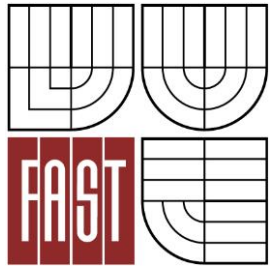




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEODESY

POZEMNÍ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ
TERRESTRIAL LASER SCANNING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUCIE ENDLICHEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLASTIMIL HANZL, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie a kartografie (N)
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Lucie Endlicherová
Název	Pozemní laserové skenování
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.
Datum zadání diplomové práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....
doc. RNDr. Miloslav Švec, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Manuály: FARO Focus 3D Manual, Scene 5.1 Manual.
Shan J., Toth Ch.K.: Topographic laser ranging and scanning. CRC Press, Taylor and Francis G. LLC.

Zásady pro vypracování

Prozkoumejte přesnostní charakteristiky pozemního skeneru FARO Focus 3D. Ověřte doporučenou maximální vzdálenost spojovacích objektů (terčů a koulí). Ověřte přesnost spojování skenů pomocí dalších spojovacích objektů (rovina, válcová plocha).

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje zjišťování charakteristik přesnosti pozemního laserového skeneru FARO Focus 3D S120. Ověřována je doporučená maximální vzdálenost mezi spojovacími objekty (terči a koulemi) a pozemním skenerem. Dále je zjišťována přesnost určení prostorových pravoúhlých souřadnic X, Y, Z laserovým skenováním s rozlišením 1/2. Nakonec je zjišťována přesnost určení plochy v souřadnici X skenováním hladké mírně zakřivené plochy.

Klíčová slova

Pozemní laserové skenování, skener FARO Focus 3D, program SCENE, mračno bodů

Abstract

This diploma thesis is focused on determine the characteristics of accuracy of the terrestrial laser scanner FARO Focus 3D S120. It is validated the recommended distance between the objects (targets and spheres) and the terrestrial scanner. Next it is tested accuracy of the Cartesian coordinates X, Y, Z measured by laser scanning with resolution 1/2. At the end it is investigated the accuracy of the area determination in X coordinate gained by the scanning of a smooth slightly curved surface.

Keywords

Terrestrial laser scanning, scanner FARO Focus 3D, software SCENE, point cloud

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Lucie Endlicherová *Pozemní laserové skenování*. Brno, 2015. 72 s., 13 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie.
Vedoucí práce doc. Ing. Vlastimil Hanzl, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27.5.2015

.....
podpis autora

Bc. Lucie Endlicherová

Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

Poděkování:

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce, doc. Ing. Vlastimilu Hanzlovi, CSc. za poskytnutí rad a připomínek při vypracovávání diplomové práce a za poskytnutá data, která jsem mohla v této práci zpracovávat.

V Brně dne 27.5.2015

Lucie Endlicherová

OBSAH

ÚVOD	9
1. STRUČNÝ VÝVOJ VYUŽITÍ LASERU V GEODETICKÝCH PŘÍSTROJÍCH	11
2. LASER	12
3. ZÁKLADNÍ PRINCIPY LASEROVÝCH MĚŘENÍ	13
3.1. Metody určení šikmé vzdálenosti.....	13
3.2. Laserové profilování	15
3.3. Laserové skenování	16
4. POZEMNÍ LASEROVÉ SKENERY	17
5. POZEMNÍ SKENER FARO FOCUS 3D	19
5.1. Důležitá nastavení skeneru.....	20
5.1.1. Výběr profilu skenování	20
5.1.2. Nastavení rozlišení a kvality.....	21
5.1.3. Nastavení rozsahu skenované oblasti	22
5.2. Přehled parametrů skenování	22
5.3. Základní vybavení skeneru	24
5.3.1. Hlavní obrazovka pozemního skeneru FARO Focus 3D	24
5.3.2. Správa pozemního skeneru	24
5.3.3. Obecná nastavení pozemního skeneru.....	25
5.4. Projekt a profil skenování	25
5.4.1. Vytvoření projektu.....	26
5.4.2. Možnosti projektu.....	26
5.4.3. Vytvoření profilu	26
5.5. Senzory pozemního skeneru	27
5.5.1. Teplotní senzor	28
5.5.2. Kompenzátor.....	28
5.5.3. Kompas	29
5.5.4. Výškoměr.....	29
5.6. Prohlížení skenů	30
5.7. Technické údaje skeneru	31
6. VLÍCOVACÍ BODY	32
6.1. Obecné požadavky	32
6.2. Šachovnicové terče.....	33
6.3. Referenční koule	33
7. PRÁCE S PROGRAMEM SCENE	34
7.1. Vytvoření nového projektu	34
7.2. Import skenů	34
7.3. Načtení skenů.....	35
7.4. Zobrazení dat.....	35
7.4.1. Quick view	36
7.4.2. Planar view	36
7.4.3. 3D view.....	37
7.4.4. Overview Map	38

7.5. Vyhledávání objektů	38
7.5.1. Automatické vyhledávání	38
7.5.2. Manuální vyhledávání	39
7.5.3. Přichycení objektu	40
7.6. Základní geometrické typy objektů.....	41
7.6.1. Šachovnicový terč.....	41
7.6.2. Koule.....	41
7.6.3. Roviny.....	41
7.7. Export objektů.....	42
8. OVĚŘENÍ DOPORUČENÉ MAXIMÁLNÍ VZDÁLENOSTI.....	43
8.1. Výpočet maximální vzdálenosti pro terč	43
8.2. Praktické ověření maximální vzdálenosti	44
9. ZJIŠTĚNÍ PŘESNOSTI URČENÍ SOUŘADNIC X, Y, Z SKENOVÁNÍM TERČŮ	
 NA ZÁRUBNÍ ZDI	47
9.1. Vlakové nádraží Adamov.....	47
9.2. Měření a zpracování dat	47
9.3. Výpočet přesnosti v jednotlivých osách souřadnicového systému	50
9.4. Fisherův test (F-test)	56
9.5. Dosažené výsledky.....	57
10.ZJIŠTĚNÍ PŘESNOSTI SOUŘADNICE X SKENOVÁNÍM HLADKÉ MÍRNĚ	
 ZAKŘIVENÉ PLOCHY	59
10.1. Skenování hladké mírně zakřivené plochy	59
10.2. Výpočet plochy polynomem 2. stupně.....	60
10.3. Výpočet přesnosti.....	63
ZÁVĚR	66
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	69
SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

Pozemní laserové skenování je jednou z metod sběru dat. Využívá se v mnoha aplikacích zejména v architektuře, stavebním inženýrství pro kontrolování výkopových prací, kontrolování deformací, zaměření fasád, sledování postupu výstavby atd. Pozemní laserové skenování je také možné využít ve zpracovatelském průmyslu, pro inspekci a reverzní inženýrství a v mnoha dalších oblastech.

Pozemním laserovým skenováním se získá mračno bodů. Poloha každého bodu je dána prostorovými pravouhlými souřadnicemi (X, Y, Z), které se získají transformací měřených polárních souřadnic (d, α, β). Pořízené mračno bodů se nejprve zpracuje v programu SCENE, další zpracování je možné v některém ze systému CAD, například v programu AutoCAD nebo Microstation, nebo v jiných speciálních softvécích s jimiž je kompatibilní.

V mnoha případech se nepořizuje pouze jeden sken, ale větší počet skenů, které je potřeba spojit dohromady. Aby bylo toto spojení možné, je nutné mít na každém skenu několik spojovacích bodů. Program SCENE vyhledává geometrické objekty, jako jsou například koule nebo šachovnicové terče, automaticky a určuje jejich prostorové pravouhlé souřadnice v lokálním systému s počátkem ve skeneru. Některé výsledné dokumentace nebo 3D modely musí být místo lokálního systému určeny v závazném geodetickém referenčním systému. Transformaci mezi těmito systémy zajišťují vřícovací body.

V této práci je pozemní laserové skenování realizováno pozemním skenerem FARO Focus 3D S120. Jedná se o vysokorychlostní 3D skener, který vzdálenost určuje měřením fázového rozdílu vln infračerveného světla, jehož vlnová délka je 905 nm. Součástí skeneru je integrovaná barevná kamera, která pořizuje fotorealistické snímky skenovaného objektu a okolního prostředí. Skener dále obsahuje čtyři senzory, kterými jsou kompas, dvojosý kompenzátor, výškoměr a teplotní senzor, jehož funkcí je zabránit přehřátí skeneru. Dosah skeneru je od 0,6 m až do 120 m a chyba měřené délky je uváděna ± 2 mm. Skenování je možné jak ve venkovním, tak ve vnitřním prostředí.

Cílem této diplomové práce je ověřit doporučenou maximální vzdálenost pro automatické vyhledávání spojovacích objektů a stanovit přesnost pozemního laserového skeneru FARO Focus 3D S120. První z požadavků znamená určit vzdálenost, při které už nelze spojovací objekty na skenu automaticky vyhledat. Tzn., že také nebude možné určit souřadnice těchto objektů. A dále vyšetřit typ této změny, jestli je lineární, exponenciální nebo se jedná o zlom. Následujícím požadavkem je zjistit s jakou přesností je možné určit prostorové pravouhlé souřadnice X, Y, Z šachovnicových terčů při daném rozlišení. Poté z dosažených výsledků také zjistit, zda skener neprokazuje nějakou systematickou chybu. Posledním požadavkem je prozkoumat, zda má při skenování hladké mírně zakřivené plochy opodstatnění nastavovat vyšší rozlišení a vyšší kvalitu a jaké výsledky je možné získat. Tato úloha částečně ověřuje, s jakou přesností skener určuje měřenou vzdálenost, při použitých parametrech a dané vzdálenosti k objektu.

Diplomová práce je rozdělena celkem do deseti kapitol. První kapitola se zabývá využitím laseru s ohledem na vývoj geodetických přístrojů. Další kapitola poskytuje

stručné informace o samotném laseru. Třetí kapitola popisuje základní principy určování šikmé vzdálenosti, laserové profilování a laserové skenování.

Čtvrtá kapitola se věnuje pozemnímu skeneru obecně a v páté kapitole je podrobněji popsán použitý skener FARO Focus 3D a práce s ním, dále jeho programové vybavení, nastavení různých parametrů a prohlížení skenů. Následuje část týkající se obecných požadavků na vlíčovací body používané při laserovém skenování. Poslední kapitola před praktickou částí se zabývá programem SCENE, který je použit pro zpracování mračna bodů. Největší část této kapitoly je věnována jednotlivým zobrazením dat, které program SCENE umožňuje a vyhledávání geometrických objektů na skenu, které je použito při řešení praktických úloh.

Praktická část je obsažena v kapitolách osm, devět a deset, ve kterých jsou podrobně zpracovány výše uvedené požadavky a za každou touto kapitolou jsou shrnuty dosažené výsledky.

V závěru je stručně popsána celková práce s definitivními výsledky. Na konci celé diplomové práce se nachází seznam použité literatury, seznam obrázků, tabulek a grafů, seznam příloh a přílohy.

1. STRUČNÝ VÝVOJ VYUŽITÍ LASERU V GEODETICKÝCH PŘÍSTROJÍCH

Lasery začaly být používány zeměměřiči pro měření vzdálenosti v druhé polovině 60. let. Přístroje pro laserová měření, profilování a skenování používaly pro vyhodnocování vzdálenosti metodu srovnávání fáze, nebo techniku měření pulzu. [1]

V počátcích byly přístroje umožňující elektronické měření vzdálenosti, používány jako samostatné přístroje. Pro zaměřování geodetických sítí nebo ke kontrolním měřením se používala metoda trilaterace nebo metoda polygonového pořadu. U těchto metod byly potřebné úhly měřeny samostatně pomocí teodolitu. Později byly tyto dva typy přístrojů sloučeny a začleněny do totální stanice, která byla schopna provádět přesná úhlová měření pomocí optoelektronických snímačů a vzdálenost byla měřena elektronicky k odraznému hranolu. Tyto totální stanice umožnily topografické mapování metodou elektronické tachymetrie, z jejichž měření se dále konstruuje topografická mapa nebo model terénu. [1]

S rozvojem velmi malých a výkonných (stále bezpečných pro oči) laserů, bylo možné bezhranolové měření vzdálenosti. Tímto vylepšením se lasery mohly využít při profilování v lomech, povrchových jámách a tunelech. Logickým krokem bylo vyvinutí skenovacích mechanismů a připojení k těmto laserovým měřičům a profiloměrům. [1]

Vše vyvrcholilo vývojem současné série pozemních laserových skenerů, které jsou nyní velmi často používány při aplikacích topografického mapování, buď ze stacionárních poloh, kdy je skener připevněn na stativ, nebo v mobilním režimu, kdy je namontován na vozidlo. [1]

2. LASER

Celá tato kapitola je zpracována podle [1]. Slovo laser je akronym z anglického *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, tj. zesílení světla stimulovanou emisí záření. V podstatě je laser optický zdroj elektromagnetického zařízení, který vytváří a vysílá světlo jako úzký svazek nebo puls v určitém směru. Emitované záření je koherentní (vlnění má stejnou frekvenci, stejný směr kmitání, stejnou fázi) a monochromatické (vlnění kmitá pouze na jediné frekvenci).

Lasery jsou obvykle klasifikovány podle typu materiálu, který je používán jako zdroj záření. Nejběžnější typy laseru jsou plynové lasery, polovodičové lasery a lasery na bázi pevných látek. Mezi další typy laserů, které se používají méně často, patří kapalné lasery, lasery na bázi barviva, excimerové lasery, atd.

Pro účely topografického mapování, jsou k provedení měření vzdáleností, potřebné velmi vysoké hladiny energie. Pouze určité typy pevnolátkových a polovodičových laserů mají velmi specifické charakteristiky.

Všechny lasery obsahují tři hlavní prvky:

První z těchto prvků obsahuje účinnou látku laseru, která obsahuje atomy, jejichž elektrony mohou být buzeny a zvýšeny na mnohem vyšší (metastabilní) úroveň energie.

Druhý prvek, který je přítomen v každém laseru, je zdroj energie. Ten poskytuje energii pro založení a pokračování akce "laserování". Nepřetržité poskytování energie laseru je obvykle popisováno jako "čerpání" laseru.

Třetím prvkem je zajištění dvou zrcadel. Jedno je plně reflexní, odráží 100 % dopadajícího laserového záření a druhé je částečně reflexní (tj. částečně prostupné). Opět se jedná o nedílné součásti nebo prvky každého laseru.

3. ZÁKLADNÍ PRINCIPY LASEROVÝCH MĚŘENÍ

Laserová měření jsou prováděna různými typy laserových přístrojů, které jsou obvykle označovány jako laserový dálkoměr.

Laserové skenery určují polohu bodu polárními souřadnicemi, které se následně převádějí na pravouhlé X, Y, Z. Polární souřadnice jsou dány měřenými veličinami, mezi které patří dva úhly, vertikální a horizontální. Třetí měřenou veličinou je šikmá vzdálenost, která může být určena dvěma způsoby. Oba principy určení šikmé vzdálenosti jsou popsány v následující kapitole.

3.1. Metody určení šikmé vzdálenosti

Šikmé vzdálenosti lze určovat jednou ze dvou hlavních metod. Obě metody jsou popsány podle [1].

První z těchto metod zahrnuje přesné měření TOF (čas letu z anglického „time of flight“) velmi krátkého, ale intenzivního pulzu laserového záření. Laserový dálkoměr měří přesný časový interval, který uplyne mezi pulzem emitovaným laserovým měřičem a jeho vrácením po odrazu od objektu. Laserový měřič je umístěn v bodě A, měřený objekt v bodě B a měření probíhá mezi nimi.

Pro výpočet šikmé vzdálenosti platí vztah:

$$R = v \cdot \frac{t}{2},$$

kde

R – šikmá vzdálenost

v – rychlost elektromagnetického záření (známá hodnota)

t – měřený časový interval

Z předchozího vztahu lze odvodit následující jednoduchý vztah pro přesnost šikmé vzdálenosti:

$$\Delta R = \Delta v \cdot \frac{t}{2} + v \cdot \frac{\Delta t}{2},$$

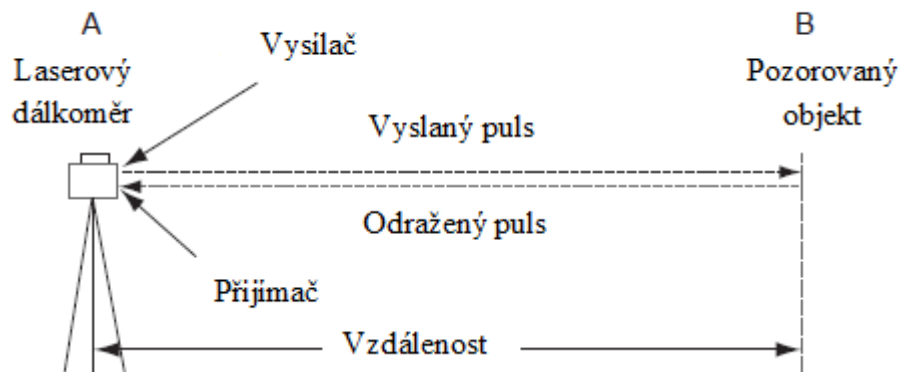
kde

ΔR – přesnost šikmé vzdálenosti

Δv – přesnost rychlosti elektromagnetického záření

Δt – odpovídající hodnota přesnosti měření času

Jelikož je rychlost světla známou hodnotou, v praxi tedy kvalita určení vzdálenosti závisí pouze na přesnosti měření času.



Obr. 3.1. Základní činnost laserového dálkoměru [1]

Ve druhé metodě laser vysílá místo pulzu souvislý paprsek laserového záření. V tomto případě je hodnota vzdálenosti odvozena srovnáním vysílané a přijímané sinusové vlny a měřením fázového rozdílu mezi nimi. Amplituda (intenzita) laserového záření je modulovaná sinusovým signálem, který má periodu T_m a vlnovou délku λ_m . Měření šikmé vzdálenosti R se pak provádí pomocí přesného měření fázového rozdílu mezi emitovaným signálem v bodě A a signálem přijímaným na přístroji po jeho odrazu od objektu, který je umístěn v bodě B.

Vztah pro výpočet šikmé vzdálenosti:

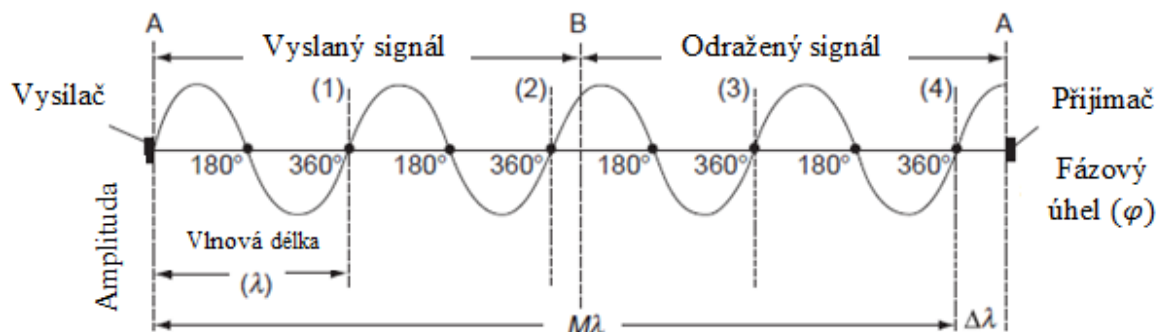
$$R = \frac{M\lambda + \Delta\lambda}{2},$$

kde

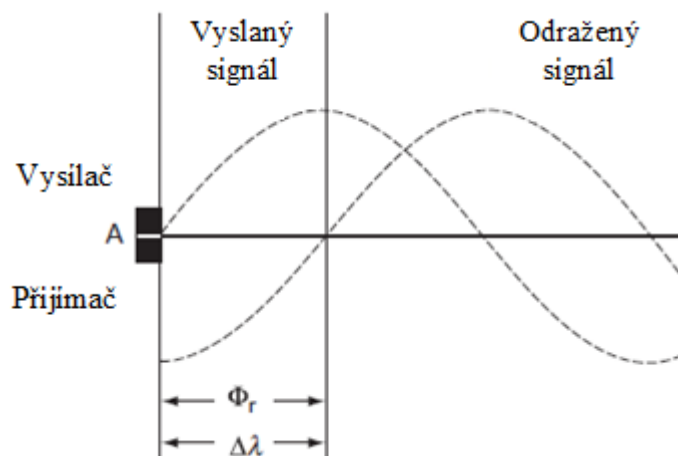
M – počet celých vlnových délek

λ – známá hodnota vlnové délky

$\Delta\lambda$ – část vlnové délky = $(\varphi / 2\pi) \cdot \lambda$, kde φ je fázový úhel



Obr. 3.2. Porovnání fáze mezi vyslanými a odraženými signály [1]



Obr. 3.3. Porovnání fáze se koná v laserovém dálkoměru [1]

3.2. Laserové profilování

Pro měření vzdáleností bodů rozmístěných podél linie se používá laserový bezhranový měřič. Měření profilu terénu se provádí v sérii kroků, kde ke každému bodu je měřena šikmá vzdálenost R a vertikální úhel V . Hodnoty měřených veličin jsou v přístroji digitálně zaznamenány a uloženy. Ze zaměřených bodů lze vyhotovit vertikální profil nebo řez. [1]

Pro vodorovnou vzdálenost platí vztah:

$$D = R \cdot \cos V,$$

kde

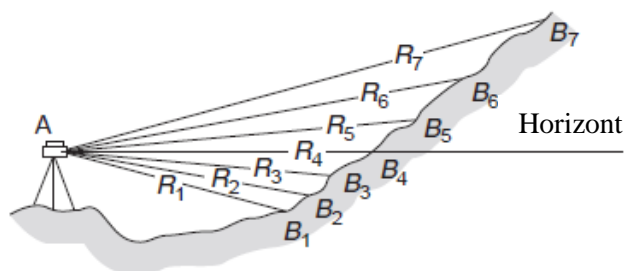
D – horizontální vzdálenost

R – měřená šikmá vzdálenost

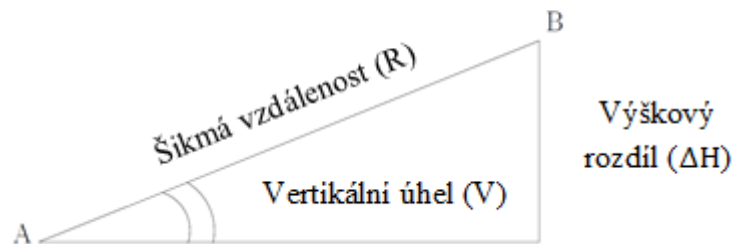
V – měřený vertikální úhel

Převýšení mezi body lze vypočítat ze vztahu:

$$\Delta H = R \cdot \sin V$$



Obr. 3.4. Měřený profil [1]

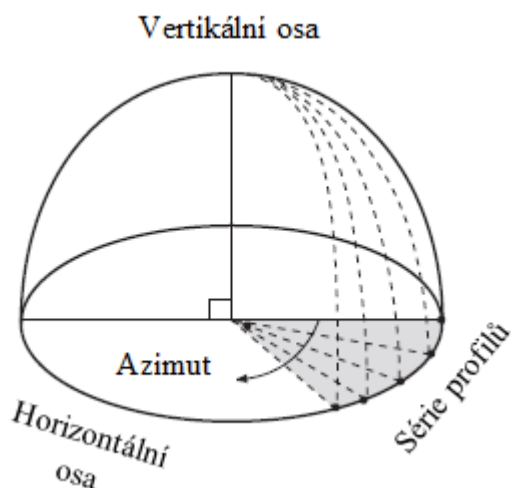


Obr. 3.5. Měřená šikmá vzdálenost (R) a vertikální úhel (V)

3.3. Laserové skenování

Přidáním skenovacího mechanismu, rotačního zrcadla nebo hranolu, do laserového měřiče se stává z profiloměru skener. Skener, tak umožňuje podrobně měřit a mapovat topografické oblasti na rozdíl od profiloměru, který umožňuje zjišťovat pouze výškové hodnoty podél linie v terénu. [1]

Pozice pozemního laserového skeneru je fixní, proto je pro skenování oblasti terénu zapotřebí pohyb ve dvou směrech. Kromě vertikálního pohybu daného rotačním zrcadlem nebo hranolem, se pohyb ve směru azimutu obvykle provádí přidáním motorového pohonu. Tento přidaný pohyb umožňuje měření řady profilů kolem vertikální osy laserového měřiče. Celkový pohyb skeneru v obou osách zajišťuje měření vertikálního úhlu, horizontálního úhlu a šikmé vzdálenosti k bodům ležícím v oblasti kolem pozice laserového skeneru. Z naměřených veličin lze vypočítat polohu bodů v prostoru a ze získaných souřadnic lze následně vytvořit 3D model terénu nebo objektu. [1]



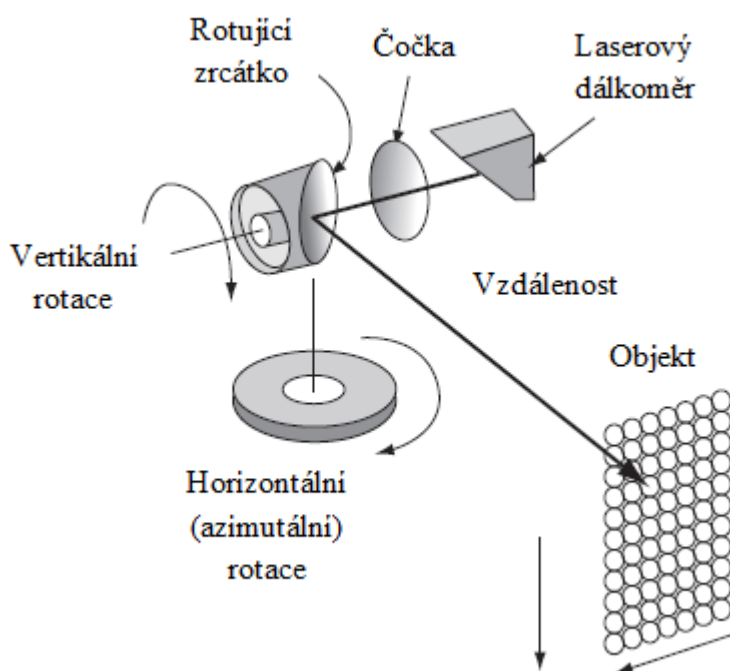
Obr. 3.6. Laserové skenování – měření série profilů za sebou [1]

4. POZEMNÍ LASEROVÉ SKENERY

Do této skupiny patří laserové skenery, které jsou během skenování na místě. Tzn., mají pevnou (statickou) polohu, při které se provádí měření topografických objektů. Měří se současně šikmá vzdálenost laserovým dálkoměrem a dva spojené úhly pomocí úhlových snímačů v horizontální i vertikální rovině procházející středem přístroje. Ve většině případů lze před vlastním procesem skenování, uživatelem nastavit úhlové přírůstky v obou směrech, jak ve směru azimutu, tak u vertikálního otáčení. Typicky jsou úhlové velikosti kroku nastaveny na stejnou hodnotu. Skener tedy poskytuje stejný vzor v obou rovinách. Počátek polárního souřadnicového systému je vložen do středu přístroje. [1]

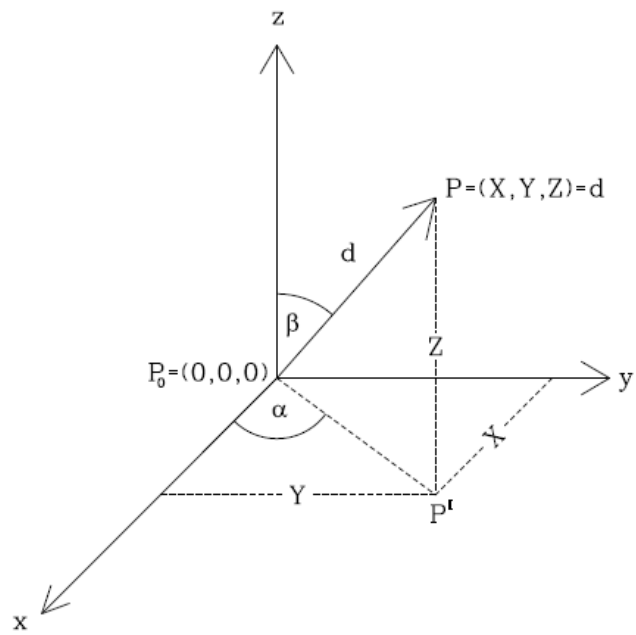
Tyto simultánní měření vzdálenosti a úhlu se provádí vysoce automatizovaným způsobem. Nejprve je stanoven skenovací vzor, u něhož je měřicí rychlost často 1000 Hz nebo více. Laserový dálkoměr využívá pro měření vzdálenosti, techniky vyslání pulsu nebo měření fázového rozdílu. Existuje i řada laserových skenerů s velmi krátkým dosahem, které jsou založeny na jiných principech měření, pracují v rozsahu několika metrů a jejich přesnost je často zlomek milimetru. [1]

Laserové skenery jsou často používány v oblasti metrologie, v průmyslových aplikacích a reverzním inženýrství, dále pro tělesné skenování a lékařský výzkum a pro záznamy objektů, které pořizují muzejní pracovníci a archeologové. [1]



Obr. 4.1. Vzdálenost, horizontální a vertikální úhlová rotace [1]

U laserového skenování je poloha bodu určena prostorovou polární metodou. Polární souřadnice jsou měřenými veličinami a tvoří je vodorovný úhel α , výškový úhel β a šikmá vzdálenost d . Tyto souřadnice jsou následně transformovány do pravoúhlého souřadnicového systému, jehož počátek je přímo ve skeneru.



Obr. 4.2. Schéma souřadnicového systému s měřenými veličinami

Převod polárních souřadnic do pravoúhlého souřadnicového systému:

- $X = d \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha$
- $Y = d \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha$
- $Z = d \cdot \cos \beta$

5. POZEMNÍ SKENER FARO FOCUS 3D

V této kapitole je popsán použitý pozemní skener FARO Focus 3D, zejména jeho programové vybavení a nastavení různých parametrů potřebných při skenování. Na konci této kapitoly jsou uvedeny technické údaje tohoto skeneru.

FARO Focus 3D je vysokorychlostní laserový skener určený pro detailní měření a vyhotovení dokumentace ve trojrozměrném prostoru. Využívá laserovou technologii, která dokáže během pár minut vytvořit detailní obraz celého prostředí. Výsledné snímky obsahují mračno bodů ve 3D prostoru. [2]

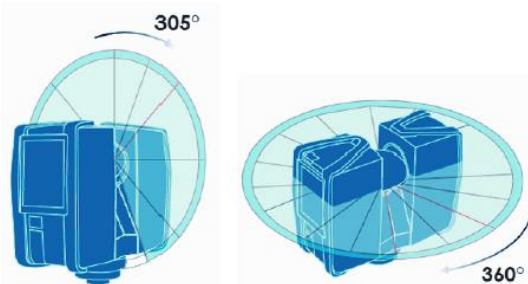
Hlavní znaky skeneru:

- Vysoká přesnost, rychlost a vysoké rozlišení
- Ovládání dotykovým displejem
- Malé rozměry a nízká hmotnost
- Fotorealistické 3D barevné skenování díky integrované barevné kameře
- Dvojosý kompenzátor, který automaticky vyrovnává zachycená data do svislice
- Kompas a výškoměr přiřazují skenům informace o orientaci a výšce
- WLAN umožňuje dálkově ovládat skener [2]

Pozemní skener FARO Focus 3D používá techniku měření fázového posunu, u které jsou konstantní vlny infračerveného záření o různých délkách vysílány ven ze skeneru. Po kontaktu s objektem se odráží zpět do skeneru. Vzdálenost mezi skenerem a objektem je přesně určena měřením fázové rozdílu vln infračerveného světla. [2]

Pravoúhlé souřadnice X, Y, Z každého bodu se vypočtou na základě měřených veličin. Vertikální úhel je určován rotací zrcátka a horizontální úhel horizontálním otáčením skeneru. Tyto úhly jsou zaznamenávány současně s měřením vzdálenosti. Vzdálenost, vertikální a horizontální úhel pak tvoří polární souřadnice (d , α , β), které jsou následně transformovány do pravoúhlého souřadnicového systému (x , y , z). [2]

Tento skener také určuje odrazivost zachycených povrchů měřením intenzity přijímaného laserového paprsku. Obecně platí, že světlé plochy odrážejí větší část vyzařovaného světla než tmavé plochy. Zjištěná hodnota odrazivosti se používá pro přiřazení odpovídající hodnoty šedé. [2]



Obr. 5.1. Vertikální a horizontální rotace [2]



Obr. 5.2. Pozemní skener FARO FOCUS 3D

5.1. Důležitá nastavení skeneru

Před začátkem skenování je potřeba provést některá důležitá nastavení. A to vybrat profil skenování, nastavit rozlišení a kvalitu skenování a správně stanovit rozsah skenování, aby nebyla skenována zbytečně velká část území, nebo naopak, aby nějaká část území nechyběla.

5.1.1. Výběr profilu skenování

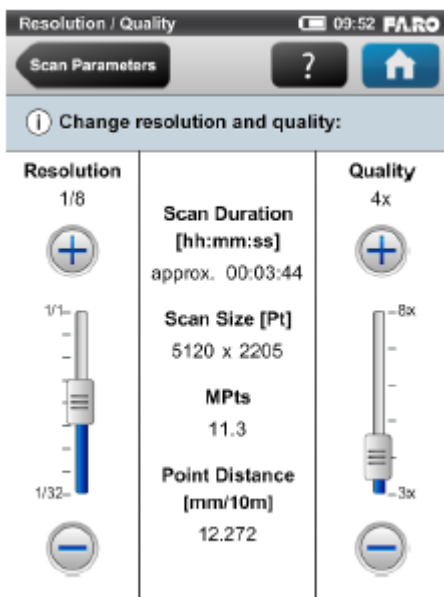
Pozemní skener má některé profily předdefinované. Lze vybrat z kombinací vnitřní nebo venkovní profil dle prostředí, ve kterém bude skenování prováděno a současně na základě vzdálenosti z možností do 20 metrů nebo nad 20 metrů. Tyto skenovací profily jsou určeny pouze pro čtení a nelze je změnit nebo smazat. Je však možné si vytvořit svůj vlastní profil, který už upravovat jde.

Vybraný profil se zvolí tak, že se na něj klikne a klikne-li se na něj znovu, zobrazí se jeho podrobnosti.



Obr. 5.3. Druhy profilů skenování [2]

5.1.2. Nastavení rozlišení a kvality



Obr. 5.4. Nastavení rozlišení a kvality [2]

Rozlišení - Výsledné rozlišení skenování lze vybrat z těchto variant 1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8, 1/10, 1/16, 1/20 a 1/32. Požadované rozlišení se nastaví pomocí posuvníku na levé straně.

Kvalita – počet opakování měření, které ovlivňuje čas skenování. Lze nastavit jednu z těchto variant 1x, 2x, 3x, 4x, 6x, 8x. Požadovaná kvalita skenování se nastaví opět pomocí posuvníku. Čím větší je nastavená kvalita skenování, tím delší je doba skenování.

Dále je uprostřed této obrazovky zobrazena výsledná doba skenování (Scan Duration), počet bodů ve svislém a vodorovném směru (Scan Size [Pt]), stejně tak i výsledný počet skenovaných bodů v milionech (MPts). Vzdálenost bodů (Point Distance) [mm/10 m] je vzdálenost v milimetrech mezi sousedními zachycenými body na vzdálenost 10 metrů.

5.1.3. Nastavení rozsahu skenované oblasti



Obr. 5.5. Rozsah skenované oblasti [2]

Vertikální rozsah – udává se ve stupních. Pro nastavení počátečního úhlu skenování se používá levé tlačítko, změna se provádí šipkou dolů a nahoru. Pravé tlačítko slouží k nastavení koncového vertikálního úhlu.

Horizontální rozsah – se též udává ve stupních. Postup pro nastavení počátečního a koncového úhlu v horizontální oblasti je stejný jako pro nastavení vertikálního rozsahu.

Výchozí rozsah - Kliknutím na toto tlačítko se nastaví výchozí rozsah skenování (vertikální rozsah od -60° do 90° a horizontální rozsah od 0° do 360°).

Obdélník v tomto pohledu zobrazuje veškerou skenovanou oblast. Pokud je ve skeneru vložena SD karta, zobrazí se náhled obrázku posledního zaznamenaného skenování. Pokud není k dispozici žádný náhled obrázku, zobrazí se pouze mřížka, kde prostor mezi vodorovnými a svislými čarami je ekvivalentní a má velikost 30° . Žlutý obdélník označuje vybranou skenovanou oblast. [2]

5.2. Přehled parametrů skenování

V následující tabulce je zobrazena rychlost měření, komprese šumu, čas skenování a axiální i radiální NOHD pro rozlišení 1/1, 1/2, 1/4, 1/5, 1/8 a 1/20 a pro všechna nastavení kvality, která jsou u těchto rozlišení k dispozici.

NOHD (nominální oční nebezpečná vzdálenost z anglického „Nominal Ocular Hazard Distance“) tzn., pokud je pozorovatel blíže ke zdroji než je NOHD, pak může být laserový paprsek nebezpečný zejména pro oči. Hodnota NOHD závisí na rozlišení a kvalitě. [2]

Resolution		Quality	Speed (kpt/sec)	Noise Compression	Net Scan Time (full scan)	pt/360°	NOHD [m]	
Mio. Pts (full scan)							axial	radial
710.7	1/1	1x	976	-	0:14:19	40,960	6.50	3.25
710.7	1/1	2x	488	-	0:28:38	40,960	10.61	5.61
710.7	1/1	3x	244	-	0:57:16	40,960	16.56	8.68
710.7	1/1	4x	122	-	1:54:32	40,960	23.98	11.66

Tab. 5.1. Parametry skenování pro rozlišení 1/1 (převzato: [2])

Resolution		Quality	Speed (kpt/sec)	Noise Compression	Net Scan Time (full scan)	pt/360°	NOHD [m]	
Mio. Pts (full scan)							axial	radial
177.7	1/2	1x	976	-	0:03:35	20,480	3.91	1.63
177.7	1/2	2x	488	-	0:07:09	20,480	6.50	2.83
177.7	1/2	3x	244	-	0:14:19	20,480	10.61	4.55
177.7	1/2	4x	122	-	0:28:38	20,480	16.56	6.33
177.7	1/2	6x	122	2x	1:54:32	20,480	23.98	11.66
44.4	1/4	1x	976	-	0:00:54	10,240	2.34	0.82
44.4	1/4	2x	488	-	0:01:47	10,240	3.91	1.42
44.4	1/4	3x	244	-	0:03:35	10,240	6.50	2.30
44.4	1/4	4x	122	-	0:07:09	10,240	10.61	3.24
44.4	1/4	6x	122	2x	0:28:38	10,240	16.56	6.33
44.4	1/4	8x	122	4x	1:54:32	10,240	23.98	11.66
28.4	1/5	2x	488	-	0:01:09	8,192	3.31	1.13
28.4	1/5	3x	244	-	0:02:17	8,192	5.53	1.85
28.4	1/5	4x	122	-	0:04:35	8,192	9.09	2.60
28.4	1/5	6x	122	2x	0:18:20	8,192	16.6	6.4
11.1	1/8	2x	488	-	0:00:27	5,120	2.33	0.71
11.1	1/8	3x	244	-	0:00:54	5,120	3.91	1.16
11.1	1/8	4x	122	-	0:01:47	5,120	6.50	1.63
11.1	1/8	6x	122	2x	0:07:09	5,120	10.61	3.24
11.1	1/8	8x	122	4x	0:28:38	5,120	16.56	6.33
1.8	1/20	4x	122	-	0:00:17	2,048	3.31	0.65
1.8	1/20	6x	122	2x	0:01:09	2,048	5.53	1.31
1.8	1/20	8x	122	4x	0:04:35	2,048	9.09	2.60

Tab. 5.2. Parametry skenování pro rozlišení 1/2 až 1/8 a 1/20 (převzato: [2])

5.3. Základní vybavení skeneru

5.3.1. Hlavní obrazovka pozemního skeneru FARO Focus 3D

Po spuštění skeneru se zobrazí jeho hlavní obrazovka, která obsahuje pět základních tlačítek.



Obr. 5.6. Hlavní obrazovka skeneru [2]

Tlačítko **Funkce**

Tlačítko	Funkce
1	Spouštění skenování
2	Úprava nastavených parametrů pro další skenování
3	Náhled na skeny, které jsou uloženy na SD kartě
4	Správa skenovaných profilů, projektů, provozovatelů a skeneru
5	Informace o provozovateli, projektu a skenovacím profilu

Tab. 5.3. Hlavní funkce skeneru FARO Focus3D (sestaveno podle: [2])

5.3.2. Správa pozemního skeneru

Je-li zvoleno tlačítko 4 na hlavní obrazovce, zobrazí se další obrazovka, na které lze vybrat následující možnosti. Funkce jednotlivých ikon jsou uvedeny v tabulce pod obrázkem.



Obr. 5.7. Správa [2]

<i>Ikona</i>	<i>Funkce</i>
Projekty	Vybrat aktuální projekt, přidat nový nebo upravit existující
Profily	Vybrat aktuální profil skenování, vytvořit nový nebo upravit existující
Provozovatelé	Vybrat aktuálního provozovatele, vytvořit nového nebo upravit existujícího
Obecná nastavení	Otevření menu pro obecná nastavení skeneru
Služba	Otevření menu pro obsluhu skeneru (aktualizace firmwaru, zálohování nebo zobrazení chyb a varování)
Senzory	Otevření menu pro správu snímače skeneru
Vypnutí skeneru	Vypnutí skeneru

Tab. 5.4. Funkce správy (sestaveno podle: [2])

5.3.3. Obecná nastavení pozemního skeneru

Skener FARO Focus 3D umožňuje také provádět další obecná nastavení. Funkce daných ikon jsou uvedeny v následující tabulce.

<i>Ikona</i>	<i>Funkce</i>
Hudba	Změna hlasitosti, povolení a zakázání zvuků
Napájení	Nastavení spořiče obrazovky, zobrazení podrobného stavu nabití baterie
Displej	Nastavení jasu displeje, překalibrovat nebo změnit tapetu na domovské obrazovce
Datum a čas	Změna formátu data, změna data a času
Jazyk	Změna jazyka operačního programu
Jednotky	Změna délkových jednotek
Síť WLAN	Změna nastavení sítě WLAN, zapnutí a vypnutí WLAN. Skener lze ovládat dálkově pomocí externího zařízení
Podrobnosti	Zobrazení a změna podrobností skeneru

Tab. 5.5. Obecná nastavení (sestaveno podle: [2])

5.4. Projekt a profil skenování

Projekt skenování se obvykle skládá z hlavního projektu, který má několik dalších dílčích projektů. Například při skenování budovy může každé patro představovat jeden dílčí projekt a každé patro, může mít další dílčí projekty, například pokoje. [2]

Skener má předdefinovaný výchozí projekt. Jedná se o standardní projekt, který nemůže být použit pro konkrétní skenování, nelze ho odstranit ani změnit jeho název nebo nadřazenost projektu. Před zahájením skenování je potřeba ze seznamu projektů zvolit správný projekt, který byl předem připraven. Tento projekt by měl odpovídat aktuální pozici skenování. [2]

5.4.1. Vytvoření projektu

Nový projekt lze vytvořit dvěma způsoby:

- Přidání nového projektu se provede pomocí tlačítka plus a po vytvoření lze změnit jeho název.
- Místo vytvoření zcela nového projektu lze nový projekt vytvořit duplikací stávajícího projektu pomocí tlačítka duplikovat. Výhodou je, že tento projekt bude mít stejná nastavení a vlastnosti jako původní duplikovaný projekt.

5.4.2. Možnosti projektu

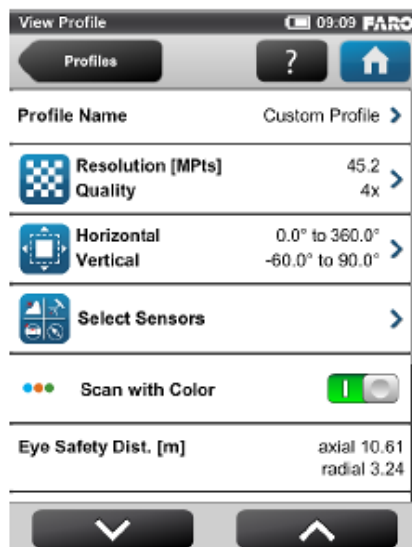
Programové vybavení skeneru umožňuje nastavit nadřazenost projektu. Je-li zvoleno tlačítko **No Parent Project**, pak to znamená, že daný projekt bude hlavním projektem a nebude mít žádný nadřazený projekt. [2]

<i>Ikona</i>	<i>Funkce</i>
Jméno	Název projektu, po kliknutí ho lze přejmenovat
Nadřazenost	Projekt má několik dílčích projektů
Zákazník	Zde je možné napsat jméno zákazníka, pro kterého je skenování prováděno
Název složky pro uložení	Po skenování bude uložen soubor do složky a přidá se aktuální číslo skenování
Počáteční číslo skenování	Automaticky se zvyšuje při každém dalším skenování
Další informace	Zjištění dalších informací
Zeměpisná šířka	Zadání přibližné zeměpisné šířky

Tab. 5.6. *Funkce projektu* (sestaveno podle: [2])

5.4.3. Vytvoření profilu

Nový profil lze vytvořit stejným způsobem jako projekt. Pomocí tlačítka plus, které přidá zcela nový profil. Nebo je možné nový profil vytvořit kopírováním stávajících profilů. Nejprve je potřeba vybrat profil, který má být kopírován a potom kliknout na tlačítko duplikovat. Zobrazí se nová obrazovka, kde se zadá jméno profilu a upravují se jeho parametry jako rozlišení, kvalita a rozsah.



Obr. 5.8. Detail profilu [2]

5.5. Senzory pozemního skeneru

Součástí skeneru jsou 4 senzory, které je možné využívat při skenování. Jedná se o teplotní senzor, dvojosý kompenzátor, kompas a výškoměr.



Obr. 5.9. Senzory [2]

<i>Druhy senzorů</i>	<i>Funkce</i>
Teplota	Zobrazení aktuální teploty skeneru, přepnutí na ventilátor, jeho zapnutí a vypnutí
Kompenzátor	Slouží pro urovnání skeneru do svislé polohy
Kompas	Zobrazení orientace skeneru
Výškoměr	Zobrazení aktuálně naměřené výšky skeneru

Tab. 5.7. Funkce senzorů (sestaveno podle: [2])

5.5.1. Teplotní senzor

Skener obsahuje několik integrovaných teplotních čidel, které měří teplotu v různých polohách uvnitř skeneru. Obrazovka pak zachycuje teplotní čidlo, které má v současné době největší kritickou hodnotu. Je-li čidlo těsně pod nebo nad kritickou hodnotou, pak se indikátor nachází ve žluté oblasti. Skenování je nadále možné, ale může být ovlivněna jeho kvalita. Z tohoto důvodu se doporučuje zahřát nebo ochladit skener, dokud není indikátor teploty opět v zelené oblasti. Pokud je teplota příliš vysoká nebo nízká, pak se indikátor nachází v červené oblasti. V tomto případě skenování není možné a skener se během několika následujících minut vypne. [2]



Obr. 5.10. Teplotní senzor [2]

5.5.2. Kompenzátor

Skener zahrnuje také vestavěný kompenzátor, který se používá pro automatické vyrovnání nasbíraných skenovaných dat. Přesnost kompenzace je určena pro sklony až 5° a degraduje u hodnoty větší jak 5°. Sklon se měří elektronicky a je uložen při každém skenování. Tato informace je pak využívána při procesu registrace, proto je vhodné urovnat skener se sklonem menším než je 5°. K urovnání se používá buď libela umístěná na stativu, nebo obrazovka skeneru se zobrazeným kompenzátořem. Pro automatické používání kompenzátoru musí být zapnuté tlačítko ON. [2]

Na displeji skeneru jsou zobrazeny 3 úrovně bubliny, jak by mohly vypadat po namontování na horní část skeneru. Jestliže se bublina nachází uvnitř menšího černého kruhu, skener je urovnán do vertikální polohy. Pokud je bublina uvnitř většího černého kruhu, pak je sklon skeneru menší než 5° a na pozadí je zobrazena zelená barva. Pokud je sklon větší než 5° na pozadí se rozsvítí červená barva a přesnost měření sklonu je snížena. [2]

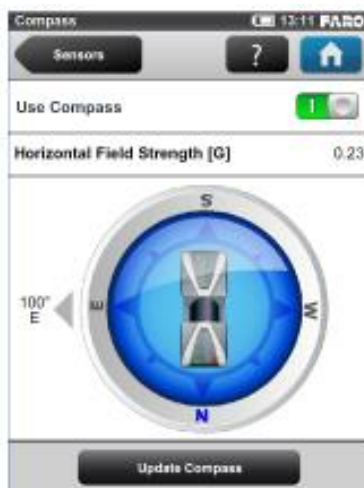


Obr. 5.11. Kompenzátor [2]

5.5.3. Kompas

Další součástí skeneru je vestavěný elektronický kompas pro měření orientace skeneru na zemském povrchu. Tato informace je připojena ke každému skenování a může být použita pro registraci v programu SCENE. Mají-li být pro registraci data určená kompasem použita automaticky, je potřeba přepnout tlačítko **použít kompas** do polohy ON. [2]

Ze začátku není na obrazovce kompasu orientace uvedena, pokud má být zobrazena aktuální orientace skeneru, je potřeba kliknout na tlačítko **aktualizovat kompas** v dolní části této obrazovky. Pro uskutečnění měření je potřeba skener otočit horizontálně o 360 °. Jakmile skener dokončí rotaci a určí svoji orientaci, kompas se zobrazí, tak jak by vypadal v případě namontování na horní část skeneru. Kompas nyní ukazuje aktuální orientaci skeneru a naměřená hodnota orientace je uvedena ve stupních. [2]



Obr. 5.12. Kompas [2]

5.5.4. Výškoměr

Určení výšky je založeno na měření atmosférického tlaku. Naměřená výška je připojena ke každému skenování a může být použita při registraci v programu SCENE. Má-li být

naměřená výška použita automaticky, je potřeba přepnout tlačítko **použít výškoměr** do polohy ON. [2]

Pro registraci stačí znát rozdíly nadmořských výšek u různých pozic skeneru. Nejprve jsou vybrány pozice skenování, které mají být použity jako podklad pro měření nadmořských výšek. Potom je skener umístěn na zvolenou referenční polohu a je zadána výška, která má být použita pro tuto pozici. Nakonec je resetován výškoměr k této referenční výšce kliknutím na tlačítko **synchronizovat referenční výšku**. Všechna další měření výškoměru se pak provádí na základě této referenční výšky. [2]

5.6. Prohlížení skenů

Skener umožňuje prohlížení fotografie všech skenů, které byly pořízeny a uloženy na SD kartě. K prohlížení skenů se lze dostat z hlavní obrazovky skeneru přes tlačítko 3 **zobrazení skenů**. Nejprve je zobrazen seznam všech dostupných skenů, ze kterého se vybírá požadovaný sken. V tomto seznamu je u každého skenu uveden jeho název, velikost a datum vytvoření souboru. Seznam je řazen podle data vytvoření skenů.

Se zobrazeným náhledem skenu lze manipulovat. Funkce tlačítek 1 - 7 jsou uvedeny v tabulce pod obrázkem.



Obr. 5.13. Náhled skenu [2]

Tlačítko Funkce

Tlačítko	Funkce
1	Zobrazí náhled fotografie předchozího skenu
2	Zobrazí náhled fotografie následujícího skenu
3	Zvětšení fotografie
4	Zmenšení fotografie
5	Zvětší obrázek do původní velikosti. Tlačítko je viditelné, jen pokud je obraz zvětšen
6	Vymaže aktuálně zobrazený sken z SD karty
7	Otevře další okno, které informuje o podrobnostech aktuálně zobrazeného skenu

Tab. 5.8. Ovládání náhledu skenu (sestaveno podle: [2])

Použitím tlačítka 7 se zobrazí podrobnosti skenování, které informují o použitých parametrech. V těchto podrobnostech lze najít informace o použitém projektu, profilu, rozlišení, kvalitě a rozsahu oblasti skenování, dále datum a čas vytvoření skenu, čas skenování, ale také i operátora skenu. [2]

5.7. Technické údaje skeneru

PAMARAMETRY MĚŘENÉ VZDÁLENOSTI

Dosah	0,6 m - 120 m vevnitř nebo venku s nízkou úrovní okolního světla a kolmým dopadem na plochu s 90% odrazivostí
Rychlost měření (bodů za sekundu)	122 000/ 244 000/ 488 000/ 976 000
Rozsah chyby	± 2 mm ve vzdálenosti 10 m a 25 m, u 90% a 10% odrazivosti

PARAMETRY MĚŘENÍ ÚHLŮ

Zorné pole (vertikální / horizontální)	300° / 360°
Velikost kroku (vertikální / horizontální)	0,009° (40 960 3D Pixel na 360°) / 0,009° (40 960 3D Pixel na 360°)
Max. vertikální rychlost skenování	5,820 rpm nebo 97 Hz

PARAMETRY LASERU

Výkon laseru (cw Ø)	20 mW (třída laseru 3R)
Vlnová délka	905 nm
Divergence paprsku	Typická 0,19 mrad (0,011°)
Průměr paprsku na výstupu	Typické 3,0 mm, kruhový

BARVA

Rozlišení	Až 70 megapixelů barvy
Dynamická vlastnost barvy	Automatické přizpůsobení jasu

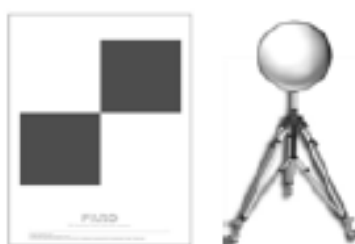
MULTI - SENSOR

Dvojosý kompenzátor	Přesnost 0,015°; Rozsah ± 5°
Výškový senzor	Prostřednictvím elektronického barometru mohou být výšky vzhledem k pevnému bodu určeny a přidány do skenu
Kompas	Elektronický kompas poskytuje orientaci skenu

Tab. 5.9. Technické údaje skeneru FARO Focus 3D (sestaveno podle: [2])

6. VLÍCOVACÍ BODY

Vlícovací body slouží pro převod naskenovaného mračka bodů do geodetického souřadnicového systému. Jako vlícovací body se u metody laserového skenování používají umělé referenční objekty, jako jsou koule a papírové šachovnicové terče. Dále se u laserového skenování používají **navazovací body**, které spojují více skenů dohromady. Každý sken, který je pořízen z odlišného stanoviska, má vlastní souřadnicový systém. Proto se provádí transformace dat, pořízených z jednotlivých stanovisek, do jediného souřadnicového systému a tento proces se nazývá **registrace**. Jako navazovací body lze též použít šachovnicové terče a koule, ale také i přírodní cíle, jako jsou roviny, stěny, rohy atd.



Obr. 6.1. Příklady umělých cílů [2]

6.1. Obecné požadavky

- Z matematického hlediska je potřeba mít tři odpovídající si reference v obou skenech, aby bylo možné tyto skeny spojit. Údaje o sklonu pořízené vestavěným duálním kompenzátorem mohou sloužit i jako jedna reference tak, aby mohly být požadovány pouze dvě další externí reference. Také větší počet referencí použitých při skenování může zlepšit výsledky registrace. Registrace, tak může být jednodušší a méně náchylná k chybám.
- Jako umělé cíle by se měly používat šachovnicové terče nebo referenční koule.
- Je potřeba používat cíle s nereflexním povrchem.
- Šachovnicové terče je nutné tisknout na papír pouze z laserové tiskárny.
- Reference by měly být snadno a jasně viditelné ve skenech.
- Cíle by neměly být rozmístěny symetricky. Měly by tvořit polygon kolem skeneru a měly by mít různé vzdálenosti od skeneru. Umísťují se do oblasti skenování v různých výškách, vzdálenostech a rovinách. Je potřeba se vyhnout umístění cílů do přímé linie.
- Pokud referenční objekty nemohou být umístěny v přiměřené vzdálenosti od skeneru, zvýší se rozlišení skenování nebo velikost těchto cílů.
- Cíle se nepokládají do těsné blízkosti dalšího cíle. Vzdálenost mezi umělými cíli by neměla být menší než 1 m.
- Je nutné se ujistit, že cíle budou vidět na více než jednom skenu. [2]

6.2. Šachovnicové terče

- Úhel dopadu mezi laserovým paprskem a terčem by neměl být menší než 45° .
- V závislosti na zvoleném rozlišení skenování, může být detekce terčů na skenu, kterou provádí program SCENE, nespolehlivá při určitých vzdálenostech od skeneru. Např. při použití A4 šachovnicového terče a skenování s rozlišením 1/4, by neměla být vzdálenost ke skeneru větší než 15 m. Větší vzdálenosti lze snadno dosáhnout zvětšením velikosti cíle nebo skenováním s vyšším rozlišením.
- Šachovnicové terče by neměly být otočeny o 45° ve vztahu k ose skeneru.
- Je potřeba mít dostatečné množství skenovaných bodů na šachovnicovém terči, nejméně čtyři nebo i více skenovaných bodů na kvadrant.
- Šachovnicové terče by neměly být připojeny k zakřivené ploše. [2]

6.3. Referenční koule

- Referenční koule by měly být při skenování zcela viditelné.
- V závislosti na zvoleném rozlišení skenování, může být detekce koulí na skenu, kterou provádí program SCENE, nespolehlivá při určitých vzdálenostech od skeneru. Např. při skenování s rozlišením 1/4 a použití koule o průměru 145 mm, by neměla být vzdálenost od skeneru větší než 18 m. Pokud je použita větší koule, např. koule o průměru 200 mm, vzdálenost od skeneru může být prodloužena na 45 m.
- Koule by měla mít na svém povrchu minimálně 60 skenovaných bodů. [2]

7. PRÁCE S PROGRAMEM SCENE

Program SCENE umožňuje zpracování dat získaných pozemním laserovým skenováním. V této kapitole je popsána práce v programu SCENE. Nejprve import, poté načtení skenů a s tím související druhy zobrazení dat. Dále je uvedeno automatické a manuální vyhledávání objektů. Na konci této kapitoly jsou rozebrány tři základní typy geometrických objektů používaných při registraci.

7.1. Vytvoření nového projektu

Úplně na samém začátku je potřeba v programu SCENE založit nový projekt, ve kterém bude dále zpracovááno mračno bodů.

Existují různé způsoby, jak vytvořit nový projekt:

- ve standardním panelu nástrojů pomocí ikony **File – New – Project**
- nebo přímo ikonou pro vytvoření nového projektu

7.2. Import skenů

Laserový skener FARO Focus3D ukládá skeny na SD kartu. Zpočátku generuje několik souborů pro jeden sken a všechny je ukládá do jedné složky na SD kartě. Tato složka je pojmenována podle názvu, který zvolí operátor. Během procesu importu, do programu SCENE, jsou všechny soubory z této složky sloučeny do jednoho souboru, který má formát fls. [3]

Skeny lze importovat automaticky nebo manuálně.



Automatický import:

1. Po spuštění programu SCENE je SD karta vložena do slotu pro paměťové karty v počítači nebo do připojeného adaptéru na paměťové karty.
2. SD karta je programem SCENE automaticky rozpoznána a je vznesen dotaz, zda mají být skeny importovány nebo ne. Potvrzením je spuštěn přenos a proces importu skenů. [3]

Manuální import:

- Příslušná složka se skeny je přetažena z SD karty do aktuálně otevřeného prostoru programu SCENE.
- Nebo pomocí ikony **File - Import:** z příslušné složky je vybrán požadovaný soubor, který má příponu fls. [3]

7.3. Načtení skenů

Aby mohl být sken dále zpracováván, je potřeba ho nejprve načíst a až poté může být zobrazen i v pracovním prostoru. Načtení se provede kliknutím pravého tlačítka myši na příslušný sken a z místní nabídky se vybere funkce **Loaded**. Pokud je sken vložen v plné velikosti, je označen tímto symbolem , pokud je vložen ve zmenšené velikosti, je označen takto . [3]

7.4. Zobrazení dat

Jak je uvedeno v manuálu programu SCENE [3], existují různé pohledy k zobrazení a prozkoumávání skenů a mračen bodů.

- **Quick View** – je standardní pohled prohlížení jednotlivých skenů. U tohoto zobrazení nemusí být skeny načteny. Quick view je k dispozici během několika sekund a mezitím jsou data načtena na pozadí. Se skenovanými body lze manipulovat, jakmile je načtení dat na pozadí dokončeno.
- **Planar View** - umožňuje prohlížení jednotlivých skenů. U tohoto zobrazení musí být skeny načteny a v případě potřeby se to stane automaticky.
- **3D View** - 3D zobrazení není omezeno na zobrazení skenovaných bodů z jednoho skenu, nabízí také kombinované zobrazení všech skenů a objektů v projektu nebo pracovním prostoru.
- **Overview Map** - s overview map lze dostat půdorys celého projektu skenování. Overview map je k dispozici pouze tehdy, pokud je k dispozici WebShare údaj z projektu.

V závislosti na druhu pohledu může být výběr pozice pozorování omezen. U zobrazení quick view a planar view se nelze volně pohybovat po skenu, jako by se mohl pohybovat pozorovatel, ale pozorování je možné pouze z pozice skeneru. U 3D zobrazení není žádné omezení, lze se tedy volně pohybovat po skenu. Zorné pole a měřítko jsou volně nastavitelné u všech typů zobrazení.

7.4.1. Quick view



Obr. 7.1. Zobrazení Quick view

Quick view zobrazuje obsah jednoho skenu, spouští se dvojitým kliknutím na sken nebo v panelu struktury pomocí příkazu **View - Quick View** v kontextovém menu skenu. Quick view je standardní zobrazení a skenované body, které budou zobrazovány, nemusí být načteny. [3]

Omezení, která platí pro zobrazení Quick view:

- Skenovaná oblast je vždy pozorována z pozice skeneru a tuto pozici nelze opustit. Nicméně, je možné změnit zorné pole a měřítko.
- Zorné pole nesmí překročit 180°. [3]

7.4.2. Planar view



Obr. 7.2. Zobrazení Planar view

Celá tato kapitola je zpracována podle manuálu k programu SCENE [3], kde je uvedeno, že zobrazení planar view stejně jako zobrazení quick view, zobrazí pouze obsah jednoho skenu. Planar view se spustí příkazem **View – Planar View** v kontextovém menu

skenu. Na první pohled může zobrazení planar view vypadat velmi zvláštně. U zobrazení planar view program SCENE používá pro zobrazení dat stejnou techniku, jako se používá pro zobrazování zemského povrchu na mapě, kde se oblast kolem pólů zvětší a trasa letu mezi dvěma vzdálenými městy není rovná, ale ohnutá.

Zobrazení planar view je užitečné, protože u některých skenerů, je to nejpřirozenější formát zobrazení skenovaných bodů. Mnoho skenerů zpracovává horizontální a vertikální úhly krok za krokem, proto je to praktické zobrazení skenovaných bodů uspořádaných do sloupců a řádků.

Pohled začíná u levého okraje prvním zaznamenaným sloupcem. V místním souřadnicovém systému skeneru má tento sloupec obvykle horizontální úhel 0° . Následující sloupce jsou na pravé straně s rostoucím vodorovným úhlem, až je dosaženo obvodového skenování 360° . V horním řádku se zobrazí skenované body s největším vertikálním úhlem, například dosažení zenitu $+90^\circ$, který je přímo nad skenerem. Od shora dolů vertikální úhel klesá, v horizontální linii dosáhne 0° a pak se změní na zápornou hodnotu. Nejmenší možný vertikální úhel -90° .

Stejně jako v zobrazení quick view, je možné skenovanou oblast zobrazit jen z pozice skeneru a tuto pozici nelze opustit. Nicméně, je možné změnit zorné pole a měřítko.

7.4.3. 3D view



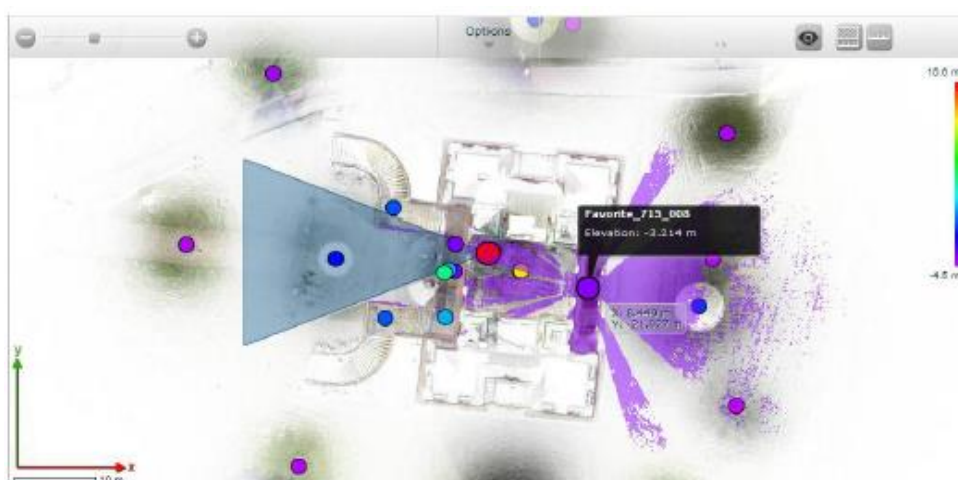
Obr. 7.3. Zobrazení 3D view

Tato kapitola je také popsána na základě informací z manuálu [3]. S 3D zobrazením lze nejnadhěji dosáhnout srozumitelného pohledu na skenované body a CAD modely. 3D zobrazení je normálně nastaveno v zorném poli, takže vyvolává dojem blízký realitě. Na rozdíl od zobrazení quick view a planar view je v 3D pohledu omezena manipulace a analýza se skenovanými body.


Spuštění 3D pohledu jednoho skenu se provede opět pomocí příkazu **View- 3D View** v kontextovém menu skenu. Lze také otevřít 3D zobrazení pro všechny skeny uložené ve složce pomocí příkazu **View- 3D View** v kontextovém menu složky.

Za normálních okolností 3D pohled zobrazuje skenované body a objekty ve správném zorném poli, jinými slovy, objekty stejné velikosti jsou menší s rostoucí vzdáleností. Je možné také změnit pohled na ortografickou projekci. Poté se vždy objekty stejné velikosti zobrazí stejnou velikostí, bez ohledu na to, jak daleko jsou. Tento typ reprezentace je běžný v mnoha CAD systémech. Lze přepínat mezi těmito dvěma způsoby v kontextovém menu 3D zobrazení pod ikonou **Camera** nebo v nastavení viditelnosti.

7.4.4. Overview Map



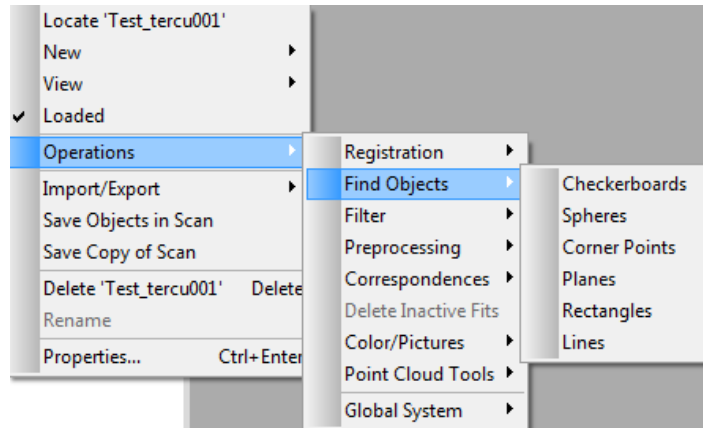
Obr. 7.4. Overview map [3]

Program SCENE umožňuje zobrazit přehledovou mapu kompletního projektu, která pomáhá orientaci v projektu. Přehledová mapa se aktivuje tímto tlačítkem  v panelu nástrojů a je k dispozici v programu SCENE pouze pokud jsou k dispozici WebShare data z projektu. To znamená, že musí být vyhotoven export WebShare dat z projektu, aby byl přístup k mapce. [3]

7.5. Vyhledávání objektů

7.5.1. Automatické vyhledávání

Program SCENE umožňuje automatické vyhledávání určitých typů objektů buď z kompletního skenu, nebo pouze z výběru skenovaných bodů. Před zahájením úkonu je třeba vybrat příslušný typ objektu v kontextovém menu skenu pod příkazem **Operations - Find Objects**, nebo v kontextovém menu skenu výběrem funkce **Find Objects**.



Obr. 7.5. Vyhledávání objektů

Automaticky lze vyhledat tyto objekty: šachovnicové terče, koule, rohové body, roviny, obdélníky a přímky.

Tato funkce šetří čas a úsilí oproti manuálnímu vyhledání, kde je nezbytné tyto referenční objekty nejprve vytvořit. Nejlepší výsledky přináší automatická detekce šachovnicových terčů, rohových bodů, linií a obdélníků pokud jsou pořízená data načtena v původních šedých hodnotách. [3]

7.5.2. Manuální vyhledávání

Manuální vyhledávání a vytváření objektů je popsáno tak, jak je uvedeno v manuálu [3]. Program SCENE podporuje vytváření a přichycování různých jednoduchých geometrických objektů jako jsou body, roviny, koule, trubky nebo linie.

Vytvoření geometrických objektů je důležité zejména pro registraci, protože po vytvoření mohou být použity jako referenční objekty. Takže ve většině případů je vytváření takovýchto referenčních objektů zásadním krokem zpracování projektu.





Pomocí panelu nástrojů **object marker** jde rychle ze skenovaných bodů vytvářet jisté geometrické objekty. Postup vytvoření objektů je následující:



1. Z panelu nástrojů **object marker** je třeba zvolit typ objektu, který má být vytvořen.



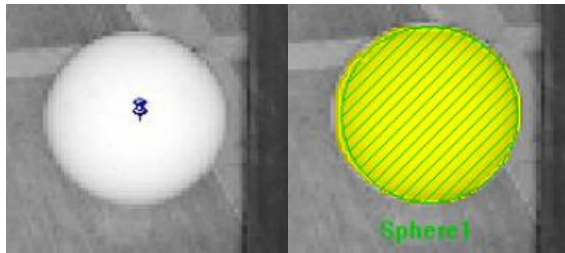
Obr. 7.6. Panel Object marker

K dispozici jsou následující geometrické objekty:

- kontrastní body (kruhové cíle) 
- šachovnicový terč 
- koule 
- rovina 

- deska 
- skenovaný bod 

2. Po zvolení typu objektu se označí odpovídající skenovaný bod v zobrazení planar nebo quick view. Dále se automaticky vytvoří výběr zbývajících bodů na daném objektu, který začíná od označeného skenovaného bodu a rozšiřuje se do okolních skenovaných bodů. Nakonec se vytvoří zvolený geometrický objekt.



Obr. 7.7. Označení a přichycení koule [3]

Nalezené objekty se ukládají do složky **AutoFeatures**, která se objeví v panelu struktury jako podsložka skenu. Každý typ objektu má vlastní dílčí složku v rámci složky AutoFeatures.

7.5.3. Přichycení objektu

Jestliže geometrický objekt má aktivní přichycení objektu, pak je celková kvalita přichycení symbolizována těmito barvami [3]:

Zelená: splněna jsou všechna jednotlivá kritéria kvality

Žlutá: alespoň jedno kritérium kvality je poněkud narušeno

Červená: alespoň jedno kritérium přichycení je vážně ohroženo

Objekty se po vyhodnocení zobrazí příslušnou barvou, jako je tomu v obr. 7.8.



Obr. 7.8. Výsledky vyhledání a přichycení objektů

7.6. Základní geometrické typy objektů

7.6.1. Šachovnicový terč

Nejčastěji používaným typem geometrického objektu je papírový šachovnicový terč. Bodem přichycení je střed tohoto terče, který se používá pro registraci.

7.6.2. Koule

Jak je uvedeno v [3], další obzvláště důležitý geometrický objekt je koule. Koule je určena svou polohou, poloměrem a hlavním bodem, který se používá pro registraci.

Existují 2 typy přichycení:

- **Přichycení s volným poloměrem:**

Kromě polohy, je poloměr koule rovněž vypočten ze skenovaných bodů. Používá se příkaz **Create Objects – Sphere**.

- **Přichycení s přednastaveným poloměrem:**

Tento typ přichycení je obzvláště vhodný pro zaměřovanou kouli, jejíž poloměr je předem znám. Pro vytvoření koule s přednastaveným poloměrem lze použít jednu z následujících možností:

- příkaz **Create Objects – Sphere Radius**
- vhodnou ikonu z panelu nástrojů **object marker**
- automatické rozpoznávání objektů: příslušný příkaz **Find Objects** v kontextovém menu skenu

Lze předdefinovat jeden nebo více poloměrů koulí v menu **Tools - Options - Matching - Match Sphere Settings**.

7.6.3. Roviny

V programu SCENE existují dva typy rovin [3]:

- **nekonečné roviny** jako idealizované roviny, které jsou nekonečně velké a nemají hranice
- **omezené roviny** jako roviny s definovanou hranicí

Roviny mohou být použity pro registraci pomocí stěn, podlah a stropů. Dva skeny s rovinnými objekty, které lemují stejnou stranu zdi, mohou být přiřazeny k sobě navzájem. Pro přiřazení dvou skenů pomocí opačných stran stěny, musí být použit objekt deska místo objektu rovina.

Nekonečné roviny mohou být vytvořeny z výběru bodů v zobrazení planar view, quick view nebo 3D pohledu. Má-li být v pohledu vytvořena nekonečná rovina je potřeba vybrat příkaz **Create Objects - Plane** v kontextovém menu výběru.

Existuje několik způsobů, jak vytvořit **omezené roviny**:

- manuálně příkazem **Create Objects - Expand Plane** v kontextovém menu výběru bodů v zobrazení planar view nebo quick view
- automaticky příkazem **Find Objects - Planes** v kontextovém menu výběru bodů v zobrazení planar view nebo quick view
- ikonou pro roviny z panelu nástrojů **object marker**
- z nekonečné roviny příkazem **New - Plane with Border** z kontextového menu nekonečné roviny

Automaticky detekované roviny jsou hodnoceny podle kvality jejich uložení. Nejlepší roviny se uloží do podadresáře **Category1** v panelu struktura. Všechny ostatní roviny se ukládají do podadresáře **Category2**. Počet vytvořených rovin v kategorii 1 je omezen na 15. Roviny, které patří do kategorie 1, jsou použity pro registraci a roviny z kategorie 2 jsou ignorovány. Roviny je možné ručně přesouvat ze složky Category1 do složky Category 2 nebo naopak.

Kromě toho jsou automaticky vytvořené roviny rozděleny do kategorií podle jejich plochy:

- malé $< 1 \text{ m}^2$
- střední $\geq 1 \text{ m}^2 \leq 10 \text{ m}^2$
- velké $> 10 \text{ m}^2$

7.7. Export objektů

Aby bylo možné používat body, roviny, trubky a koule v CAD systémech, je třeba tyto objekty exportovat v různých formátech jako soubor a ten pak importovat do CAD systému. [3]

Export bodů, rovin, trubek a koulí ze skenu se provede po otevření kontextového menu skenu výběrem příkazu **Import / Export - Export Objects**. Mají-li být exportovány objekty všech skenů ze složky skenu, je potřeba otevřít kontextové menu složky skenu a vybrat příkaz odtamtud. [3]

Formát - K dispozici jsou následující formáty: DXF, IGES a VRML. V závislosti na zvoleném formátu se provádí další nastavení na samostatné kartě. [3]

8. OVĚŘENÍ DOPORUČENÉ MAXIMÁLNÍ VZDÁLENOSTI

Cílem tohoto testování bylo zjistit, na jakou vzdálenost je možné automaticky případně manuálně vyhledat umělé cíle na skenu. Výrobce udává, že při rozlišení skenování 1/4 a velikosti šachovnicového terče na formát papíru A4 by neměla být vzdálenost terčů od skeneru větší než 15 m. Další požadavek je takový, že v každém kvadrantu šachovnicového terče je potřeba mít alespoň 4 body. Pro referenční koule o průměru 145 mm, při nastaveném rozlišení skenování 1/4 výrobce udává, že by vzdálenost neměla být větší než 18 m. Tyto požadavky jsou převzaty z kapitoly 6.2. a 6.3. této práce.

8.1. Výpočet maximální vzdálenosti pro terč

Výše uvedené vzdálenosti se zdály být poněkud malé, proto bylo provedeno testování. Teoretickým výpočtem se ověřovala pouze vzdálenost 15 m pro šachovnicové terče, protože provést teoretický výpočet pro koule by bylo docela náročné. Šachovnicové terče použité jako vlíčovací body mají v praxi větší uplatnění oproti koulím. Jednak si jich lze vytisknout neomezené množství a jednak se na rozdíl od koulí dají zaměřit běžnou geodetickou metodou, protože střed terče je pozorovatelný, je dán bodem dotyku všech čtyř kvadrantů.

Před samotným testováním byla vypracována teoretická příprava. Cílem této přípravy bylo zjistit, při jaké vzdálenosti nebude splněna podmínka počtu 4 bodů na kvadrant šachovnicového terče. Z toho tedy vyplývá, že nebude možné terč na skenu nalézt a ani určit jeho souřadnice. Velikost použitého terče je 15 x 15 cm, kdy jeden kvadrant má velikost strany 75 mm.

Rozsah skenování	Celkový počet bodů na 360°	Rozlišení skenování	Strana kvadrantu šachovnicového terče
360°	40 960	1/1	75 mm

Obr. 8.1. Základní údaje pro výpočet

Pro výpočet byla strana čtverce zmenšena o 6 mm, z důvodu, že se předpokládal špatný odraz paprsku na okrajích kvadrantu. Následoval výpočet kroku vysílání paprsku jako podíl rozsahu celého kruhu k celkovému počtu bodů pro rozlišení 1/1. Z toho byl vypočten krok pro rozlišení 1/4. Dále byly zvoleny vzdálenosti pro výpočet od 15 m do 30 m. Pro vybrané vzdálenosti byla pomocí obloukové míry vypočtena mezera mezi sousedními body, která se zvětšuje s narůstající vzdáleností a tím se zmenšuje počet bodů na přímce. Z délky strany kvadrantu a vzdálenosti mezer byl určen počet bodů na přímce a vypočtena pravděpodobnost výskytu daného počtu bodů.

- *Výpočet pravděpodobnosti výskytu daného počtu bodů*

$$P(n) = \frac{(m - (s - n \cdot m))}{m} \cdot 100$$

P(n) – pravděpodobnost výskytu daného počtu bodů na přímce v %

n – počet bodů na přímce

m – velikost mezery

s – velikost strany kvadrantu 69 mm

vzdálenost [m]	mezera [mm]	n	P(n) [%]
15	9,2	7	50
18	11,0	6	75
21	12,9	5	65
24	14,7	4	31
27	16,6	4	84
28	17,2	4	98
29	17,8	3	12
30	18,4	3	25

Obr. 8.2. Výpočet maximální vzdálenosti v závislosti na počtu bodů

Závěr:

Z výpočtu bylo zjištěno, že při rozlišení 1/4 nebude možné šachovnicové terče rozeznat ze vzdáleností větších jak 28 m.

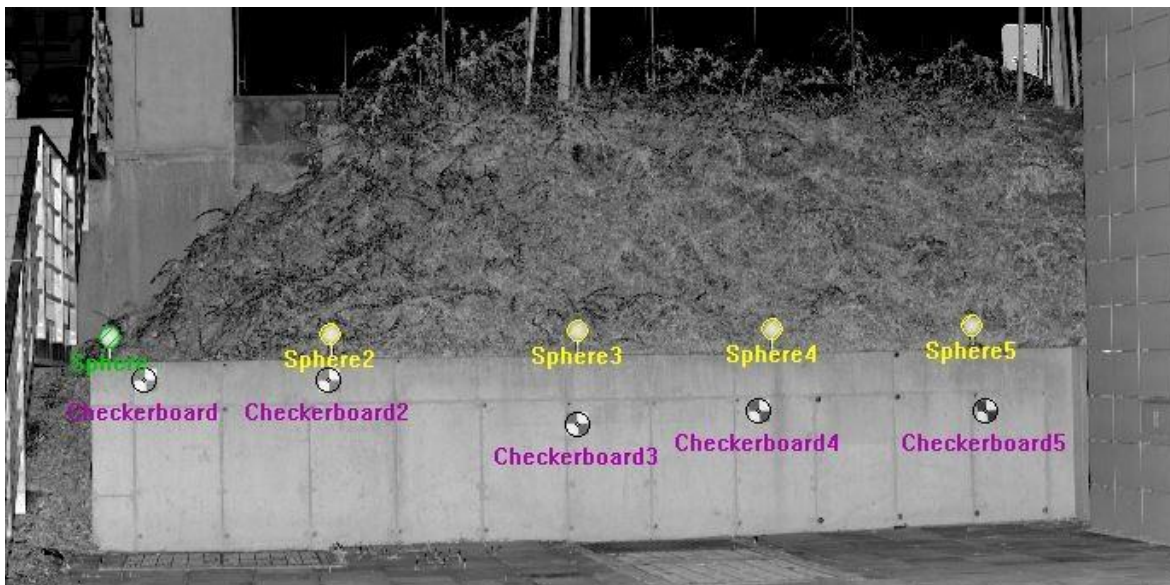
8.2. Praktické ověření maximální vzdálenosti

Na základě zjištěných výsledků z přípravy bylo provedeno skenování v areálu Fakulty stavební VUT v Brně. Jako objekt byla vybrána betonová opěrná zeď, na kterou bylo přibližně po jednom metru umístěno 5 referenčních koulí a 5 šachovnicových terčů.

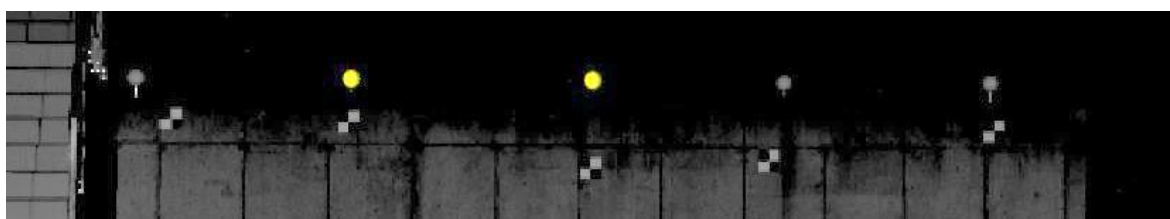


Obr. 8.3. Rozmístění umělých cílů na opěrné zdi

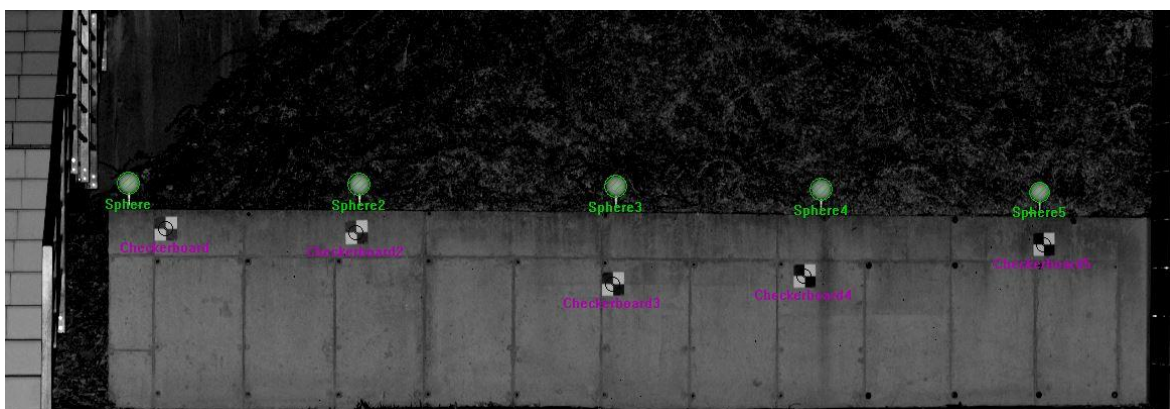
Skenování proběhlo ve vzdálenostech od 15 do 30 m s rozstupem stanovisek tři metry. Rozlišení skenování bylo použito 1/5, 1/4 a 1/2. Kvalita skenování, což je počet opakování měření, byla nastavena na hodnotu 4 a pro vzdálenost 30 m i na hodnotu 1.



Obr. 8.4. Výsledek vyhledání cílů na vzdálenost 15 m u rozlišení 1/5



Obr. 8.5. Výsledek vyhledání cílů na vzdálenost 30 m u rozlišení 1/4



Obr. 8.6. Výsledek vyhledání cílů na vzdálenost 30 m u rozlišení 1/2

V následující tabulce jsou zpracovány výsledky skenování. Barvy byly zvoleny stejně, jako je určil program SCENE. V tabulce jsou barevně a bez poznámky označeny cíle, které byly na skenu vyhledány programem SCENE automaticky. Umělé cíle určené manuálně mají poznámku. Bílou barvou, jsou označeny cíle, které nebylo možné rozlišit automaticky ani manuálně.

vzd.[m]	rozl.	kvalita	Referenční koule					Šachovnicové terče				
15	1/5	4										
18	1/5	4										
21	1/5	4	MN									
18	1/4	4					M					
21	1/4	4			M							
24	1/4	4					MN	nejsou na skenu				
27	1/4	4					MN					
30	1/4	4										
30	1/2	4										
30	1/2	1										

Tab. 8.1. Výsledky skenování

MN – manuálně nelze rozlišit (nedostatečný počet bodů na kouli)

M – manuálně lze rozlišit

Vysvětlení barev, které určil program SCENE:

Zelená: splněna jsou všechna jednotlivá kritéria kvality

Žlutá: alespoň jedno kritérium kvality je poněkud narušeno

Závěr:

Ze skenování byl potvrzen teoretický předpoklad, že nebude možné terče rozeznat ze vzdáleností od skeneru větších jak 28 m. Na vzdálenost 27 m byly rozpoznány čtyři terče z pěti a na vzdálenost 30 m už nebylo možné rozeznat žádný terč. Z praktického měření tedy bylo zjištěno, že změna opravdu nastala mezi vzdálenostmi 27 a 30 m, pravděpodobně na vypočtených 28 m. Tato změna neměla lineární charakter, že by rovnoměrně ubýval počet nalezených terčů, ale projevila se jako přímý skok.

Dosah, který je limitující pro nalezení šachovnicových terčů při skenování s rozlišením 1/4 je téměř dvojnásobný od dosahu, který udává výrobce.

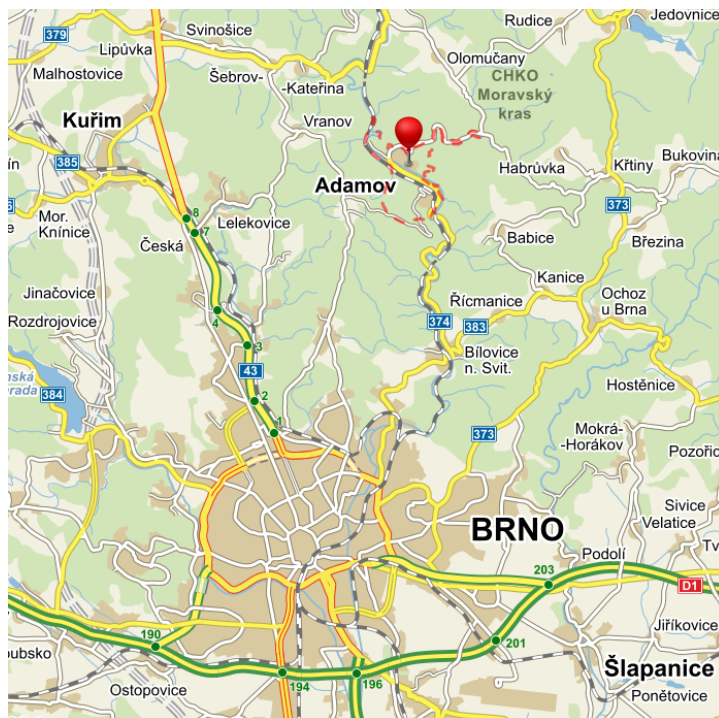
Pro koule o poloměru 145 mm uvádí výrobce dosah 18 m. Po provedení praktického skenování s rozlišením 1/4 a vyhodnocení bylo na tuto vzdálenost určeno všech 5 koulí s nižší kvalitou. Pro vzdálenost 30 m byly určeny dvě koule z pěti také s nižší kvalitou. Zjištěny byly tedy opět lepší výsledky, než uvádí výrobce.

Nakonec byla provedena ještě další dvě skenování ze vzdálenosti 30 m s rozlišením 1/2 a nastavenými kvalitami 4 a 1. Výsledky byly shodné, všech 10 geometrických objektů bylo rozpoznáno a koule byly určeny s nejlepší kvalitou. Lze vyvodit závěr, že i na vzdálenost 30 m s vysokým rozlišením a nízkou kvalitou, lze bez problémů skenovat a je možné dosáhnout kvalitních výsledků.

9. ZJIŠTĚNÍ PŘESNOSTI URČENÍ SOUŘADNIC X, Y, Z SKENOVÁNÍM TERČŮ NA ZÁRUBNÍ ZDI

9.1. Vlakové nádraží Adamov

Město Adamov leží v Jihomoravském kraji v okrese Blansko a nachází se přibližně 12 km severně od města Brna. Tímto městem protéká řeka Svitava a východním směrem se rozprostírá Chráněná krajinná oblast Moravský kras.



Obr. 9.1. Město Adamov [6]

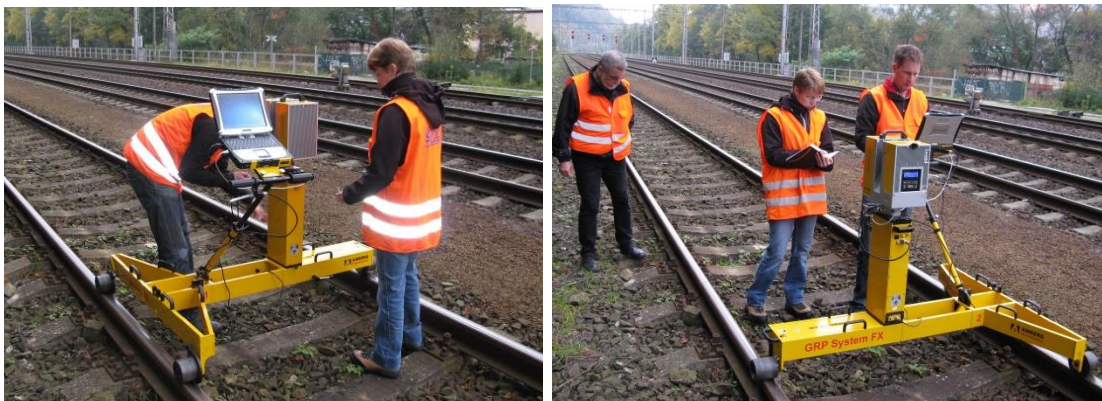
Na železniční stanici Adamov probíhalo geodetické měření a pozemní laserové skenování. Předmětem tohoto měření bylo zaměření šachovnicových terčů signalizovaných na zárubní zdi, která se nacházela podél kolejiště asi 250 m severním směrem od železniční stanice.

9.2. Měření a zpracování dat

Amberg GRP System FX je měřický vozík od švýcarské firmy Amberg. Používá se v železniční geodezii pro získání přesné geometrie koleje. Verze GRP 5000 je vybavena vysokorychlostním kinematickým skenovacím systémem začleněným v profiloměru označovaném Amberg Profiler 5002. Z měřeného staničení a výškového úhlu se vypočtou souřadnice X a Z, ze kterých lze dále určit rozchod a převýšení koleje. [4] Celé zařízení se označuje jako MMS (malý měřicí systém).

České dráhy zakoupily tento typ měřického vozíku a požadovaly jeho ověření. Předmětem tedy bylo zjištění charakteristik přesnosti relativních souřadnic X a Z určené

tímto systémem. Na základě tohoto požadavku bylo provedeno geodetické měření a pozemní laserové skenování. Těchto měřických prací jsem se zúčastnila a zpracované výsledky z obou měření mi sloužily pro další zpracování, které se zabývalo ověřováním přesnosti pozemního laserového skenování.

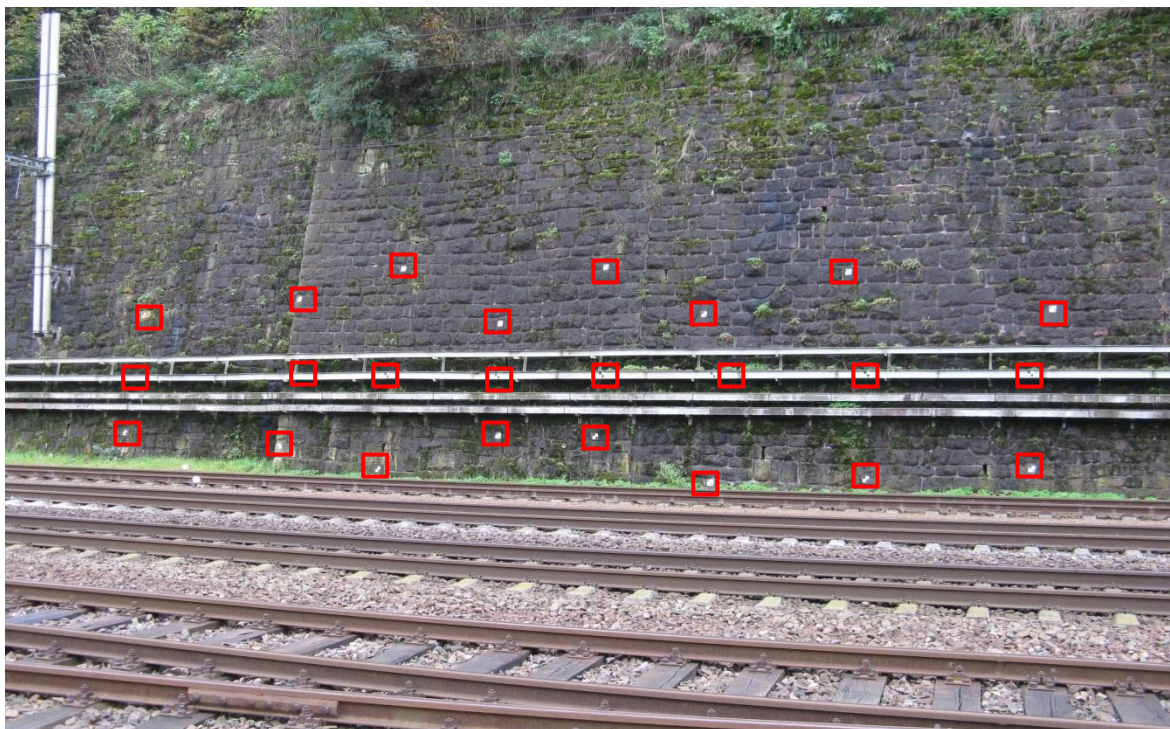


Obr. 9.2. Měřický vozík Amberg GRP System FX

Před začátkem měření bylo na zárubní zeď umístěno celkem 36 šachovnicových terčů. Geodetické měření bylo provedeno totální stanicí Topcon GPT 2006, která umožňuje měření vzdálenosti bezhranolovým způsobem. Zaměřován byl střed šachovnicového terče ve dvou polohách dalekohledu. Současně probíhalo i pozemní laserové skenování realizované skenerem FARO Focus 3D. Skenování bylo uskutečněno s rozlišením 1/2 a kvalitou 4. U obou metod bylo zaměření provedeno ze dvou pozic přístroje.



Obr. 9.3. Pozice totální stanice a skeneru



Obr. 9.4. 24 označených terčů rozmístěných na zárubní zdi



Obr. 9.5. Vyhledané terče v programu SCENE zobrazení planar view



Obr. 9.6. Vyhledaný terč v zobrazení planar view



Obr. 9.7. Vyhledané terče v programu SCENE zobrazení quick view

Prostorová poloha terčů byla určena v místním systému, dále označovaném jako **geodetický systém**, prostorovým protínáním vpřed z dat získaných totální stanicí. Mračno bodů pořízené skenováním bylo zpracováno programem SCENE. Terče byly na skenu vyhledány automaticky, některé byly určeny manuálně a některé se nepodařilo rozpoznat vůbec. Pravděpodobně z důvodu, že nebyly připevněny na dostatečně rovný povrch. V manuálu skeneru se totiž uvádí, že by terče neměly být připevněny k zakřivené ploše. A protože každý sken má vlastní souřadnicový systém, tak byly pro rozpoznané cíle určeny souřadnice zvlášť pro pravý a zvlášť pro levý sken.

Z důvodu, že každý sken a geodetické měření měli různě pootočené souřadnicové systémy s odlišným počátkem v prostoru, bylo potřeba provést transformaci místních souřadnicových systémů skeneru do místního geodetického systému, jehož osa y leží ve středu osy koleje a je orientovaná směrem do Brna, osa x je kolmo na ni ve směru na zárubní zeď a osa z je kolmá na rovinu xy a směřuje nahoru. Toto zpracování bylo vyhotoveno ve fotogrammetrickém programu ORPHEUS. Pro výpočet byla zvolena podobnostní transformace, která zachovává tvar a rozměr. Celá transformace měla dva kroky, nejprve bylo provedeno pootočení kolem osy z a potom pootočení v ose y. Pro výpočet transformace bylo použito 12 dvojic bodů zaměřených totální stanicí. Výsledkem tohoto zpracování bylo určení souřadnic terčů, původně získaných skenováním, v místním geodetickém systému.

9.3. Výpočet přesnosti v jednotlivých osách souřadnicového systému

Na základě obdržených podkladů byla zjišťována vnější přesnost určení relativních souřadnic pozemním laserovým skenováním. Obdržené podklady tvořily souřadnice terčů v místním geodetickém systému, určené dvěma metodami. Pro metodu laserového skenování to byly souřadnice terčů z pravého a z levého skenu.

Protože v manuálu skeneru není uvedena přesnost určení jednotlivých souřadnic, bylo rozhodnuto, že se provede testování a přesnost se zjistí. V této části zpracování je geodetická metoda považována za přesnou a souřadnice určené prostorovým protínáním vpřed jsou pokládány za pravé.

Geodetickým měřením byly určeny souřadnice celkem 36 terčů signalizovaných na zárubní zdi. Pořízeny byly dva skeny, pravý a levý. Každý obsahoval jiný počet vyhodnocených terčů. Toto vyhodnocení probíhalo v programu SCENE. Z pravého skenu bylo pro zpracování použito 23 terčů z 26 vyhodnocených a z levého skenu 30 terčů z 31 vyhodnocených. Celkem 19 terčů bylo vyhodnoceno, jak na pravém, tak i na levém skenu. Některé vyhodnocené terče nebyly pro zpracování použity vůbec z důvodu, že jejich odchylky alespoň v jedné ose byly větší než 1 cm. Pouze jeden bod (č. 35) nebyl vyhodnocen ani v jednom skenu.

Zpracování spočívalo v tom, že byly nejprve ze souřadnic vypočteny odchylky v jednotlivých osách geodetického systému, viz příloha č. 4. Dále byly pro každou osu ze souborů odchylek vypočteny střední hodnoty a směrodatné odchylky, výpočet těchto charakteristik byl uskutečněn pro oba skeny. Potom byla určována četnost odchylek v jednotlivých osách. Interval pro výpočet četnosti byl stanoven velikostí směrodatné odchylky. Použity byly tři intervaly, v jednonásobku, dvojnásobku a trojnásobku směrodatné odchylky. Na základě vypočtené četnosti byl vyhotoven histogram a poté byl vytvořen i graf normálního rozdělení s parametry střední hodnoty a směrodatné odchylky. Oba grafy byly zhotoveny pro všechny osy zvlášť, viz příloha č. 5. Pro celkový přehled byl také vyhotoven histogram a graf normálního rozdělení pro všechny tři osy dohromady, jak pro pravý, tak i pro levý sken.

Popsané výpočty byly provedeny podle následujících vzorců:

- **Výpočet odchylek**

$$\varepsilon_x = X_S - X_P, \varepsilon_y = Y_S - Y_P, \varepsilon_z = Z_S - Z_P,$$

kde

ε – odchylka

x, y, z – osy souřadnicového systému

X, Y, Z – souřadnice

X_S – dolní index S označuje bod určený skenováním (skutečná souřadnice)

X_P – dolní index P označuje bod určený protínáním vpřed (pravá souřadnice)

- **Výpočet středních hodnot (aritmetických průměrů)**

$$\mu_x = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{x_i}}{n}, \mu_y = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{y_i}}{n}, \mu_z = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_{z_i}}{n},$$

kde

μ – střední hodnota

n – počet hodnot základního souboru

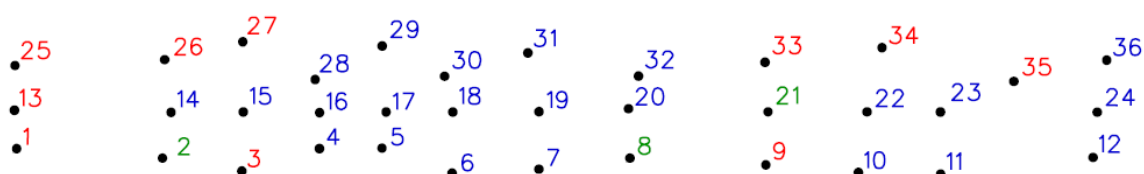
- **Výpočet směrodatných odchylek**

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{x_i} - \mu_x)^2}{n}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{y_i} - \mu_y)^2}{n}}, \sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_{z_i} - \mu_z)^2}{n}}$$

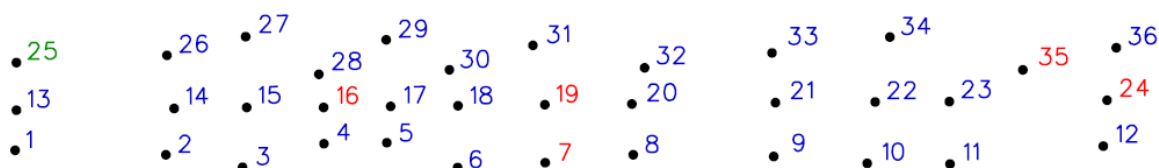
- **Výpočet hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení**

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

V následujících dvou obrázcích jsou zobrazeny zaměřené body, nejprve pro pravý sken a poté pro levý sken. Červeně jsou zakresleny body, které nebyly programem SCENE vyhodnoceny. Modře jsou body použité pro zpracování a zeleně jsou označeny body nepoužité při zpracování, protože alespoň jedna jejich odchylka byla větší než 1 cm.



Obr. 9.8. Přehled bodů pravého skenu



Obr. 9.9. Přehled bodů levého skenu

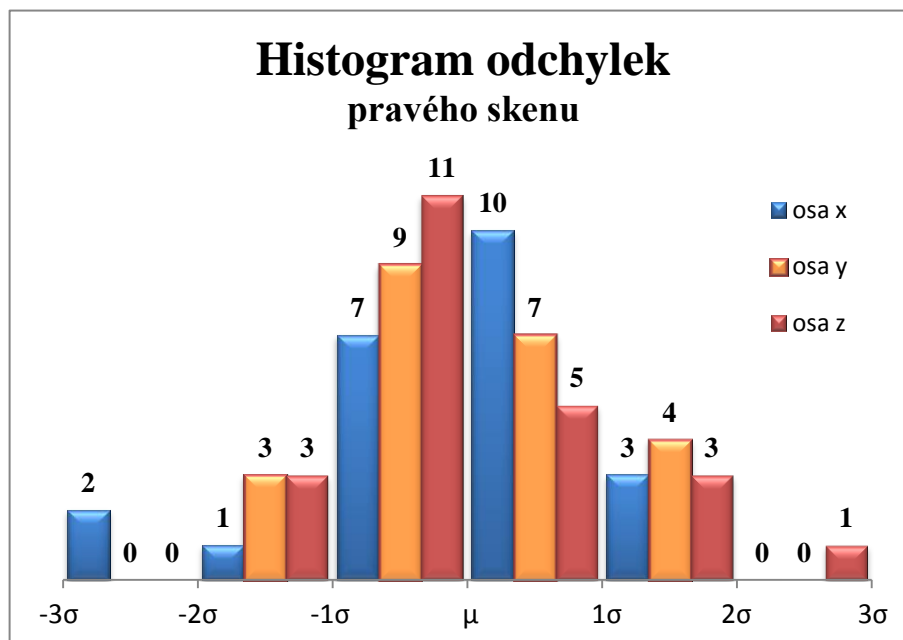
Pro posouzení výsledků byla ještě vypočtena mezera mezi sousedními skenovanými body pro rozlišení 1/2 a minimální vzdálenost terče od skeneru. Ze souřadnic bodů v systému skeneru byla vypočtena minimální vzdálenost 24 m, pro kterou byla následně pomocí obloukové míry vypočtena mezera mezi sousedními skenovanými body 7,4 mm.

V následující tabulce jsou pro oba skeny uvedeny vypočtené střední hodnoty a směrodatné odchylky v jednotlivých osách místního geodetického souřadnicového systému.

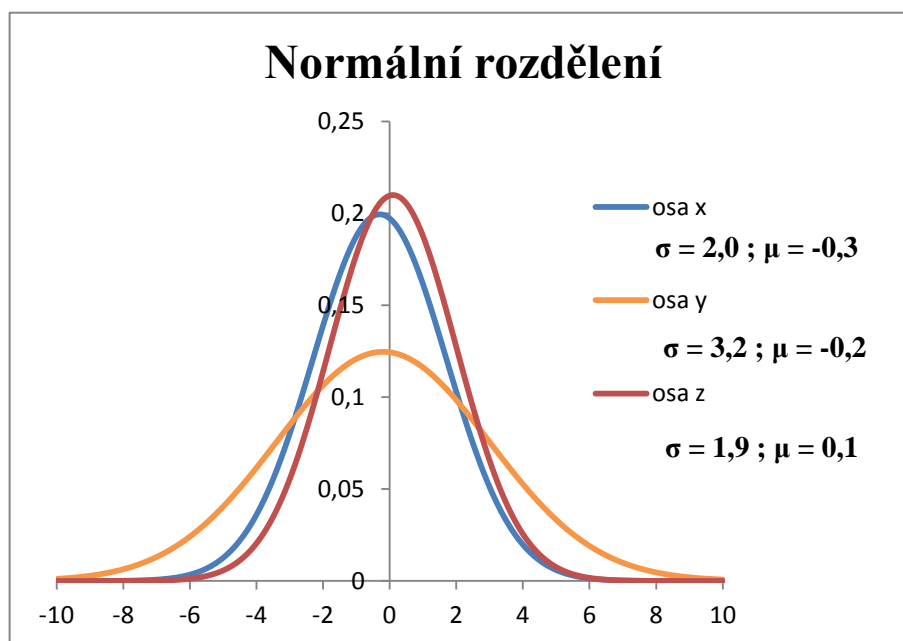
<i>Pravý sken</i>			<i>Levý sken</i>		
osa x	osa y	osa z	osa x	osa y	osa z
Střední hodnota [mm]					
-0,3	-0,2	0,1	0	0,1	0,4
Směrodatná odchylka [mm]					
2,0	3,2	1,9	1,3	2,9	1,7

Tab. 9.1. Střední hodnoty a směrodatné odchylky v osách x, y, z

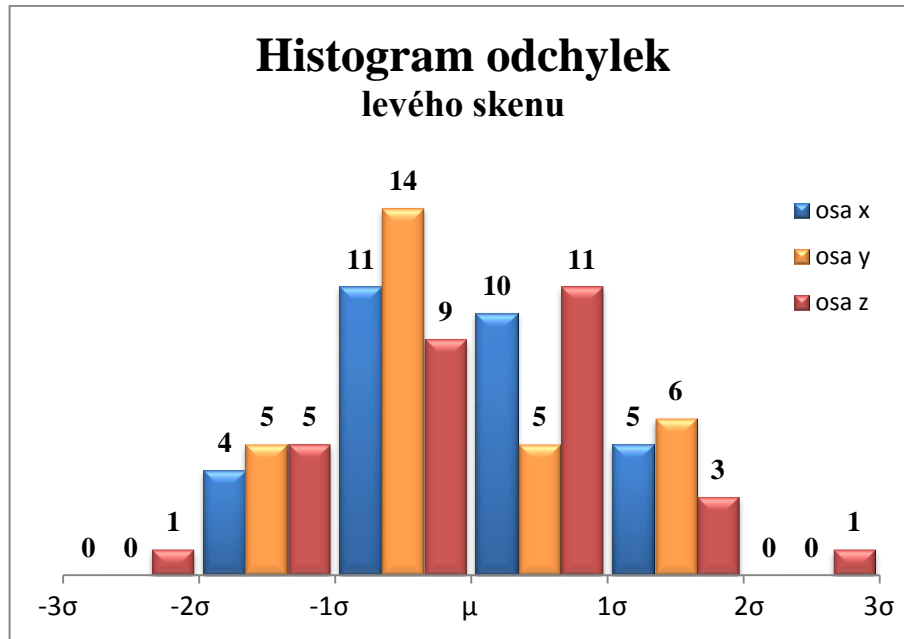
Z tabulky č. 9.1. je patné, že všechny směrodatné odchylky jsou menší, než je polovina mezery mezi sousedními skenovanými body, tedy jsou menší než 3,7 mm pro vzdálenost 24 m. Největší směrodatnou odchylku mají oba skeny v ose y. Tato osa v místním geodetickém systému leží ve středu osy koleje. U pravého skenu je nejmenší směrodatná odchylka v ose z, naopak v případě levého skenu je to směrodatná odchylka v ose x. Střední hodnoty se pohybují v intervalu od -0,3 mm do 0,4 mm. Z velikosti intervalu je patné, že žádný soubor odchylek není od nuly výrazně vychýlen. Jedná se tedy o náhodný soubor odchylek bez systematických chyb.



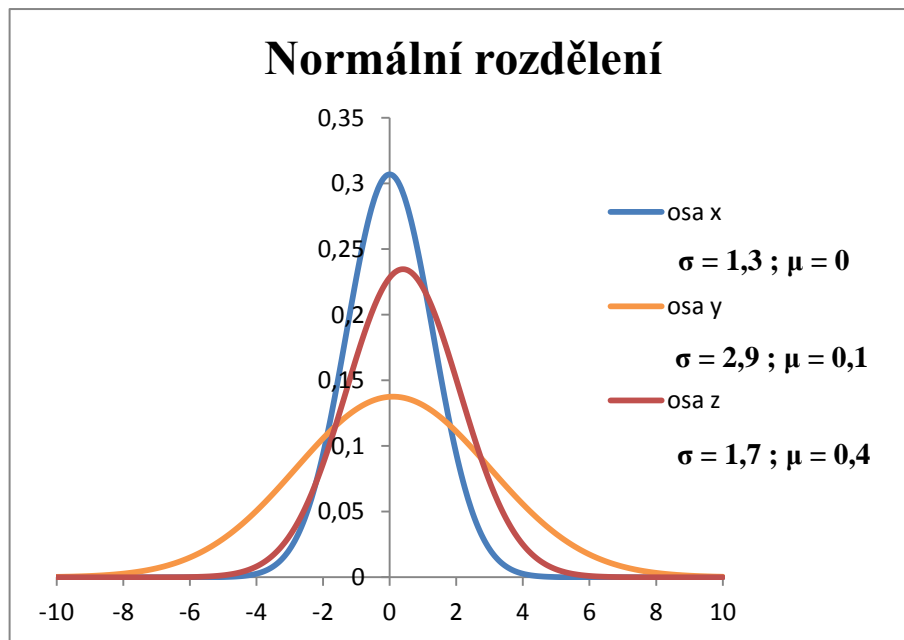
Graf 9.1. Histogram všech os pravého skenu



Graf 9.2. Normální rozdělení všech os pravého skenu



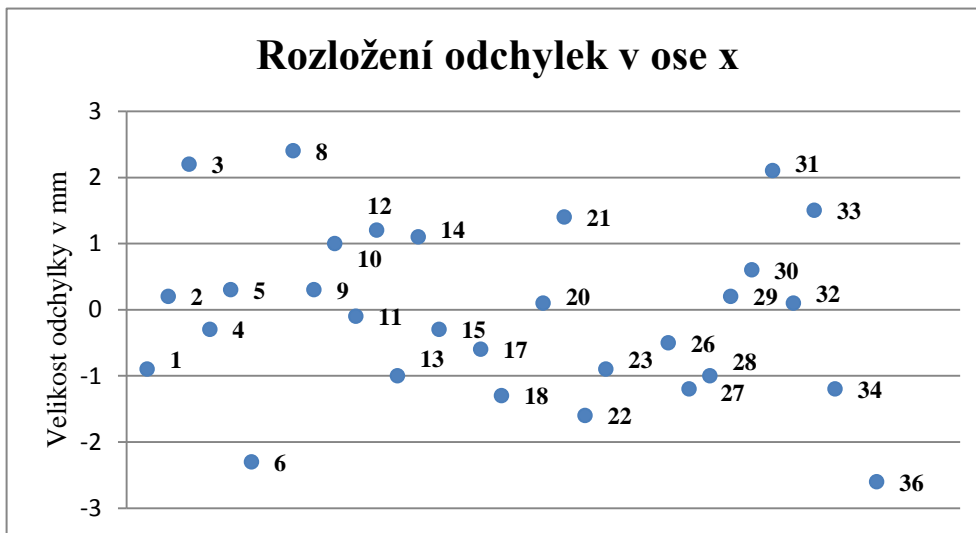
Graf 9.3. Histogram všech os levého skenu



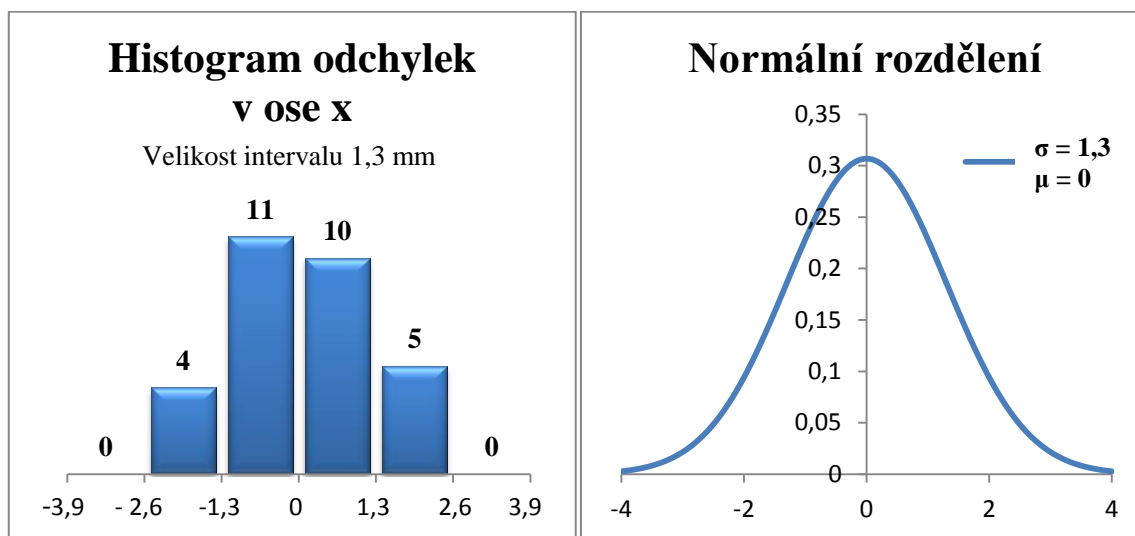
Graf 9.4. Normální rozdělení všech os pravého skenu

Z výsledků bylo zjištěno, že dané soubory odchylek mají normální rozdělení. Odchylky v těchto souborech jsou symetrické vzhledem ke střední hodnotě a malé odchylky jsou četnější než ty velké. Většina odchylek je v intervalu směrodatné odchylky a téměř všechny hodnoty odchylek jsou v intervalu do dvounásobku směrodatné odchylky vzhledem ke střední hodnotě. Z histogramu pravého skenu je patné, že pro osu y jsou všechny hodnoty odchylek do dvounásobku směrodatné odchylky. Z histogramu levého skenu je vidět, že jak pro osu x, tak i pro osu y jsou též všechny hodnoty odchylek do dvounásobku směrodatné odchylky.

V následujícím grafu jsou zobrazeny odchylky zjištěné v ose x jednotlivých bodů levého skenu. Body jsou uspořádány podle čísel od nejmenšího po největší, aby každý bod měl stejnou pozici v grafu. Zbývající grafy jsou uvedeny v příloze č. 6. a lze na nich pozorovat náhodné rozložení odchylek v jednotlivých osách a též pro každý bod si lze povšimnout proměnlivosti velikosti odchylky téhož bodu v jednotlivé ose.



Graf 9.5. Rozložení odchylek v ose x levého skenu



Graf 9.6. Histogram odchylek a graf normálního rozdělení osy x levého skenu

Nejlepší výsledky byly zjištěny pro osu x souřadnicového systému levého skenu. Střední hodnota je rovna nule a vypočtená směrodatná odchylka je 1,3 mm, což je nejmenší hodnota ze všech směrodatných odchylek. Z histogramu je vidět, že všechny odchylky jsou do dvounásobku směrodatné odchylky. Dále si lze povšimnout, že histogram téměř kopíruje tvar Gaussovy křivky. Z 30 hodnot odchylek je 15 záporných a 15 kladných a v každém odpovídajícím si intervalu je četnost odlišná pouze o jednu hodnotu. Takovéto rozložení odchylek není v žádné další ose splněno.

9.4. Fisherův test (F-test)

Protože byly vypočteny rozdílné směrodatné odchylky v odpovídajících si osách obou skenů a nebylo zřejmé, zda mohou být mezi sebou porovnávány, byl vyhotoven Fisherův test.

Zpracování bylo provedeno podle zdroje [5], kde je uveden postup výpočtu a vyhodnocení testu označovaného jako F-test neboli test dvou rozptylů. V F-testu se testuje nulová hypotéza: $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$. Základ tohoto testu tvoří dva výběrové soubory, které jsou předmětem srovnávání. Každý z těchto souborů musí mít normální rozdělení s parametry střední hodnoty a rozptylu. Máme tedy dva výběrové soubory 1 a 2, každý o různém počtu členů n základního souboru s odlišnými parametry μ_1, s_1^2 a μ_2, s_2^2 .

V prvním kroku se vypočtou výběrové rozptyly s_1^2, s_2^2 , pak se stanoví počet stupňů volnosti v pro oba soubory podle vzorce $v_i = n_i - 1$ pro $i = 1, 2$. Dále se vypočte testovací kritérium F dle vzorce:

$$F = \frac{\text{větší z rozptylů } (s_1^2, s_2^2)}{\text{menší z rozptylů } (s_1^2, s_2^2)}$$

Následně se zvolí hladina významnosti a ve statistických tabulkách pro F-test se vyhledá odpovídající kritická hodnota. $F_{krit.} = 1 - \frac{\alpha}{2}$ kvantil F rozdělení o stupních volnosti (v_1, v_2) .

Nakonec se vypočtená statistika F porovnává s tabulkovou kritickou hodnotou $F_{krit.}$:

- Je-li $F > F_{krit.}$ nulovou hypotézu $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ **zamítáme** a můžeme říci, že se rozptyly obou souborů statisticky **významně liší**.
- Je-li $F < F_{krit.}$ hypotézu H_0 **nezamítáme** a můžeme říci, že se rozptyly obou souborů statisticky **významně neliší**.

Na základě Fisherova testu byly vyhodnoceny výsledky skenování v Adamově. Základní soubory tvořily vypočtené odchylky v jednotlivých osách obou skenů. Předmětem vyhodnocení byly tedy osy x, y, z místního geodetického souřadnicového systému.

Pravý sken obsahuje v každé ose 23 hodnot ($n_1=23$) a počet stupňů volnosti je 22 ($v_1=22$). Levý sken obsahuje v každé ose 30 hodnot ($n_2=30$) a počet stupňů volnosti je 29 ($v_2=29$). Hladina významnosti byla zvolena 5 % ($\alpha=0,05$), potom kvantil je 0,975. Na základě těchto hodnot byla funkcí F.INV v Microsoft Excelu vypočtena kritická hodnota 2,18. Dále byly vypočteny výběrové rozptyly pro všechny osy obou skenů a také testovací kritéria pro osy x, y, z . Zpracovaný F-test pro měření v Adamově je uveden v příloze č. 7 a výsledky jsou uvedeny i v tabulce č. 9.2.

Výběrový rozptyl [mm ²]					
v ose x skenu		v ose y skenu		v ose z skenu	
pravého	levého	pravého	levého	pravého	levého
4,25	1,62	10,57	8,55	3,68	2,91
Testovací kritérium F					
v ose x	2,62	v ose y	1,24	v ose z	1,27
Výsledky F- testu					
v ose x		v ose y		v ose z	
$F > F_{krit.}$	$2,62 > 2,18$	$F < F_{krit.}$	$1,24 < 2,18$	$F < F_{krit.}$	$1,27 < 2,18$
zamítáme hypotézu H_0		nezamítáme hypotézu H_0		nezamítáme hypotézu H_0	
rozptyly obou souborů se statisticky významně liší		rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší		rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší	

Tab. 9.2. Zpracovaný F-test

Z výsledků F-testu je zřejmé, že pouze směrodatné odchylky osy x pravého a levého skenu nelze porovnávat, protože výběrové rozptyly těchto dvou souborů se statisticky významně liší.

9.5. Dosažené výsledky

Z rozdílů souřadnic bodů určených geodetickou metodou a skenováním byla vypočtena vnější přesnost určení souřadnic X, Y, Z laserovým skenováním. Protože osa x má statisticky významně odlišné rozptyly a směrodatné odchylky nelze mezi jednotlivými skeny porovnávat, je zde uvedena přesnost pro oba skeny. Pro pravý sken byla vypočtena přesnost určení souřadnice X 2,0 mm a pro levý sken 1,3 mm. Výsledná přesnost určení souřadnice Y a Z byla vypočtena aritmetickým průměrem ze směrodatných odchylek pravého a levého skenu. Přesnost určení souřadnice Y byla stanovena 3,1 mm a určení souřadnice Z 1,8 mm. Všechny hodnoty přesnosti jsou uvedeny pro použité rozlišení 1/2 a umístění terčů ve vzdálenosti mezi 24 m a 35 m.

Další poznatek byl vyvozen na základě provedené transformace. Výrobce udává přesnost dvojosého kompenzátoru $0,015^\circ = 54''$. Při transformaci systému skeneru do geodetického systému byly zjištěny hodnoty úhlů rotace, viz tabulka č. 9.3.

<i>Pravý sken</i>		<i>Levý sken</i>	
osa x	osa y	osa x	osa y
Úhel rotace [°]			
0,0029	- 0,0005	- 0,0022	0,0002
Úhel rotace [']			
10	- 2	- 8	1

Tab. 9.3. Rotace skenů

Z vypočtených úhlů rotace lze odvodit, že kompenzátor skeneru pracuje velmi dobře, protože všechny hodnoty úhlů rotace jsou výrazně menší, než je udávaná přesnost kompenzátoru.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 9.2., v Adamově proběhlo nejen geodetické měření a skenování, které jsem zpracovávala v této práci, ale také měření zakoupeným MMS (malý měřicí systém).

od firmy Amberg. Obdržela jsem výsledky z tohoto měření, tak je zde uvedu.

Zpracování dat je popsáno na konci kapitoly 9.2. Zpracování za účelem zjištění přesnosti určení relativních souřadnic X a Z z měření realizované systémem MMS mělo jediný rozdíl a to ten, že souřadnice Z byly navíc korigovány o vliv sklonu koleje, tak aby mohly být porovnány s relativními souřadnicemi MMS.

Následující práce jsou popsány doc. Ing. Vlastimilem Hanzlem, CSc., který toto měření zpracovával. Pracovníci SŽDC-TÚDC Olomouc s MMS provedli opakované měření v dynamickém režimu za podmínek doporučených výrobcem systému (pomalá chůze). Měření bylo provedeno vždy 2x v obou směrech, tedy celkem 4 měření. Zpracováno bylo 8 souborů měření:

- job1u.txt – kolej 3, staničení **klesající**, dvoukolová část vozíku **vlevo** (pozice A)
- job2u.txt – kolej 3, staničení **rostoucí**, dvoukolová část vozíku **vpravo** (pozice A)
- job3u.txt – kolej 3, staničení **klesající**, dvoukolová část vozíku **vpravo** (pozice B)
- job4u.txt – kolej 3, staničení **rostoucí**, dvoukolová část vozíku **vlevo** (pozice B)

V pozici A je dvoukolová část vozíku na vzdálenější kolejnici vzhledem ke kontrolním bodům. U pozice B je tomu naopak.

Dvojice měření se stejnou pozicí koleček (dvoukolová část vozíku) umožní stanovit vnitřní přesnost měření (opakovatelnost) MMS, porovnání souřadnic z dvojic s opačnou pozicí umožní odhalit výskyt některých systematických chyb v systému, stanovit jejich původ a velikost. Porovnání relativních souřadnic s geodeticky určenými souřadnicemi umožní určit vnější přesnost určení relativních souřadnic. Rozhodující analýzy jsou učiněny z měření na 3. koleji, kde počet kontrolních bodů je dostatečný na stanovení charakteristik přesnosti.

Z rozdílů mezi souřadnicemi bodů určené geodetickou metodou a body určené MMS stanovíme vnější přesnost určení relativní souřadnice x a z systémem MMS.

Dvojice měření	Sx [mm]	Sz [mm]
GM-job1	2.6	2.6
GM-job2	3.0	2.8
GM-job3	2.9	3.0
GM-job4	3.3	3.3

Náhodná část (statisticky zjištěná výpočtem) vnější přesnosti určení relativní souřadnice x a z systémem MMS po odstranění zjistitelných systematických chyb je určena aritmetickým průměrem ze směrodatných odchylek: $S_x=3.0$ mm, $S_z=2.9$ mm.

10. ZJIŠTĚNÍ PŘESNOSTI SOUŘADNICE X SKENOVÁNÍM HLADKÉ MÍRNĚ ZAKŘIVENÉ PLOCHY

Dalším úkolem této práce je zjistit s jakou přesností lze pozemním skenerem FARO Focus 3D určit téměř hladkou a mírně zakřivenou plochu a zda má opodstatnění nastavovat pro takováto skenování větší kvalitu skenování.

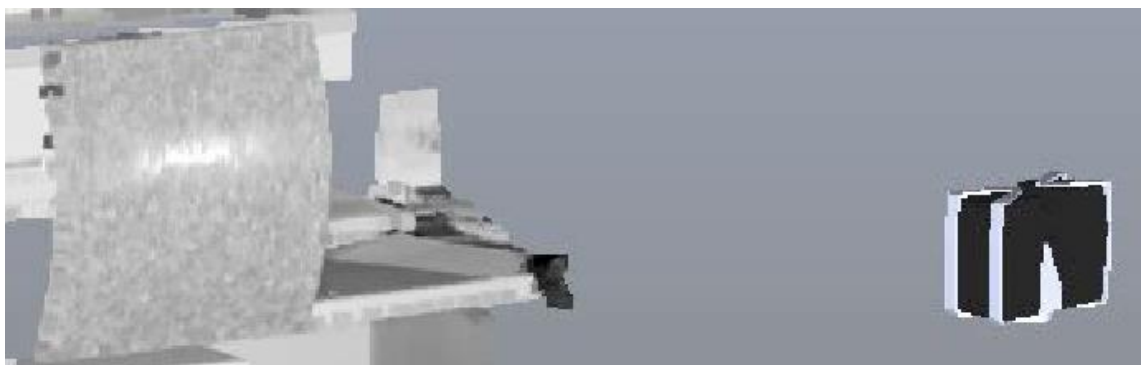
10.1. Skenování hladké mírně zakřivené plochy

Provedeny byly tři skenování, první s rozlišením 1/20, kterému odpovídá mezera mezi sousedními skenovanými body 30,7 mm/10 m. U tohoto rozlišení 1/20 lze nastavit nejnižší kvalitu 4, potom lze nastavit už jen kvalitu 6 a 8. Nejnižší kvalita 4 je dána pravděpodobně z důvodu, že mezera mezi sousedními body je už docela velká, a tak je požadován alespoň větší počet opakování. Druhé a třetí skenování bylo provedeno s rozlišením 1/8, kterému odpovídá mezera mezi sousedními skenovanými body 12,3 mm/10 m. Tyto dva skeny mají stejné rozlišení, ale různou kvalitu. Pro druhý sken byla nastavena kvalita 4 a pro třetí sken kvalita 2. Skenovaná plocha o velikosti 50 x 50 cm byla umístěna ve vzdálenosti 2 metry od skeneru. Protože skener počítá mezery mezi sousedními body na vzdálenost 10 metrů, je potřeba si mezery přepočítat dle použité vzdálenosti.

rozlišení	mezera na 10 m	mezera na 2 m
1/20	30,7 mm	6,1 mm
1/8	12,3 mm	2,5 mm

Tab. 10.1. Velikost mezery mezi body v závislosti na rozlišení a vzdálenosti

Daná plocha byla skenována ze vzdálenosti 2 metry a ke skeneru byla natočena vypuklou stranou. Měřená vzdálenost mezi skenerem a skenovanou plochou byla přibližně ve směru osy x souřadnicového systému skeneru.



Obr. 10.1. Sken měřené plochy

Mračno bodů bylo zpracováno programem SCENE. Hlavní zpracování spočívalo v odříznutí bodů, které byly mimo měřenou plochu. Body skenované plochy byly uloženy v textovém souboru ve formě seznamu souřadnic v pořadí souřadnic X, Y, Z. Pro druhý

a třetí sken bylo uskutečněno ještě druhé uložení výsledků, kde proběhla další filtrace dat a uložen byl pouze každý 4. bod, tím se čtyřnásobně zvětšila mezera mezi sousedními body a objem dat se několikanásobně zmenšil.

Sečtením tří pořízených skenů a dvou dalších uložení dat bylo získáno celkem 5 souborů pro zpracování, které mělo dva kroky. První spočíval ve výpočtu plochy pomocí polynomu druhého stupně a druhý ve zpracování a vyhodnocení výsledků.

10.2. Výpočet plochy polynomem 2. stupně

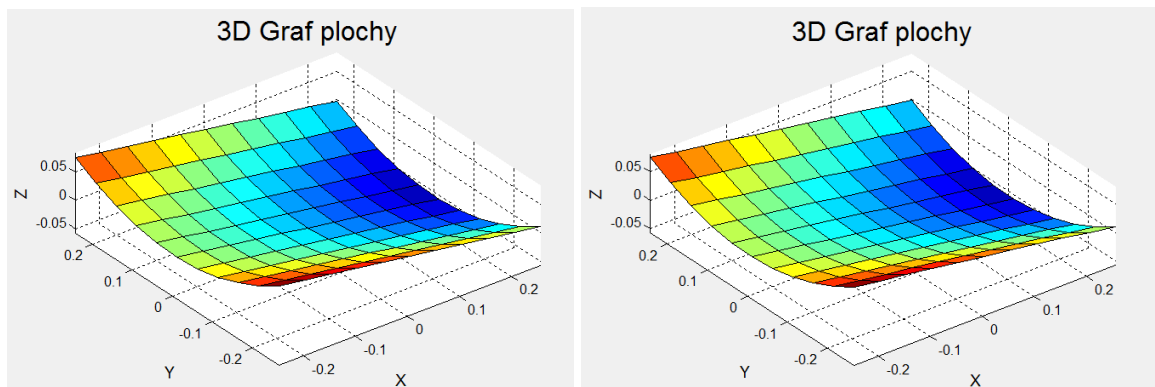
Všech 5 souborů bylo zpracováno v programu Polynom, který vytvořil Ing. Petr Kalvoda Ph.D. Protože se polynomem určuje souřadnice Z, ale je požadováno určení souřadnice X, bylo potřeba změnit pořadí souřadnic z pořadí X, Y, Z na pořadí Y, Z, X. Po načtení upraveného seznamu souřadnic byl proveden výpočet polynomu druhého stupně, jehož vzorec je $Z = a(1) + a(2)X + a(3)Y + a(4)XY + a(5)X^2 + a(6)Y^2$. Metodou nejmenších čtverců (MNČ) byly určeny koeficienty $a(1)$ až $a(6)$ a jejich střední chyby. Dále byly pro každý bod vypočteny opravy v souřadnici Z, takže v naší X a také byl automaticky vytvořen 3D graf plochy.

Protože 3D graf plochy vytvořený výpočtem polynomu třetího stupně lépe odhaluje deformace, byl zhotoven i graf polynomu třetího stupně. Deformaci si v tomto případě lze představit jako nerovnoměrné zvlnění vypočtené plochy. Vznik této deformace způsobují body, které leží mimo skenovanou plochu, přesto jsou obsaženy ve výpočtu a poté jsou i součástí grafu.

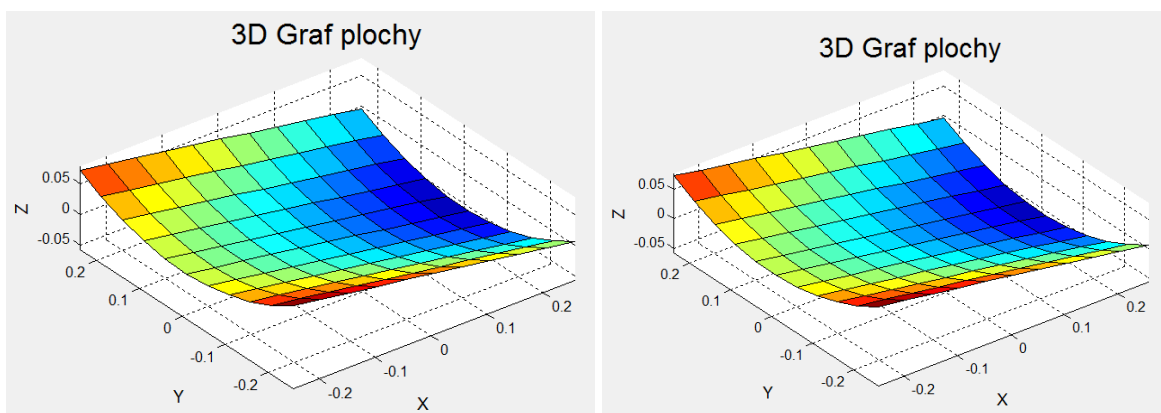
Na základě vytvořených grafů, dále označovaných jako **původní data**, byly odhalovány body ležící mimo skenovanou plochu. Protože původní data obsahovala počty bodů v řádu tisíců a desetitisíců bylo hledání bodů ležících mimo skenovanou plochu provedeno následovně. Nejprve byly v seznamu souřadnic seřazeny souřadnice X od největší po nejmenší a body, které překročily určitou hodnotu, byly smazány. Protože se tímto způsobem odstranila pouze část takovýchto bodů, byla provedena druhá oprava. Tato oprava spočívala v tom, že z výsledků obdržených výpočtem polynomu druhého stupně, byly vypočtené opravy jednotlivých bodů seřazeny od nejmenší po největší. Body, které měly opravu větší než 1,5 cm, byly poté vyhledány v seznamu souřadnic a smazány. Po těchto dvou opravách byl proveden nový výpočet a byla získána nová data, dále označována jako **opravená data**.

Všechny vytvořené 3D grafy plochy vyhotovené z původních a opravených dat jsou uvedeny v příloze č. 10.

První sken: $R = 1/20, Q = 4$



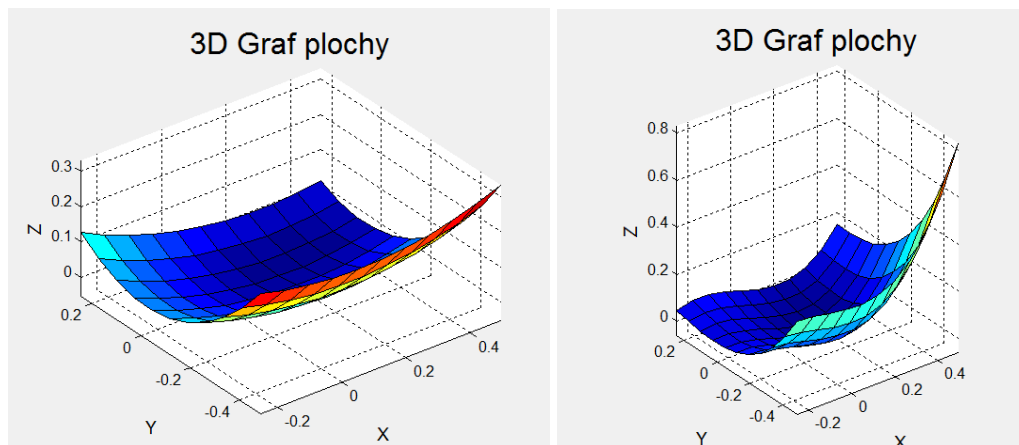
Graf 10.1. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (původní data 1. skenu)



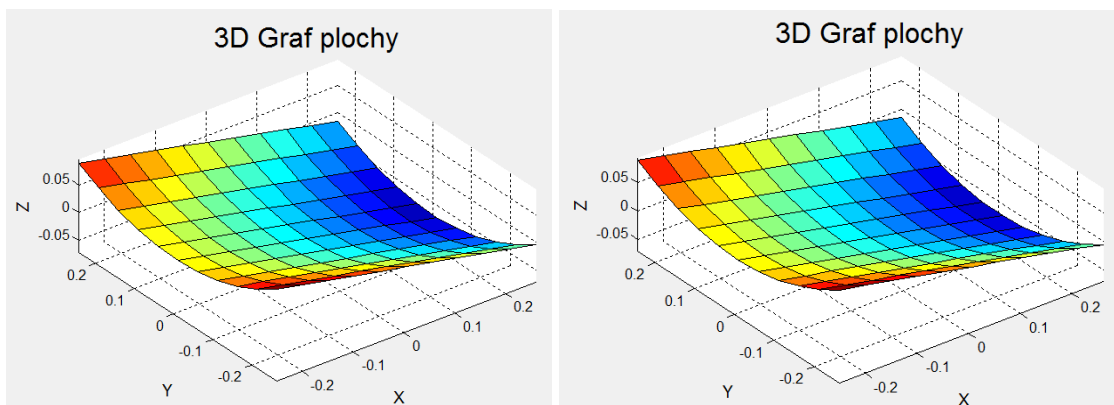
Graf 10.2. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (opravená data 1. skenu)

Po prvním výpočtu a vytvoření grafu z původních dat nebyl na pohled patrný žádný rozdíl mezi grafem polynomu druhého a třetího stupně, přesto bylo zjištěno 29 bodů jejichž oprava dosahovala hodnot až ± 4 cm. Po odstranění těchto bodů byla vypočtena opravená data. Srovnáme-li všechny čtyři grafy nenajdeme žádný rozdíl i přesto, že původní data obsahují body ležící mimo skenovanou plochu.

Druhý sken: $R = 1/8, Q = 4$



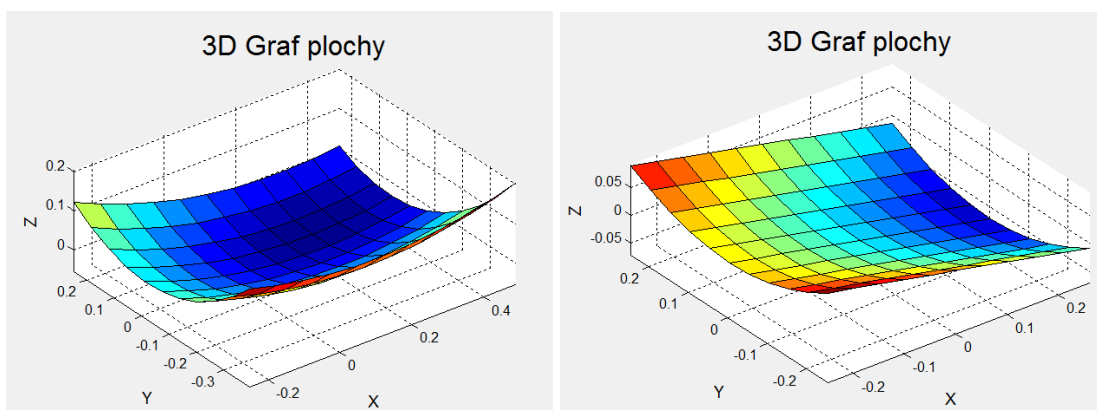
Graf 10.3. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (původní data 2. skenu)



Graf 10.4. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (opravená data 2. skenu)

Na této ukázce je pěkně vidět, jak body ležící mimo plochu způsobují deformace. Deformace je ještě výraznější v grafu, který byl vytvořen vypočtem polynomu třetího stupně. Zvlnění plochy způsobilo celkem 120 bodů. Největší deformaci způsobil bod o souřadnici X 3,03 m, jeho souřadnice byla skoro o 80 cm větší než maximální X souřadnice ostatních bodů na ploše a jeho oprava činila -64 cm. Z uvedené souřadnice X je vidět, že tento bod opravdu ležel mimo skenovanou plochu a při ořezávání bodů ležících mimo skenovanou plochu nebyl odstraněn. Při výpočtu pak způsobil protažení pravého předního rohu. Toto protažení lze pozorovat u obou grafů původních dat. Po odstranění chyb a novém výpočtu byla plocha už hladká s mírným zakřivením bez zvlnění, její přední a zadní hrana byla rovná, tak jak má opravdu být. Vypočtená plocha má stejnou podobu, jak pro polynom druhého a třetího stupně, tak se podobá i ploše vytvořené z prvního skenu.

Druhý sken: R = 1/8, Q = 4 (každý 4. bod)



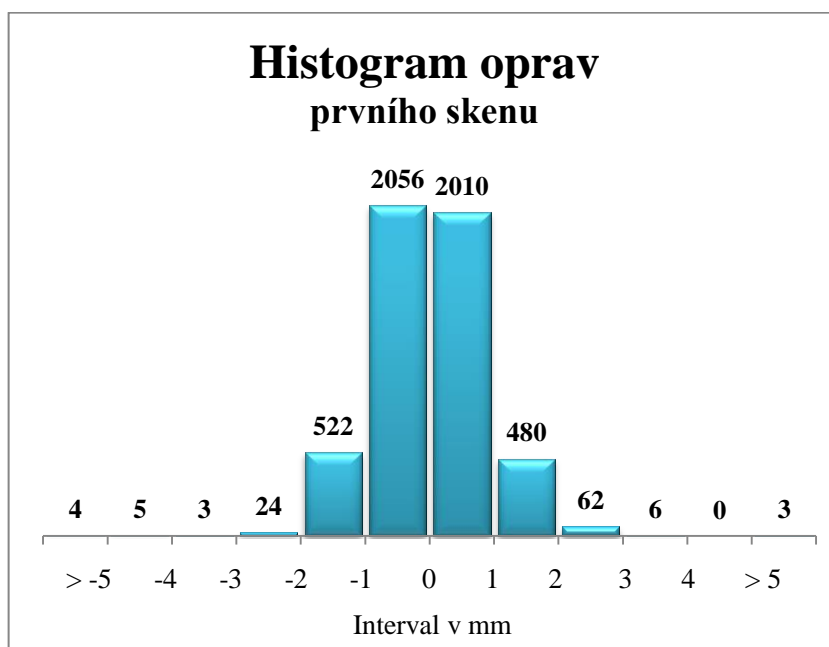
Graf 10.5. Vlevo polynom druhého stupně (původní data), vpravo polynom druhého stupně (opravená data)

Tyto data vznikla uložením každého čtvrtého bodu z pořízeného druhého skenu. Mezera mezi sousedními body se tedy zvětšila z původních 2,5 mm na 10 mm. Vynecháním tří sousedních bodů se zmenšil celkový počet bodů ležících mimo plochu. Zde největší chybu způsobil bod o souřadnici X 2,77 m, jeho souřadnice byla skoro o 60 cm větší než maximální X souřadnice ostatních bodů na ploše a jeho oprava činila -52 cm. Tento bod opět způsobil protažení pravého předního rohu, jak je vidět z levého obrázku.

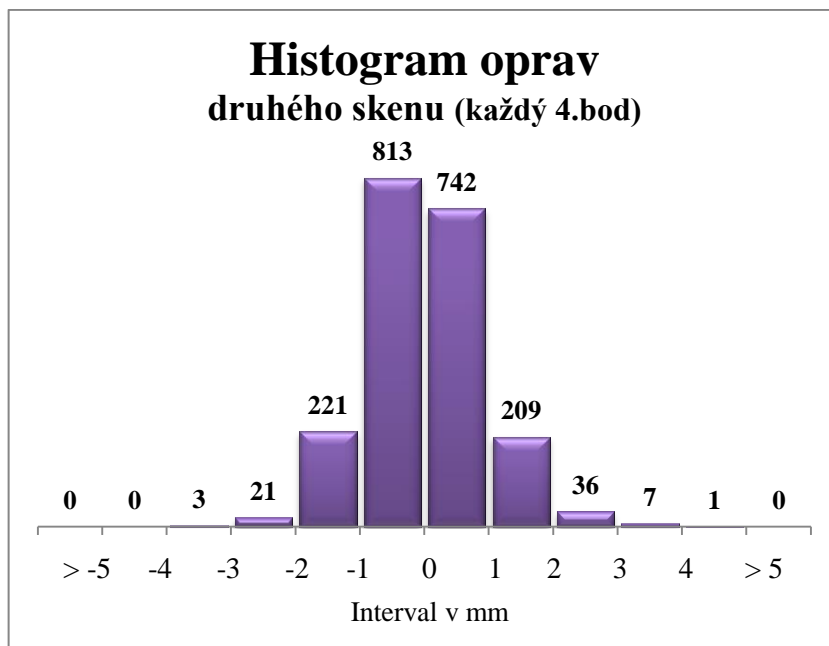
Grafy třetího skenu jsou téměř shodné s grafy druhého skenu. Uvedeny jsou v příloze č. 10 ve větší velikosti. Ze třetího skenu bylo odstraněno 148 bodů. Největší vypočtená oprava činila -52 cm pro bod o souřadnici X 2,80 m. Poslední soubor pojmenovaný třetí sken každý 4. bod obsahoval také body ležící mimo skenovanou plochu. V tomto souboru byla největší vypočtená oprava -48 cm pro bod o souřadnici X 2,80 m.

10.3. Výpočet přesnosti

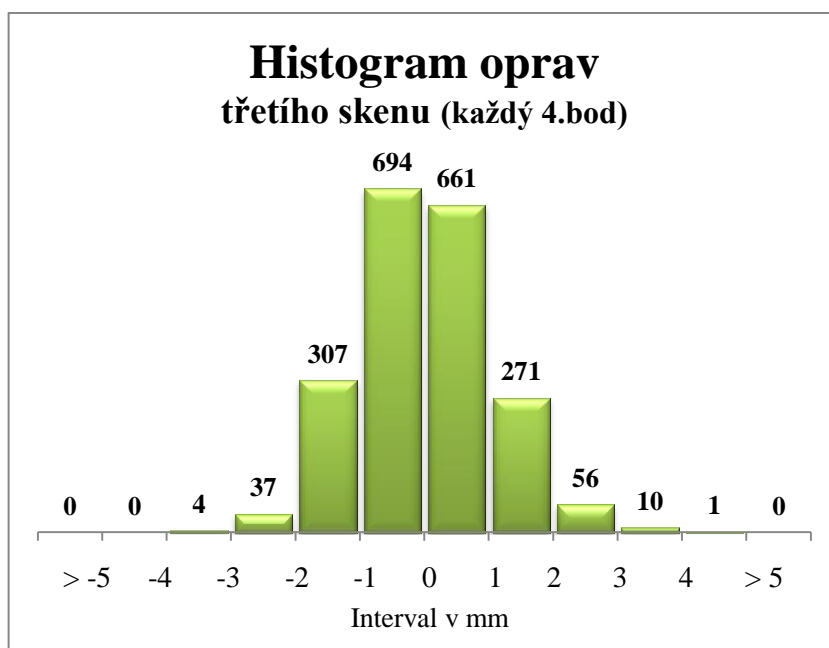
Druhým krokem bylo zpracování výsledků získaných výpočtem plochy pomocí polynomu druhého stupně, zpracování vypočtených oprav. Pro každý soubor byla z oprav vypočtena směrodatná odchylka a pro tři vybrané soubory byl vytvořen histogram oprav. Vybrány byly tyto soubory: první sken, druhý a třetí sken každý 4. bod, protože nemají tak velký objem dat jako druhý a třetí sken v původní velikosti.



Graf 10.6. Histogram oprav 1. skenu



Graf 10.7. Histogram oprav 2. skenu (každý 4. bod)



Graf 10.8. Histogram oprav 3. skenu (každý 4. bod)

Ze všech tří vyhotovených histogramů je patrné, že největší četnost oprav je v intervalu ± 1 mm a téměř všechny opravy se nacházejí v intervalu do ± 3 mm. Pouze v prvním skenu jsou obsaženy i opravy větší než ± 5 mm, celkem je to 7 hodnot, které tvoří pouze 0,1 % z celkového počtu 5 175 oprav.

V následující tabulce jsou uvedeny vypočtené směrodatné odchylky pro každý soubor. Tyto soubory mají odlišné parametry skenování, rozlišení a kvalitu.

pořadí skenu	rozl.	kvalita	mezera [mm]	směrodatná odchylka [mm]	počet bodů	původní počet bodů
1.	1/20	4	6,1	0,9	5175	5204
2.	1/8	4	2,5	1,0	33145	33265
3.	1/8	2	2,5	1,1	32724	32872
2. (každý4.bod)	1/8	4	10,0	0,9	2053	2062
3. (každý4.bod)	1/8	2	10,0	1,1	2041	2050

Tab. 10.2. Nastavené parametry a výsledky skenování

Závěr:

Z vypočtených směrodatných odchylek bylo zjištěno, že:

- porovnáme-li první sken se druhým, jejichž rozlišení je odlišné, ale kvalita stejná, tak rozdíl ve směrodatné odchylce je 0,1 mm,
- srovnáme-li druhý sken se třetím, tak data druhého skenu pořízená s kvalitou 4 jsou přesnější pouze o 0,1 mm,
- a srovnáme-li druhý sken se třetím, kde byl uložen každý 4. bod skenování, tak zde i data pořízená s kvalitou 4 jsou přesnější, ale pouze o 0,2 mm.

Na základě těchto zjištění lze říci, že u této hladké a mírně zakřivené plochy skenované ze vzdálenosti 2 m nemá opodstatnění provádět skenování s vyšším rozlišením a s vyšší kvalitou, protože směrodatné odchylky jsou téměř totožné, jejich rozdíl 0,1 mm a 0,2 mm lze zanedbat s ohledem na přesnost měřené délky, která je výrobcem uvedena ± 2 mm.

S větší kvalitou narůstá i doba skenování. U rozlišení 1/8 s kvalitou 2 lze 360° naskenovat za 27 sekund a s kvalitou 4 za 1 minutu a 47 sekund, takže doba skenování narostla více než 3x. U rozlišení 1/20 s nejnižší možnou kvalitou 4 lze 360° naskenovat za 17 sekund. Tyto časy jsou uvedeny v tabulkách kapitoly 5.2.

Jak již bylo zmíněno, měřená vzdálenost se pohybovala přibližně v ose x, takže přesnost určení plochy v ose x závisela na měřené vzdálenosti a z dosažených výsledků byla tato přesnost stanovena aritmetickým průměrem ze směrodatných odchylek 1 mm.

Takovéto plochy tedy stačí skenovat s rozlišením 1/20 a s kvalitou 4. Těmto parametrům odpovídá po zaokrouhlení na celé milimetry (zanedbání 0,1 mm) přesnost určení souřadnice X 1 mm. Tato přesnost byla určena z dat pořízených ze vzdálenosti přibližně 2 m, které odpovídá rozestup sousedních bodů 6,1, mm.

ZÁVĚR

Tato práce se nejprve zabývala ověřením maximálního dosahu pro automatické nalezení objektů, šachovnicového terče a koule. Výrobce uvádí tento dosah vzdáleností 15 m pro šachovnicové terče a 18 m pro koule o poloměru 145 mm při použitím rozlišení 1/4. Teoretický výpočet byl proveden pouze pro šachovnicové terče, rozlišení bylo zvoleno 1/4 a interval stanovisek skenování po 3 m. Z výpočtu bylo zjištěno, že při rozlišení 1/4 nebude možné šachovnicové terče nalézt ze vzdáleností větších jak 28 m. Na základě tohoto výpočtu bylo provedeno skenování. Na opěrnou zeď bylo umístěno 5 šachovnicových terčů a 5 referenčních koulí vzdálených od sebe přibližně 1 metr.

Ze skenování byl potvrzen teoretický předpoklad, že terče není možné rozeznat ze vzdáleností od skeneru větších jak 28 m. Na vzdálenost 27 m byly určeny čtyři terče z pěti a na vzdálenost 30 m už nebylo možné rozeznat žádný terč. Z praktického měření tedy bylo potvrzeno, že změna opravdu nastává mezi vzdálenostmi 27 a 30 m, pravděpodobně na vypočtených 28 m. Tato změna neměla lineární charakter, že by rovnoměrně ubýval počet nalezených terčů, ale projevila se jako přímý skok.

Dosah, který je limitující pro nalezení šachovnicových terčů při skenování s rozlišením 1/4 je téměř dvojnásobný od dosahu, který udává výrobce. Pokud je potřeba provést skenování ze vzdálenosti větší než 28 m, může se použít buď větší terč, nebo stačí zvýšit rozlišení na 1/2.

Pro koule o poloměru 145 mm výrobce uvádí dosah 18 m. Po provedení praktického skenování s rozlišením 1/4 a vyhodnocení bylo na tuto vzdálenost určeno všech 5 koulí s nižší kvalitou. Pro vzdálenost 30 m byly určeny dvě koule z pěti také s nižší kvalitou. Zjištěny byly tedy opět lepší výsledky, než uvádí výrobce.

Nakonec bylo ze vzdálenosti 30 m provedeno ještě skenování s rozlišením 1/2 a kvalitou 1 i 4. Výsledky byly shodné, všech 10 geometrických objektů bylo rozpoznáno a koule byly určeny s nejlepší kvalitou.

Další fází této práce bylo zjistit, s jakou přesností lze určit pravoúhlé prostorové souřadnice X, Y, Z šachovnicových terčů signalizovaných na zárubní zdi. Na zárubní zeď bylo umístěno celkem 36 šachovnicových papírových terčů v různých vzdálenostech a ve třech výškových úrovních. Skenování bylo uskutečněno s rozlišením 1/2 a kvalitou 4, pořízeny byly dva skeny pravý a levý z odlišných stanovisek. Všechny terče byly zaměřeny i prostorovým protínáním vpřed pomocí totální stanice.

Z rozdílů souřadnic bodů určených protínáním vpřed a skenováním byla vypočtena vnější přesnost určení souřadnic X, Y, Z laserovým skenováním. Na základě Fisherova testu bylo zjištěno, že osa x má statisticky významně odlišné rozptyly a směrodatné odchylky nelze mezi jednotlivými skeny porovnávat, proto jsou v následující tabulce uvedeny směrodatné odchylky pro oba skeny. Výsledná vnější přesnost určení souřadnice Y a Z byla vypočtena aritmetickým průměrem ze směrodatných odchylek pravého a levého

skenu. Všechny hodnoty směrodatných odchylek jsou uvedeny pro použité rozlišení 1/2 a umístění terčů ve vzdálenosti mezi 24 m a 35 m.

σ_X (pravého skenu)	σ_X (levého skenu)	σ_Y	σ_Z
2,0 mm	1,3 mm	3,1 mm	1,8 mm

Osy souřadnicového systému jsou orientovány následovně. Osa y leží ve středu osy koleje a je orientovaná směrem do Brna, osa x je kolmo na ni ve směru na zárubní zeď a osa z je kolmá na rovinu xy a směřuje nahoru. Všechny směrodatné odchylky jsou menší, než je polovina mezery mezi sousedními skenovanými body, tedy jsou menší než 3,7 mm pro vzdálenost 24 m. Největší směrodatná odchylka byla zjištěna v ose y. Můj předpoklad je takový, že je to způsobeno mnohonásobně větším rozsahem souřadnic v ose y, který je až 40 m. Kdežto rozsah souřadnic v ose x a v ose z je pouze necelých 5 metrů.

Střední hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 9.1. se pohybují v intervalu od -0,3 mm do 0,4 mm. Z velikosti intervalu je patrné, že žádný soubor odchylek není od nuly výrazně vychýlen. Jedná se tedy o náhodný soubor odchylek bez systematických chyb.

Další poznatek byl vyvozen na základě provedené transformace. Výrobce udává přesnost dvojosého kompenzátoru $0,015^\circ = 54''$. Při transformaci systému skeneru do místního geodetického systému byly zjištěny hodnoty úhlů rotace v rozsahu $-8''$ až $10''$, lze tedy odvodit, že kompenzátor skeneru pracuje velmi dobře, protože všechny hodnoty úhlů rotace jsou výrazně menší, než je udávaná přesnost kompenzátoru.

Poslední úloha této práce se týká skenování hladké mírně zakřivené plochy o velikosti 50 x 50 cm skenované ze vzdálenosti 2 m. První skenování bylo provedeno s rozlišením 1/20, kvalitou 4 a další skeny byly pořízeny s rozlišením 1/8, kvalitou 4 a 2. Na základě výpočtu polynomu druhého stupně byla měřená plocha určena i matematicky. Výpočet byl vyřešen metodou nejmenších čtverců a pro každý bod byla určena jeho oprava. Z těchto oprav byly dále vypočteny směrodatné odchylky, viz tabulka 10.2., ze kterých je patrné, že nemá opodstatnění provádět takováto skenování s vyšším rozlišením a s vyšší kvalitou. Protože směrodatné odchylky jsou téměř totožné, jejich rozdíl 0,1 mm a 0,2 mm lze zanedbat s ohledem na přesnost měřené délky, která je výrobcem uvedena ± 2 mm.

V této úloze se měřená vzdálenost pohybovala přibližně v ose x, takže se dá říci, že se zjišťovala přesnost měřené délky. Z dosažených výsledků byla tato přesnost stanovena aritmetickým průměrem ze směrodatných odchylek 1 mm.

Výsledkem této úlohy je, že pokud se skenují takovéto plochy z přibližně stejné vzdálenosti jako v této úloze, pak stačí skenování provést s rozlišením 1/20 a s kvalitou 4. Těmto parametrům odpovídá přesnost určení plochy v ose x 0,9 mm.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SHAN, Jie a Charles K TOTH. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, c2009, xvii, 590 p., [8] p. of plates. ISBN 1420051423.
- [2] *FARO LASER SCANNER FOCUS 3D* [online]. 2011, ©FARO Technologies Inc. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: https://doarch332.files.wordpress.com/2013/11/e866_faro_laser_scanner_focus3d_manual_en.pdf
- [3] *SCENE 5.1 - USER MANUAL* [online]. 2012, ©FARO Technologies Inc. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: http://www2.faro.com/downloads/files/scene/e1020_scene_5.1_manual_en.pdf
- [4] *GRP System FX* [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.ambergtechnologies.ch/en/products/rail-surveying/grp-system-fx/>
- [5] *F-test* [online]. [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/Ftest.htm>

Zdroje internetových obrázků:

- [6] Mapy: <http://www.mapy.cz>

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázky

Obr. 3.1. Základní činnost laserového dálkoměru	14
Obr. 3.2. Porovnání fáze mezi vyslanými a odraženými signály	14
Obr. 3.3. Porovnání fáze se koná v laserovém dálkoměru	15
Obr. 3.4. Měřený profil	15
Obr. 3.5. Měřená šikmá vzdálenost (R) a vertikální úhel (V)	16
Obr. 3.6. Laserové skenování – měření série profilů za sebou	16
Obr. 4.1. Vzdálenost, horizontální a vertikální úhlová rotace	17
Obr. 4.2. Schéma souřadnicového systému s měřenými veličinami	18
Obr. 5.1. Vertikální a horizontální rotace	19
Obr. 5.2. Pozemní skener FARO FOCUS 3D	20
Obr. 5.3. Druhy profilů skenování	21
Obr. 5.4. Nastavení rozlišení a kvality	21
Obr. 5.5. Rozsah skenované oblasti	22
Obr. 5.6. Hlavní obrazovka skeneru	24
Obr. 5.7. Správa	24
Obr. 5.8. Detail profilu	27
Obr. 5.9. Senzory	27
Obr. 5.10. Teplotní senzor	28
Obr. 5.11. Kompenzátor	29
Obr. 5.12. Kompas	29
Obr. 5.13. Náhled skenu	30
Obr. 6.1. Příklady umělých cílů	32
Obr. 7.1. Zobrazení Quick view	36
Obr. 7.2. Zobrazení Planar view	36
Obr. 7.3. Zobrazení 3D view	37
Obr. 7.4. Overview map	38
Obr. 7.5. Vyhledávání objektů	39
Obr. 7.6. Panel Object marker	39
Obr. 7.7. Označení a přichycení koule	40
Obr. 7.8. Výsledky vyhledání a přichycení objektů	40
Obr. 8.1. Základní údaje pro výpočet	43
Obr. 8.2. Výpočet maximální vzdálenosti v závislosti na počtu bodů	44
Obr. 8.3. Rozmístění umělých cílů na opěrné zdi	44
Obr. 8.4. Výsledek vyhledání cílů na vzdálenost 15 m u rozlišení 1/5	45
Obr. 8.5. Výsledek vyhledání cílů na vzdálenost 30 m u rozlišení 1/4	45
Obr. 8.6. Výsledek vyhledání cílů na vzdálenost 30 m u rozlišení 1/2	45
Obr. 9.1. Město Adamov	47
Obr. 9.2. Měřický vozík Amberg GRP System FX	48
Obr. 9.3. Pozice totální stanice a skeneru	48

Obr. 9.4. 24 označených terčů rozmístěných na zárubní zdi	49
Obr. 9.5. Vyhledané terče v programu SCENE zobrazení planar view.....	49
Obr. 9.6. Vyhledaný terč v zobrazení planar view	49
Obr. 9.7. Vyhledané terče v programu SCENE zobrazení quick view.....	50
Obr. 9.8. Přehled bodů pravého skenu	52
Obr. 9.9. Přehled bodů levého skenu	52
Obr. 10.1. Sken měřené plochy.....	59

Tabulky

Tab. 5.1. Parametry skenování pro rozlišení 1/1	23
Tab. 5.2. Parametry skenování pro rozlišení 1/2 až 1/8 a 1/20.....	23
Tab. 5.3. Hlavní funkce skeneru FARO Focus3D	24
Tab. 5.4. Funkce správy.....	25
Tab. 5.5. Obecná nastavení.....	25
Tab. 5.6. Funkce projektu	26
Tab. 5.7. Funkce senzorů	27
Tab. 5.8. Ovládání náhledu skenu.....	30
Tab. 5.9. Technické údaje skeneru FARO Focus 3D	31
Tab. 8.1. Výsledek skenování.....	46
Tab. 9.1. Střední hodnoty a směrodatné odchylky v osách x, y, z.....	52
Tab. 9.2. Zpracovaný F-test	57
Tab. 9.3. Rotace skenů.....	57
Tab. 10.1. Velikost mezery mezi body v závislosti na rozlišení a vzdálenosti	59
Tab. 10.2. Nastavené parametry a výsledky skenování	65

Grafy

Graf 9.1. Histogram všech os pravého skenu	53
Graf 9.2. Normální rozdělení všech os pravého skenu	53
Graf 9.3. Histogram všech os levého skenu.....	54
Graf 9.4. Normální rozdělení všech os pravého skenu	54
Graf 9.5. Rozložení odchylek v ose x levého skenu	55
Graf 9.6. Histogram odchylek a graf normálního rozdělení osy x levého skenu	55
Graf 10.1. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (původní data 1. skenu).....	61
Graf 10.2. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (opravená data 1. skenu).....	61
Graf 10.3. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (původní data 2. skenu).....	61
Graf 10.4. Vlevo polynom druhého stupně, vpravo polynom třetího stupně (opravená data 2. skenu).....	62

Graf 10.5. Vlevo polynom druhého stupně (původní data), vpravo polynom druhého stupně (opravená data).....	62
Graf 10.6. Histogram oprav 1. skenu.....	63
Graf 10.7. Histogram oprav 2. skenu (každý 4. bod).....	64
Graf 10.8. Histogram oprav 3. skenu (každý 4. bod).....	64

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: **Seznam souřadnic X, Y, Z terčů určených prostorovým protínáním vpřed v geodetickém systému** (*elektronicky*)

Příloha č.2: **Transformace souřadnic terčů ze systému skeneru do geodetického systému** (*elektronicky*)

2.1: M3000OBJ _pravý sken

2.2: M30002OBJ _levý sken

Příloha č.3: **Seznam souřadnic X, Y, Z terčů určených skenováním v geodetickém systému** (*elektronicky*)

3.1: Sez. souř. terčů pravého skenu v geodetickém systému

3.2: Sez. souř. terčů levého skenu v geodetickém systému

Příloha č.4: **Výpočet přesnosti určení souřadnic X, Y, Z** (*elektronicky*)

4.1: Výpočet přesnosti _pravý sken

4.2: Výpočet přesnosti _levý sken

Příloha č.5: **Grafy pro jednotlivé osy souřadnicového systému**

Příloha č.6: **Rozložení odchylek v jednotlivých osách souřadnicového systému**

Příloha č.7: **F-test**

Příloha č.8: **Seznam souřadnic Y, Z, X skenované plochy** (*elektronicky*)

8.1: sez. souř. y,z,x PRVNÍ SKEN

8.2: sez. souř. y,z,x DRUHÝ SKEN

8.3: sez. souř. y,z,x TŘETÍ SKEN

8.4: sez. souř. y,z,x DRUHÝ SKEN (každý 4.bod)

8.5: sez. souř. y,z,x TŘETÍ SKEN (každý 4.bod)

Příloha č.9: **Protokoly z výpočtu polynomu druhého stupně** (*elektronicky*)

9.1: polynom 2.st. PRVNÍ SKEN

9.2: polynom 2.st. DRUHÝ SKEN

9.3: polynom 2.st. TŘETÍ SKEN

9.4: polynom 2.st. DRUHÝ SKEN (každý 4.bod)

9.5: polynom 2.st. TŘETÍ SKEN (každý 4.bod)

Příloha č.10: **3D graf plochy**

Příloha č. 4.1: Výpočet přesnosti_pravý sken

bod č.	Souřadnice v geodetickém systému určené						odchytky		
	PROTÍNÁNÍM VPŘED			SKENOVÁNÍM (pravý sken)					
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	ϵ_x [mm]	ϵ_y [mm]	ϵ_z [mm]
4	3,1317	25,3626	209,7835	3,1350	25,3630	209,7800	3,3	0,4	-3,5
5	2,9263	23,0707	209,8068	2,9270	23,0720	209,8070	-0,7	-1,3	-0,2
6	2,6097	20,5019	208,8944	2,6110	20,5060	208,8940	-1,3	-4,1	0,4
7	2,4233	17,3187	209,0469	2,4280	17,3180	209,0470	-4,7	0,7	-0,1
10	1,4930	5,6038	208,9448	1,4910	5,6050	208,9450	2,0	-1,2	-0,2
11	1,2979	2,5934	208,8982	1,2980	2,5930	208,8980	-0,1	0,4	0,2
12	0,9932	-2,9902	209,5130	0,9990	-2,9910	209,5130	-5,8	0,8	0
14	3,4971	30,8029	211,1007	3,4980	30,8090	211,1030	-0,9	-6,1	-2,3
15	3,2407	28,1567	211,1219	3,2410	28,1580	211,1230	-0,3	-1,3	-1,1
16	3,0184	25,3608	211,1023	3,0200	25,3640	211,1020	-1,6	-3,2	0,3
17	2,8364	22,9215	211,1261	2,8350	22,9160	211,1270	1,4	5,5	-0,9
18	2,6547	20,4753	211,1275	2,6550	20,4730	211,1290	-0,3	2,3	-1,5
19	2,4317	17,3173	211,1472	2,4310	17,3160	211,1450	0,7	1,3	2,2
20	2,2011	14,1494	211,1547	2,2000	14,1510	211,1550	1,1	-1,6	-0,3
22	1,5594	5,2957	211,1665	1,5600	5,2970	211,1680	-0,6	-1,3	-1,5
23	1,3571	2,6033	211,1640	1,3570	2,6040	211,1630	0,1	-0,7	1,0
24	0,9326	-3,1420	211,1684	0,9320	-3,1400	211,1690	0,6	-2,0	-0,6
28	3,6350	25,5265	212,3085	3,6360	25,5320	212,3090	-1,0	-5,5	-0,5
29	3,6802	23,0691	213,5384	3,6800	23,0690	213,5360	0,2	0,1	2,4
30	3,2546	20,7791	212,4382	3,2530	20,7750	212,4400	1,6	4,1	-1,8
31	3,2551	17,7309	213,2955	3,2530	17,7250	213,2900	2,1	5,9	5,5
32	2,7511	13,6738	212,4546	2,7510	13,6770	212,4530	0,1	-3,2	1,6
36	1,6484	-3,4850	213,0719	1,6510	-3,4900	213,0690	-2,6	5,0	2,9

Střední hodnota v ose		
x [mm]	y [mm]	z [mm]
-0,3	-0,2	0,1

Směrodatná odchytky v ose		
x [mm]	y [mm]	z [mm]
2,0	3,2	1,9

Tabulka vyloučených bodů

bod č.	Souřadnice v geodetickém systému určené						odchytky		
	PROTÍNÁNÍM VPŘED			SKENOVÁNÍM (pravý sken)					
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	ϵ_x [mm]	ϵ_y [mm]	ϵ_z [mm]
2	3,5092	31,1148	209,4254	3,5100	31,1030	209,4250	-0,8	11,8	0,4
8	2,2744	14,1106	209,3145	2,2600	14,1020	209,3160	14,4	8,6	-1,5
21	1,8254	8,9263	211,1607	1,8260	8,9410	211,2240	-0,6	-14,7	-63,3

Příloha č. 4.2: Výpočet přesnosti levý sken

bod č.	Souřadnice v geodetickém systému určené						odchyly		
	PROTÍNÁNÍM VPŘED			SKENOVÁNÍM (levý sken)					
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	ε_x [mm]	ε_y [mm]	ε_z [mm]
1	4,7161	36,5919	209,6255	4,7170	36,5870	209,6250	-0,9	4,9	0,5
2	3,5092	31,1148	209,4254	3,5090	31,1160	209,4240	0,2	-1,2	1,4
3	3,1832	28,3301	208,9547	3,1810	28,3300	208,9540	2,2	0,1	0,7
4	3,1317	25,3626	209,7835	3,1320	25,3600	209,7820	-0,3	2,6	1,5
5	2,9263	23,0707	209,8068	2,9260	23,0710	209,8070	0,3	-0,3	-0,2
6	2,6097	20,5019	208,8944	2,6120	20,4970	208,8950	-2,3	4,9	-0,6
8	2,2744	14,1106	209,3145	2,2720	14,1130	209,3150	2,4	-2,4	-0,5
9	1,8533	9,0000	209,2175	1,8530	9,0040	209,2170	0,3	-4,0	0,5
10	1,4930	5,6038	208,9448	1,4920	5,5990	208,9430	1,0	4,8	1,8
11	1,2979	2,5934	208,8982	1,2980	2,5930	208,9000	-0,1	0,4	-1,8
12	0,9932	-2,9902	209,5130	0,9920	-2,9900	209,5160	1,2	-0,2	-3,0
13	4,5800	36,5435	211,0776	4,5810	36,5430	211,0760	-1,0	0,5	1,6
14	3,4971	30,8029	211,1007	3,4960	30,8040	211,0990	1,1	-1,1	1,7
15	3,2407	28,1567	211,1219	3,2410	28,1580	211,1220	-0,3	-1,3	-0,1
17	2,8364	22,9215	211,1261	2,8370	22,9230	211,1260	-0,6	-1,5	0,1
18	2,6547	20,4753	211,1275	2,6560	20,4760	211,1290	-1,3	-0,7	-1,5
20	2,2011	14,1494	211,1547	2,2010	14,1520	211,1550	0,1	-2,6	-0,3
21	1,8254	8,9263	211,1607	1,8240	8,9210	211,1620	1,4	5,3	-1,3
22	1,5594	5,2957	211,1665	1,5610	5,2990	211,1640	-1,6	-3,3	2,5
23	1,3571	2,6033	211,1640	1,3580	2,6050	211,1620	-0,9	-1,7	2,0
26	4,2525	31,0437	213,0262	4,2530	31,0410	213,0220	-0,5	2,7	4,2
27	4,1338	28,1809	213,6846	4,1350	28,1810	213,6820	-1,2	-0,1	2,6
28	3,6350	25,5265	212,3085	3,6360	25,5270	212,3090	-1,0	-0,5	-0,5
29	3,6802	23,0691	213,5384	3,6800	23,0710	213,5370	0,2	-1,9	1,4
30	3,2546	20,7791	212,4382	3,2540	20,7800	212,4380	0,6	-0,9	0,2
31	3,2551	17,7309	213,2955	3,2530	17,7340	213,2950	2,1	-3,1	0,5
32	2,7511	13,6738	212,4546	2,7510	13,6770	212,4550	0,1	-3,2	-0,4
33	2,5505	9,0361	212,9700	2,5490	9,0400	212,9730	1,5	-3,9	-3,0
34	2,4078	4,7514	213,5133	2,4090	4,7460	213,5150	-1,2	5,4	-1,7
36	1,6484	-3,4850	213,0719	1,6510	-3,4890	213,0690	-2,6	4,0	2,9

Střední hodnota v ose		
x [mm]	y [mm]	z [mm]
0	0,1	0,4

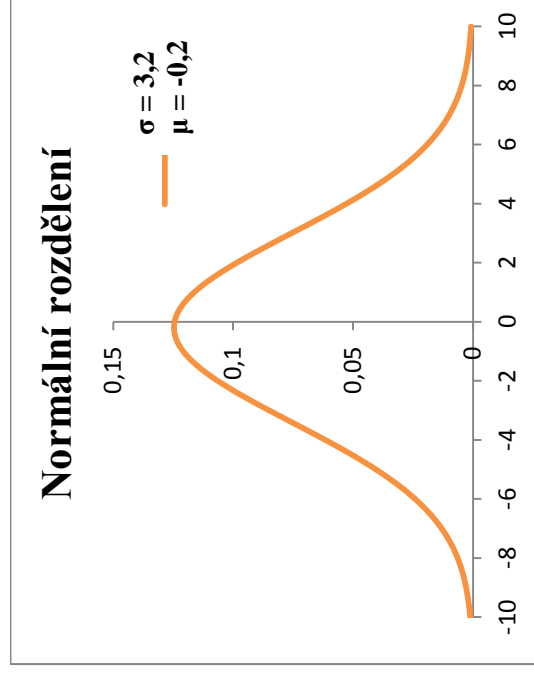
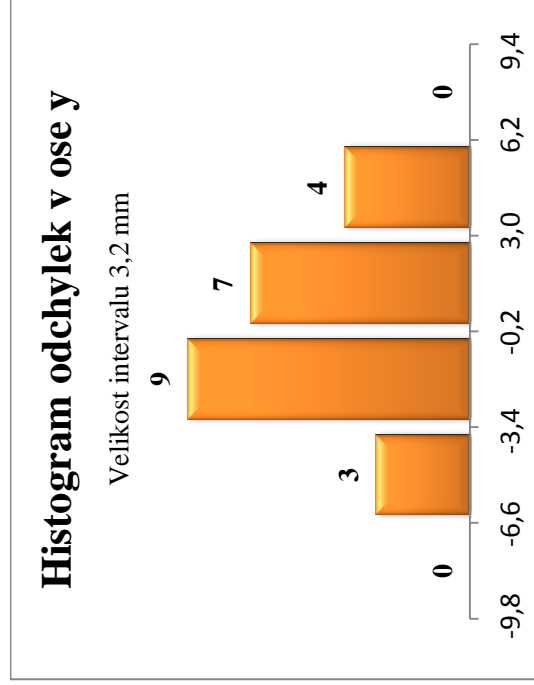
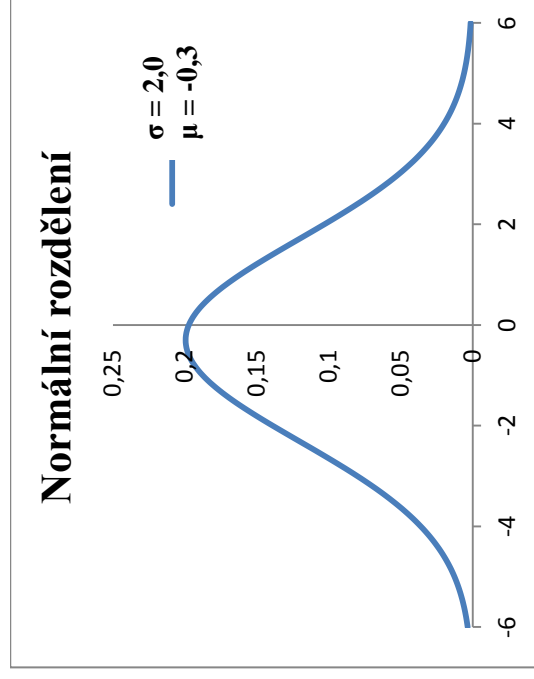
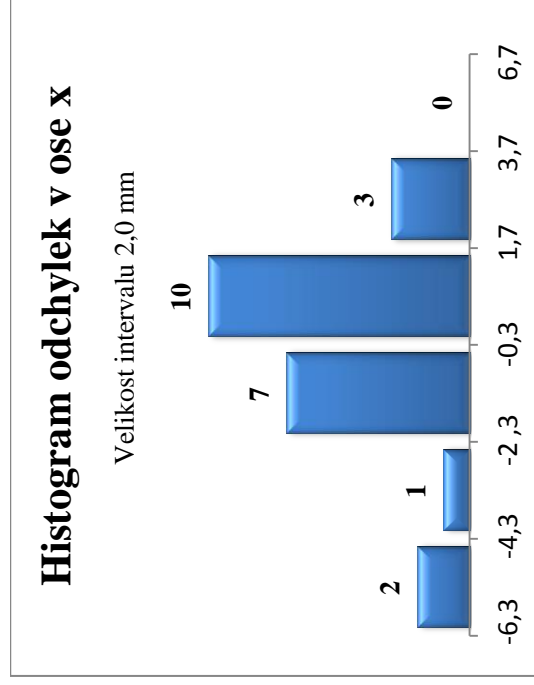
Směrodatná odchylka v ose		
x [mm]	y [mm]	z [mm]
1,3	2,9	1,7

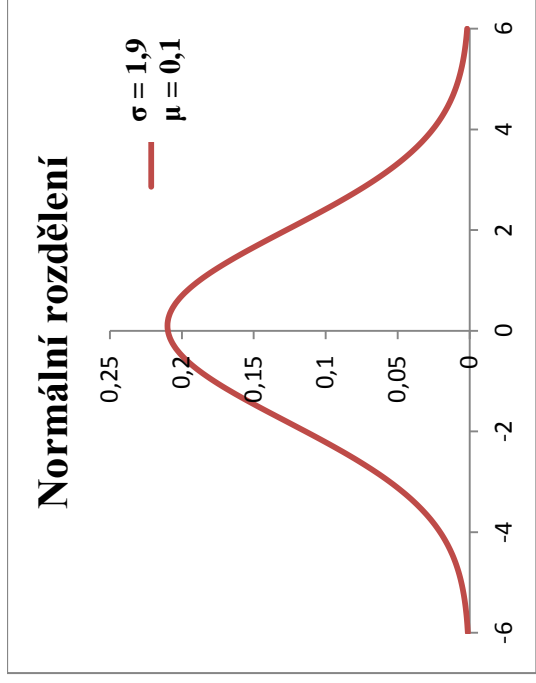
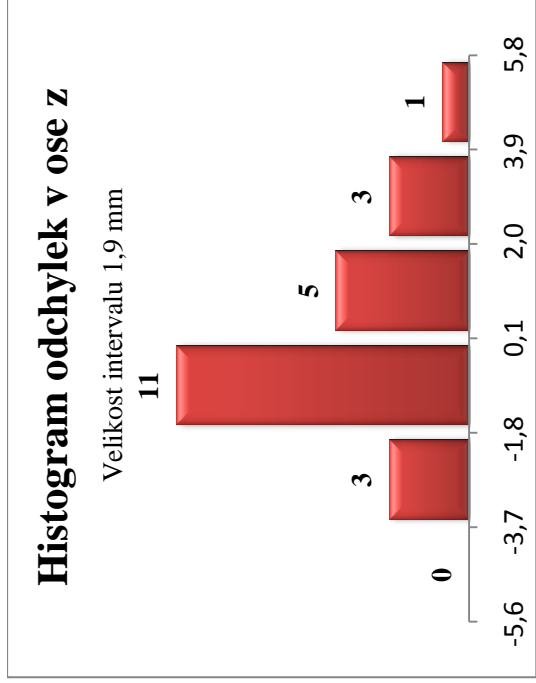
Tabulka vyloučených bodů

bod č.	Souřadnice v geodetickém systému určené						odchyly		
	PROTÍNÁNÍM VPŘED			SKENOVÁNÍM (pravý sken)					
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	ε_x [mm]	ε_y [mm]	ε_z [mm]
25	5,3688	36,5275	212,8006	5,368	36,528	212,812	0,8	-0,5	-11,4

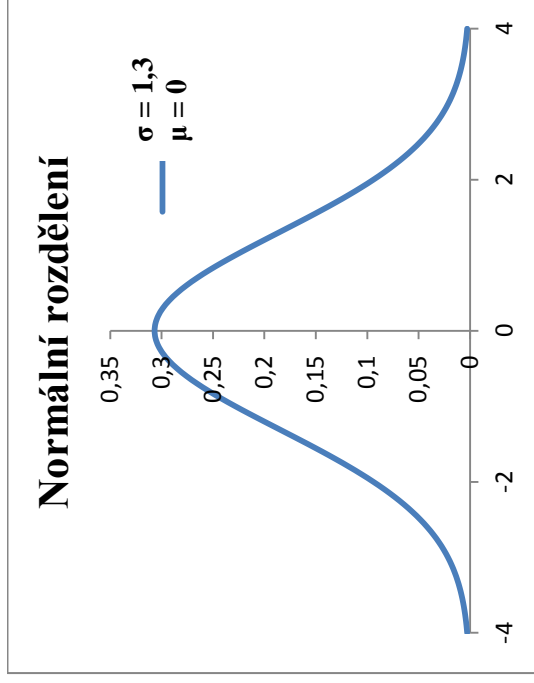
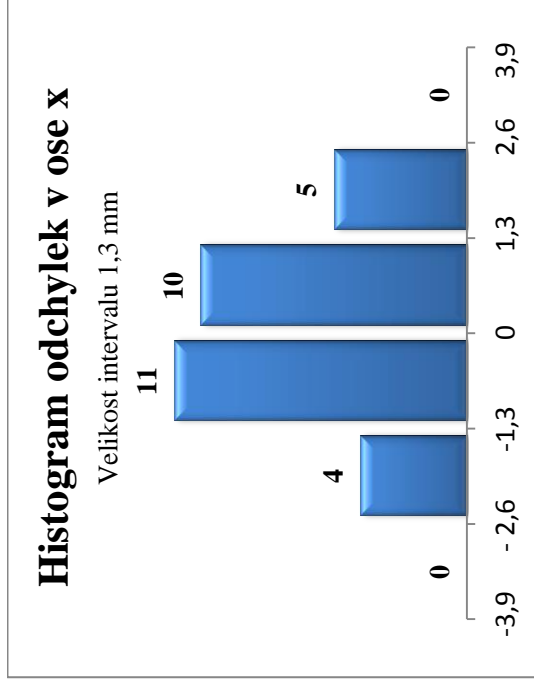
Příloha č. 5: Grafy pro jednotlivé osy souřadnicového systému

Histogram odchylek a graf normálního rozdělení pro osy x, y, z pravého skenu

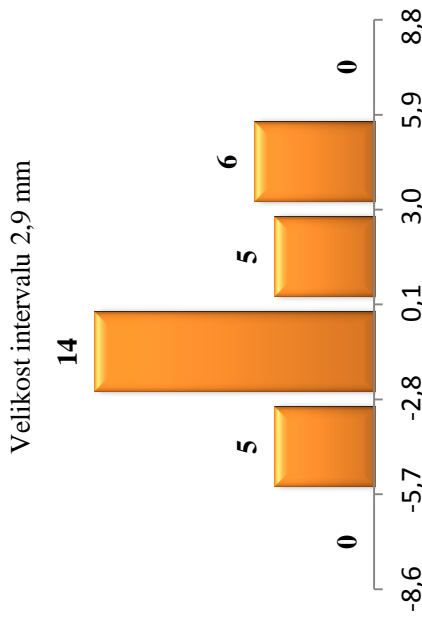




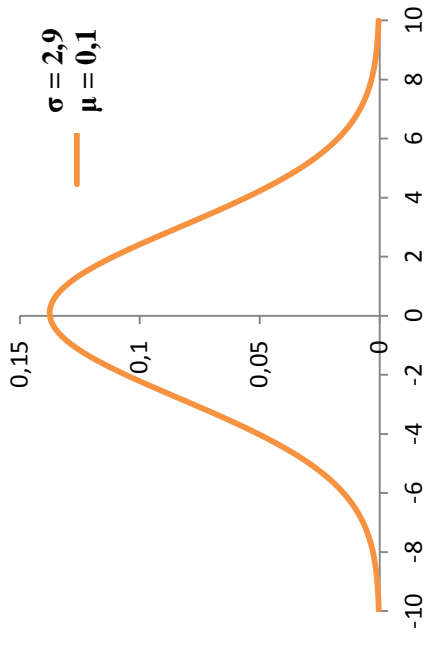
Histogram odchylek a graf normálního rozdělení pro osy x, y, z levého skenu



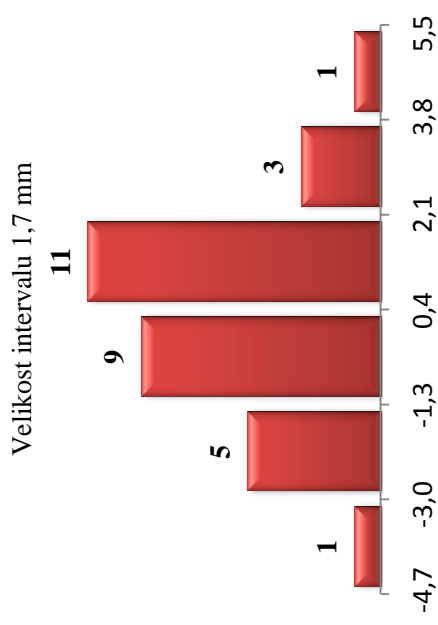
Histogram odchylek v ose y



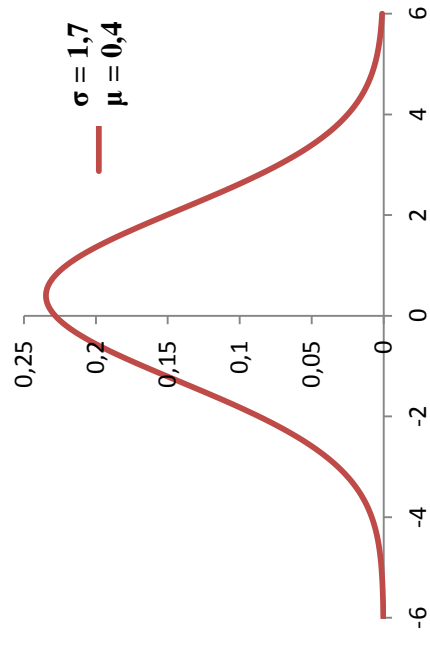
Normální rozdělení



Histogram odchylek v ose z

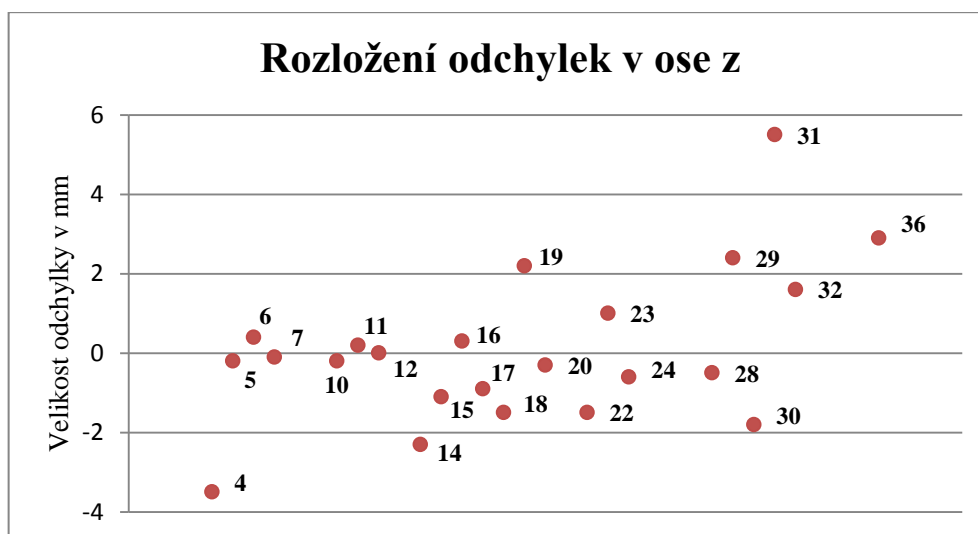
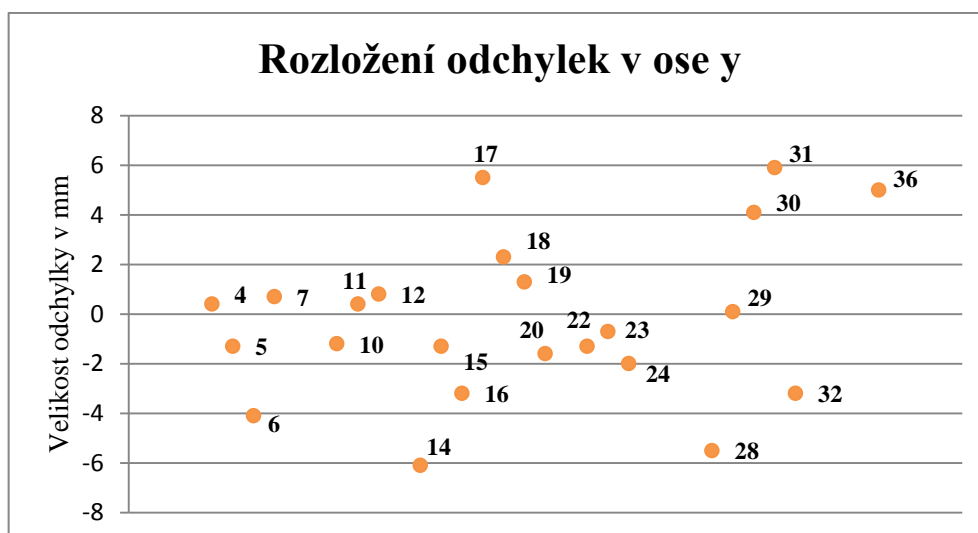
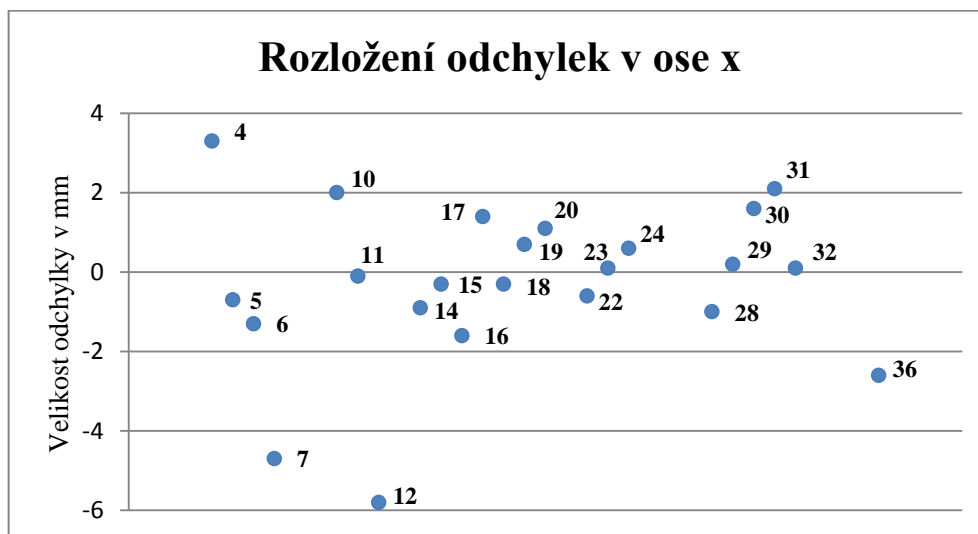


Normální rozdělení

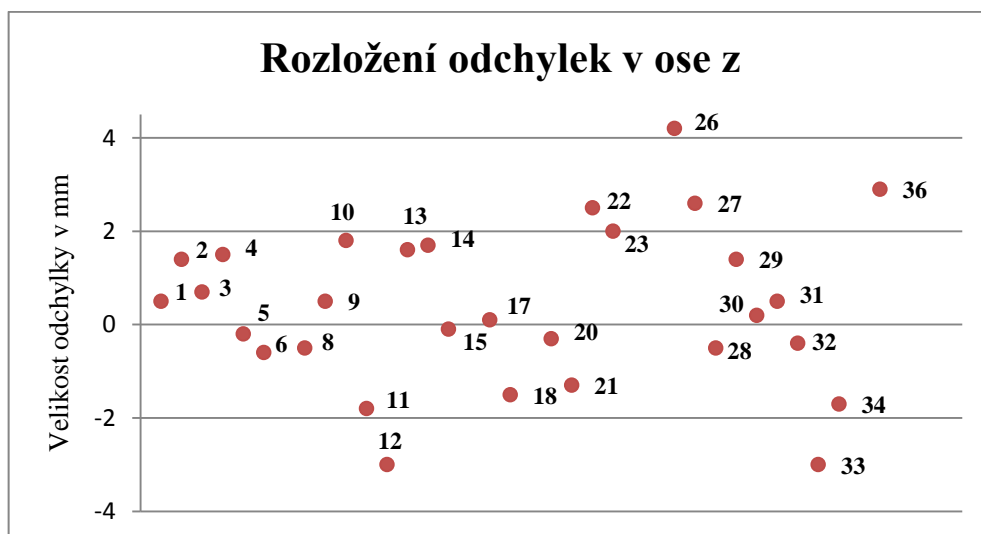
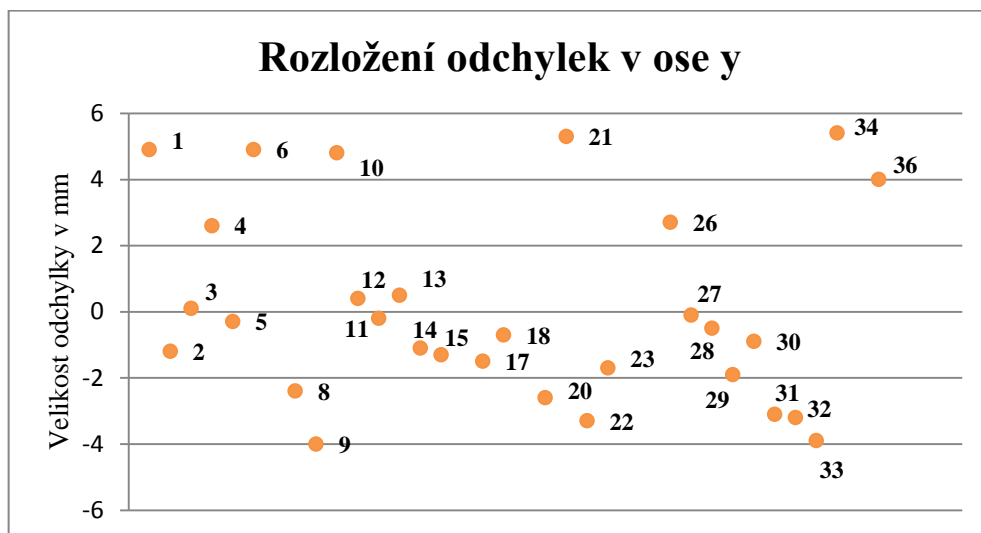
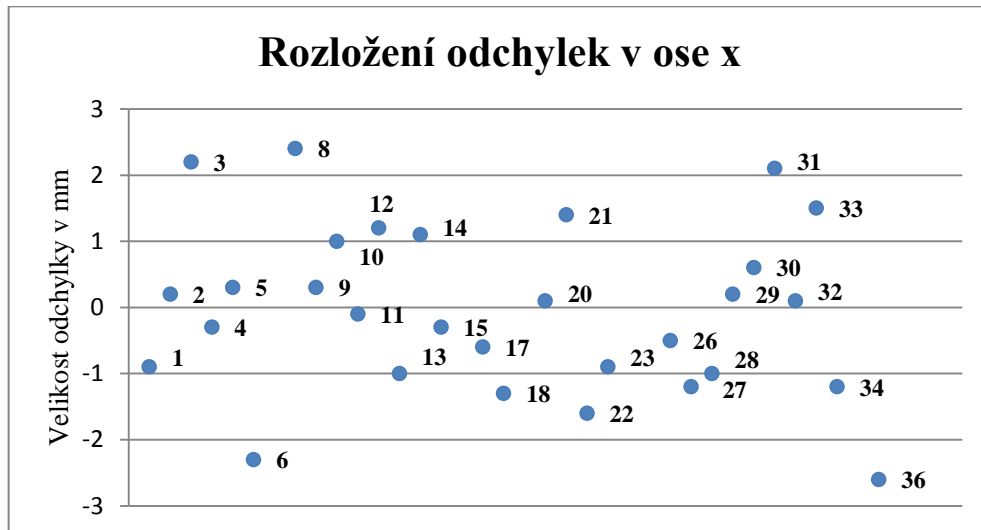


Příloha č. 6: Rozložení odchylek v jednotlivých osách souřadnicového systému

Rozložení odchylek pro osy x, y, z pravého skenu



Rozložení odchylek pro osy x, y, z levého skenu



Příloha č. 7: F-test

Odchylky [mm]					
v ose x skenu		v ose y skenu		v ose z skenu	
pravého	levého	pravého	levého	pravého	levého
3,3	-0,9	0,4	4,9	-3,5	0,5
-0,7	0,2	-1,3	-1,2	-0,2	1,4
-1,3	2,2	-4,1	0,1	0,4	0,7
-4,7	-0,3	0,7	2,6	-0,1	1,5
2,0	0,3	-1,2	-0,3	-0,2	-0,2
-0,1	-2,3	0,4	4,9	0,2	-0,6
-5,8	2,4	0,8	-2,4	0	-0,5
-0,9	0,3	-6,1	-4,0	-2,3	0,5
-0,3	1,0	-1,3	4,8	-1,1	1,8
-1,6	-0,1	-3,2	0,4	0,3	-1,8
1,4	1,2	5,5	-0,2	-0,9	-3,0
-0,3	-1,0	2,3	0,5	-1,5	1,6
0,7	1,1	1,3	-1,1	2,2	1,7
1,1	-0,3	-1,6	-1,3	-0,3	-0,1
-0,6	-0,6	-1,3	-1,5	-1,5	0,1
0,1	-1,3	-0,7	-0,7	1,0	-1,5
0,6	0,1	-2,0	-2,6	-0,6	-0,3
-1,0	1,4	-5,5	5,3	-0,5	-1,3
0,2	-1,6	0,1	-3,3	2,4	2,5
1,6	-0,9	4,1	-1,7	-1,8	2,0
2,1	-0,5	5,9	2,7	5,5	4,2
0,1	-1,2	-3,2	-0,1	1,6	2,6
-2,6	-1,0	5,0	-0,5	2,9	-0,5
	0,2		-1,9		1,4
	0,6		-0,9		0,2
	2,1		-3,1		0,5
	0,1		-3,2		-0,4
	1,5		-3,9		-3,0
	-1,2		5,4		-1,7
	-2,6		4,0		2,9

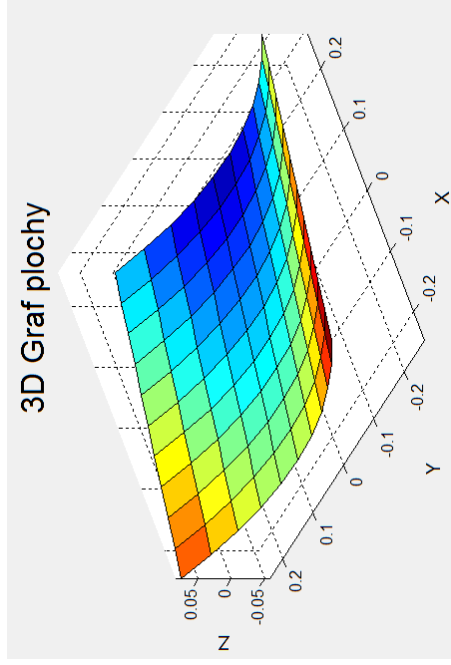
Testujeme nulovou hypotézu $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$

Kritická hodnota pro F-test $F_{krit.} = 2,18$

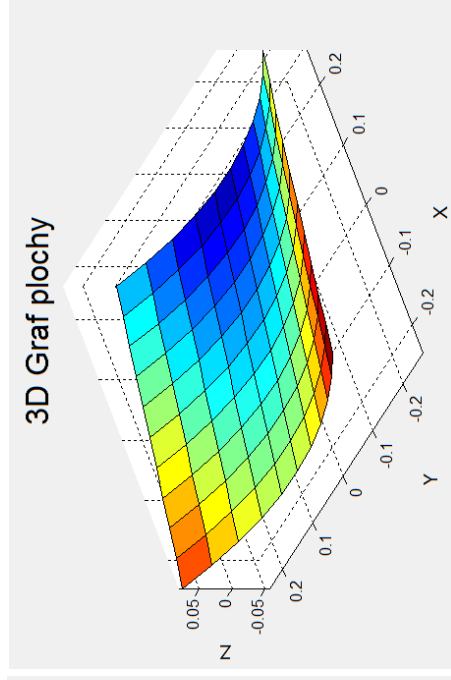
Výběrový rozptyl [mm ²]					
v ose x skenu		v ose y skenu		v ose z skenu	
pravého	levého	pravého	levého	pravého	levého
4,25	1,62	10,57	8,55	3,68	2,91
Testovací kritérium F					
v ose x	2,62	v ose y	1,24	v ose z	1,27
Výsledky F-testu					
v ose x $F > F_{krit.} \quad 2,62 > 2,18$		v ose y $F < F_{krit.} \quad 1,24 < 2,18$		v ose z $F < F_{krit.} \quad 1,27 < 2,18$	
zamítáme hypotézu H_0		nezamítáme hypotézu H_0		nezamítáme hypotézu H_0	
rozptyly obou souborů se statisticky významně liší		rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší		rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší	

Příloha č. 10: 3D graf plochy

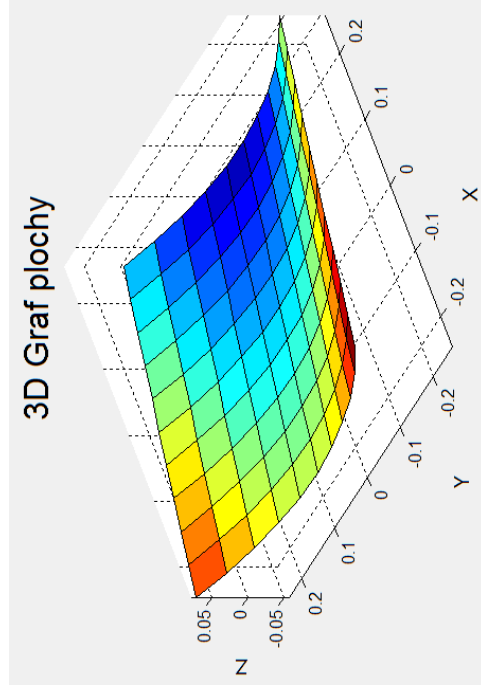
První sken: $R = 1/20$, $Q = 4$



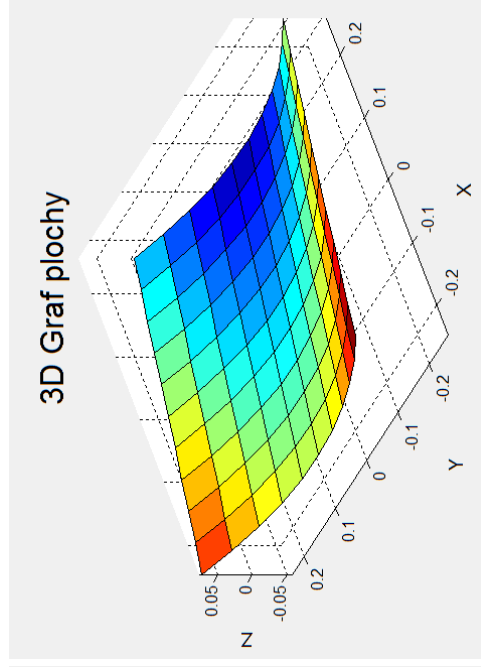
Polynom druhého stupně (původní data)



Polynom třetího stupně (původní data)

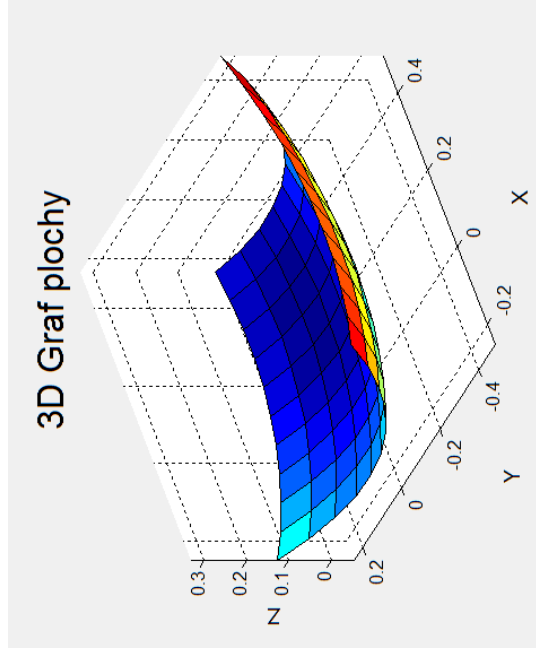


Polynom druhého stupně (opravená data)

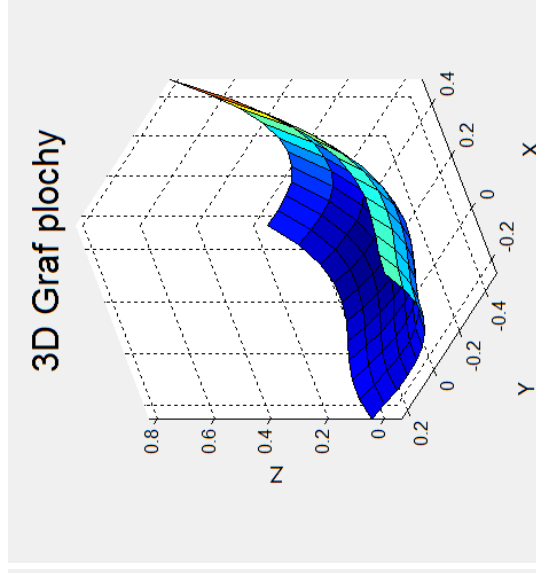


Polynom třetího stupně (opravená data)

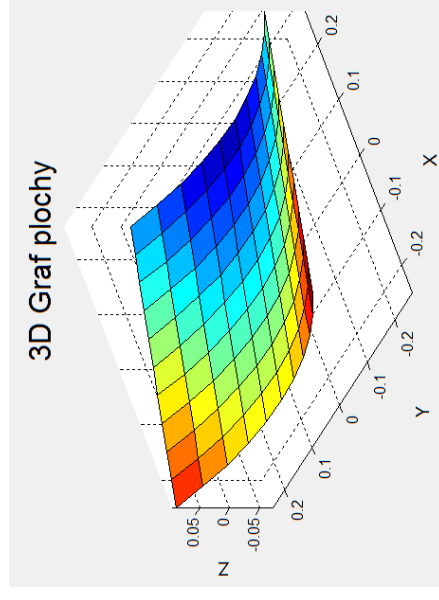
Druhý sken: $R = 1/8, Q = 4$



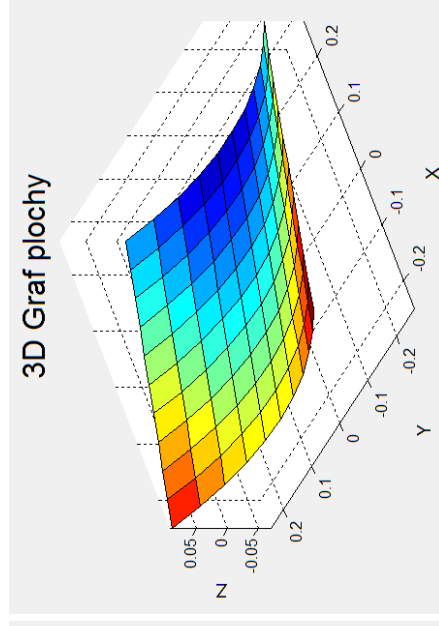
Polynom druhého stupně (původní data)



Polynom třetího stupně (původní data)

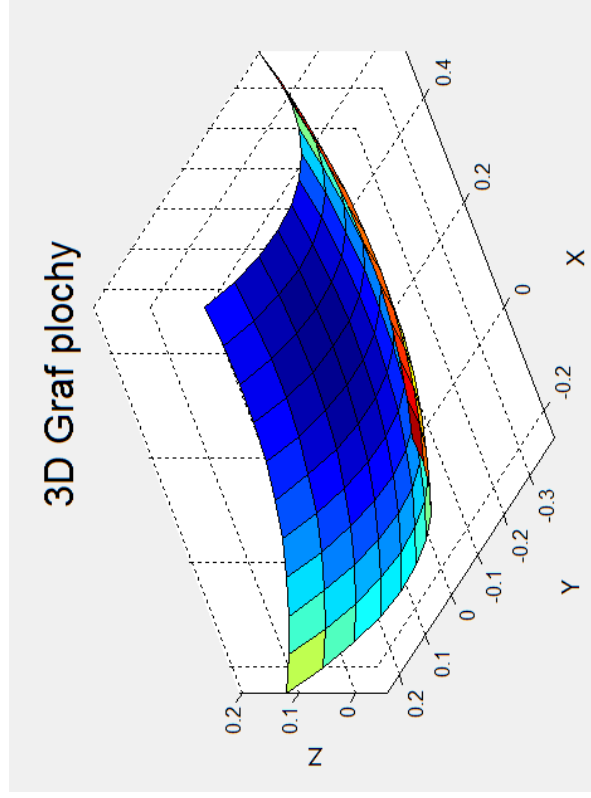


Polynom druhého stupně (opravená data)

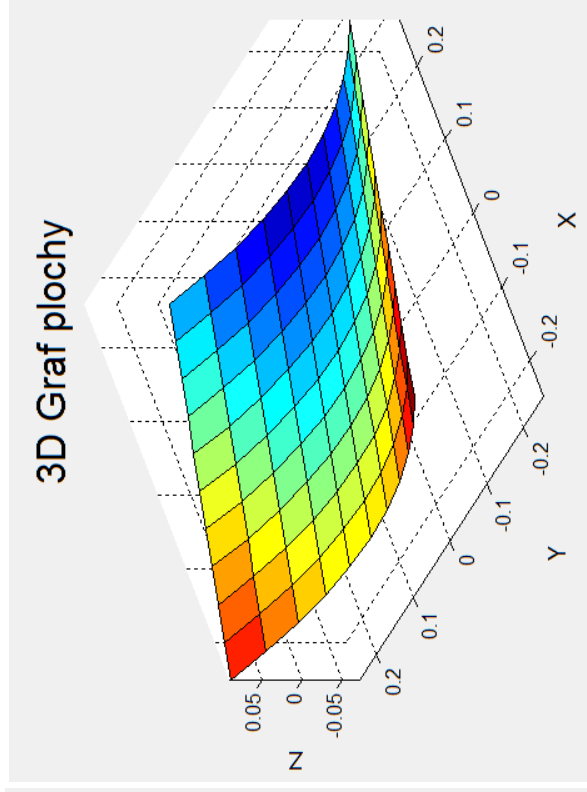


Polynom třetího stupně (opravená data)

Druhý sken: $R = 1/8$, $Q = 4$ (každý 4. bod)

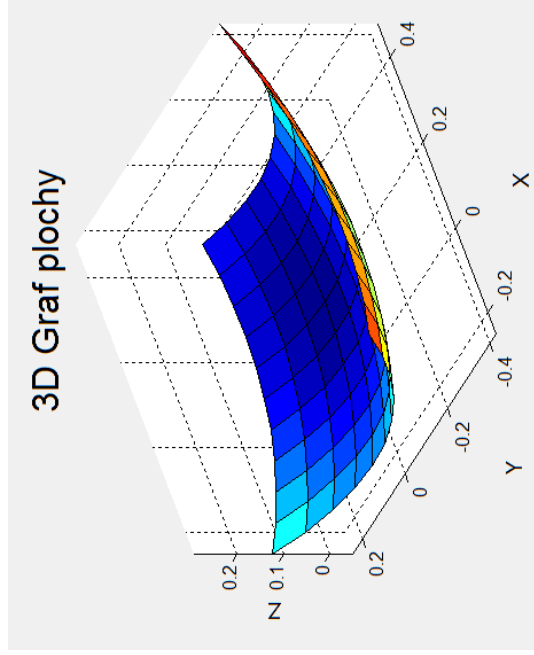


Polynom druhého stupně (původní data)

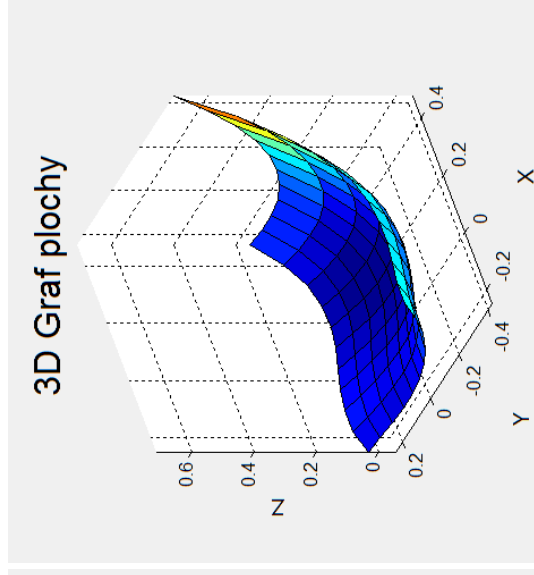


Polynom druhého stupně (opravená data)

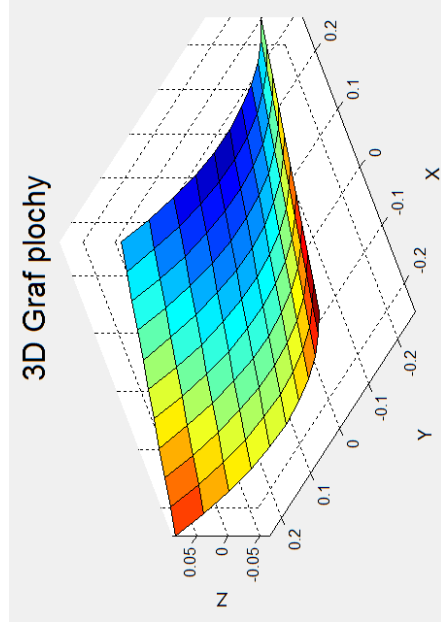
Třetí sken: $R = 1/8, Q = 2$



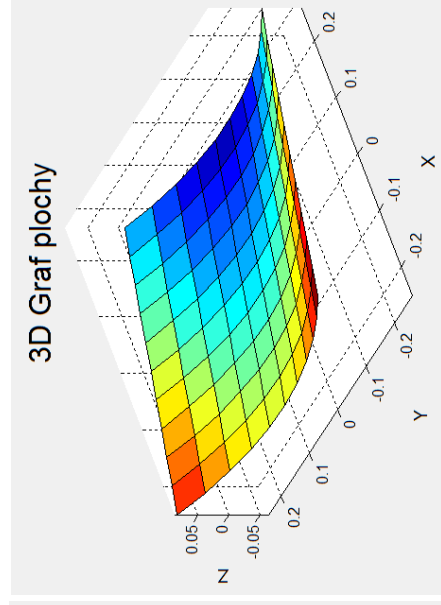
Polynom druhého stupně (původní data)



Polynom třetího stupně (původní data)

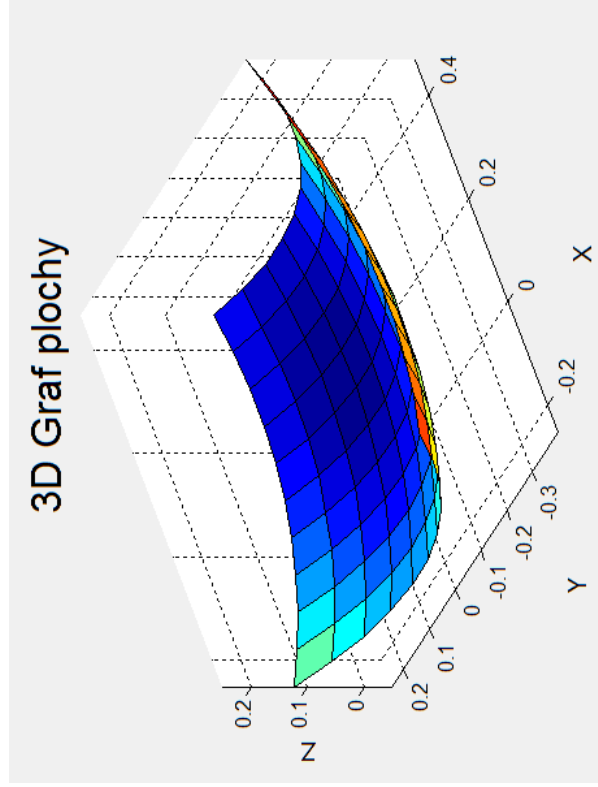


Polynom druhého stupně (opravená data)

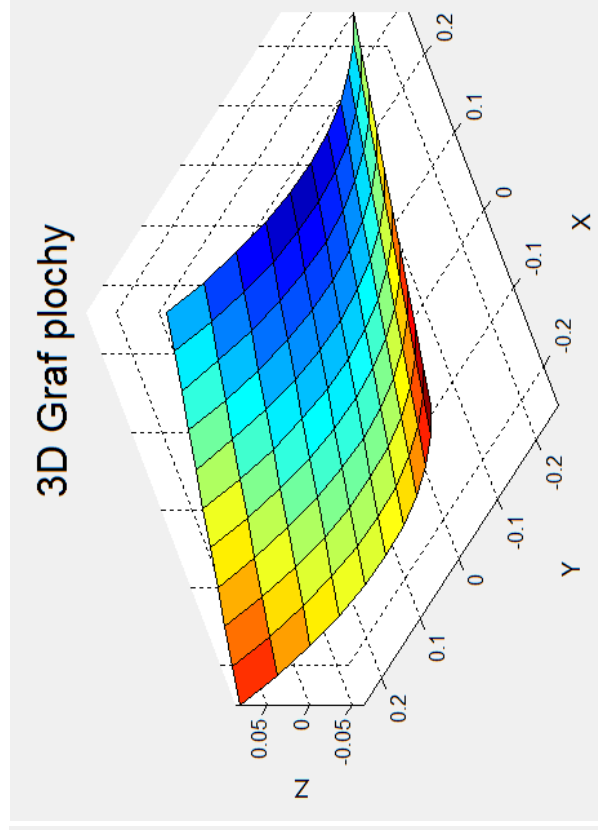


Polynom třetího stupně (opravená data)

Třetí sken: $R = 1/8$, $Q = 2$ (každý 4. bod)



Polynom druhého stupně (původní data)



Polynom druhého stupně (opravená data)