vozidlo) zanedbatelná. Rozdíl mezi vozidlem černé, světlé barvy a vozidla se světlou, matnou barvou je zobrazen na bodových mračnecích daných vozů na obrázku 6.



Obrázek 5 – Odraz paprsku od povrchu [3]



Obrázek 6 - Porovnání mračen vozidel s rozdílnými povrchy

2.5 Metody určování prostorových dat

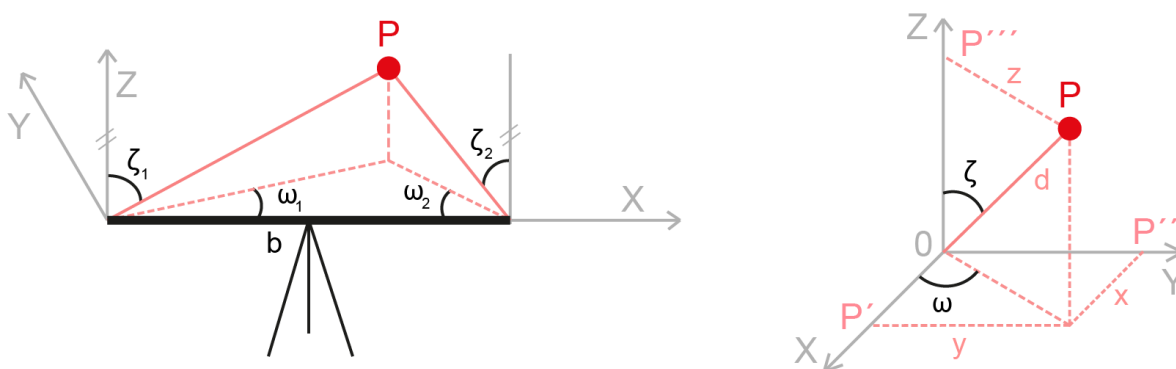
Princip určování prostorových dat objektu pomocí terestrických⁴ skenovacích systémů je založen na dvou metodách a to „metoda prostorového protínání vpřed“ a „prostorová polární metoda.“ [1] [3]

2.5.1 Metoda prostorového protínání vpřed

Principem této metody získávání prostorových souřadnic určitého bodu, je určování horizontálních a zenitových úhlů. Dále je nutné znát délku základny, kterou představuje vzdálenost měřících prvků daného skeneru. Na obrázku 7 je znázorněno schéma této metody. Je zde patrná třírozměrná referenční soustava tvořená osami x , y a z . Dále jsou zde zobrazeny horizontální úhly ω_1 , ω_2 a zenitové úhly ζ_1 a ζ_2 . Základna b a měřený bod P . [1] [3]

2.5.2 Prostorová polární metoda

V tomto případě postačuje pro určení souřadnic bodu získat vzdálenost bodu měřícího zařízení skeneru a informace o velikosti horizontálního a zenitového úhlu. Na obrázku 7 je schematicky zobrazena prostorová polární metoda. Stejně jako v případě metody prostorového protínání vpřed je zde uvedena třírozměrná referenční soustava s osami x , y , z a počátkem 0 . Měřený bod P je s počátkem spojen průvodičem d a úhly ω a ζ . Dále jsou zde zobrazeny obrazy bodu na jednotlivých osách - P' , P'' , P''' . V porovnání s výše uvedenou metodou je potřeba získat informace jen o dvou úhlech (ω a ζ). Určení délky průvodiče d je popsáno v následující kapitole. [1] [3]



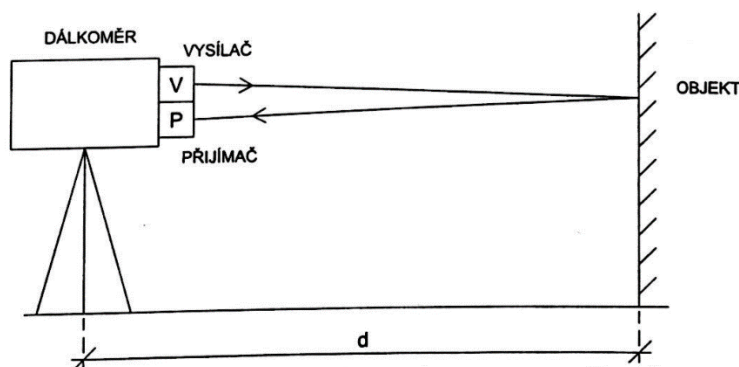
Obrázek 7 – Schéma metody prostorového protínání vpřed a prostorové polární metody, upraveno z [1]

⁴ Statický nebo kinematický skenovací systém, který je umístěn na nosiči, který se pohybuje po dráze pevně spojené se Zemí.

2.5.3 Určování délky

Při použití prostorové polární metody je nezbytné určit délku průvodiče d (viz kapitola 2.5.2). Měření vzdálenosti je založeno na elektronickém, případně optoelektronickém principu.

Princip elektronického měření délky je obecně znázorněn na obrázku 8. Ve skeneru je umístěn dálkoměr skládající se z vysílače a přijímače. Elektromagnetické vlnění, které je vysláno vysílačem V směrem k objektu se o objekt odrazí a následně je zaznamenáno přijímačem P , který se nachází na počátku měřené délky d .



Obrázek 8 - Obecné schéma měření délky [1]

Optoelektronické určování délky je založeno na znalosti jedné strany obecného trojúhelníku, u kterého známe délku základny b . Poté jsou změřeny nebo známy úhly přilehlé k této straně. Tato metoda je vhodná především při měření na krátké vzdálenosti, kdy je zde dosaženo relativně vysoké přesnosti. V případě měření na dlouhé vzdálenosti jsme limitováni délkou základny b a s tím související měření úhlů. [1] [3] [4]

2.6 Proces měření skenovacím systémem

Při samotném skenování, respektive měření skenovacím systémem je nutné dodržet určitý postup, který zaručí, že naměřená data budou zatížena co nejmenší chybou měření a budou vhodná k následnému zpracování a úpravě. Pro docílení výše uvedených požadavků je nutné ve všech směrech zohlednit vlastnosti a možnosti určitého typu skeneru. Především je potřeba brát do úvahy dosah skeneru, který nám udává, jaký největší prostor můžeme skenovat. Dále patří mezi důležité vlastnosti zvolená podrobnost skenování nebo například tvar zorného pole. [1]

V rámci této bakalářské práce bude proces měření popisován především z hlediska měření statickým skenerem s panoramatickým zorným polem. S ohledem na skenování osobního automobilu a s tím souvisejících nutností, které je potřeba zohlednit.

2.6.1 Rekognoskace objektu měření

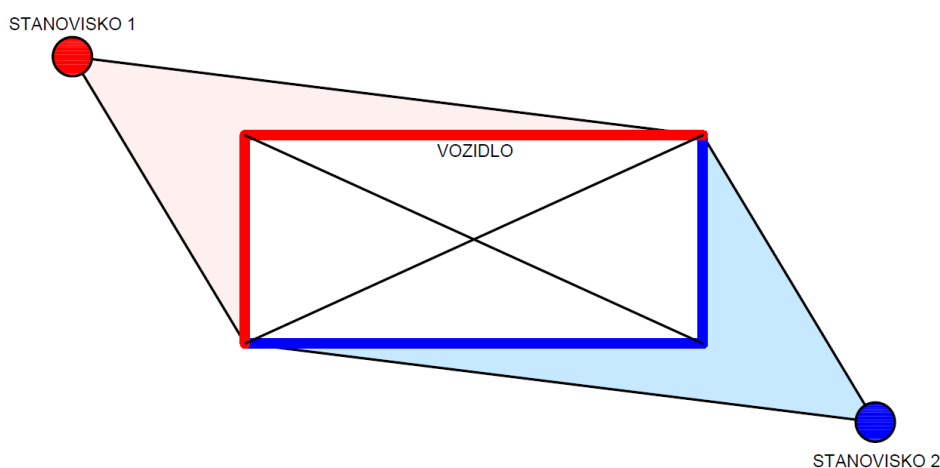
Rekognoskací objektu se rozumí proces s cílem rozpoznání základních vlastností, které musíme vzít do úvahy před začátkem skenování. Mezi základní vlastnosti objektu v tomto případě považujeme především velikostní a materiálové znaky. Dále je nutno zohlednit možnosti a vlastnosti skeneru (rozlíšení skenování, dosah skeneru atd.) Na základě těchto informací se následně zvolí vhodná poloha stanovisek měření a rozmístění vlíčovacích bodů. Následující popis a navržené postupy jsou vztaženy k celkové dokumentaci vozidla. Hlavním cílem bylo zachycení vozidla v dostatečné kvalitě, rozsahu při snížení nároků na časovou a datovou náročnost výsledného modelu. [1]

2.6.2 Volba stanovisek měření

Stanoviskem měření se rozumí poloha, ve které se nachází skener během skenování. V případě snahy o minimalizování času potřebného k naskenování objektu je volba stanovisek klíčová.

Počet stanovisek ovlivňují především nároky na podrobnost získaných dat, časové možnosti (rychlost sběru dat) a rovnoměrné zachycení povrchu. Dále je nutné zohlednit to, jestli je naším cílem získání informací o celkové deformaci vozidla, případně jen určitý detail vozidla po nárazovém testu. Tyto požadavky ovlivňují celkový počet a polohu stanovisek, jejichž poloha je ve své podstatě závislá na konkrétních případech a nelze tak vyslovit jednoznačné tvrzení, které rozmístění je nejvhodnější.

Obecně lze chápat jako nejjednodušší případ skenování celého vozidla ze dvou stanovisek. Tato situace je zjednodušeně zobrazena na obrázku 9. Jedná se o pohled na vozidlo shora.



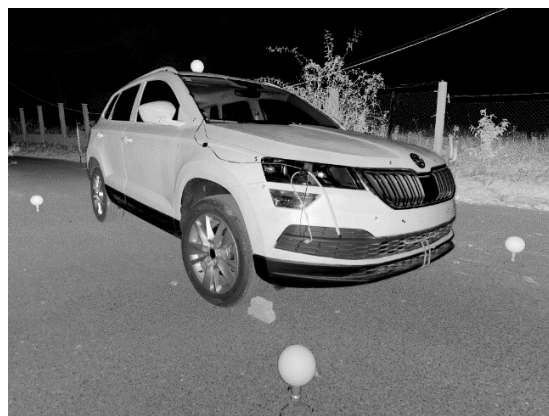
Obrázek 9 - Schéma rozmístění stanovisek (minimální počet)

Tento přístup lze uplatnit zejména v případě, kdy je potřeba získat pouze „orientační obraz“ o vozidle. Naskenování případných deformací v určitém detailu je v tomto případě prakticky nemožné, neboť jsme limitováni přímým výhledem skeneru.

Praktická ukázka zorných polí ze stanovisek 1 a 2 podle obrázku 9 je zobrazena níže.



Obrázek 10 - Zorné pole stanoviště 2 s vyznačenými vřícovacími body



Obrázek 11 - Zorné pole stanoviště 1 s vyznačenými vřícovacími body

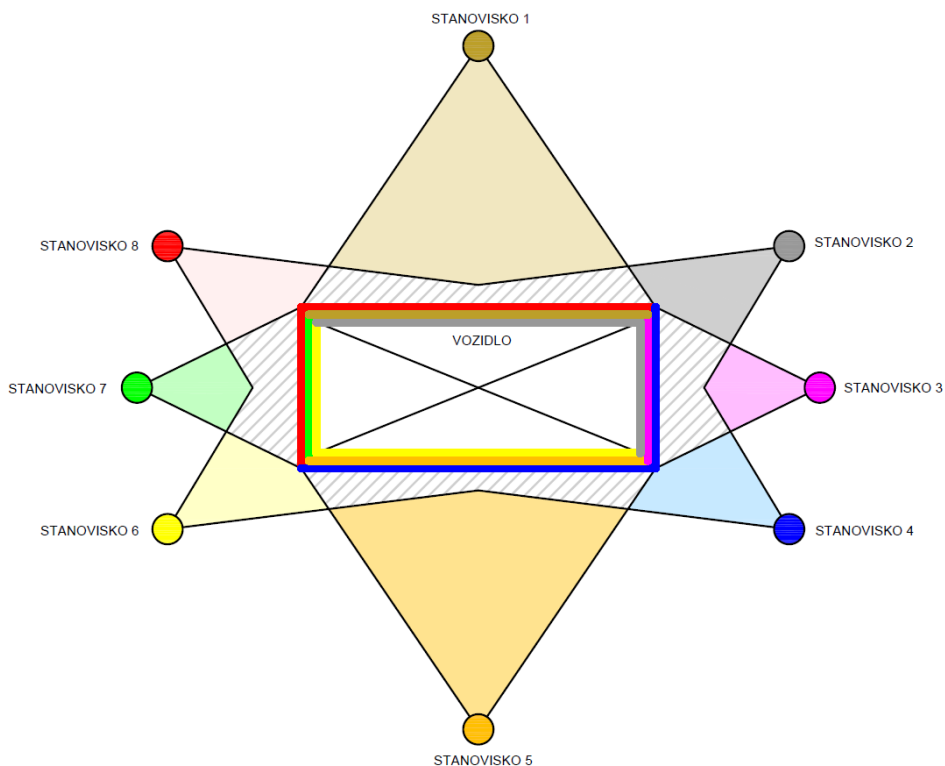
V tomto případě jsou získány celkem dva skeny, které zachycují celé vozidlo. Právě tato skutečnost je hlavní výhodou, neboť je tento způsob nejméně časově náročný. Nevýhodou je přesnost měření (viz kapitola 2.4), která je negativně ovlivněna vlivem úhlu dopadu laserového paprsku na přesnost měření délky, další nevýhodou jsou i rozdíly mezi podrobností jednotlivých částí vozidla (části blíže ke skeneru budou naskenovány podrobněji, než části dále od skeneru).

Tuto nepřesnost lze eliminovat skenováním ze stanovisek, jejichž poloha se nachází na příčné a podélné ose vozidla (stanoviště 3 a 7 na ose podélné, stanoviště 1 a 5 na ose příčné). Situace je znázorněna na obrázku 12. Cílem je v tomto případě dosáhnout, pokud možno kolmého odrazu paprsku od objektu.

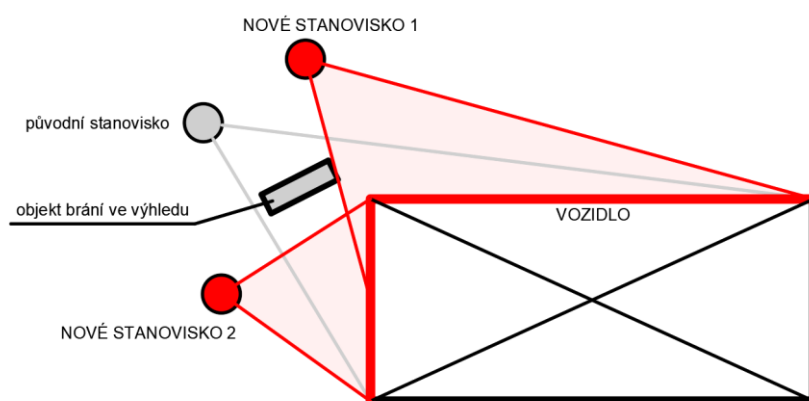
Také musíme brát do úvahy při volbě stanovisek členitost nebo dostupnost objektu, neboť skener je omezen přímým výhledem na objekt (paprsek se od objektu odráží zpět do skeneru). Příkladem takové situace může být předmět, který se nachází v zorném poli skeneru a brání ve výhledu na měřený objekt (např.: kolizní partner, uvolněné části vozidla apod.) viz obrázek 13, kde je nutno rozložit původně zamýšlené stanoviště na dvě jiná. V tomto případě následně vzniká otázka, jestli není možné snížit podrobnost skenování (zrychlení skenování) v důsledku zvýšení počtu stanovisek. Příklad s konkrétními hodnotami (údaje vychází ze skeneru FARO Focus 3D 120) je uveden v tabulce 3, kde původní situaci tvoří jedno stanoviště, které je nutné rozložit na dvě nová – první alternativa je se stejnými parametry skenování jako původní, druhá alternativa s nižším rozlišením. Z tabulky vyplývá, že v případě druhé alternativy získáme přibližně stejný počet bodů jako v původní situaci. V rámci první alternativy je naskenováno dvojnásobné množství bodů s dvojnásobným časem, který je potřebný.

Tabulka 3 - Porovnání časové náročnosti s ohledem na podrobnost skenování

	Původní situace	1. alternativa	2. alternativa
Rozlišení	1/4	1/4	1/5
Kvalita	4	4	4
Počet bodů	cca 19,5 mil.	cca 39 mil.	cca 23,4 mil.
Čas	8:00 minut	16:00 minut	11:00 minut



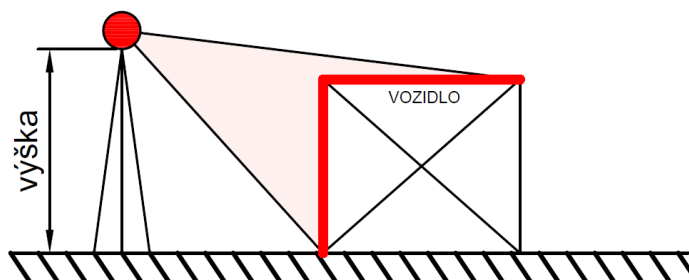
Obrázek 12 - Schéma rozmístění stanic



Obrázek 13 - Situace v případě rozložení stanoviště na dvě

Dalším vlivem na úplnost dat je výška, ve které se skener během skenování nachází. V tomto případě jsou omezující technické možnosti stativu, případně existence vhodných míst, kam lze stativ umístit. V případě snahy o minimalizování počtu stanovišek je vhodné umístit skener do takové výšky, ze které bude naskenován bok a střeška vozidla v rámci jednoho skenu (viz obrázek 14).

Výše uvedené příklady umístění stanovišek lze vhodně kombinovat s ohledem na požadované informace, které mají být získány.



Obrázek 14 - Výškové umístění skeneru

2.6.3 Vlícovací body

Při skenování z více stanovišek vzniká potřeba při následném zpracování jednotlivá bodová mračna spojit. Vlícovací body jsou podrobně popsány v kapitole 3.4.1. Z hlediska jejich umístění musí být poloha těchto bodů volena takovým způsobem, který zaručuje, že bude v každém skenu dostatečné množství potřebné pro následné zarovnání (např.: minimálně tři body v prostoru či kombinace jedné roviny a jednoho bodu). V případě, že je možno identifikovat více vlícovacích bodů, než je potřebné minimum pro zarovnání, vzrůstá robustnost zarovnání společně se statistickou informací o výsledné nepřesnosti. [1] [2] [11]

Vhodné umístění vlícovacích bodů při skenování vozidla je nutno volit tak, aby bylo z jednoho stanoviška vidět na, pokud možno co nejvyšší počet těchto bodů. Vhodná místa reprezentují na obrázku 12 šedě vyšrafované plochy, které vznikly průnikem jednotlivých zorných polí skenerů z daných stanovišek. V tomto případě je zde průnikovou oblastí myšlena i střeška vozidla. Další možností je umístit vlícovací body do blízkého okolí vozidla, za předpokladu splnění podmínky na přítomnost těchto bodů ve více skenech.

Dalším přístupem, který byl v nedávné době představen společností Leica je funkce VIS (Visual Inertial System), která je implementována u skeneru RTC360. Tato funkce automaticky zarovnává bodová mračna na základě znalosti polohy skeneru a jeho přemístění v průběhu skenování, která je zjišťována snímáním charakteristických bodů v okolí prostřednictvím několika kamer s využitím IMU jednotky. [12]

3 Principy zpracování získaných prostorových dat

Naměřená data, vzhledem k jejich nevýběrovému a hromadnému sběru, je vždy potřeba následně zpracovat. Tato činnost se provádí ve specializovaném programu a výstupem by měl být model, který vystihuje reálný obraz měřeného objektu.

Principem zpracování dat je použití řady nástrojů v programech na zpracování dat, kterými jsou naměřená data upravena do takové podoby, která je splňuje veškeré požadavky z hlediska dalšího využití. Cílem zpracování je především omezit množství chyb, které vznikly skenováním v důsledku technických vlastností měřícího zařízení a podmínek při měření (vliv prostředí, povrch objektu atd.) viz kroky popsané v 3.3.1, 3.3.2 a 3.3.3. [1] [3]

3.1 Program na zpracování dat

Jedná se o program, který obsahuje funkce pro úpravu naměřených dat, pomocí něhož bychom měli být schopni zpracovat bodové mračno do cílové podoby (trojúhelníková síť, CAD model atd.)

Tyto programy lze rozdělit na ty, které jsou přímo od výrobce daného skeneru nebo jsou od jiných společností. Dále je možné programy dělit na bezplatně dostupné a placené.

Další kategorií tvoří tzv. open-source programy, které umožňují uživateli přistupovat ke zdrojovému kódu aplikace.

Výhodou programů dodávaných přímo od výrobce skenerů je to, že dokáží pracovat se všemi daty, které skener zaznamenal. V případě programů třetích stran můžeme pracovat s daty z různých zdrojů, respektive přístrojů.

Jako příklady konkrétních programů lze uvést program **Scene** od společnosti FARO, **Geomagic Design X** od 3D Systems. Příkladem open-source programů je **CloudCompare** nebo **MeshLab**.

Výše uvedené programy nabízí uživatelům nástroje pro práci s daty. Nicméně existuje řada programů, které jsou určeny pouze pro zobrazení bodových mračen (někdy s možností základních měření apod.) Příkladem jsou programy **3DVEM**, **FugroViewer** nebo **Online LIDAR point cloud viewer**. [1] [22]

3.2 Reprezentace dat

Cílem zpracování je nějakým způsobem reprezentovat data, nejčastější způsoby jsou uvedeny zde:

- Bodové mračno (množina bodů s určitými vlastnostmi (poloha, barva atd.))
- Trojúhelníková síť (viz 3.6.2.1)
- NURBS (non-uniform rational basis spline)
- CSG (constructive solid geometry)

3.3 Vstupní úpravy mračen bodů

Mezi první kroky při zpracování dat patří především odstranění nepotřebných nebo chybných dat. Poté je potřeba množství dat redukovat, tj. odstranit data, která jsou nadbytečná (nemají nic společného s měřeným objektem), případně redundantní (opakující se) a způsobují nerovnoměrnost dat v rámci povrchu měřeného objektu a zbytečně zpomalují proces vyhodnocení. [1]

Proces vstupní úpravy je rozdělen do tří kategorií.

- 1) Odstranění nepotřebných nebo chybných dat
- 2) Filtrace dat
- 3) Redukce naměřených dat

3.3.1 Odstranění nepotřebných nebo chybných dat

V tomto kroku by měla být odstraněna nepotřebná data, mezi která patří například okolí skeneru (budovy, stěny, lidé apod.) Následně je nutné odstranit hrubé chyby měření, které jsou v tomto případě viditelné, například množina bodů, jenž se nachází v relativně velké vzdálenosti od měřeného objektu, případně vícenásobné odrazy apod. [1] [3]

3.3.2 Filtrace dat

Smyslem filtrace dat je „tlumení šumu“ pro hladké povrchy a odstranění nežádoucích dat. Filtraci dat je možné vykonat při vstupní úpravě bodů, případně i v průběhu dalšího zpracování. Podrobněji je filtrace popsána v kapitole 3.5. [1]

3.3.3 Redukce naměřených dat

Při skenování dochází k tomu, že části objektu, které se nachází blíže skeneru, jsou naskenovány s vyšší hustotou než vzdálenější části objektu. V těchto případech je hustota zbytečně vysoká a množství bodů v této oblasti může být redukováno. [1]

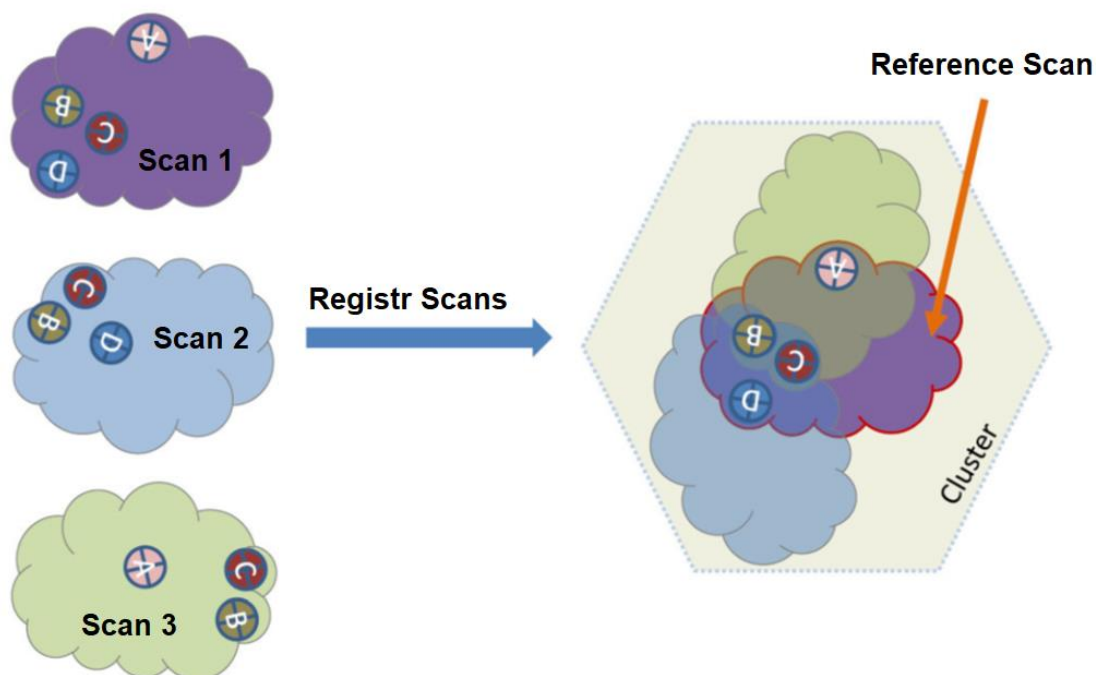
3.4 Spojování jednotlivých mračen bodů

Jednotlivá mračna bodů je potřeba spojit do jednoho mračna, tím vznikne ucelený model naskenovaného objektu. Mračna bodů lze spojovat buď **pomocí vlíčovacích bodů**, nebo **na základě jejich vzájemného překrytu**. Nutnost spojování mračen vychází ze skutečnosti, že skener ukládá prostorová data v souřadné soustavě skeneru. Tudíž má každý sken svou souřadnou soustavu a cílem je všechny skeny transformovat do jedné souřadnicové soustavy. [1] [11]

3.4.1 Spojování jednotlivých skenů pomocí vlíčovacích bodů

Při spojování mračen se vychází z předpokladu, že jednotlivé skeny obsahují společné body, které jsou v průběhu skenování v neměnné pozici, tzv. **vlíčovací body**, které lze obecně definovat jako: „*bod sloužící pro geometrickou transformaci nejčastěji obrazových dat do jiného (např. referenčního) souřadnicového systému*“. [42] Z výše uvedeného důvodu jsou vlíčovací body důležitou součástí každého skenu.

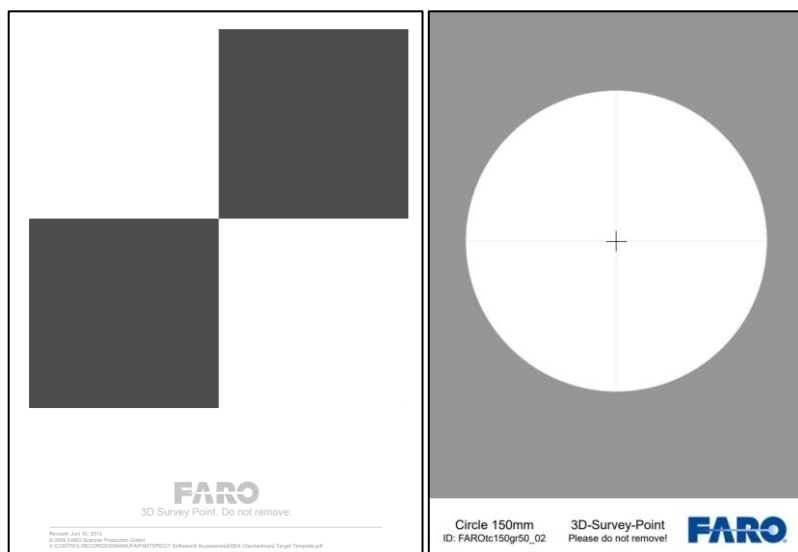
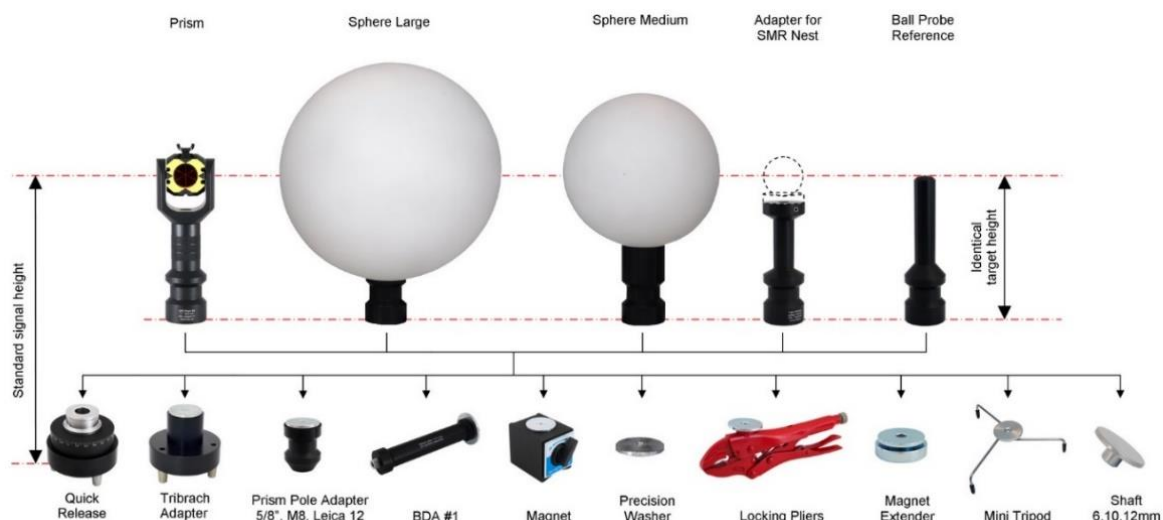
Jako vlíčovací body je možné použít například sféry, jejichž naskenovaný model v podobě bodového mračna je v programu na zpracování dat proložen koulí (matematickým tělesem). Tyto koule jsou následně spojeny a vznikne ucelená situace. Jiným případem vlíčovacích bodů jsou přirozeně signalizované jednoznačně změřitelné prvky na objektu. [1] Princip této metody je znázorněn na obrázku 15.



Obrázek 15 - Princip vlíčovacích bodů, upraveno z [15]

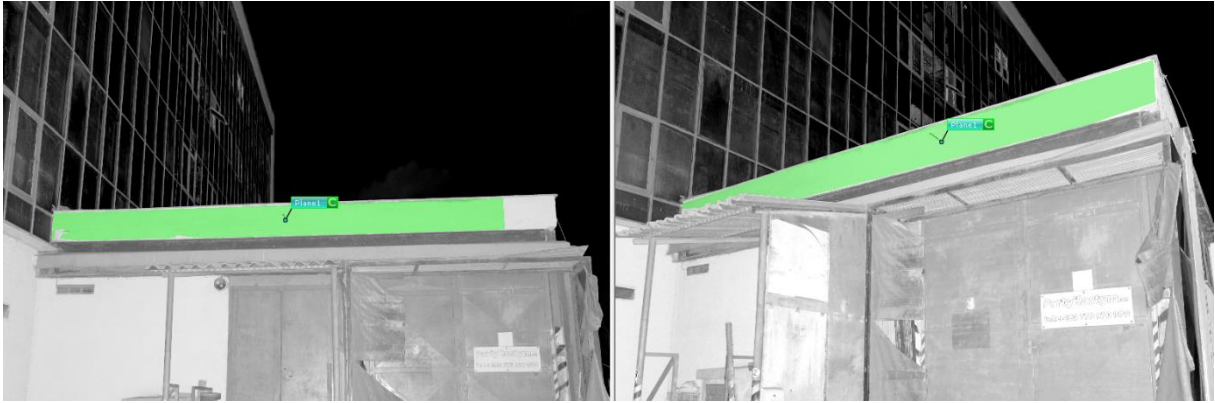
Jako další varianty těchto bodů, lze použít například roviny (obrázek 17) nebo terče s vysokou odrazivostí, fungující na principu koutového odražeče. Vzhledem k vysoké odrazivosti jsou tyto body v mračnu snadno identifikovatelné. [3] [11]

Ukázky těchto vřicovacích bodů včetně sady nástrojů pro pevné umístění jsou na následujícím obrázku 16.



Obrázek 16 - Ukázka sady vřicovacích bodů a jejich příslušenství [16] [20]

Ukázka rozpoznání rovin v programu Scene je na obrázku 17. Podle [31] je možno v programu SCENE zarovnávat také pomocí tzv. checkboard (obrázek 16). Použití těchto typů bodů (sféry a checkboardy) vykazuje údajně vyšší přesnost výsledného zarovnání.



Obrázek 17 - Ukázka zarovnávacích rovin v programu SCENE

3.4.2 Spojování jednotlivých skenů na základě překrytu

Principem této metody je zarovnání (spojení) bodových mračen na základě minimální vzdálenosti ve vzájemně se překrývajících oblastech. Tento způsob v porovnání s výše uvedenou metodou zarovnání pomocí vlíčovacích bodů vykazuje údajně nižší přesnost výsledného zarovnání. Základní myšlenkou algoritmů pro zarovnání mračen bodů je minimalizace vzdáleností obou mračen, která je prováděna výpočtem transformačních matic a následnou transformací bodů. Vzhledem k množství bodů, které jednotlivá mračna obsahují, jsou zpravidla mračna reprezentována vybranými body, které vznikají například decimací či výběrovou redukcí při zohlednění struktur zachycené scény. Algoritmy tohoto typu jsou zpravidla iterační, tj. takové, že opakují určitou činnost do doby, kdy je dosaženo požadovaných vlastností.

Základní myšlenku představuje tzv. ICP algoritmus (popsaný v kapitole 3.4.2.1). Dále existuje řada dalších algoritmů, které v zásadě vycházejí z myšlenky ICP algoritmu, avšak jsou do jisté míry optimalizovány v určitých přístupech pro práci s bodovými mračny.

Na podobném principu pracuje také Kabschův algoritmus, který ovšem pracuje s jiným vstupem (s odchylkou, kterou ICP algoritmus počítá). [1] [24] [36] [46]

3.4.2.1 ICP algoritmus

Iterative Closest Point je algoritmus, který se používá pro zarovnání mračen bodů na základě výpočtu vzdáleností mezi dvěma vybranými body a následné transformace, kterou se tato vzdálenost zmenšuje.

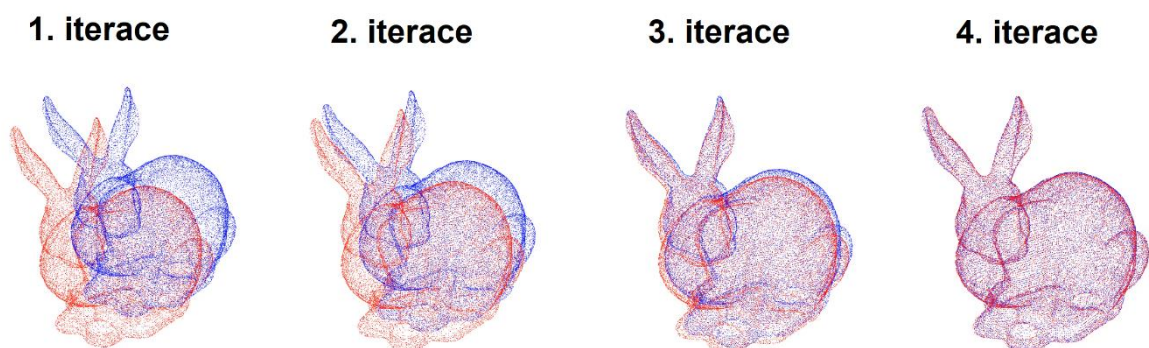
Algoritmus lze použít pro množiny bodů, implicitní a parametrické křivky nebo například pro trojúhelníkové sítě.

Princip algoritmu je následující:

Jsou dány množiny bodů $\mathbf{M} = \{\mathbf{m}_1; \mathbf{m}_2; \dots; \mathbf{m}_i\}$ a $\mathbf{N} = \{\mathbf{n}_1; \mathbf{n}_2; \dots; \mathbf{n}_j\}$. Mezi dvěma body se určí Euklidovská vzdálenost podle rovnice 3.1. Následně se vypočítá transformační klíč, pomocí kterého se bod \mathbf{m}_i transformuje v prostoru co nejbližší k bodu \mathbf{n}_j . Tento postup se opakuje do té doby, než se hodnota střední kvadratické vzdálenosti nezmenší na požadovanou hodnotu. [1] [9]

$$d(\mathbf{m}_i, \mathbf{n}_j) = \sqrt{(x_{nj} - x_{mi})^2 + (y_{nj} - y_{mi})^2 + (z_{nj} - z_{mi})^2} \quad (3.1)$$

Jednotlivé iterace jsou vyobrazeny na následujícím obrázku:



Obrázek 18 - Iterace ICP algoritmu, upraveno z [27]

3.4.2.2 Typy ICP algoritmů

Jak již bylo zmíněno výše, tak existuje celá řada modifikací tohoto algoritmu. Jednotlivé modifikace lze rozdělit podle toho, jaká fáze původního ICP algoritmu je upravena.

V první řadě se jednotlivé varianty odlišují ve způsobu výběru bodů, mezi kterými jsou vypočítávány vzdálenosti. První možností je použití všech bodů, které bodová mračna obsahují. Jiný přístup představuje možnost vzorkovat bodové mračno (vybrat pouze část bodů) a pouze pomocí nich počítat vzdálenosti.

Dále se algoritmy liší podle způsobu vyhledávání korespondujících bodů ve druhém mračnu. V těchto případech se používá tzv. K-D strom nebo lze využít normály jednotlivých bodů. V případě normál se hledají ve druhém mračnu oblasti s podobnou orientací normálových vektorů. [9] [24]

3.5 Filtrace dat

Při skenování jsou naměřená data zatížena chybou měření, která je u laserových skenovacích systémů způsobena především přesností, se kterou se měří vzdálenost bodu na měřeném objektu. Poté je chybou negativně ovlivněno i měření úhlů. Tyto chyby jsou zejména

způsobeny technickými vlastnostmi skeneru. Mezi další činitele ovlivňující množství a velikost chyb patří zejména materiálové vlastnosti skenovaného povrchu a úhel dopadu laserového paprsku, dále také například atmosférické podmínky, ve kterých měření probíhalo. V tomto případě je ovlivněna prostorová trajektorie laserového svazku a také samotné komponenty skeneru. Body, jejichž poloha je nesprávně určena se v bodovém mračnu projeví tzv. šumem.

[1] [3] [6]

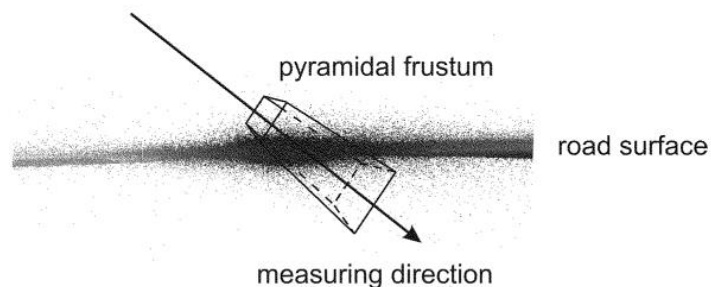
Z výše uvedených poznatků vyplývá, že bodové mračno je potřeba upravit, respektive odstranit body, které jsou zatíženy tak velkou chybou, že nemají pro další zpracování dat žádný význam, ba dokonce ovlivňují výslednou hodnotu modelu. Příkladem jsou body, jejichž poloha neodpovídá povrchu skenovaného objektu. Dále je potřeba odstranit body, které reprezentují jiné objekty – lidé, jedoucí vozidla apod.

Výsledný šum lze redukovat, v některých případech i z velké části eliminovat, dvěma hlavními způsoby. První možnost spočívá v redukcí šumu již při samotném skenování. U některých skenerů se vzdálenost měří opakovaně. Poté se z naměřených hodnot vypočítá aritmetický průměr. V tomto případě počet opakování volí uživatel. Jiný způsob je založen na době, kterou se vzdálenost měří, přičemž čím delší dobu se vzdálenost měří, tím je výsledná hodnota vzdálenosti přesnější. Příkladem vybraných skenovacích systémů je Focus 3D od společnosti Faro, případně skenery od společnosti Trimble. Společnost Leica Geosystems u skenerů řady P nabízí možnost odstranění šumu, která je založena na dvojnásobném skenování jedné situace. Následně se oba skeny porovnají a objekty, které změnily svou polohu, případně které se ve druhém skenu již nevyskytují, jsou odstraněny. **[1] [32]**

Druhá možnost redukce šumu již probíhá po naměření dat ve specializovaném softwaru, který obsahuje konkrétní funkce určené k filtraci dat. Jako příklady programů lze uvést Geomagic Design X nebo Geomagic Studio. Na základě informací od výrobce těchto programů filtrace probíhá takto: „*algoritmus funguje tak, že hledá v mračnu body, které statisticky leží mimo oblast průměrovaného souboru bodových dat a posouvá je na statisticky správné místo.*“ **[1]**

3.5.1 Průměrování sférických souřadnic blízkých bodů

Jedná se o jednu z možných metod určenou na redukcí šumu. Principem této metody je v prvním kroku zvolit oblast, která obsahuje určité množství bodů, jejichž poloha v prostoru je určena sférickými souřadnicemi. Jako možný tvar oblasti uvádí **[8]** komolý jehlan, jehož svislá osa (výška) má směr totožný se směrem skenování, v tomto případě byl uveden příklad povrchu vozovky (roviny), nicméně tato metoda je použitelná i pro jiné tvary objektu. Viz obrázek 19.



Obrázek 19 - Množina bodů s výběrovou oblastí [8]

Následně jsou zprůměrovány sférické souřadnice daných bodů podle následujících vztahů (3.2, 3.3, 3.4), kde n představuje počet bodů v oblasti, φ a θ jsou hodnoty horizontálního a vertikálního úhlu, r je délka průvodiče.

$$\varphi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (3.2)$$

$$\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (3.3)$$

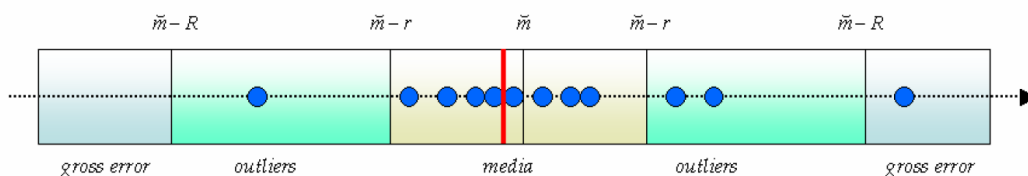
$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (3.4)$$

Výsledkem je bodové mračno, které tvoří body, jejichž sférické souřadnice jsou určeny z výše uvedených rovnic 3.2 až 3.4. [1] [8]

3.5.2 Průměrování délek blízkých bodů

Tento algoritmus v [6] označen jako LSR 2004 pracuje na podobném principu jako předchozí metoda (3.5.1). V tomto případě je bodové mračno rozděleno na pravidelné mřížky s určitým počtem bodů, jejichž velikost volí uživatel. Autorem v [6] je uvedeno, že v mřížce mají být minimálně 4 body, přičemž by počet bodů (dán velikostí mřížky) měl být alespoň dvojnásobný v porovnání s hustotou skenování.

Z množiny těchto bodů v mřížce je určen výsledný bod, jehož poloha je vypočítána na základě průměrné vzdálenosti bodů (od skeneru) ležících v oblasti „*media*.“



Obrázek 20 – Statistické vyhodnocení bodů [6]

Na obrázku 20 je zobrazen princip vyhodnocení, ze kterého jsou patrné jednotlivé „oblasti“. Body použité pro výpočet průměrné vzdálenosti leží v „oblasti“ **media**. [6]

3.6 Zpracování dat z měření

V předchozích kapitolách byl uveden stručný přehled principů práce s daty a jejich možné úpravy včetně popisu základních algoritmů. Dalším krokem ve zpracování dat je vyjádření bodů v podobě trojúhelníkové sítě, případně vyjádření pomocí geometrických primitiv. Volba mezi vhodným způsobem vyhodnocení je závislá na tvaru měřeného objektu. Pokud se jedná o objekt, který má tvar blízký nějakému geometrickému tvaru (např.: stěna, sloup, jednoduché strojní součástky), tak je vhodné jej aproximovat matematickými tělesy. V opačném případě je nutno použít konstrukci trojúhelníkové sítě. [1] [3]

3.6.1 Aproximace objektů matematickými primitivy

Tento způsob za předpokladu výše uvedených podmínek (objekt má tvar blízký specifickému⁵ geometrickému tvaru) vykazuje zmenšení množství dat, neboť jednotlivé plochy nejsou tvořeny velkým množstvím bodů, ale pouze matematickými rovnicemi a konstantami. [1]

3.6.2 Triangulace

Základem triangulace je vytvoření trojúhelníkové sítě, která dostatečně nahradí povrch mnoha trojúhelníky. Tento způsob je vhodný pro složitější objekty, mezi které lze zařadit i vozidla, pro které je zcela nevhodné použití výše uvedené metody (3.6.1). Zjednodušeně řečeno lze triangulaci chápat jako proces spojování bodů nově vytvořenými hranami a stěnami. [1] [2]

3.6.2.1 Trojúhelníková síť

Trojúhelníkovou sítí (též možný výraz polygonová síť) rozumíme mnohostěn, který je založen na 3D digitálních datech, která jsou složena z bodů (vrcholů)⁶, hran⁷ a stěn⁸. Tyto sítě jsou ve většině případů použity v rámci technologií CAD/CAM/CAE a dále v grafických programech. [2]

3.6.2.2 Delaunayova triangulace

Hlavním požadavkem této metody je, aby se nově vytvořené trojúhelníky co nejvíce přibližovali rovnostranným trojúhelníkům. Základní podmínkou je to, že v opsané kružnici daného trojúhelníku není žádný další bod. Tento způsob triangulace se také vyznačuje tím, že dochází k maximalizaci minimálních úhlů v jednotlivých trojúhelnících. Duální úlohou k tomuto způsobu triangulace je tzv. Voroného diagram. Body, které přísluší sousedním oblastem ve Voroného diagramu jsou navzájem propojeny hranou v Delaunayově triangulaci. [1] [37]

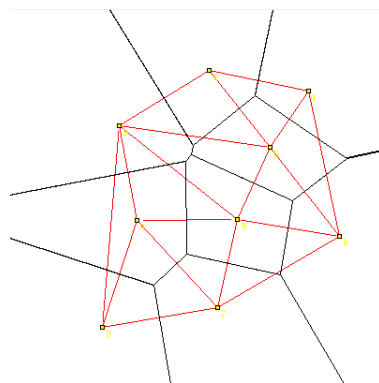
⁵ koule, kužel, krychle apod.

⁶ anglické označení **point**, případně **vertex**

⁷ anglické označení **edge**

⁸ anglické označení **face**

Ukázka Delaunayovy triangulace a Voroného diagramu je na obrázku 21, na kterém jsou červeně vyznačeny hrany trojúhelníků a černě hranice oblastí Voroného diagramu.

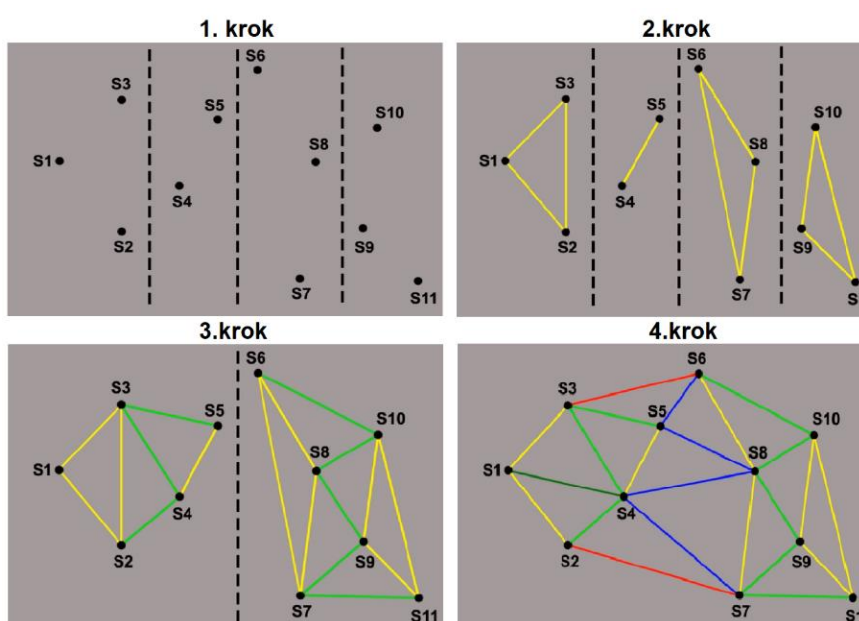


Obrázek 21 - Delaunayova triangulace a Voroného diagramu [21]

3.6.2.3 Základní dělení algoritmů

Podle [1] lze dělit algoritmy pro generování trojúhelníkových sítí do následujících skupin:

- **Místní vylepšování** (modifikace existující sítě podle podmínek Delaunayovy triangulace)
- **Inkrementální konstrukce** (vytváření sítě trojúhelníky, které splňují podmínky Delaunayovy triangulace)
- **Použití vyšší dimenze** („body jsou transformovány do prostoru s vyšší dimenzí, triangulace je pak určena projekcí konvexního trupu vytvořeného v prostoru s vyšší dimenzí do původního prostoru“)
- **Rozděl a panuj** (body jsou rozděleny na „podskupiny,“ které se triangulují a následně se spojují do výsledné sítě, viz obrázek 22)



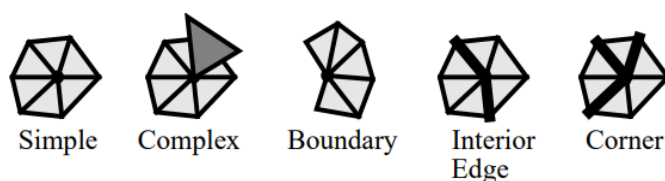
Obrázek 22 - Postupné kroky metody "rozděl a panuj" [26]

3.6.3 Redukce prvků trojúhelníkových sítí

Po vytvoření trojúhelníkové sítě je nutno s ohledem na výpočetní výkon počítačů redukovat počty jednotlivých prvků sítě. Důležitým předpokladem redukce je zachování původního tvaru v co nejvyšší možné míře neboli zachování určité míry přesnosti modelu. Pojem redukce se v některých zdrojích (např.: [2] nebo [7]) označuje pojmem „*decimace*“ nebo „*simplifikace*.“ Redukci lze podle [1] dělit do 3 kategorií: redukce **vrcholů**, redukce **hran**, redukce **trojúhelníků**. [1] [7]

3.6.3.1 Redukce vrcholů

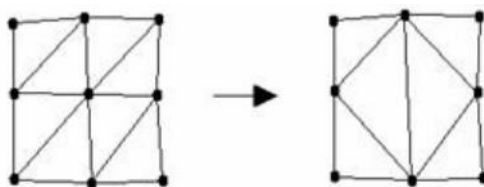
Redukcí vrcholů se rozumí proces odstraňování vrcholů a následné doplnění trojúhelníků. Nová triangulace se provádí lokálně, tj. se trianguluje oblast, které byla ovlivněna odstraněním vrcholu. Příkladem tohoto algoritmu je Schroederův algoritmus. Ten v prvním kroku určí charakter bodu (z hlediska polohy a geometrie viz obrázek 23).



Obrázek 23 - Typy vrcholů [14]

Dále algoritmus vyhodnotí, jestli může být daný vrchol odstraněn a následně je oblast nahrazena novou triangulací. [1] [14]

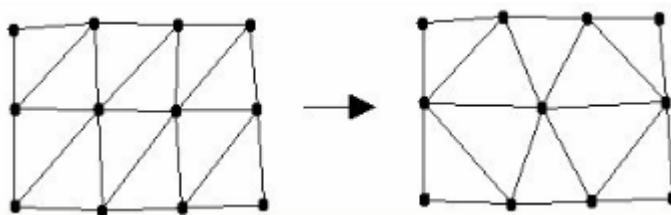
Proces decimace vrcholů je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 24 - Decimace vrcholů [1]

3.6.3.2 Redukce hran

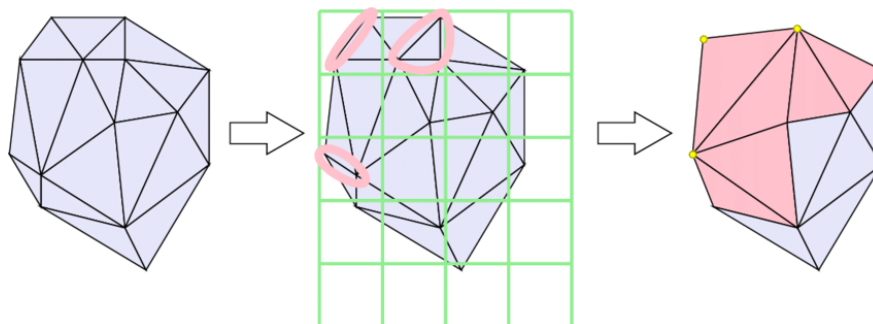
Principem redukce hran je nahrazení hrany jedním vrcholem, který představuje počáteční a koncový bod odstraněné hrany, viz obrázek 25. [1] [33]



Obrázek 25 - Decimace hran [1]

3.6.3.3 Vertex clustering

Další metodou redukce trojúhelníkové sítě je tzv. vertex clustering neboli shlukování vrcholů. Základní myšlenkou této metody je rozdělení sítě do oblastí. Poté je pro každou oblast vypočten vrchol s nejvíce vypovídající pozicí (vrchol, který svou polohou nejvíce charakterizuje danou oblast.) Následně jsou body v oblasti sloučeny do daného bodu. Jednotlivé kroky této metody jsou na obrázku 26. [7]

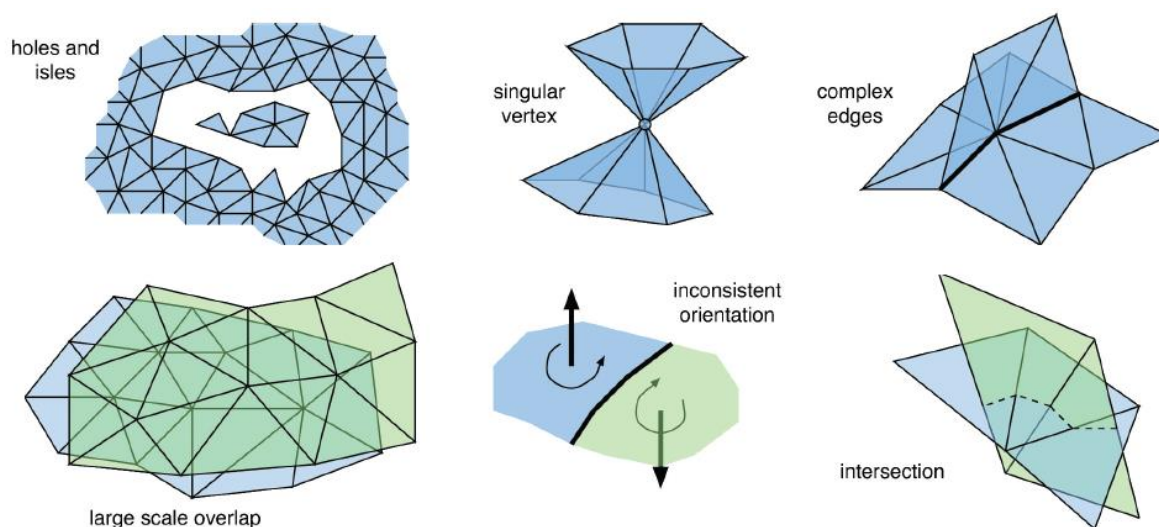


Obrázek 26 - Vertex clustering [34]

3.6.4 Oprava modelu

Výsledný model, který představuje trojúhelníková síť zpravidla obsahuje chyby, které je potřeba pro další práci (např.: použití CAD technologie nebo NURBS křivek) s modelem odstranit. V případě programu Geomagic Design X je tento problém řešen příslušnou funkcí, která chyby vyhledává a následně je automaticky opravuje. [2] [7]

Nejčastější chyby trojúhelníkových sítí jsou zobrazeny na následujícím obrázku 27. Množství výskytu těchto chyb a jejich podoba na modelu budou popsány v další kapitole, která se bude zabývat zpracováním konkrétních dat.



Obrázek 27 - Chyby trojúhelníkové sítě [7]

4 Metody slučování, úpravy a čištění dat

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak existuje celá řada programů na zpracování dat. V rámci této bakalářské práce byl využit program Geomagic Design X. Mezi jeho hlavní výhody patří především to, že umožňuje práci s daty, která byla exportována přímo ze skeneru. Tato data je možné dále zpracovat až do finální podoby. V našem případě se jedná o polygonovou síť, která minimalizuje chyby a vystihuje, pokud možno co nejvíce měřený objekt. Nevýhody programu lze nalézt zejména při importování a následném zarovnání bodových mračen. Tyto skutečnosti budou zmíněny vždy v příslušných kapitolách.

4.1 Program na zpracování dat

Geomagic Design X od společnosti 3D Systems je program určený pro reverzní inženýrství. Program obsahuje nástroje pro práci s naskenovanými daty, tj. nástroje pro práci s bodovým mračnem a pro tvorbu sítí a povrchů, které jsou podrobněji rozebrány v dalších částech této práce. Dále poskytuje nástroje pro tvorbu CAD modelů s historií tvorby a stromem funkcí. [2] [30] [28]

4.2 Postup zpracování dat

Proces zpracování dat v příslušném programu lze rozdělit do několika obecných kroků:

- a) Importování dat
- b) Hrubé očištění dat
- c) Zarovnání bodových mračen
- d) Čištění dat
- e) Triangulace
- f) Úprava polygonové sítě

4.3 Importování dat

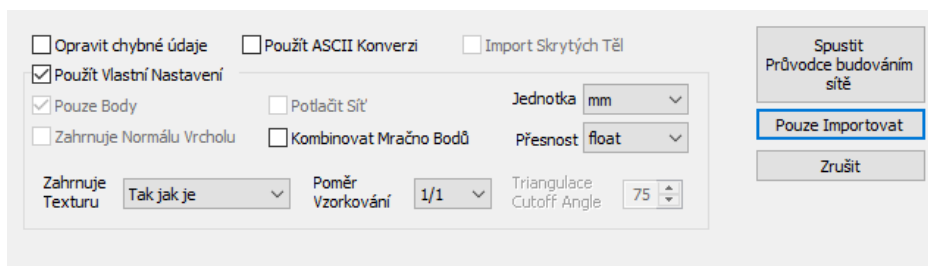
Prvním krokem ve zpracování je importování naskenovaných dat do programu. Geomagic Design X umožňuje importovat data z mnoha typů skenerů od různých výrobců. Vybrané formáty, které jsou programem podporovány jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 4 - Vybrané podporované formáty dat [2]

Přípona souboru	Aplikace
stl	Stereolithography
pts	Geomagic Point
xrl, xdl, rwl	XO Model
obj	OBJ
ply	CyberWave
fls	FARO
pts, ptx, ptg	Leica
3ds	3D Studio

Kromě importu bodového mračna lze do programu importovat i CAD data neboli data, která jsou používána CAD aplikacemi. V případě, že je formát dat neznámý, je možné použít pro importování průvodce (ASCII Converter). V tomto průvodci se definují typy dat v jednotlivých sloupcích včetně záhlaví tabulky apod. Zpravidla soubor obsahuje informace o souřadnicích bodu **x**, **y** a **z**. Dále také informace o barvě bodu ve formátu RGB (Red-Green-Blue). [2]

V dialogu pro importování dat je několik možností, které jsou zobrazeny na obrázku 28.



Obrázek 28 - Možnosti importu dat

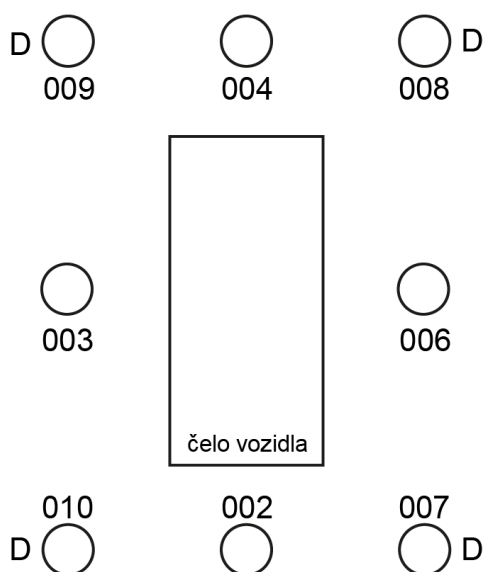
Při nahrávání bodového mračna je především nutné zvolit správné jednotky a zajistit, aby byly zachovány informace o normálách vrcholů a informace o textuře. V případě zvolení možnosti „**Jako barevné body**“ je textura převedena na barvu jednotlivých bodů. [2] Použití textury, respektive informace o barvě jednotlivých bodů může následně ulehčit proces slučování mračen, proto je vhodné texturu použít, pokud je k dispozici. Poměr vzorkování je nutné ponechat na možnosti „1/1“, neboť by při vzorkování mohlo dojít ke ztrátě informací na měřeném objektu.

V řadě případů je ovšem proces importování časově náročný. Například soubory **fls** se importují déle v závislosti na velikosti souboru. Při nahrávání mračen o desítkách milionů bodů dokonce někdy dochází k neočekávanému ukončení programu. Jako možné řešení se ukázalo převedení dat ve formátu **fls** do formátu **e57** v programu Scene, který je dodáván přímo od výrobce skeneru. Při importování dat se v tomto případě nevyskytly žádné z předchozích chyb.

4.3.1 Praktická ukázka

Do programu byla importována data ve formátu fls, která byla naskenována skenerem Focus 3D 120 od společnosti Faro. Cílem bylo získat model celého vozidla, které bylo následně podrobeno nárazové zkoušce.

Jedná se o 8 skenů, jejichž stanoviska vůči vozidlu jsou zobrazena na následujícím obrázku 29. Písmenem **D** je označeno stanovisko, ve kterém byl skener umístěn v rámci výškové úrovně co nejnižší (podle technických možností stativu). V případě ostatních stanovisek byl skener umístěn co nejvýše (opět podle technických možností stativu).



Obrázek 29 - Stanoviska měření

Hodnoty nastavených parametrů skenování byly voleny tak, aby se přesnost pohybovala v řádu milimetrů, která je pro případ počítačové rekonstrukce karoserie vozidla vzhledem k předpokládaným deformacím v řádu centimetrů zcela dostačující. Rozlišení bylo nastaveno na hodnotu **1/4** a kvalitu **4**. Celkové množství bodů v jednotlivém skenu se pohybuje okolo 19,5 milionu (jedná se o údaj ze skeneru, skutečné množství bodů je uvedeno v tabulce 5).

4.4 Hrubé očištění dat

Pod tímto pojmem si lze představit proces odstraňování nepotřebných bodů, které byly naskenovány a nemají s měřeným objektem žádnou spojitost, případně nejsou pro další zpracování důležité. Řadí se mezi ně především části okolí měřeného objektu. Příkladem mohou být stromy, osoby, okolní stavby apod.

Cílem tohoto kroku je redukovat množství bodů v mračnecích, a tím snížit náročnost na zpracování dat.

Jedna z možností, jak redukovat množství bodů spočívá také ve vhodném nastavení přístroje, konkrétně se jedná o velikost skenované oblasti, kterou lze omezit na cílový objekt. Nevýhodou je ovšem to, že nebudeme mít k dispozici kompletní situaci a může následně vzniknout problém při zarovnání, kdy nebudou dostupné referenční objekty (zejména přirozeně signalizované body, např.: zdi).

Před odstranění nepotřebných bodů je nutné identifikovat vlčcovací body, které je nutné zachovat. V určitých případech lze zarovnávat bodová mračna také pomocí rovin, proto je vhodné důkladně promyslet, jestli jsou nějaké prvky okolí skenovaného objektu vhodné pro toto použití. To stejné platí i pro jiné charakteristické body, které jsou zachyceny ve více skenech.

4.4.1 Praktická ukázka

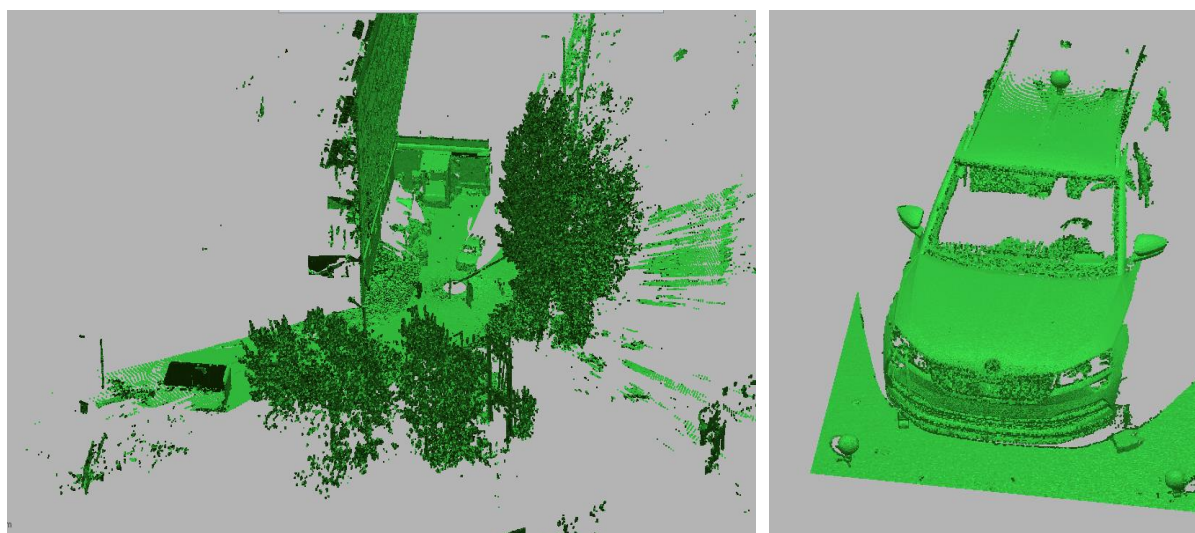
Množství bodů před hrubým očištěním a po hrubém očištění je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 5 - Množství bodů

Označení skenu	Množství bodů před hrubým očištěním	Množství bodů po hrubém očištění
1	22 599 193	1 197 211
2	24 649 269	1 306 411
3	22 269 852	1 180 302
4	23 245 092	1 231 990
5	24 781 556	1 313 422
6	24 660 648	1 307 014
7	21 177 642	1 122 415
8	22 968 411	1 217 326
CELKEM	186 351 663	9 876 638

Ukázka změny v podobě dat je zobrazena na obrázku 30, kde je bodové mračno (vlevo) před hrubým očištěním a po hrubém očištění (vpravo). V rámci tohoto kroku byly zachovány vřícovací body v podobě sfér, jiné formy vřícovacích bodů nebyly v tomto případě použity.

Při manipulaci s daty byly použity příslušné nástroje (zejména nástroje pro výběr bodů) programu Geomagic Design X. Jedním z velmi užitečných nástrojů pro výběr se v rámci tohoto případu ukázal tzv. „inverzní výběr“. Ten umožňuje uživateli vybrat cílový objekt (vozidlo) a následně klávesovou zkratkou (Shift + I) vybrat body ležící mimo výběr [2]. Z časového hlediska to značně urychlilo proces zpracování.



Obrázek 30 - Bodové mračno před a po hrubém očištění

4.5 Zarovnání bodových mračen

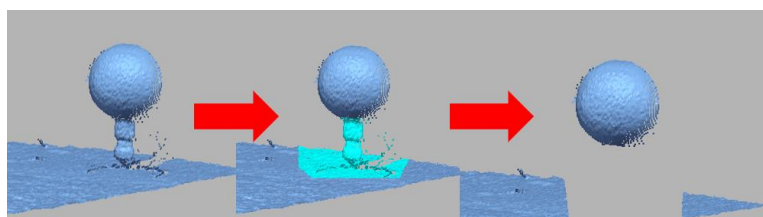
Po hrubém očištění mračen je potřeba jednotlivá mračna vzájemně zarovnat (transformovat skeny z jednotlivých stanovisek do jednoho souřadnicového systému). Geomagic Design X disponuje řadou nástrojů, pomocí kterých lze mračna zarovnávat. Příkladem jsou možnosti „Lokální Založeno na Automatickém předpokladu,“ „Lokální Založeno na Vybraném Bodě“ a „Global and Fine“. Dále umožňuje program zarovnat skeny pomocí sfér. [2]

Nejprve je vhodné pokusit se zarovnat mračna pomocí sfér. Tento způsob zarovnání je v porovnání s ostatními možnostmi časově rychlejší a vykazuje údajně relativně vysokou přesnost zarovnání (přesnost zarovnání je rozebrána v kapitole 5). Nevýhodou této metody je fakt, že Geomagic Design X vyžaduje minimálně 3 sféry v každém skenu, který zarovnáваме. Pro dostatečně přesnou aproximaci referenčních sfér je důležité mít dostatečné množství bodů na referenčním objektu. S výhodou lze také využít známých rozměrů referenčního objektu (například poloměr sféry apod.).

Pokud nelze zarovnávat pomocí sfér je nutné využít funkci „Lokální Založeno na Vybraném Bodě“. V tomto případě uživatel volí charakteristické body, které jsou stejné na obou skenech (dostatečně výrazné a jedinečně identifikovatelné prvky). Poté program bodová mračna zarovná, nicméně nepřesnost zarovnání je relativně vysoká a pro další práci s body je zcela nevhodná. Proto je nutno použít funkci „Global and Fine.“ Ta „zarovná“ mračna na základě výpočtu odchylky v překrytových oblastech, kterou minimalizuje (viz kapitola 3.4.2).

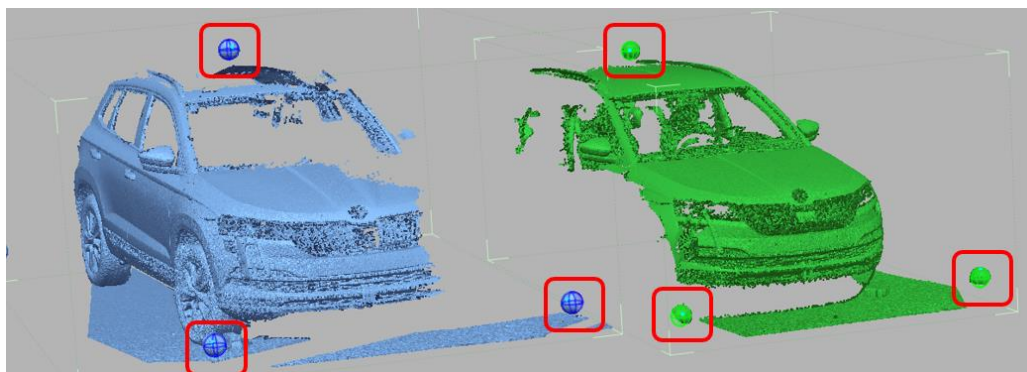
4.5.1 Praktická ukázka

Při zarovnávání pomocí sfér, je potřeba „osamostatnit“ sféry od zbytku mračna (viz obrázek 31). Tento krok je klíčový, neboť je tak značně zvýšena pravděpodobnost úspěšné identifikace sféry.



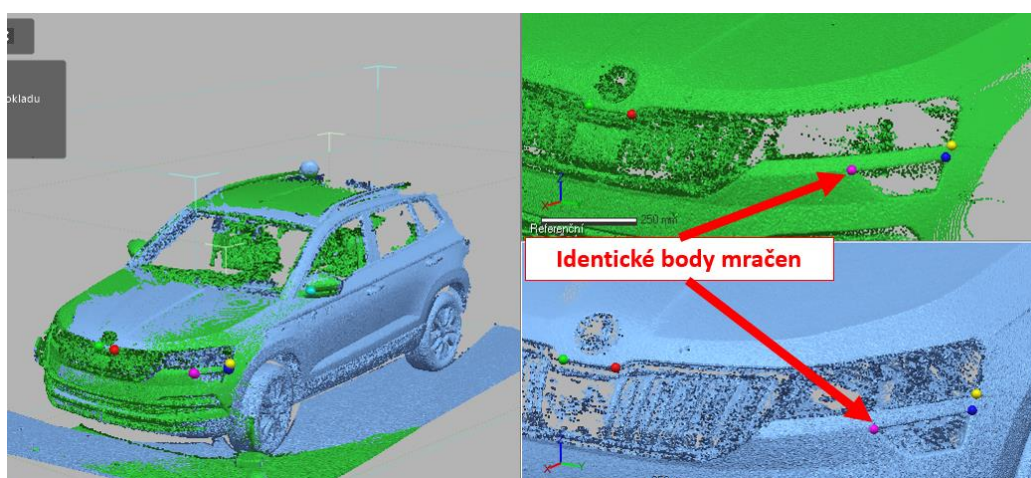
Obrázek 31 - Proces "osamostatnění" sféry

Po tomto kroku je nutné, aby uživatel nastavil parametry pro výběr sféry (nabídka „Extrahovat Možnosti Balónu“). Parametry jsou „Minimální Velikost Clusteru“ a „Maximální Velikost Clusteru“ neboli počet bodů, které sféra obsahuje. [2] Na základě zkušeností je vhodné nastavit minimální hodnotu například 50 a maximální například 50 000. Tím je zaručeno, že bude sféra identifikována. Samozřejmě je nutné brát ohled na množství bodů sféry a podle toho maximální hodnotu nastavit. Ukázka identifikovaných sfér je na obrázku 32.



Obrázek 32 - Rozpoznané vřícovací sféry

Přříklad použití funkce „Lokální Založeno na Vybraném Bodě“ je na obrázku 33.



Obrázek 33 - Vybrané identické body

Popis metody „Global and Fine“ je důkladně popsán v [2]. Jako hlavní parametry lze vyjmenovat například „Maximální Počet Iterací“ a „Maximální Průměrná Odchylka“ (viz ICP algoritmus popsán v kapitole 3.4.2.1).

4.6 Čištění dat

Účelem čištění dat je odstranění bodů, které jsou naskenovány, ale jsou pro další zpracování dat nepotřebná. Pro odstraňování se používají nástroje pro výběr, kterými jsou body vybrány a následně jsou body odstraněny.

V rámci čištění bodů vzniká otázka, jestli je vhodné odstranit i vřícovací body. V případě, že je potřeba naskenovaná data dále porovnávat s jinými daty (např.: vozidlo před nárazem a po nárazu), tak je vhodné ponechat nějaké referenční objekty, které poté ulehčí následné zarovnání. V případě sfér to ovšem nemá význam, neboť je prakticky nemožné umístit sféry na stejné pozice vůči vozidlu po nárazu. Nicméně v programu Geomagic Control X je možné zarovnávat i pomocí rovin [29] a proto je dobré ponechat například část povrchu, na kterém se vozidlo nachází, a tu následně použít.

Další nástroje, kterými lze bodové mračno čistit jsou:

- Filtrování šumu
- Vzorkování
- Vyhlazení

4.6.1 Filtrování šumu

Tato funkce odstraňuje malé clustery, jejichž velikost (počet bodů na cluster) je zadaná uživatelem. Viz obrázek 34. [2]



Obrázek 34 - Filtrování šumu [2]

4.6.2 Vzorkování

Vzorkováním dojde k redukci počtu bodů v mračnu. Funkci lze využít zejména v případech, kde je hustota bodů vyšší než potřebná (např.: body v blízkosti skeneru). Uživatel volí poměr vzorkování, možnost zachování křivosti a hranice objektu. Další možností je zvolit jednotnou vzdálenost mezi body. [2]

4.6.3 Vyhlazení

Vyhlazením se rozumí redukce „hrubosti“ bodového mračna. Parametry funkce jsou „síla vyhlazení“, „stupeň hladkosti“ a „přípustná odchylka“ (princip je zobrazen na obrázku 35, kde je přípustná odchylka označena jako „Deviation“). [2]



Obrázek 35 - Princip "přípustné odchylky" [2]

Použití výše uvedených nástrojů (4.6.1–4.6.3) je závislé na konkrétní podobě bodového mračna a nelze tak vyslovit jednoznačné tvrzení, kdy a kde je použít. Při využití funkce „Sestavení HD Sítě“ navíc dochází automaticky ke značné redukci šumu, tím pádem je „ruční“ filtrování, vzorkování a vyhlazování zbytečné.

4.6.4 Praktická ukázka

Obrázek 36 zobrazuje nástroje pro výběr (zleva: čára, obdélník, kružnice, lomená čára, laso).

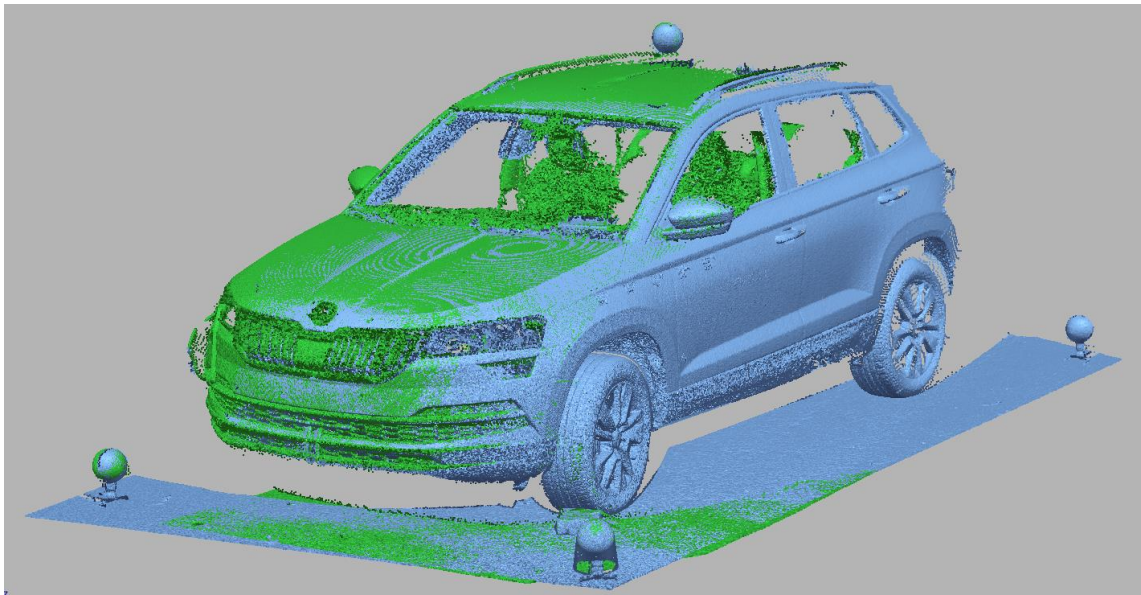


Obrázek 36 - Nástroje pro výběr

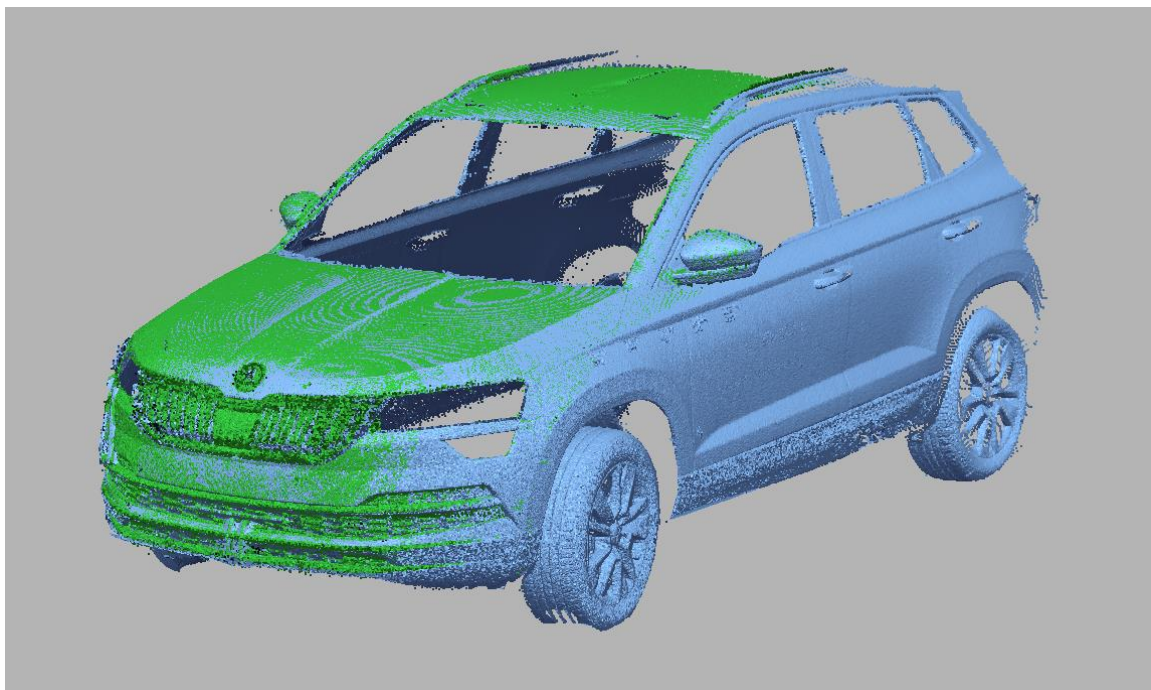
Nástroj čára vybírá obdélník, jehož jedna strana je podstatně menší než druhá (řádově několik bodů). Analogicky lze tuto funkci chápat jako obdobný nástroj v programu Adobe Photoshop, kde menší hranu tvoří jeden pixel. Výběr kružnice je vhodné používat například pro výběr kol vozidla, případně na další části kruhového tvaru. Při „*zpracování vozidla*“ je vhodný zejména nástroj lomená čára a laso. Těmito nástroji se dají velice dobře vybírat různé tvary karoserie apod., které nemají pravidelný tvar.

K procesu čištění lze přistupovat třemi různými možnostmi. První z nich je čistit každé bodové mračno zvlášť, a to následně spojit do jednoho celku. Druhá možnost je mračnou sloučit a čistit ho jako celek. Třetí možnost kombinuje dvě výše uvedené varianty, kdy je mračno sloučeno do jednoho, následně je vhodně rozděleno pro účely čištění a opětovně spojeno do finálního mračna. Pojmem „*vhodné rozdělení*“ se rozumí například separace kol od zbytku vozidla (to usnadní přístup k místům v oblasti blatníků). Další rozdělení mračna je například oddělení čela nebo boku vozidla (usnadnění přístupu k interiéru vozidla). Z časového hlediska zpracování dat se jeví poslední možnost jako nejvýhodnější.

Ukázka dat před a po očištění jsou na následujících obrázcích 37 a 38. Konkrétně je zde nejvíce patrné především odstranění vřícovacích sfér, povrchu, na kterém vozidlo stojí a odstranění interiéru vozidla.



Obrázek 37 - Vozidlo před vyčištěním



Obrázek 38 - Vozidlo po vyčištění

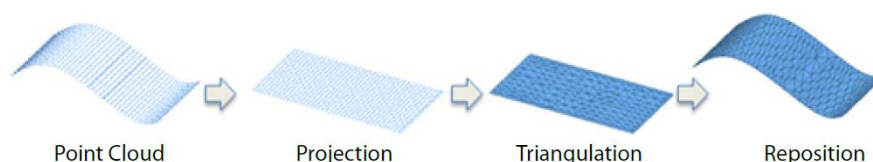
4.7 Triangulace

Po očištění bodového mračna ho lze triangulovat. Geomagic Design X nabízí několik funkcí, kterými lze triangulaci provést [2].

- a) 2D triangulace
- b) 3D triangulace
- c) Konstrukce polygonové sítě
- d) Sestavení HD sítě

4.7.1 2D triangulace

Principem 2D triangulace je rozložení bodového mračna na virtuální plochu nebo kouli a následná triangulace. Následně dojde k transformaci polygonové sítě zpět do původního tvaru. Tento způsob je vhodný zejména pro objekty, které byly naskenovány z jednoho stanoviska. Postup je graficky znázorněn na obrázku 39. [2]



Obrázek 39 - 2D triangulace [2]

V případě vozidla je tento způsob nepoužitelný, protože je zpravidla vozidlo skenováno z více stanovisek. Pokud byla naskenována pouze nějaká určitá část vozidla (zrcátko, kapota apod.) může dojít k problému s rozložením bodového mračna do roviny (resp. koule).

4.7.2 3D triangulace

Pokud nelze bodové mračno promítnout na plochu, případně kouli, tak lze využít 3D triangulaci. Ta postupně spojuje jednotlivé body v malých oblastech (poly-face) a tyto oblasti opět spojuje ve větší celky (viz obrázek 40). Mezi parametry, které lze nastavit patří kritérium pro připojení vrcholů, kterým se stanovuje vzdálenost mezi body, které jsou propojeny. [2]



Obrázek 40 - 3D triangulace [2]

Výhodou této metody je skutečnost, že není potřeba, aby bodové mračno obsahovalo informací o normálách bodů. Proto lze tuto metodu použít pro jakékoliv mračno bodů bez nutnosti výpočtu normál. Nevýhodou 3D triangulace je to, že výsledná polygonová síť obsahuje velké množství chyb, které je potřeba následně opravit (viz kapitola 3.6.4).

4.7.3 Konstrukce polygonové sítě

Obdobný nástroj jako 3D triangulace je funkce „*Konstrukce Polygonové Sítě*“. Tato funkce vykazuje v porovnání s tou předchozí prakticky stejné výsledky. Odlišnost je především v parametrech, které může uživatel určit. Jedná se zejména o „*Přesnost Zachycení Geometrie*“, kterou se určuje, jak přesně budou zachyceny v polygonové síti jednotlivé detaily objektu. [2]

Opět jako v předchozím případě, je nutné polygonovou síť dále upravovat.

4.7.4 Sestavení HD sítě

Funkce „*Sestavení HD sítě*“ trianguluje bodové mračno s možností nastavení rozlišení a stupněm redukce šumu. Rozlišením se rozumí přesnost zachycení detailů objektu. Tato přesnost je také ovlivněna stupněm redukce šumu, kdy při nastavení příliš vysoké hodnoty dojde ke jejich ztrátě, na druhou stranu při nastavení nízké hodnoty nedojde k dostatečnému odstranění šumu. [2]

Dále je možno nastavit, jak moc se budou vyplňovat otvory, což v případě vozidla představují okna, světla a spodní část vozidla.

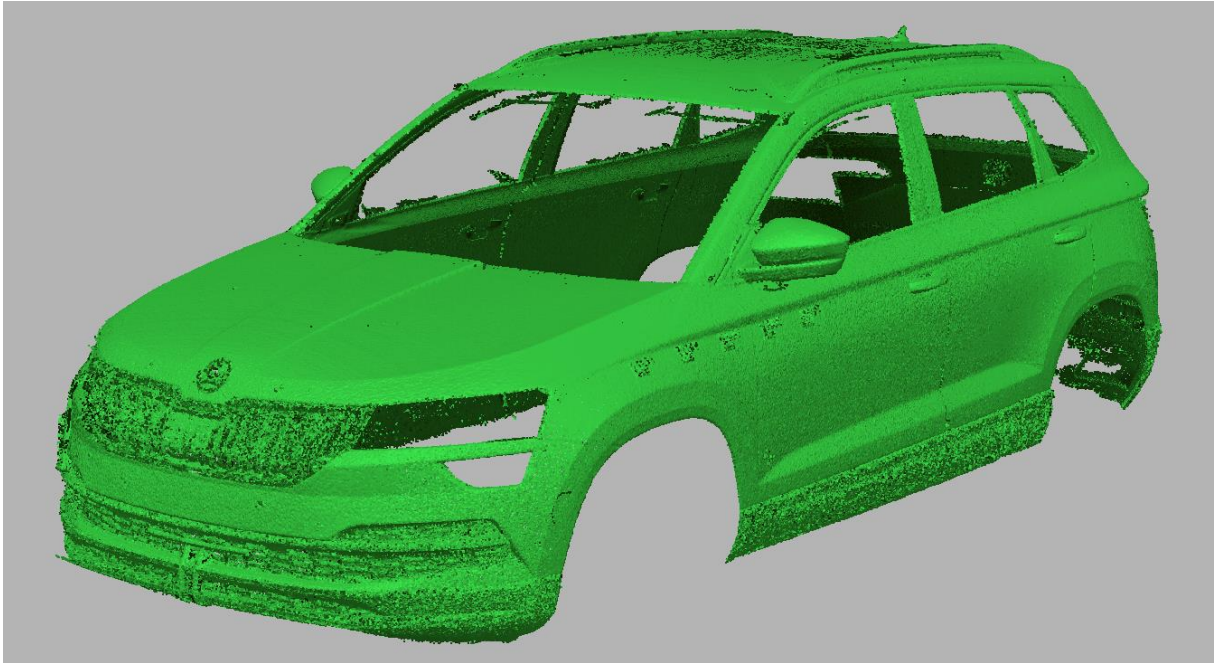
V porovnání s výše uvedenými funkcemi, vykazuje tato ve výsledku relativně kvalitní polygonovou síť, která obsahuje podstatně menší počet chyb. Zpravidla zde není nutno následně použít funkci „*Globální Remesh*“ (viz následující kapitola).

Nutností k dokončení triangulace je ovšem existence informací o normálách bodů. Geomagic Design X obsahuje funkci k jejich vytvoření [2], avšak výsledky nejsou kvalitní a je nutno tento krok provést v jiných programech (např.: Cloud Compare).

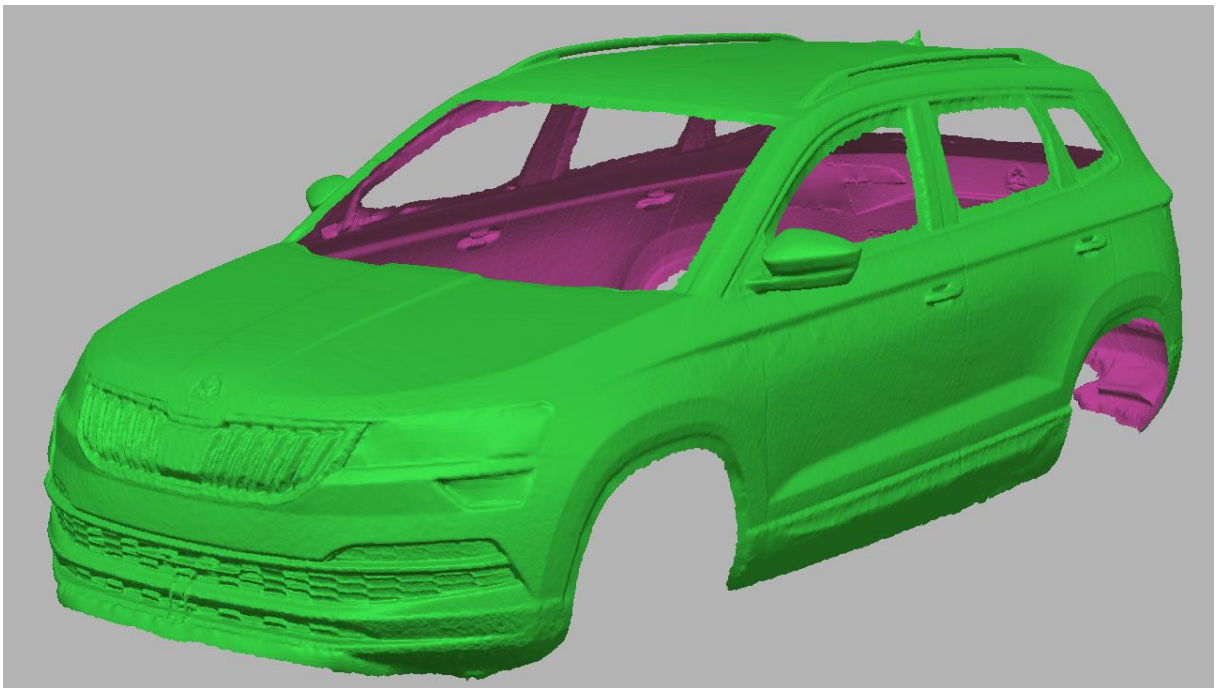
4.7.4.1 Praktická ukázka

Na následujících obrázcích 41 a 42 je zobrazena situace před a po použití funkce „*Sestavení HD sítě*“.

Kvalita této funkce se v tomto případě projevila především v oblasti masky automobilu, kdy došlo k výrazné redukci šumu, přičemž v polygonové síti je tento detail velmi dobře zachycen. Tato funkce je také v porovnání s ostatními časově výrazně méně náročná.



Obrázek 41 - Bodové mračno před triangulací



Obrázek 42 - Bodové mračno po triangulaci (a po opravě)

4.8 Úprava polygonové sítě

Při vytváření polygonové sítě dochází k tvorbě chyb, které je nutné pro další práci s modelem odstranit, případně minimalizovat jejich počet. Kromě opravy chyb lze úpravou chápat i proces zlepšování tvaru sítě (např.: vyhlazení apod.)

V případě opravy chyb program Geomagic Design X nabízí funkci „*Průvodce Léčením*“, která automaticky vyhledá řadu charakteristických chyb a následně se je pokusí opravit. [2]

Typy chyb, které se ve funkci vyhledávají a opravují:

- **Non-Manifold Poly Vrcholy** (viz kapitola 3.6.4, obrázek 27 – Singular Vertex)
- **Přeložené Poly-facety**
- **Zavěšené Poly-facety**
- **Malé Clustery**
- **Malé Poly-facety**
- **Non-Manifold Poly-facety**
- **Protínající se Poly-facety**
- **Malé tunely**

Vybrané chyby, které se při zpracování dat zpravidla vyskytují ve vyšší míře jsou popsány níže.

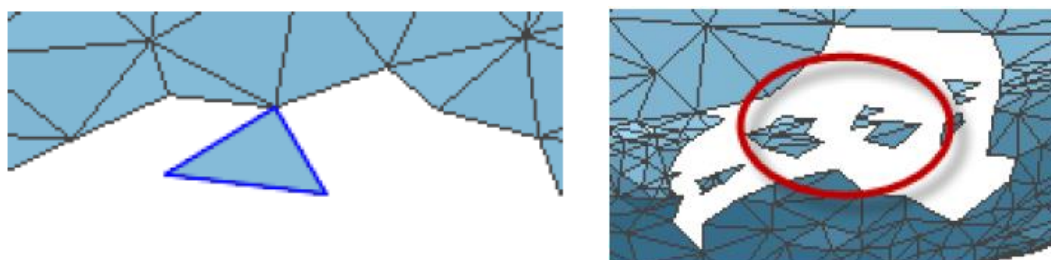
4.8.1 Přeložené Poly-facety

Jedná se o případ, kde jsou plochy trojúhelníků přeloženy kolem jedné společné hrany a tyto plochy svírají určitý úhel, přičemž nejnižší hodnotu tohoto úhlu volí uživatel (plochy, které svírají menší úhel, než je tato hodnota jsou klasifikovány jako přeložené poly-facety). [2]

4.8.2 Zavěšené Poly-facety a Malé Clustery

Trojúhelníky, které jsou na zbytek sítě napojeny pouze jedním vrcholem, tj. nemají společnou hranu s jinými trojúhelníky, se označují jako „*Zavěšené Poly-facety*“. Jako „*Malé Clustery*“ se označují takové trojúhelníky, které nemají společnou ani jednu a hranu a ani jeden bod. [2]

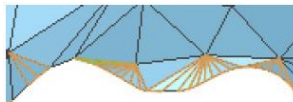
Tyto chyby jsou znázorněny na obrázku 43.



Obrázek 43 - Zavěšené Poly-facety a Malé clustery [2]

4.8.3 Malé Poly-facety

Malá Poly-faceta je plocha trojúhelníku, která je menší než uživatelem zadaný rozměr. Tato chyba vytváří značnou disproporci ve velikosti trojúhelníků v porovnání se zbytkem sítě. Chyba je znázorněna na obrázku 44. [2]



Obrázek 44 - Malé Poly-facety [2]

4.8.4 Ostatní nástroje na úpravu sítě

Dále lze polygonovou síť upravovat několika funkcemi [2]:

- **Vyplnění otvorů** (vyplní otvory, které uživatel zvolí)
- **Odstranění značek** (odstraňuje značky použité například při skenování ručním skenerem)
- **Globální Remesh** („přepočítá celou polygonovou síť a zlepší její kvalitu“)
- **Redukce** („sníží počet trojúhelníků v polygonové síti“)
- **Rozčlenění** („zvýší počet síťových ploch, čímž dojde k vylepšení průběhu křivosti povrchu“)
- **Vyhlazení** (dojde k vyhlazení sítě, v určitých případech může být takto redukován šum)

4.8.5 Praktická ukázka

Po sestavení HD sítě byly průvodcem léčení identifikovány tyto chyby:

Tabulka 6 - Chyby sítě

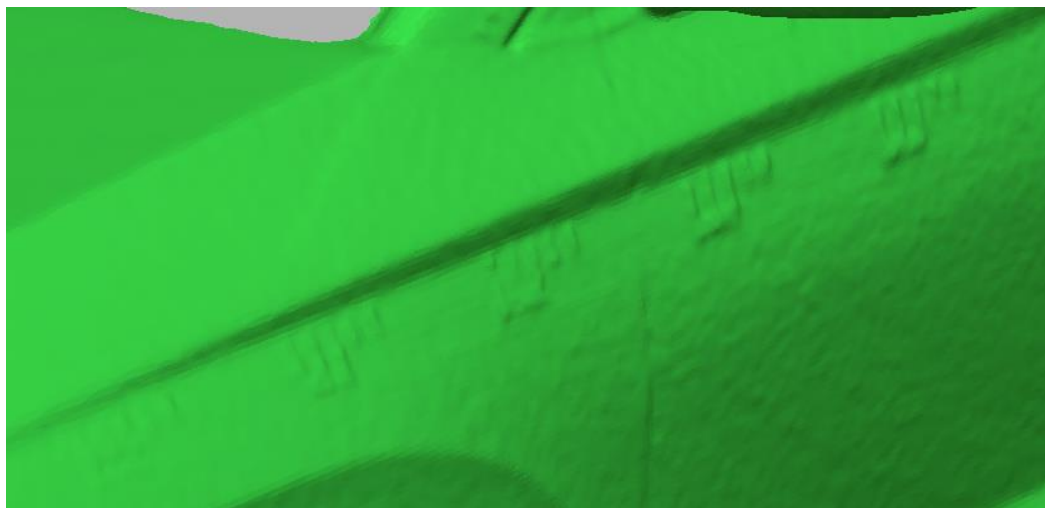
Název chyby	Počet chyb
Non-Manifold Poly-vrcholy	1
Přeložené Poly-facety	4
Malé Clustery	13 648
Malé Poly-facety	63 740

Parametry byly následující:

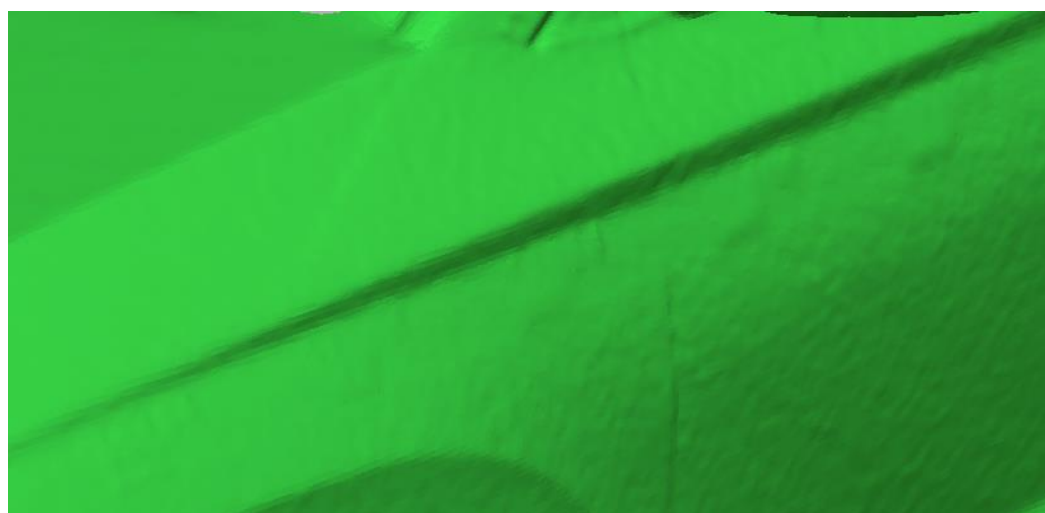
- Non-Manifold Poly-vrcholy
 - Poměr umístění bodu **0,9**
- Přeložené Poly-facety
 - Úhel menší než **17°**
- Malé Clustery
 - Počet Poly-facet na jeden Cluster **50 000**
- Malé Poly-facety
 - Rozloha menší než **0,04 mm²**

Během opravy je zpravidla nutné spustit průvodce opravy vícekrát za sebou, aby došlo k úplnému odstranění chyb. V případě střechy vozidla bylo nutno vyplnit relativně velké otvory. Ty jsou způsobeny tím, že během skenování nebyla střecha zadokumentována v potřebném rozsahu a podrobnosti (viz obrázky 47 a 48).

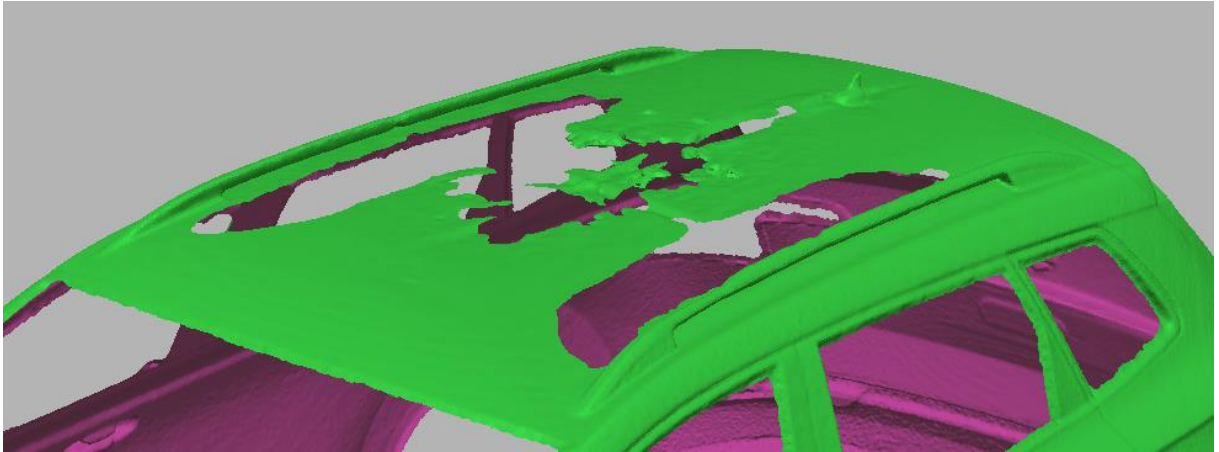
V případě lokálního vyhlazení určitých míst byl použit nástroj „*Inteligentní štětec*“, kterým lze efektivně upravovat polygonovou síť. Na následujících obrázcích je zobrazen příklad vyhlazení stop po měřítku na vozidle, které byly tímto nástrojem vyhlazeny. Nevýhoda tohoto nástroje spočívá v tom, že dochází k úpravě polygonové sítě, která mění měřený povrch výsledného modelu. Nicméně v tomto případě došlo k opravě zjevných chyb, jejichž úpravou nedošlo ke změně vypovídající hodnoty modelu, která by měla vliv na využití těchto dat (měření deformací vozidla).



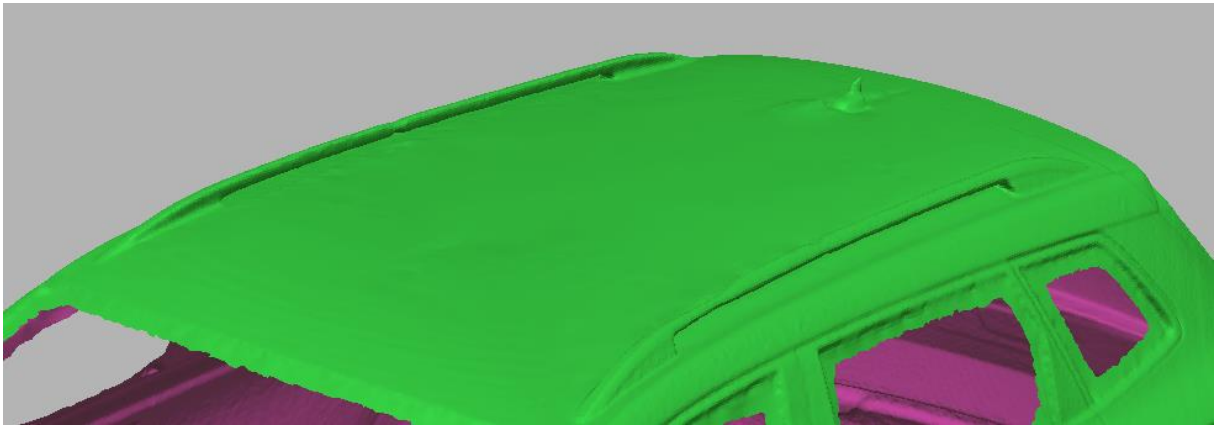
Obrázek 45 - Stav před vyhlazením



Obrázek 46 - Stav po vyhlazení



Obrázek 47 - Střecha před úpravou



Obrázek 48 - Střecha po úpravě

5 Zhodnocení vlivu úpravy dat na výslednou vypovídající hodnotu modelu

Předmětem této kapitoly je zhodnotit vliv úprav na výslednou vypovídající hodnotu modelu. Výsledný model by měl co nejvíce odpovídat reálnému obrazu skutečného objektu. Jedním z prvních vlivů na přesnost modelu má chyba, popřípadě přesnost skenování. Existuje celá řada možností, jak co možno nejvíce eliminovat chyby měření, a jak zvýšit přesnost.

Podrobněji byly tyto možnosti popsány v kapitole 2.4. Ve stručnosti se jedná zejména o:

- Dosahovanou přesnost měření
- Kalibraci skeneru
- Vliv vnějšího prostředí (interiér, exteriér, atmosférické podmínky atd.)
- Geometrii měřených objektů
- Materiál (povrch) objektů
- Způsob zarovnání jednotlivých mračen

Po naskenování má již na výsledný model vliv pouze jeho úprava v příslušném programu.

5.1 Měření odchylky pomocí Accuracy Analyzer

Funkce Accuracy Analyzer, která je obsažena v programu Geomagic Design X nabízí možnosti měření odchylek mezi finálním modelem nebo model v jakékoliv fázi zpracování a bodovým mračnem. [2]

5.2 Přesnost zarovnání mračen

5.2.1 Zarovnání pomocí vybraných bodů

Předmětem měření je soubor osmi bodových mračen, která byla zarovnána v programu Geomagic Design X pomocí funkce „*Lokální Založeno na Vybraném Bodě*“ a posléze funkcí „*Global and Fine*“. Základní parametry funkce „*Global and Fine*“ jsou následující:

- Poměr vzorkování: **Auto**
- Max. počet iterací: **500**
- Max. průměrná odchylka: **Auto**

Mračna byla zarovnána postupně od skenu číslo 002 (viz obrázek 29) v pořadí 002–007–006–008–004–009–003–010.

Následně byla změřena odchylka bodových mračen v překrývajících se oblastech. Tyto oblasti byly definovány tak, že vzájemná vzdálenost je nejvýše 10 mm, tj. ± 5 mm. To znamená, že pokud v určitých místech byla vzdálenost vyšší, pak touto vzdáleností (hodnotou) nebyly ovlivněny výsledky měření.

Sledovanými veličinami jsou **průměr (AVG)**, který podle [2] představuje průměr maximální a minimální odchylky (v našem případě je maximální a minimální odchylka limitována hodnotou 5 mm), dále **kvadratický průměr (RMS)** a **směrodatná odchylka (SD)**.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 7 - Naměřená data – vybrané body

Číslo skenů	Průměr (AVG) [mm]	Kvadratický průměr (RMS) [mm]	Směrodatná odchylka (SD) [mm]
002–007	-0,28	1,01	0,97
007–006	-0,1	0,94	0,93
006–008	0,08	0,9	0,89
008–004	-0,02	1,39	1,39
004–009	0,11	1,57	1,57
009–003	0,42	1,49	1,43
003–010	0,53	1,2	1,07
010–002	0,57	1,68	1,58

5.2.2 Zarovnání pomocí referenčních sfér

Stejně jako v předchozí kapitole byla mračna zarovnána postupně od skenu 002.

Parametry funkce „Zarovnání pomocí koulí“:

- Min. velikost clusteru: **50**
- Max. velikost clusteru: **50 000**
- Tolerance vyhledávání párování: **5%**

Sféry byly vybírány manuálně, neboť funkce automatického výběru je dostupná pouze pro polygonové sítě.

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty – sféry

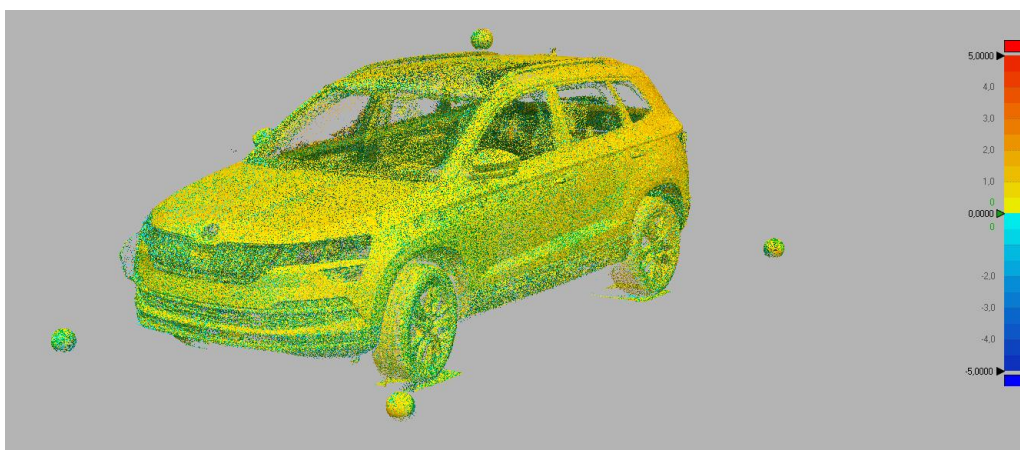
Číslo skenů	Průměr (AVG) [mm]	Kvadratický průměr (RMS) [mm]	Směrodatná odchylka (SD) [mm]
002–007	-0,03	0,97	0,97
007–006	0,55	1,21	1,08
006–008	-0,19	0,94	0,92
008–004	0,27	1,35	1,33
004–009	0,04	1,08	1,08
009–003	0,04	1,08	1,07
003–010	1,3	2,01	1,53
010–002	1,54	2,09	1,42

Při pohledu na tabulky 7 a 8 nejsou patrné zásadní rozdíly v naměřených hodnotách, a tudíž nelze vyslovit tvrzení, že zarovnání pomocí sfér v tomto případě vykazuje vyšší přesnost, než zarovnání pomocí vybraných bodů a použití funkce „Global and Fine“. Tento výsledek odpovídá současnému trendu, kdy je omezováno využití referenčních prvků při skenování strukturovaných objektu s řadou výrazných prvků. Přesto nespornou výhodou referenčních prvků je jistota výsledného řešení nezávisle na charakteru měřeného objektu.

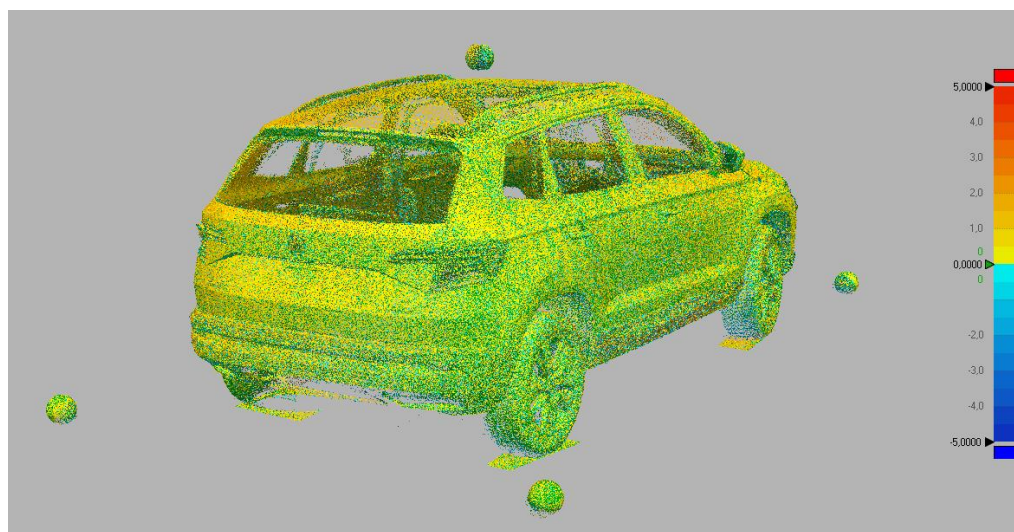
Zarovnaná bodová mračna byla následně porovnána mezi sebou. Rozdílové rastry s rozsahem stupnice ± 5 mm je zobrazeny níže. Zhodnocení naměřených dat je rozebráno v kapitole 5.5.

Naměřené statistické veličiny jsou následující:

- Průměr = **0,33 mm**
- Kvadratický průměr = **0,68 mm**
- Směrodatná odchylka = **0,59 mm**



Obrázek 49 - Rozdílový rastr 1



Obrázek 50 - Rozdílový rastr 2

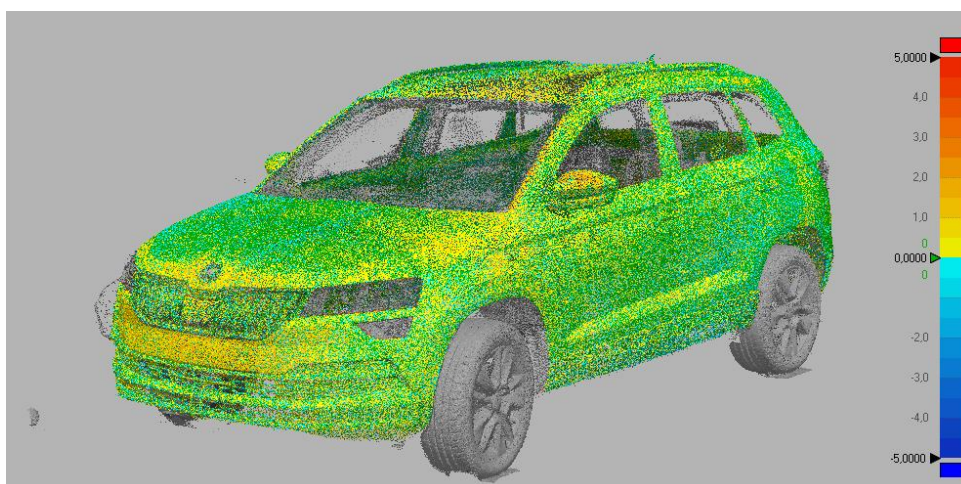
5.3 Vliv redukce šumu a vyhlazení

Cílem je zjištění odchylky mezi zarovnaným mračnem před jakoukoliv úpravou a mračnem, které bylo vyčištěno a byla na něm použita redukce šumu, vyhlazení, vzorkování apod. Zatímco „původní“ mračno obsahuje přibližně 8,7 milionu bodů, „upravené“ mračno obsahuje přibližně 3 miliony bodů.

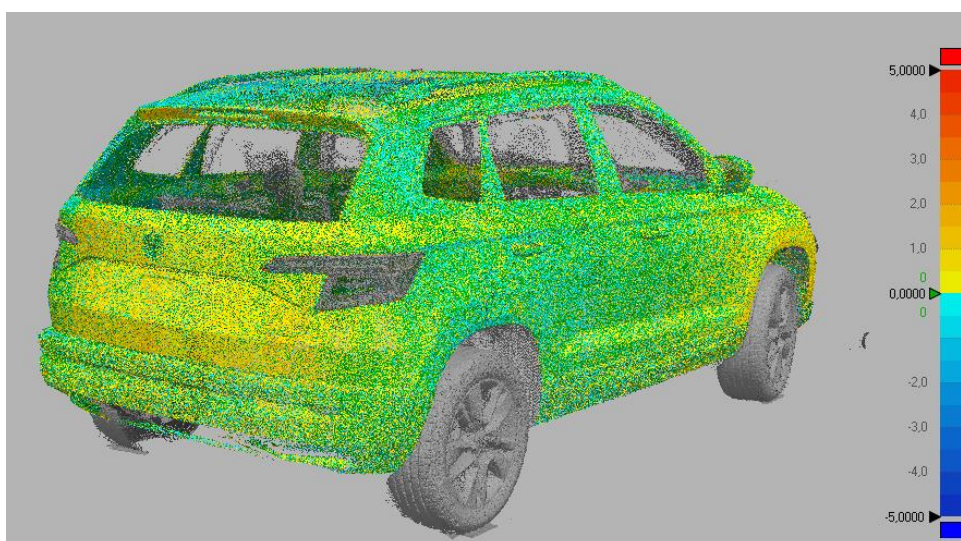
Naměřené statistické veličiny jsou následující:

- Průměr = **0,08 mm**
- Kvadratický průměr = **0,52 mm**
- Směrodatná odchylka = **0,51 mm**

Rozdílové rastry s rozsahem stupnice ± 5 milimetrů jsou zobrazeny níže.



Obrázek 51 - Rozdílový rastr 3



Obrázek 52 - Rozdílový rastr 4

5.4 Porovnání polygonové sítě vůči bodovému mračnu

Funkce „Sestavení HD sítě“ nabízí uživateli volbu mezi několika parametry, které mají vliv na výslednou podobu polygonové sítě. V této kapitole je porovnáno několik polygonových sítí s vyčištěným mračnem bodů a s uvedením základních charakteristik, ať již z hlediska odchylky mezi sítí a mračnem, tak z hlediska počtu prvků sítě včetně chyb.

Možnosti funkce „Sestavení HD sítě“ jsou následující:

- Filtr s vysokým rozlišením – stupnice 1 až 5 (SD = 1, HD = 3, UHD = 5)
- Stupeň redukce šumu – stupnice 1 až 7 (Slabý = 1, Silný = 7)

Podle [2] se filtrem s vysokým rozlišením rozumí, jaké množství bodů, bude bráno do úvahy při tvorbě sítě, tj. při použití nejvyššího stupně 5 je použito více bodů, které v důsledku způsobí vyšší přesnost zachycení tvaru objektu.

Stupeň redukce šumu ovlivňuje zjednodušeně řečeno „*jak moc bude mračno filtrováno*.“ Při použití vyššího stupně dojde k vyšší redukci šumu, která ovšem může mít za následek ztrátu přesnosti vytvořené sítě.

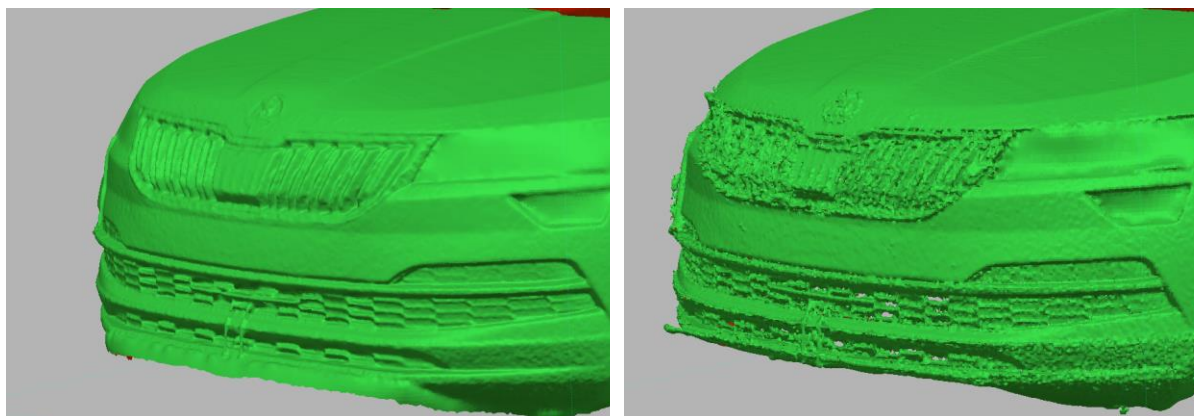
V rámci měření odchylky od bodového mračna bylo vytvořeno celkem 5 polygonových sítí s různými parametry. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 - Výsledky měření odchylky – Sestavení HD sítě

Filtr s vysokým rozlišením	Stupeň redukce šumu	Průměr (AVG) [mm]	Kvadratický průměr (RMS) [mm]	Směrodatná odchylka (SD) [mm]
5 (UHD)	7 (Silný)	0,37	0,66	0,54
3 (HD)	7 (Silný)	0,46	0,8	0,66
1 (SD)	7 (Silný)	0,97	1,42	1,04
3 (HD)	4	0,3	0,6	0,52
3 (HD)	1 (Slabý)	0,34	0,64	0,54

Z naměřených hodnot vyplývá, že jako „*nejlepší výsledek*“ byl dosažen při nastavení, které je uvedeno na čtvrtém řádku. Nicméně je potřeba zohlednit skutečnost, že bodové mračno nebylo příliš důkladně čištěno, přesněji řečeno nebylo v určitých oblastech filtrováno, neboť se předpokládala automatická filtrace v průběhu sestavování sítě. Z vizuálního hlediska lze považovat za „*nejlepší výsledek*“ síť, která vznikla s nastavením parametrů uvedené v prvním řádku.

Pro porovnání jsou dané sítě zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 53 - Porovnání polygonových sítí

5.5 Zhodnocení úprav

Jak bylo ukázáno v předchozích kapitolách, tak existuje celá řada nástrojů a funkcí, které slouží ke zpracování bodového mračka do podoby polygonové sítě. Při zpracování by měl být kladen důraz především na přesnost zachycení detailů měřeného objektu. Zároveň ovšem nesmíme pominout časovou stránku věci a volit jakýsi kompromis mezi způsobem zpracování, kdy máme veškerou práci s daty „*více pod kontrolou*“ než v případě, kdy používáme automatické funkce, jejichž princip není uživateli zcela znám. Ukázkovým příkladem je právě funkce „*Sestavení HD sítě*“, která uživateli poskytuje relativně dobré výsledky v porovnání s jinými funkcemi určených na triangulaci, ať již z hlediska počtu chyb polygonové sítě, tak z hlediska velikosti odchylky od původního bodového mračka. Nevýhoda této a jiných „*automatických*“ funkcí je vyvážena časem, který je v porovnání s využitím jiných metod podstatně kratší, v některých případech i v řádu několika hodin.

V rámci této bakalářské práce byla úprava prezentována na vozidle Škoda Karoq. Vozidlo bylo při skenování natřeno světlou, matnou barvou, což se projevilo při kvalitě vstupního bodového mračka, které velmi dobře zachycovalo celou karosérii vozidla. Při úpravě došlo k „*ručnímu*“ odstranění nepotřebných bodů v podobě okolí objektu, sedaček apod. Dále bylo mračno sloučeno pomocí referenčních sfér a vzorkováno, čímž došlo ke snížení počtu bodů, které ovšem nebylo příliš viditelné a křivost povrchu zůstala zachována. Poté již byla vytvořena polygonová síť funkcí „*Sestavení HD sítě*.“ V neposlední řadě byla pomocí funkce „*Průvodce opravou*“ odstraněna řada chyb, čímž vznikla finální síť (obrázek 42).

Cílem bylo získat polygonovou síť, kterou by bylo možné porovnat v polygonovou síť vozidla po nárazu a následně získat informace o deformaci vozidla, která se pohybuje v řádu desítek centimetrů, z čehož vyplývá, že přesnost, respektive změřená odchylka, která se pohybuje v řádu milimetrů je zcela dostačující.

6 Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo v první kapitole rozebrat základní parametry, které ovlivňují 3D skenování, skenovací systém a přístupy, které se v současnosti využívají. V některých bodech je odkazováno na případy skenování vozidla, která sebou přináší určitá specifika z hlediska vhodné volby skenovacího systému. Byly zde také uvedeny příklady konkrétních skenerů a jejich základních vlastností.

Dále zde byla zmíněna problematika přesnosti a chyby měření s ohledem na povrch skenovaného objektu. V rámci tohoto tématu se potvrdilo, že jako vhodný povrch pro dokumentaci vozidel je matný povrch, který v porovnání s lesklým povrchem karoserie vykazoval přesnější zachycení skenovaného vozidla.

V rámci této kapitoly byl také řešen způsob umístění skeneru. Výstupem jsou různé přístupy z hlediska počtu stanovisek měření a množství získaných informací.

Ve druhé kapitole bylo cílem uvést základní přehled principů zpracování dat. Byly zde rozděleny programy určené ke zpracování dat do základních skupin podle charakteristických vlastností, kterými se vyznačují, včetně několika konkrétních příkladů. Dále zde byla uvedena možná reprezentace dat. Následně byly řešeny různé úpravy dat, včetně zarovnávání, filtrace a redukce bodů. Významnou část tvoří kapitoly týkající se triangulace, opět s uvedením základních algoritmů, s důrazem na Delaunayho triangulaci. V závěru této kapitoly byly zmíněny základní chyby polygonových sítí, které mohou triangulací vzniknout.

Třetí kapitola představuje „*praktickou*“ část této práce. Cílem bylo vytvořit z bodových mračen model vozidla reprezentovaný polygonovou sítí. Byl zde uveden konkrétní postup zpracování dat znázorněn na „*praktických ukázkách*.“ Vše bylo provedeno v programu Geomagic Design X. Výjimkou je „*předzpracování*“ dat v programu Scene, ovšem tento krok spočíval pouze v převedení dat do jiného formátu pro snadnější práci v Geomagicu. Posloupnost a přístup ke zpracování vycházel z empiricky získaných zkušeností při zpracování dat naskenovaných vozidel. Nelze tak vyslovit tvrzení, že uvedený postup je správný a nejefektivnější z hlediska jiných objektů, případně je vhodný pro použití v jiných oborech, jako je například strojírenství.

V poslední kapitole byly rozebrány úpravy dat z hlediska přesnosti a vlivu na výsledný model. Byl zvolen postup, ve kterém byly měřeny odchylky jednotlivých prvků (modelů v určitých fázích zpracování) vůči sobě.

Přínos této práce spočívá v pochopení základů 3D skenování, jejich aplikace na vozidla, a především v poznání procesu zpracování dat v programu Geomagic Design X.

V práci bylo několikrát poukázáno na to, že zpracovaný model bude použit pro následné porovnání, jehož výsledkem by byla analýza deformace vozidla. Považuji to za námět k diplomové práci, ve které bych se věnoval práci s daty v programu Geomagic Control X, který slouží k tomuto účelu. Z hlediska postupů při zpracování dat, bych se odkazoval na tuto práci a využil zde získané znalosti a zkušenosti.

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠTRONER, Martin a České vysoké učení technické v Praze. Katedra speciální geodézie. *3D skenovací systémy*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3.
- [2] 3D Systems. *Geomagic Design X: User Guide*. USA, 2013.
- [3] KAŠPAR, Milan. *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. Hradec Králové: Vega, 2003. ISBN 978-80-90-08603-6.
- [4] BELLOCCHIO, Francesco. *3D surface reconstruction: multi-scale hierarchical approaches*. New York: Springer, 2013. ISBN 14-614-5631-2.
- [5] EBRAHIM, Mostafa Abdel Bary. *3D Laser Scanners' Techniques Overview* [online]. 4. Raipur: International Journal of Science and Research, 2015 [cit. 2019-06-15]. ISSN 2319-7064. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/282753883_3D_Laser_Scanners'_Techniques_Overview
- [6] BORNAZ, Leandro. *Terrestrial laser scanner data processing* [online]. Turín: Politecnico di Torino – Dipartimento di Georisorse e Territorio, 2004 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228972484_Terrestrial_laser_scanner_data_processing
- [7] BOTSCH, Mario. *Polygon mesh processing*. Natick, Mass.: A K Peters, 2010. ISBN 978-156-8814-261.
- [8] SCHULZ, Thorsten. *Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy* [pdf]. Berlín: Technical University of Berlin, 2008 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005368245>
- [9] BESL, P. *A Method for Registration of 3-D shapes* [online]. IEEE Transaction on PAMI, 1992, 14 (2), 239-256, ISSN 0162-8828.
- [10] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [11] FARO Technologies. *SCENE 2019.0 User Manual*. USA, 2019.
- [12] GEFOS Leica. *Leica RTC360 Specifikace produktu* [pdf]. Sankt Gallen: Leica Geosystems [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/data/original/skenery/rtc/leica-rtc360-ds-875030-0618-cs-lr.pdf>

- [13] LUHMANN, Thomas. *Photogrammetrie und Laserscanning: Anwendung für As- Built-Dokumentation und Facility Management*. Heidelberg: Wichmann, 2002. ISBN 3879073902.
- [14] SCHROEDER, William J., Jonathan A. ZARGE a William E. LORENSEN. *Decimation of triangle meshes* [pdf]. Schenectady: General Electric Company, 1992 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://webdocs.cs.ualberta.ca/~lin/ABProject/papers/4.pdf>
- [15] ANIER, Karoliina. *SKANEERITUD PUNKTIILVEST EHITUSINFORMATSIOON-IMUDELIKOOSTAMINE HOONE HALDAMISEKS EESTI RAHVAMUUSEUMI NÄITEL* [online]. Tartu (Estonská republika), 2017 [cit. 2019-08-08]. Dostupné z: https://technodocbox.com/3D_Graphics/66476891-Eesti-maaulikool-metsandus-ja-maaehitusinstituut-karoliina-anier.html. Diplomová práce. EESTI MAAÜLIKOOL.
- [16] Components of SRS system. In: *ATS* [online]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://ats.se/products-scan-reference-system.html#gallery1>
- [17] [Robotické měřicí rameno se sondou]. In: *BLUM NOVOTEST* [online]. Kroměříž: Blum-Novotest [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://www.blum-novotest.com/fileadmin/_processed_/e/1/csm_quickstart-tc50_a8ef99b588.jpg
- [18] BOEHLER, Wolfgang. *3D Scanning Instruments*. [pdf]. Mainz: University of Applied Sciences, Institute for Spatial Information and Surveying Technology [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://i3mainz.hs-mainz.de/sites/default/files/public/data/p05_Boehler.pdf
- [19] *Faro Focus* [online]. FARO Technologies. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://www.faro.com/products/construction-bim-cim/faro-focus/>
- [20] FARO Technologies. *Checkboard Registration Targets* [pdf]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://knowledge.faro.com/Hardware/3D_Scanners/Focus/Checkerboard_Registration_Targets_Download_for_the_Laser_Scanner_or_HandHeld_Scanner?mtlearnin_gpath=focus3d_20-120_downloads
- [21] Delaunay-Voronoi. In: *Imagej* [online]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://imagej.net/_images/1/1b/Delaunay-voronoi.png
- [22] PAVELKA, Karel. *Mobilní laserové skenování: studijní opora*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05261-7.
- [23] *RIEGL VZ-400i* [online]. RIEGL Laser Measurement Systems [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/48/>

- [24] RUSINKIEWICZ, Szymon. *Efficient Variants of the ICP Algorithm* [pdf]. San Francisco: Stanford University [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: http://www.pcl-users.org/file/n4037867/Rusinkiewicz_Efficient_Variants_of_ICP.pdf
- [25] ŠTRONER, Martin. *Teorie fungování terestrických skenovacích systémů. Fyzikální principy skenovacích systémů. Bezpečnost práce*. [online prezentace]. 2008 [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/LSK/index.html>
- [26] *Delaunay triangulation divide and conquer algorithm* [online]. YouTube. [cit. 2019-07-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=FUkmgjB3tSg>
- [27] *Iterative Closest Point (ICP)* [online]. YouTube. [cit. 2019-07-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=uzOCS_gdZuM
- [28] *Geomagic Design X* [online]. 3D SCAN. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/geomagic-design-x/>
- [29] *Alignment (Unplanned)* [online]. 3D Systems Software Support: 3D Systems [cit. 2019-08-08]. Dostupné z: <https://softwaresupport.3dsystems.com/knowledgebase/article/KA-03298/en-us>
- [30] *Geomagic Design X* [online]. 3D SYSTEMS. [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-design-x>
- [31] FARO Technologies. *FARO Laser Scanner Focus 3D Manual*. USA, 2012.
- [32] *Introducing the Double Scan Feature for ScanStation P-Series* [online]. HEXAGON GEOSYSTEMS. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: https://leica-geosystems.com/kk-kz/products/laser-scanners/scanners/leica-scanstation-p40--p30/double_scan_feature_for_scanstation_p-series
- [33] HOPPE, Hugues. *Mesh Optimization* [pdf]. Seattle: University of Washington [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <http://hhoppe.com/meshopt.pdf>
- [34] CHRISTENSEN, Claus Lyng. Vertex Clustering. In: *ResearchGate* [online]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/In-vertex-clustering-the-vertices-inside-the-same-cluster-are-replaced-by_fig6_233492568
- [35] KOSKA, Bronislav. *Teorie fungování laserových skenovacích systémů*. [online prezentace]. 2008 [cit. 2019-07-01]. Dostupné z: k154.fsv.cvut.cz/~pospisil/lsk/Prezentace1_2009.ppt

- [36] *Iterační algoritmy (zatím pro hledání kořenů)* [online]. MFF UK. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <http://utf.mff.cuni.cz/~ledvinka/?197254>
- [37] PETŘÍK, Oldřich. *Matematické modelování: Voroného diagramy* [pdf]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~mikaMM/Galerie%20studentskych%20praci%20MM/2008/Pet%C5%99%C3%ADk%20Old%C5%99ich%20-%20Voron%C3%A9ho%20diagramy.pdf>
- [38] POSPÍŠIL, Jiří. *Současné trendy skenování ve stavebnictví a v příbuzných oborech: Recent trends of scanning in civil engineering and related branches*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007. ISBN 978-80-01-03755-3.
- [39] *CCD senzor* [online]. Slovník VÚGTK. [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: https://www.vugtk.cz/slovník/5312_ccd--charge-coupled-device
- [40] *Inerciální měřící jednotka* [online]. Slovník VÚGTK. [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: http://www.vugtk.cz/slovník/5997_inercialni
- [41] *Laserové skenování* [online]. Slovník VÚGTK. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://www.vugtk.cz/slovník/termin.php?jazykova_verze=&tid=5529&l=laserove-skenovani
- [42] *Vlícovací bod* [online]. Slovník VÚGTK. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://www.vugtk.cz/slovník/1299_passpunkt-r
- [43] ŠTRONER, Martin. *Přehled terestrických skenovacích systémů*. [online prezentace]. 2014 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/LSK/index.html>
- [44] ŠTRONER, Martin. *Určování délek*. [online prezentace]. 2008 [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/GEY1/index.html>
- [45] VOSELMAN, George a Hans-Gerd MAAS. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath: Whittles, 2010. ISBN 1439827982.
- [46] YANG, Jiaolong. *Go-ICP: A Globally Optimal Solution to 3D ICP Point-Set Registration* [pdf]. Peking: Beijing Institute of Technology [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1605.03344.pdf>

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Selektivní a neselektivní určování bodů [1].....	9
Obrázek 2 - Robotické měřicí rameno se sondou [17]	11
Obrázek 3 - Kamerový (vlevo) a panoramatický (vpravo) skener [13]	13
Obrázek 4 - Rozdělení skenerů podle měřicího principu [1]	14
Obrázek 5 – Odraz paprsku od povrchu [3].....	16
Obrázek 6 - Porovnání mračen vozidel s rozdílnými povrchy	16
Obrázek 7 – Schéma metody prostorového protínání vpřed a prostorové polární metody, upraveno z [1].....	17
Obrázek 8 - Obecné schéma měření délky [1]	18
Obrázek 9 - Schéma rozmístění stanovisek (minimální počet).....	19
Obrázek 10 - Zorné pole stanoviska 2 s vyznačenými vlíčovacími body	20
Obrázek 11 - Zorné pole stanoviska 1 s vyznačenými vlíčovacími body	20
Obrázek 12 - Schéma rozmístění stanovisek	21
Obrázek 13 - Situace v případě rozložení stanoviska na dvě	21
Obrázek 14 - Výškové umístění skeneru.....	22
Obrázek 15 - Princip vlíčovacích bodů, upraveno z [15].....	25
Obrázek 16 - Ukázka sady vlíčovacích bodů a jejich příslušenství [16] [20]	26
Obrázek 17 - Ukázka zarovnávacích rovin v programu SCENE	27
Obrázek 18 - Iterace ICP algoritmu, upraveno z [27].....	28
Obrázek 19 - Množina bodů s výběrovou oblastí [8].....	30
Obrázek 20 – Statistické vyhodnocení bodů [6]	30
Obrázek 21 - Delaunayova triangulace a Voroného diagramy [21].....	32
Obrázek 22 - Postupné kroky metody "rozděl a panuj" [26].....	32
Obrázek 23 - Typy vrcholů [14]	33
Obrázek 24 - Decimace vrcholů [1]	33
Obrázek 25 - Decimace hran [1]	33
Obrázek 26 - Vertex clustering [34].....	34
Obrázek 27 - Chyby trojúhelníkové sítě [7]	34
Obrázek 28 - Možnosti importu dat	36
Obrázek 29 - Stanoviska měření.....	37
Obrázek 30 - Bodové mračno před a po hrubém očištění	38
Obrázek 31 - Proces "osamostanění" sféry.....	39
Obrázek 32 - Rozpoznané vlíčovací sféry.....	40
Obrázek 33 - Vybrané identické body	40
Obrázek 34 - Filtrování šumu [2].....	41
Obrázek 35 - Princip "přípustné odchylky" [2]	41

Obrázek 36 - Nástroje pro výběr	42
Obrázek 37 - Vozidlo před vyčištěním.....	43
Obrázek 38 - Vozidlo po vyčištění.....	43
Obrázek 39 - 2D triangulace [2]	44
Obrázek 40 - 3D triangulace [2]	44
Obrázek 41 - Bodové mračno před triangulací	46
Obrázek 42 - Bodové mračno po triangulaci (a po opravě)	46
Obrázek 43 - Zavěšené Poly-facety a Malé clusterly [2]	47
Obrázek 44 - Malé Poly-facety [2].....	48
Obrázek 45 - Stav před vyhlazení	49
Obrázek 46 - Stav po vyhlazení	49
Obrázek 47 - Střecha před úpravou	50
Obrázek 48 - Střecha po úpravě	50
Obrázek 49 - Rozdílový rastr 1	53
Obrázek 50 - Rozdílový rastr 2	53
Obrázek 51 - Rozdílový rastr 3	54
Obrázek 52 - Rozdílový rastr 4	54
Obrázek 53 - Porovnání polygonových sítí.....	56

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Dělení skenerů podle rychlosti [1].....	15
Tabulka 2 - Základní specifikace vybraných skenerů [12] [19] [23].....	15
Tabulka 3 - Porovnání časové náročnosti s ohledem na podrobnost skenování	21
Tabulka 4 - Vybrané podporované formáty dat [2]	35
Tabulka 5 - Množství bodů.....	38
Tabulka 6 - Chyby sítě	48
Tabulka 7 - Naměřená data – vybrané body	52
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty - sféry.....	52
Tabulka 9 - Výsledky měření odchylky – Sestavení HD sítě.....	55

10 Seznam příloh

00_zdrojova_data

Crash_622_1_002.flis

Crash_622_1_003.flis

Crash_622_1_004.flis

Crash_622_1_006.flis

Crash_622_1_007.flis

Crash_622_1_008.flis

Crash_622_1_009.flis

Crash_622_1_010.flis

01_zpracovana_data

01_zpracovana_data.xrl (soubor obsahuje polygonovou síť a bodové mračno)