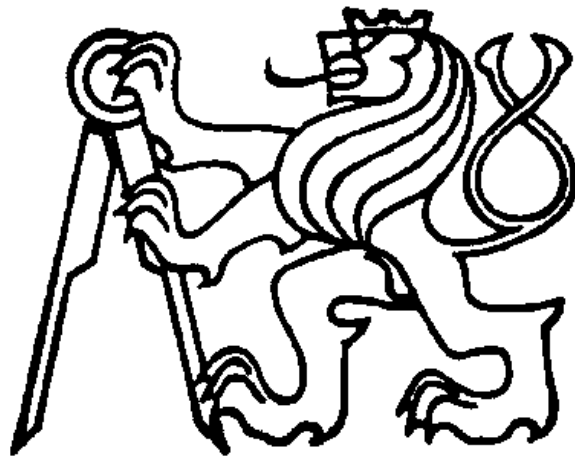


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Využití 3D kamery pro určení vzájemné polohy a
natočení modelu a změřeného objektu**

2014/2015

Bc. Jakub Prchal

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval(a) samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce Ing. Martina Nečase, MSc., Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal(a), jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Datum

podpis
Jakub Prchal

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Martinovi Nečasovi, MSc., Ph.D. za pomoc při vedení diplomové práce. Mé poděkování patří také mým rodičům, kteří mě při studiu podporovali.

Anotace

Jméno autora:	Bc. Jakub Prchal
Název diplomové práce:	Využití 3D kamery pro určení vzájemné polohy a natočení modelu a změřeného objektu
Akademický rok:	2014/2015
Obor studia:	Aplikovaná mechanika
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor Mechaniky a mechatroniky
Vedoucí práce:	Ing. Martini Nečas, MSc., Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 90 Počet obrázků: 89
Klíčová slova:	natočení, optimalizace, optické metody měření, 3D objekt, Optigo, STL, 3D scanner, analýza, interferometrie, triangulace
Keywords:	rotation, optimization, optical measurement method, 3D object, the Optigo, STL, 3D scanner, analysis, interferometry, triangulation

Abstrakt

Tato práce se zabývá určením vzájemné polohy a natočení modelu a 3D obrazu změřeného objektu. Základem práce je zpracování algoritmů pro analýzu dat z 3D kamery. Tato zařízení jsou v současném průmyslu využívána stále častěji a uplatňují se v rozličných oblastech jako např. metrologii, reverzním inženýrství a robotice. První část práce se zabývá různými variantami získání 3D obrazu pomocí optických metod. Pro získání experimentálních 3D dat bylo v práci využito zařízení CogniTens - Optigo 200 firmy Hexagon Metrology s.r.o. Následující část práce je věnována vývoji algoritmů pro zpracování získaných dat a to jak ve 2D, tak i 3D prostoru. Konečná část práce je věnována testování vytvořených programů na reálně získaných datech. Hlavním výsledkem práce jsou metody pro identifikace natočení dvou vzájemných objektů, a to zkoumaného objektu a ideálního 3D CAD modelu.

Abstract

This work deals with pose determination between CAD model and the object measured by 3D camera and the related 3D data processing algorithms. 3D cameras are nowadays widely used in diverse industry areas such as metrology, reverse engineering and robotics. The first part deals with the different variants of the 3D image acquisition using optical methods. The experimental data were obtained by using CogniTens - Optigo 200 3D camera from Hexagon Metrology Ltd. The next part is then devoted to the development of 3D data processing algorithms, both in 2D and 3D space. The last part is devoted to algorithm tests on experimentally obtained data sets. The main result of this work are methods for identifying mutual pose between investigated object and the ideal 3D CAD model.

Obsah

1. Úvod	5
1.1 Úvod do problematiky	5
1.2 Cíle práce	5
2. Optické metody měření 3D objektů.....	6
2.1. Triangulace	6
2.1.1. Aktivní triangulace	6
2.1.2. Pasivní triangulace.....	9
2.1.3. Měřicí systém s teodolitem	10
2.1.4. Fokusovací technika	11
2.1.5. Techniky "podoba ze stínování"	12
2.2. Optická interferometrie.....	12
2.2.1. Interferometrie pracující s více vlnovými délkami.....	13
2.2.2. Holografická interferometrie	13
2.2.3. Skvrnová interferometrie	14
2.2.4. Interferometrie s bílým světlem.....	15
2.3. Metody založené na měření doby letu modulovaného světla	15
3. CogniTens - Optigo 200 systém	17
3.1 Použité vybavení.....	17
3.2 Příprava měření.....	20
3.3. Postup měření	22
4. Náhrada systému CogniTens - Optigo 200.....	24
4.1. Artec Spider	24
4.2. 3D Systems Capture Scanner.....	25
4.2. 3D scanner WLS400M	25
5. Definice problému	27
6. Analýza natočení obrazu.....	29
6.1 Metoda nejmenších opsaných obdélníků	29
6.2. Metoda nejmenších opsaných kvádrů.....	35
6.3. Práce se souborem ve formátu STL.....	43
6.4. Metoda analýzy pomocí opsaných hranolů (klínů a kvádrů).....	54
6.5. Metoda nejvzdálenějšího bodu	65
7. Experiment.....	70
7.1 Příprava dat z 3D kamery	71
7.2 Měřený objekt kvádr s válcem.....	73
7.3 Měřený objekt Zkosený kvádr	79
8. Závěr	84
Seznam obrázků.....	86

Seznam tabulek	89
Seznam literatury	90

1. Úvod

1.1 Úvod do problematiky

Tato práce se zabývá analýzou 3D obrazu zkoumaného objektu a vzájemným natočením zkoumaného objektu a předlohy v podobě CAD modelu. Optické metody patří v současnosti k hojně využívaným technologiím, protože umožňují získat obraz objektu bez jediného kontaktu měřicího zařízení se zkoumaným objektem. Tyto metody se v současné době uplatňují v celé řadě průmyslových odvětví, především v robotice, na kterou je tato práce cílena.

V této práci je provedena analýza 3D obrazu získaného pomocí systému CogniTens-Optigo 200, který je schopen poskytnout výsledný bodový obraz zkoumaného objektu. Práce se dále zabývá vytvořením algoritmů pro získání výsledného natočení objektu ležícího na podložce a vzorového CAD modelu.

Práce se zabývá algoritmy, které budou schopny zpracovat co nejdetailnější obraz v co nejkratším čase, aby je bylo možné aplikovat do reálných situací a projektů. Poslední kapitola je zaměřena na testování jednotlivých algoritmů a odhalování jejich chyb pro případná další vylepšení.

1.2 Cíle práce

Cílem práce je vytvoření programů pro rychlou analýzu 3D obrazu a nalezení souhlasného natočení tohoto obrazu s jeho CAD modelem.

- Provedení rešerše optických systémů pro 3D měření objektů.
- Seznámení se se systémem CogniTens - Optigo 200.
- Vytvoření algoritmů pro identifikaci vzájemného natočení 3D modelu a měřeného objektu.
- Optimalizaci algoritmů pro reálné využití.
- Provedení experimentu s reálnými předměty.
- Porovnání výsledků jednotlivých měření.

2. Optické metody měření 3D objektů

Tato část se zabývá základními způsoby měření a zaznamenání objektů pro zpracování počítačovými systémy při zachování všech informací o poloze bodů v prostoru. Důležité je zamezení ztráty prostorového vyjádření jako u standardního záznamu kamery nebo fotoaparátu. Výsledkem těchto metod je zachycení bodu v prostoru a to tak, že je z něj zpětně možné zrekonstruovat 3D obraz

Techniky vycházejí ze tří základních způsobů měření:

- triangulace
- optická interferometrie
- měření doby letu modulovaného světla

2.1. Triangulace

V současnosti nejpoužívanější metoda pro záznam 3D souřadnic bodů. Vždy využívá skládání více obrazů nebo záznamů do pomyslných trojúhelníků, ze kterých doplňuje informace o prostorových souřadnicích. Rozlišujeme tyto druhy triangulace:

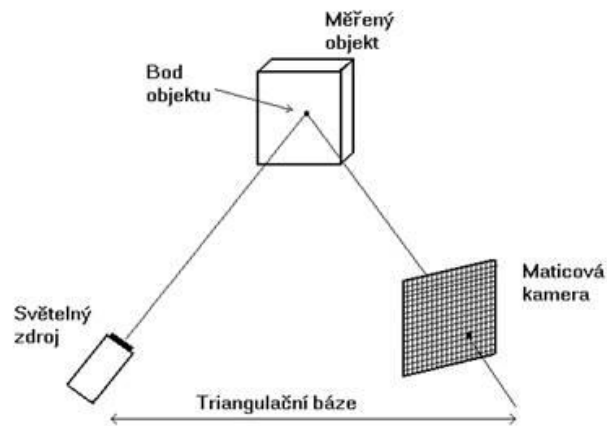
- aktivní triangulace
- pasivní triangulace
- měřicí systémy s teodolitem
- fokusovací technika
- techniky "podoba ze stínování"

2.1.1. Aktivní triangulace

Aktivní triangulace využívá fotogrammetrické rekonstrukce snímaného objektu. Jde o nasvícení povrchu zkoumaného objektu zdrojem světla a současným snímáním pomocí CCD snímače.

Při této metodě je triangulační trojúhelník vytvořen pomocí těchto komponent: světelný zdroj, sledovaný objekt a snímač světelného signálu. Spojnice mezi světelným zdrojem a snímačem je neměnná a nazýváme ji triangulační bází. Schéma aktivní triangulace (Obrázek 1). Úhel svíraný mezi triangulační bází a ramenem mezi světelným zdrojem a objektem je konstantní, zatímco úhel mezi triangulační bází a

objektem je proměnlivý a slouží jako hlavní informace o prostorové souřadnici objektu.[1]



Obrázek 1: Schéma aktivní triangulace

Zdroj: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.htm> [10. 3. 2015.]

- světelný paprsek (1D triangulace)
- světelný pruh (2D triangulace)
- strukturovaný světelný svazek (3D triangulace)

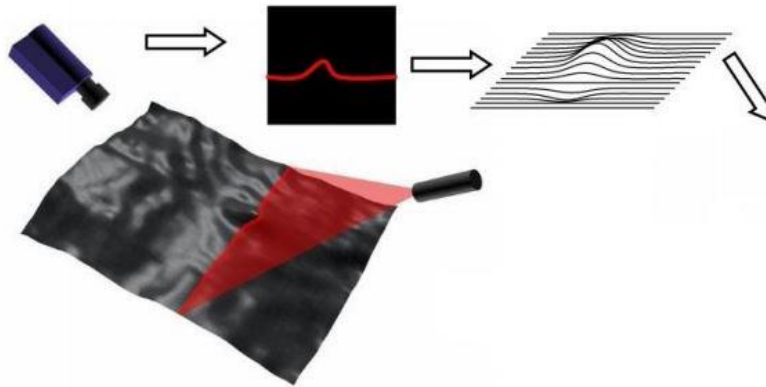
Všeobecným problémem těchto metod jsou nerovnosti a vyhloubeniny na zobrazovaném objektu, protože mohou zabránit jak správnému nasvícení objektu, tak správnému rozpoznání objektu pomocí snímače.

1D triangulace

Využívání nasvícení povrchu pomocí bodového zdroje světla ve formě paprsku. Při tomto postupu je objekt současně snímán pomocí kamery s CCD snímačem.[1]

2D triangulace

Při této metodě se na snímáný objekt vysílá místo jednoho bodu přímkový paprsek. Paprsek se na povrchu daného tělesa zdeformuje a tato deformace je zachycena do 2D obrazu, po složení více 2D obrazů je možno zrekonstruovat 3D obraz snímaného objektu (Obrázek 2).[2]



Obrázek 2: Systém 2D triangulace

Zdroj:

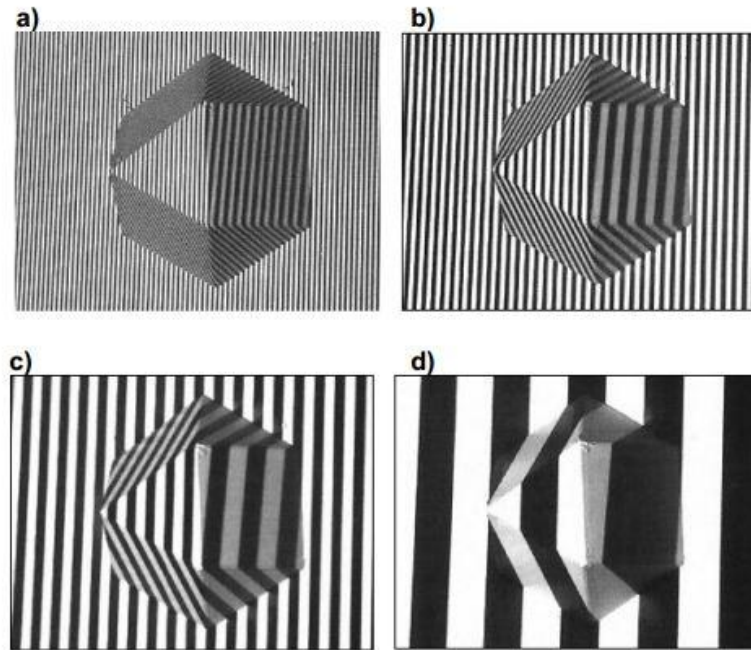
https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/33065/Dp_Jan%20Novotn%C3%BD.pdf?sequence=2&isAllowed=y [10. 3. 2015.]

3D triangulace

Tato metoda využívá při projekci strukturovanou mřížku nebo světelné pole. Podle deformací jednotlivých čar se stanovuje výsledná struktura modelu. Výsledek tohoto měření závisí nejen na kvalitě snímáče, ale také na hustotě zadané mřížky (Obrázek 3).[3]

Do této skupiny patří tyto techniky:

- technika moiré
- technika světelného vzoru
- technika barevného kódu
- technika fázového posuvu



Obrázek 3: Možnosti 3D triangulace

Zdroj:

https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/13733/3D_triangulacni_technika_rekonstrukce_objektu.pdf?sequence=2&isAllowed=y [10. 3. 2015]

2.1.2. Pasivní triangulace

Pasivní triangulace opět využívá různé formy digitální fotogrammetrie. Slovem pasivní je myšleno to, že tyto způsoby snímání 3D obrazu nepotřebují ke svému pořízení žádný specifický zdroj světla. Tyto metody pouze kombinují více obrazů a poté dopočítávají z-tovou souřadnici. Běžně jsou používány tyto systémy:

- více kamer se známou orientací
- více kamer se samokalibrací
- jedna kamera v různých polohách se samokalibrací

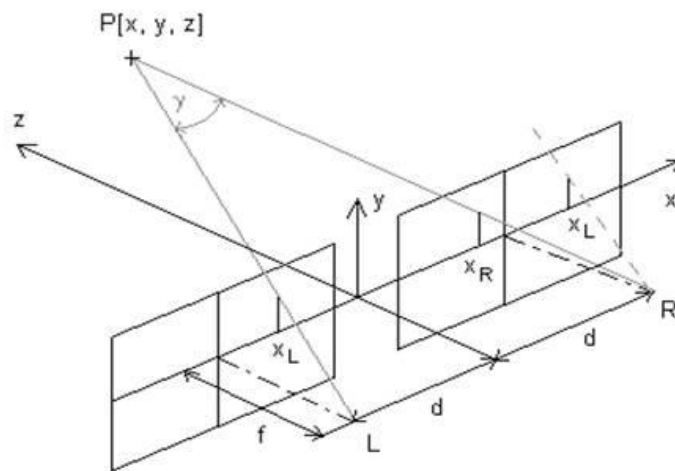
Pro dynamické systémy je vhodnější varianta s více kamerami, pro statickou úlohu většinou postačí jedna kamera se samokalibrací. Pro systémy se samokalibrací je nutný nějaký kalibrační předmět s předem známými a definovanými rozměry. Systém pracuje na porovnání dvou a více obrazů ze dvou kamer se známou vzájemnou polohou. Při zachycení bodu na obou obrazech se pomocí triangulace doplní výsledná prostorová souřadnice zjišťovaného bodu.[1]

Speciálním příkladem triangulace je stereo vidění (Obrázek 4). Stereo vidění využívá známé vzájemné polohy dvou kamer a proto je možné při zpracování skládat výsledný obraz z těchto dvou obrazů. Tento jev funguje za předpokladu, že optické osy snímačů jsou rovnoběžné, obrazové roviny leží v rovině $z=0$ a ohnisková vzdálenost je shodná. Shrnout lze následujícími rovnicemi (2.1 až 2.3). Toto je nejjednodušší možnost konfigurace, při složitějších nastaveních je třeba přidat vzorce pro přepočítání jednotlivých hodnot.[1]

$$x = x_L \cdot \frac{2 \cdot d}{x_L - x_P} \quad (2.1)$$

$$y = y_L \cdot \frac{2 \cdot d}{x_L - x_P} \quad (2.2)$$

$$z = \frac{2 \cdot d \cdot f}{x_L - x_P} - f \quad (2.3)$$



Obrázek 4: Schéma stereo vidění

Zdroj: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html> [20. 4. 2015,]

2.1.3. Měřicí systém s teodolitem

Měřicí systém s teodolitem je jedním z nejpřesnějších měřicích systémů s chybou pod $10^{-5}\%$. Ze známých souřadnic polohy měřených bodů a měřicího aparátu jsou nasnímány úhly svírané mezi volenou vodorovnou a horizontální osou a je dopočítána

vzájemná výšková souřadnice všech bodů. Systém je hojně využíván ve stavebnictví pro svou jednoduchost a přesnost (Obrázek 5).[4]



Obrázek 5: Teodolit

Zdroj: <http://igdm.vsb.cz/igdm/zamestnanci/pospisil/navody%20geo1.pdf> [20. 4. 2015]

2.1.4. Fokusovací technika

Fokusovací technika využívá k měření difrakci polarizovaného světla závislého na ohniskové vzdálenosti. Jsou známy tyto druhy fokusovací techniky:

- konfokální mikroskopie
- kontrolované fokusování
- metody rozfokusování

Konfokální mikroskopie

Tato technologie využívá laserového paprsku procházejícího přes dvě clonky a čočku, který se poté zobrazuje do ohniskové vzdálenosti. Odražené světlo opět prochází přes clonky až do čidla. Clonky odfiltrují všechny odraz kromě ohniskové roviny. Pro kompletní řešení úlohy je potřeba snímat celou známou síť (x, y) , abychom získali kompletní hodnoty z-tových souřadnic plochy.[1]

Kontrolované fokusování

Tato technologie využívá stejného principu jako předchozí varianta, pouze je zde využíváno dané z-tové souřadnice a sleduje se, která síť bodů (x, y) je obsažena v z-tové rovině.

Metody rozfokusování

Zde je vzdálenost určena pomocí velikosti nebo ostrosti difrakčního kroužku světla odraženého zpět do objektu.

2.1.5. Techniky "podoba ze stínování"

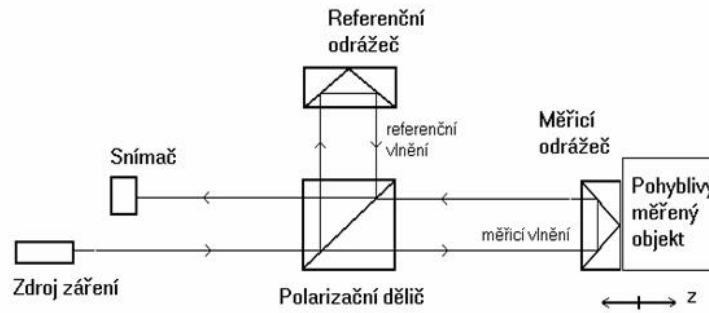
„Podoba ze stínování“ pracuje s normálami a odlesky od nasvícených ploch na zkoumaném objektu. Technika pracuje se známou polohou zdrojů a snímačů. Z normál jsou poté dokonstruovány zkoumané plochy. Je možné aplikovat změnu intenzity světla, pohyb světel nebo snímačů.

2.2. Optická interferometrie

Tato metoda využívá ke svému měření zdroj koherentního záření a rozpad světla na polarizačním děliči (Obrázek 6). Polarizační dělič paprsek rozdělí na dva, kde se jeden odrazí a vykoná danou vzdálenost k odrazové ploše a zpět. Druhý „měřící paprsek“ projde polarizačním děličem a odrazí se od měřeného objektu. Tyto dva paprsky se opět složí na polarizačním děliči. Podle intenzity výsledného světla a podle fázové odchylky světelného vlnění je stanovena vzdálenost. Mezi nejčastěji používané interferometry patří: Michelsonův, Sagnacův, Fabry-Peretův, Mach-Zehnderův.[1]

Mezi nejvýznamnější principy optické interferometrie patří:

- interferometrie pracující s více vlnovými délkami
- holografická interferometrie
- skvrnová interferometrie
- interferometrie s bílým světlem



Obrázek 6: Schéma optické interferometrie

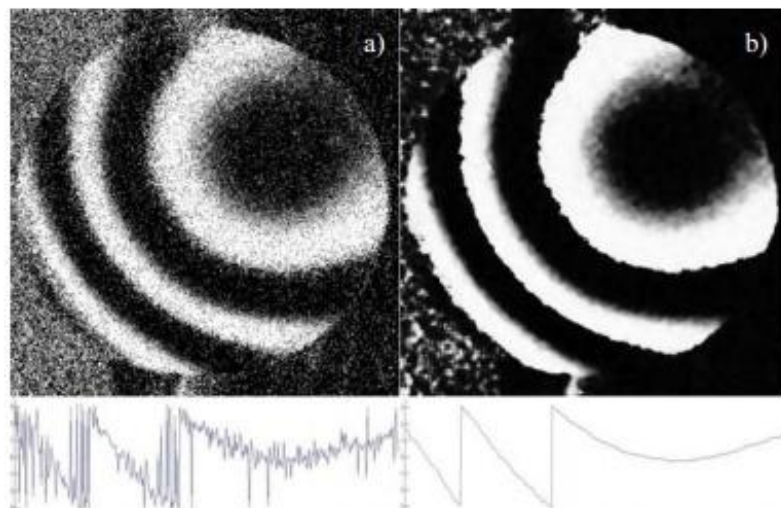
Zdroj: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>[25. 4. 2015.]

2.2.1. Interferometrie pracující s více vlnovými délkami

Tato technika pracuje na stejném principu, jako je popsán v předchozím odstavci. Pro svoje měření používá zdroj generující paprsek s různými vlnovými délkami. Rozsah těchto vlnových délek určuje rozlišovací schopnost daného přístroje. Rozlišovací schopnost je v řádu nanometrů na vzdálenost několika metrů.

2.2.2. Holografická interferometrie

Holografická interferometrie se využívá pro měření kmitajících procesů, pro porovnání stavu před a po deformaci a mnohé další aplikace. Tato metoda využívá stejného principu jako metody předchozí. Zde ovšem není důležité porovnání s referenčním paprskem, ale srovnáváme stav před deformací, který je vytvořen v jiném časovém okamžiku a okamžitý stav po deformaci. Nezdeformovaný obraz je promítán zpět na deformovaný objekt a z tohoto srovnání lze odečíst výslednou deformaci (Obrázek 7).[5]

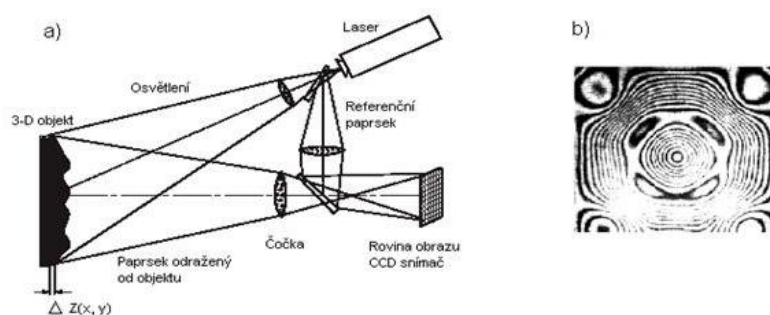


Obrázek 7: Výsledek holografické interferometrie

Zdroj: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB09/prispevky/085_psota.pdf[25. 4. 2015.]

2.2.3. Skvrnová interferometrie

Tato metoda využívá monochromatického paprsku světla vyslaného na nerovný povrch objektu. Na povrchu spolu jednotlivé části interferují a odrážejí se do snímáče. Snímač vytvoří skvrnitý vzor, který odpovídá danému povrchu. Pokud bude pokus opakován pro různé formy deformace, od kterých bude odečten počáteční interferogram, výsledkem procesu bude rozdílový interferogram (Obrázek 8), který odpovídá výsledné deformaci.[1]

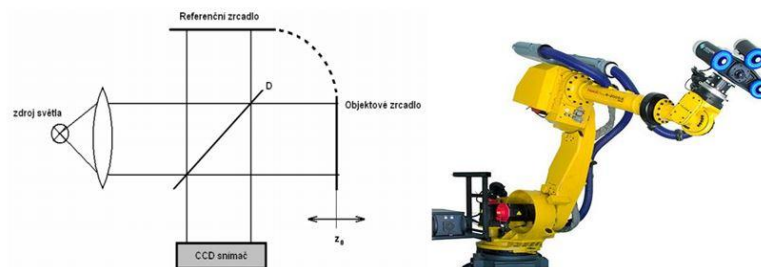


Obrázek 8: Skvrnová interferometrie: a) typické uspořádání, b) rozdílový interferogram

Zdroj: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>[25. 4. 2015]

2.2.4. Interferometrie s bílým světlem

Tato metoda využívá zdroj světla s velkou spektrální šířkou od 10 do 100 nanometrů. Metoda se používá jak pro měření na nerovném povrchu, tak pro měření děr a výškových budov. Při měření prochází bílé světlo soustavou čoček, která z něj utvoří potřebný strukturovaný paralelní svazek. Světlo je opět přes dělič rozděleno na referenční a měřicí část, která je vyslána k objektu. Poté se opět spojí v děliči a jsou zaznamenány na CCD snímači (Obrázek 9). Výhodou metody je záznam celé snímané oblasti a proto vysoká efektivita měření. Tato metoda je vhodná i pro robotické použití (Obrázek 9).



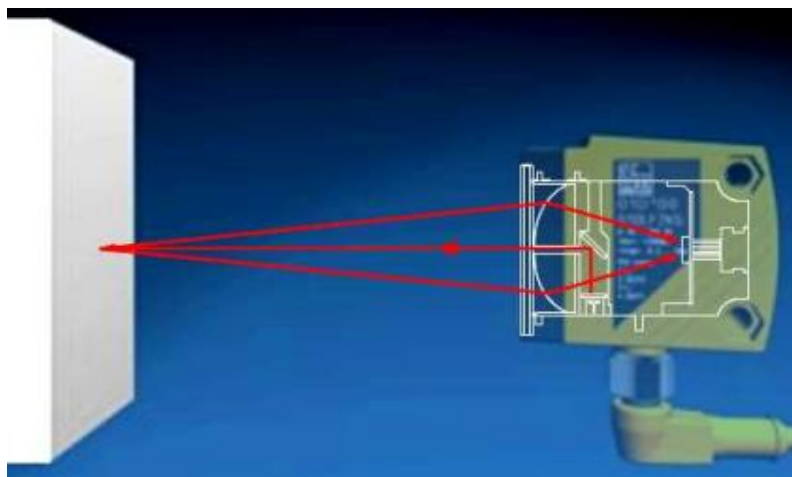
Obrázek 9: Robot využívající interferometrie s bílým světlem

Zdroj: http://www.hexagonmetrology.cz/Hexagon-Metrology-WLS400A_767.htm#.VGsyJPmG8RE[30. 4. 2015]

2.3. Metody založené na měření doby letu modulovaného světla

Tyto metody využívají známého vztahu pro vzdálenost (2.4). Z tohoto stavu můžeme při známé soustavě (x, y) dopočítat z-tovou souřadnici. Před začátkem měření je nutnost kalibrace přístroje pro dané podmínky za pomoci referenčního objektu v dané vzdálenosti. Kvůli vysoké rychlosti c ($3 \cdot 10^8$ m/s) a nutnosti sladit vše s časovači a elektronikou v přístroji vzniká chyba v řádech centimetrů. Proto tato technika není vhodná pro přesné měření (Obrázek 10).

$$z = c \frac{t}{2} \quad (2.4)$$



Obrázek 10: Schéma pro měření doby letu

Zdroj:

https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/5626/DP_Mlatecova%20Hana.pdf?sequence=1&isAllowed=y [10. 5. 2015.]

V této části byly shrnuty základní principy optických metod pro měření vzdálenosti a záznam 3D obrazu zkoumaného předmětu. Tyto metody nejsou jediným způsobem analýzy 3D profilu. Mezi další metody využívané v průmyslové praxi patří také metody založené na principech magnetizmu, ultrazvuku a dalších. Pro vlastní měření byl použit systém CogniTens - Optigo 200, který k tvorbě výsledného obrazu bodů využívá kombinaci triangulace a interferometrie bílým světlem.

3. CogniTens - Optigo 200 systém

Pro potřeby diplomové práce bylo potřeba analyzovat umístění zkoumaného objektu v daném prostoru. Dle zadání bylo k řešení tohoto problému využito systému „CogniTens - Optigo 200“. Systém vytváří mrak bodů v 3D prostoru, kterým lze nahradit geometrický model zkoumaného objektu. Tento systém je možné po úpravách ve vytvořených programech nahradit jiným zařízením, které je schopno vytvořit dostatečně přesný mrak bodů, kterým lze popsat zkoumaný objekt.

3.1 Použité vybavení

CogniTens - Optigo 200 je systém využívající tři kamery s rozlišením 1,4 megapixelu upevněných na masivní optické hlavě (Obrázek 11). Kamery mají výměnné čočky pro lepší rozlišení při práci s různými velikostmi předmětů. Dále je kolem každé kamery světelný kruh, který při měření produkuje bílé světlo pro měření a analýzu předmětu. Optická hlava je opatřena dvěma lasery, které pomáhají určit vzdálenost zkoumaného objektu. Velmi důležitý je také strukturovaný světelný zdroj, který tuto texturu promítá na daný objekt a tím usnadňuje mapování a 3D zkoumání objektu. Další důležitou součástí optické hlavy je teplotní senzor, který pomáhá stanovit okolní podmínky, rychlost šíření světla a rozptyl světla pro co největší přesnost daného měření. [7]



Obrázek 11: Systém CogniTens - Optigo 200

Zdroj: *Optigo User Manual*

Nedílnou součástí systému je kontrolní kabina, která obsahuje počítač se softwarem pro ovládání měření a případnou změnu naměřených hodnot a úpravu naměřeného mraku bodů.

Mezi další součásti dané sestavy patří mapovací fotoaparát „Optigo 10 Mapping Camera“ (Obrázek 12). Toto zařízení se užívá k předběžnému zmapování prostoru a nalezení polohy mapovacích terčů, které si popíšeme v dalším odstavci. Tento systém je založen na fotoaparátu Canon EOS5D opatřeném 24 milimetrovou čočkou a širokým úhlem záběru.[8]



Obrázek 12: Optigo 10 Mapping Camera

Zdroj: *CogniTens Mapping - User Manual*

Mezi další důležité součásti měřicího zařízení patří barevně kódované terče a barevně kódované tyče (Obrázek 13). Barevně kódované terče (Obrázek 14) mají unikátní retro-reflexivní sadu cílů umístěnou na magnetické destičce. Tyto terčíky pomáhají systémům optigo při orientaci obrazů vzhledem k celkové poloze zkoumaného objektu. Barevně kódované tyče pomáhají při určení velikosti zkoumaného objektu. Tyče jsou důležité především pro větší objekty. Tato sada reflexního příslušenství je důležitá hlavně pro systém optigo 10, který zachytává pouze reflexní body.[8]



Obrázek 13. Barevné kódovací tyče

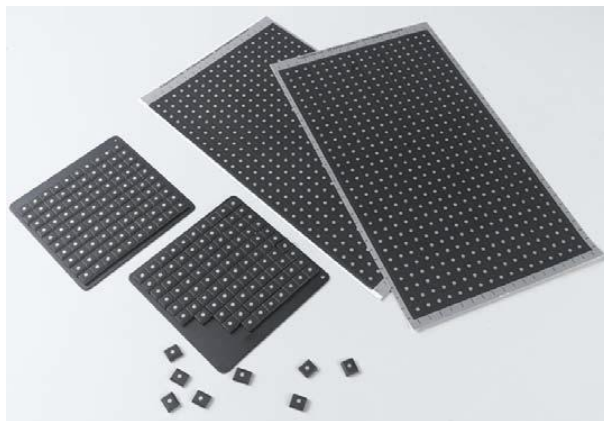
Zdroj: *CogniTens Mapping - User Manual*



Obrázek 14: Barevné kódovací terče

Zdroj: *Optigo User Manual*

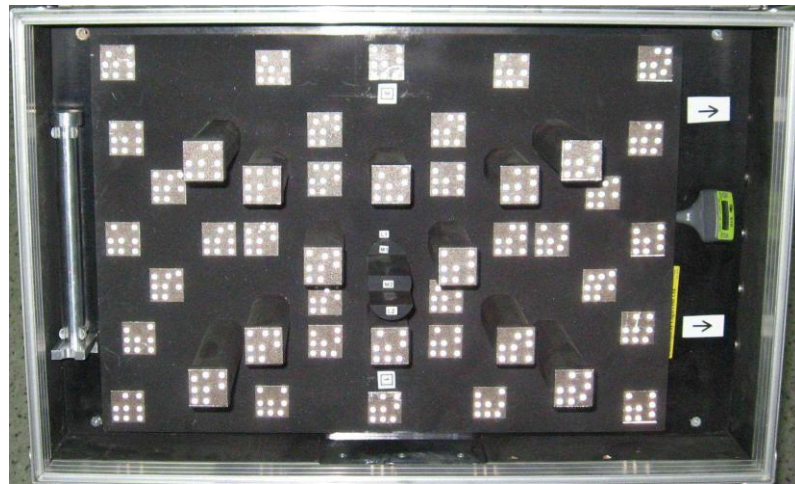
Velmi důležité jsou „retro-reflexivní terče“ (Obrázek 15), pomocí kterých se orientuje hlavní systém kamery. Pomocí těchto terčů lze zjistit natočení vyfocenému obrazu vůči zkoumanému objektu. Tyto terče jsou ve dvou provedeních a to magnetické pro feromagnetické součásti nebo nalepovací pro ostatní druhy součástí.



Obrázek 15: Retro-reflexivní terče

Zdroj: *Optigo User Manual*

Pro fungování systému je důležitá kalibrační krabice (Obrázek 16). Tato krabice je tvořena sestavou mnoha reflexních bodů rozmístěných v různých pozicích a výškách od základní roviny krabice. Důležitá je zde prostřední věž, kde jsou místa, která se používají pro zaměření a kalibraci systému před každým měřením. Další důležitou částí je teploměr umístěný na boční straně kalibračního boxu. Přesná teplota při měření zajišťuje vyšší přesnost.[7]

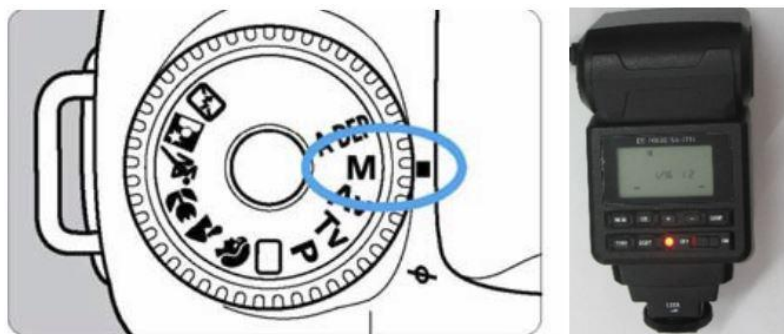


Obrázek 16: Kalibrační box

Zdroj: *CogniTens Mapping - User Manual*

3.2 Příprava měření

Pro úspěšné měření je nejprve potřeba dobře připravit mapovací oblast. Tato oblast by měla být maximálně vodorovná a co nejvíce rovinná. Pro zvolený postup měření se dá použít i drsný povrch, ale může se stát, že výrazně ovlivní výsledek měření. Povrch je potřeba očistit a polepit jak barevně kódovanými tak reflexními terčíky. Důležité je dostatečně husté polepení terčíky. Je dobré tyto terčíky ukládat do strukturované sítě. Poté je potřeba nasnímat danou oblast pomocí Optigo 10 fotoaparátu. Na fotoaparátu je po zapnutí potřeba nastavit mód M a nastavit expoziční čas na 250 (Obrázek 17). Dále je třeba na blesku nastavit rychlost záblesku 1/16 pro blesk jedna. Nyní je potřeba vyfotit mapovací oblast. Fotoaparát je umístěn do horizontální polohy, kdy osa čočky splývá s osou mapované plochy. Vytvoří se fotka a fotoaparát se potočí o 90°. Poté je třeba vyjmout paměťovou kartu a nahrát mapované prostředí do softwaru pro měření (Obrázek 18).[8]



Obrázek 17: Nastavení blesku fotoaparátu

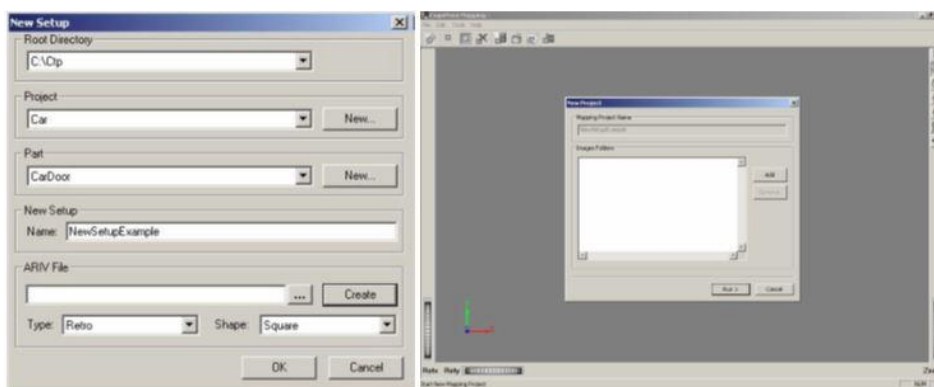
Zdroj: *CogniTens Mapping - User Manual*



Obrázek 18: Přenos nafocených dat

Zdroj: *CogniTens Mapping - User Manual*

Pro zpracování obrazu je také nutné vytvořit soubor, který bude obsahovat všechny reflexní štítky. Práce je prováděna v aplikaci Masurement. Je třeba otevřít projekt výběrem File> New Projekt (Obrázek 19). Na obrazovce se objeví okno, které je na obrázku, ve kterém je třeba vyplnit vybraná pole a zahájí se proces tvorby souboru zmáčknutím tlačítka create. Otevře se okno nového projektu, do kterého se nahrají fotky vyfocené fotoaparátem. Zmáčkne se tlačítko Add a najdou se nafocené fotky, okno se zavře a zmáčkne se tlačítko Run. Při analýze fotek je možné vyřadit ze souboru špatné terče. Poté co je soubor připraven pro další práci se zmáčkne tlačítko a soubor se nahraje do místa, kde se má uložit.[7]



Obrázek 19: Tvorba nového projektu

Zdroj: *CogniTens Mapping - User Manual*

Při začátku měření je nutné vytvořit prvotní nastavení systému. Pro tento postup stačí při otevření měření zvolit File> New> Setup. Do okna New setup se nahraje soubor, jehož vytvoření je popsáno v předchozím odstavci. Soubor má koncovku .arv. Potom už jen odsouhlasit tlačítkem Ok a prostředí je nahráno do nového souboru.

3.3. Postup měření

Při samotném měření je nejprve nutno kalibrovat kameru CogniTens - Optigo 200 po zapnutí programu Measurement. Ke kalibraci se využívá Calibration Block. Nejprve se program zeptá na okolní teplotu (Obrázek 20), tuto teplotu je možné odečíst na teploměru na boční straně Calibration Block. Pro kalibraci přístroje je nezbytné vyfotit dvě fotky (Obrázek 21). Pro fázi jedna musí být kamera podle velikosti namířena na body na věži vprostřed kalibrační krabice a zmáčknout tlačítko 1 st Phase. Místa namíření jsou popsána v příložené tabulce. Při měření musí být dodržena ideální vzdálenost. Tuto vzdálenost je možno nastavit pomocí dvou laserů, které se musí na hledaném bodě sjednotit v jeden. Pokud je první fáze kalibrace úspěšná, postup pokračuje dále stejným postupem pro druhý bod z tabulky. Pokud je procedura neúspěšná, proceduru je třeba zopakovat. Pokud byla kalibrace úspěšná, zmáčkne se tlačítko Calibration. V tento moment je kamera zkalibrována a může se začít s měřením.



Obrázek 20: Nastavení teploty prostředí

Zdroj: *Optigo User Manual*



Obrázek 21: Proces kalibrace

Zdroj: *Optigo User Manual*

Velikost pole	Fáze značka	Bloku
Malé	1 st Phase	S1
	2 st Phase	S2
Střední	1 st Phase	M1
	2 st Phase	M2
Velké	1 st Phase	L1
	2 st Phase	L2

Tabulka 1: Tabulka pro kalibrační nastavení

Zdroj: *CogniTens Mapping - User Manual*

4. Náhrada systému CogniTens - Optigo 200

V rámci diplomové práce byl k vytvoření mraku bodů, který je v práci analyzován, použit systém CogniTens - Optigo 200. Tento systém, který je ale velmi nákladný, je schopen zpracovávat velmi přesné a detailní polohy 3D bodů, které musejí být následně tříděny, aby byla daná problematika zpracovatelná v reálném čase. Pro potřeby této úlohy není taková úroveň detailu nutná. Jako náhrada současného systému se nabízejí dále uvedené varianty.

4.1. Artec Spider

Mezi jednu z možných variant patří ruční scannery. Jejich výhodou jsou menší rozměry a hmotnost a také schopnost nepřetržité tvorby obrazu. Jako příklad je možno uvést scanner „Artec Spider“ (Obrázek 22). Výhodou je dále to, že pro tento druh vytváření 3D obrazu není potřeba referenčních značek. Scanner využívá principu triangulace, který byl popsán v předchozích kapitolách. Scanner je schopen tvořit až 7,5 snímku za sekundu, což umožňuje rychlou tvorbu 3D obrazu. Scanner je schopen 3D rozlišení až 0,03mm a zdrojem světla jsou modré diody. Nevýhodou je nutnost malé vzdálenosti zkoumaného objektu a malého rozsahu zkoumané oblasti (90x70 mm až 180x140 mm), což by znamenalo problémy při automatizaci. Při automatizaci by bylo třeba nejprve nastavit, jak malé objekty přístroj zkoumá, případně proměnlivě nastavovat vzdálenost a místo, ze kterých je obraz pořizován.[9]



Obrázek 22:Scanner Artec Spider

Zdroj: <http://www.skenovani3d.cz/3d-skenery/artec-spider/> [15. 5. 2015.]

4.2. 3D Systems Capture Scanner

Jako další alternativu lze uvést „3D Systems Capture Scanner“ (Obrázek 23). Tento scanner využívá technologie „state-of-the-art blue LED technology“. Pomocí této technologie je schopen snímat body s přesností 0.06 mm s vzorkovací frekvencí 3 Hz. Opět je zde problém s menším rozsahem scanneru (do 50 mm na snímek). Scanner má integrovanou schopnost rozpoznání vlastní polohy pomocí triangulace scannovaného objektu. Mezi výhody opět patří nižší rozměry a nižší hmotnost kolem jednoho kilogramu.[10]



Obrázek 23: 3D Systems Capture Scanner

Zdroj: http://geomagic.com/files/2014/1823/4234/Capture_Design_EN_Web.pdf[15. 5. 2015.]

4.2. 3D scanner WLS400M

Jako poslední lze uvést scannery od firmy Hexagon. Příkladem je třeba „3D scanner WLS400M“ (Obrázek 24). Tento scanner pracuje s technologií bílého světla, která mu umožňuje pracovat na velké oblasti (500x500 mm). Princip této metody vychází z koherentní scannovací interferometrie, kdy je vyslán paprsek bílého světla na zkoumaný objekt a poté je porovnána doba návratu s referenčním paprskem. Systém má

ovšem problém s většími rozměry a větší hmotností. Jeho výhodou je větší přesnost a větší snímaná oblast.[11]



Obrázek 24: 3D scanner WLS400M

Zdroj:<http://www.directindustry.com/prod/hexagon-metrology/3d-scanner-white-light-5623-568675.html>[10. 5. 2015.]

5. Definice problému

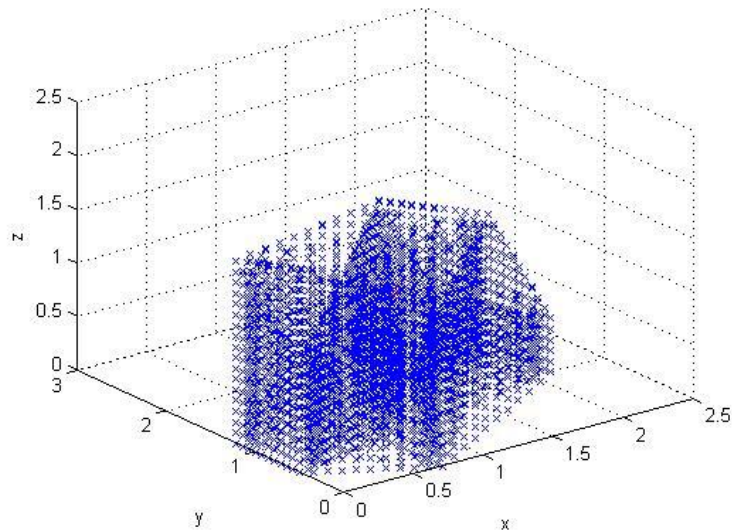
Daný úkol vychází ze zadaného vybavení a definice úkolu. V úkolu bylo definováno, že zadané objekty nemusí být tvarově přesné, jejich rozměry mohou být větší než je jejich ideální obraz v 3D modelu.

Pro identifikaci polohy je nezbytné použít znalost ideálního modelu vytvořeného v některém z CAD softwarů a transformovaném do některého z univerzálních formátů. Pro tuto úlohu byl zvolen formát STL pro jeho nejmenší datový objem, který zachovává pouze informaci o krajních plochách a vrcholových bodech. Detailně se transformací pro STL formát bude zabírat kapitola 6.3.

Problémem zvoleného systému CogniTens - Optigo 200 je po provedené analýze vysoký počet zjištěných bodů. Toto množství narůstá až do desítek tisíc bodů. Při postupném testování systému pomocí stupňů volnosti jednotlivých bodů, by vzhledem k počtu bodů systému počet stupňů volnosti stoupal až do statisíců a to by sebou neslo velké nároky na výpočtový čas.

Proto je potřeba vytvořit jinou formu analýzy. Tato analýza by měla snížit dobu zpracování na pár sekund a tím i zvýšit reakceschopnost při práci s tímto systémem.

Jedním z velkých problémů je umístění systému na podložce. Podložka znemožňuje snímání objektu ze všech stran. Hlavním problémem je získání spodní strany objektu. Problémem je také, že pokud je u některých objektů spodní strana získána, její získání nemusí být úplné. Také je těžké posoudit, jak úplná spodní strana byla získána, případně které body jsou vyobrazením podložky a které již zkoumaného objektu. Proto při zde použité analýze spodní strana není vůbec používána, případně je upravena tak, aby byla vždy stejná a případné chyby ji ovlivňovaly pouze minimálně. Proto je obraz uvažován v provedení jako na obrázku (Obrázek 25).



Obrázek 25: Neúplný obraz objektu

Dalším problémem jsou body okolního prostředí, tedy body, které nejsou součástí analyzovaného objektu, ale při snímání jsou také zachyceny pomocí 3D kamery. Podložka, na které zkoumaný objekt leží, by při měření měla být dokonale rovná, ale vzhledem k dokonalosti snímacího systému a jeho schopnosti rozlišovat až desetinné rozdíly ve výchylnách, je třeba s tímto počítat a případné body podložky odfiltrout i za cenu ztráty některých dat objektu. Výpočet musí být vůči těmto datům naprosto nezávislý, případná ztráta těchto dat by neměla výslednou analýzu ohrozit.

6. Analýza natočení obrazu

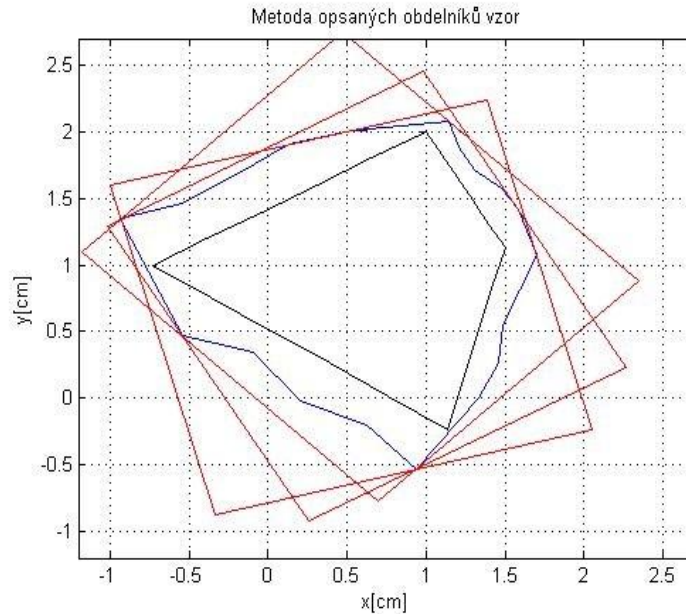
Největším problémem získaných dat z 3D kamery je to, že výstupem z kamery je pouze 3D mrak bodů. Tomuto mraku bodů chybí jakákoliv informace o spojitosti mezi těmito body a entitách, které tyto body tvoří (křivky, plochy, objemy atd.). Zadáním úkolu bylo stanoveno, že výsledný útvar vznikne litím, tudíž jeho krajní roviny mohou být drsné a jakákoliv nepřesnost může způsobovat chybu při stanovení krajních rovin a hran. U každého útvaru je vhodné nejprve stanovit přesné úhly natočení, pod kterými je zkoumaný objekt umístěn v prostoru a následnou vzájemnou polohu. Toto rozdělení problému umožňuje zrychlit následné hledání přesné polohy objektu vůči CAD modelu, protože je pak možné problém zjednodušit pouze na odchylky dvou středů a není třeba rozlišovat jednotlivé body zvlášť.

Cílem všech metod, které budou v této práci popsány, je vytvoření matematického obtisku. Matematický model v práci představuje soustava geometrických objektů, které jsou pro zkoumaný objekt jedinečné. V práci popsané metody se zaměřují na vytvoření matematického obtisku modelu a následné srovnání s matematickým obtiskem zkoumaného objektu. Pokud tyto obtisky dostatečně přesně reprezentují své předlohové objekty, mělo by výsledné geometrické zarovnání těchto matematických obtisků odpovídat skutečnému zarovnání reálného objektu a jeho modelové předlohy.

6.1 Metoda nejmenších opsaných obdélníků

Jako první metoda byla zvolena „metoda nejmenších opsaných obdélníků“. Metoda se skládá z postupné analýzy mraku bodů pomocí postupně rotujících útvarů s minimálním objemem opsaným danému útvaru. Pro první pokusy bylo použito zjednodušení do 2D prostoru. Metoda analyzuje natočení dvou vzájemných poloh a hledá úhel φ , pomocí kterého rozliší natočení těchto objektů v rovině.

Úloha v 2D systému má tedy pouze jeden úhel natočení, který je třeba analyzovat. Proto je hledání úhlu mnohem přesnější a méně citlivé na nepřesnosti, než u analýzy 3D objektu, kde je třeba určit tři základní úhly natočení a proto je úloha závislá na těchto třech parametrech mnohem méně přesná. Na přiloženém obrázku lze vidět ideální útvar, který v tomto případě zastupuje CAD model a vykreslení bodů, které se budou analyzovat. Opět je splněno základní zadání úlohy, že všechny body na analyzovaném útvaru leží vně ideálního zkoumaného útvaru.



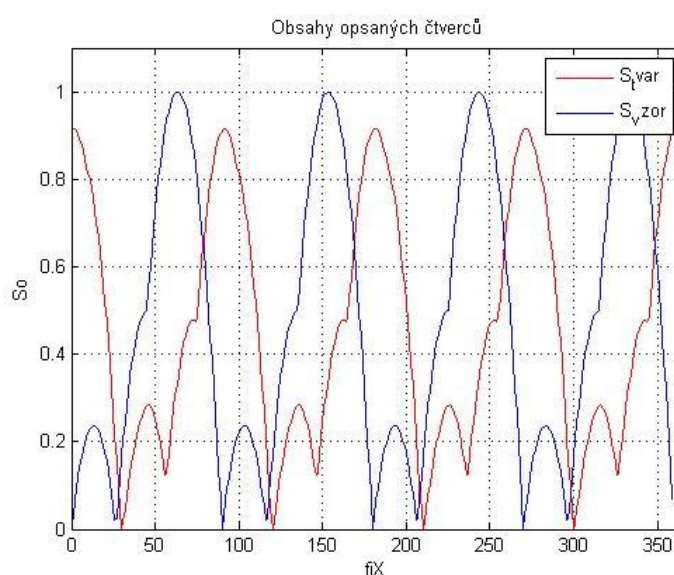
Obrázek 26: Znáornění opsaných obdelníků objektu

Základ analýzy je jednoduchý. Kolem zkoumaného útvaru se vytvoří obdelník s minimálním obsahem, který se základní osou X svírá stanovený úhel. Tato metoda se aplikuje kolem celého útvaru při proměnlivém úhlu φ_x svíraným osou X a jednou ze stran hledaného obdelníka (Obrázek 26). Analýza probíhá pomocí postupného zkoumání všech bodů a to dosažením do základní rovnice přímky (6.1). Z této přímky se hledají minimální a maximální hodnoty parametru b , které se později použijí k rekonstrukci hledaného obdelníku. Obdelník se složí ze čtyř bodů, které vzniknou jako průniky přímek s maximální a minimální hodnotou b pro daný úhel φ_x a přímek s úhlem $\varphi_x + \frac{\pi}{2}$. Pomocí těchto krajních bodů se stanoví obsah výsledného obdelníku, který se zapíše do vektoru, který se dále použije pro analýzu natočení.

$$y = a \cdot x + b \quad (6.1)$$

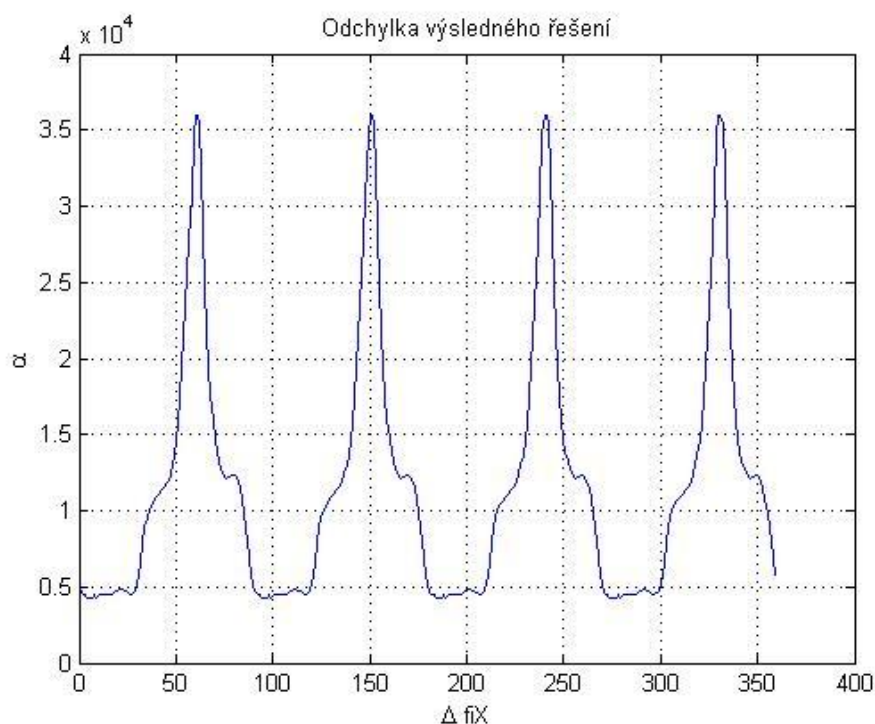
Tento postup se provádí, jak u ideální předlohy s dokonalým tvarem a jasnými hranami, tak pro zkoumaný objekt s tvarovými nepřesnostmi. Postup pro ideální tvar lze použít separátně a jeho výsledky pouze nahrát do skriptu ve formě výsledného vektoru zkoumaných obsahů. Tento postup výrazně zkracuje výpočtový čas a je stěžejní hlavně při přechodu na problém s třemi osami rotace, kdy dokáže výpočtový čas z několika hodin zkrátit na pouhé sekundy.

Dalším postupem je natočení a zorientování výsledných hodnot obsahů vzorového a zkoumaného objektu (Obrázek 27). Pro oba objekty je posunuto minimum do nulové hodnoty tak, že od všech obsahů je odečtena minimální hodnota obsahu, které bylo v daném testování dosaženo. Potom je zde použita diferenční funkce, kterou je posouzena odchylka vzorového objektu a zkoumaného objektu (6.2), (Obrázek 28), který je zvolen v přesné a známé poloze (Obrázek 28). Následně je třeba vybrat jednu z maximálních hodnot grafu, které představují úhel natočení vzoru a zkoumaného obrazu. Každé řešení má nejméně čtyři maxima funkce, které vyplývají ze symetrie obdélníku, který je v metodě použit jako analyzační útvar.



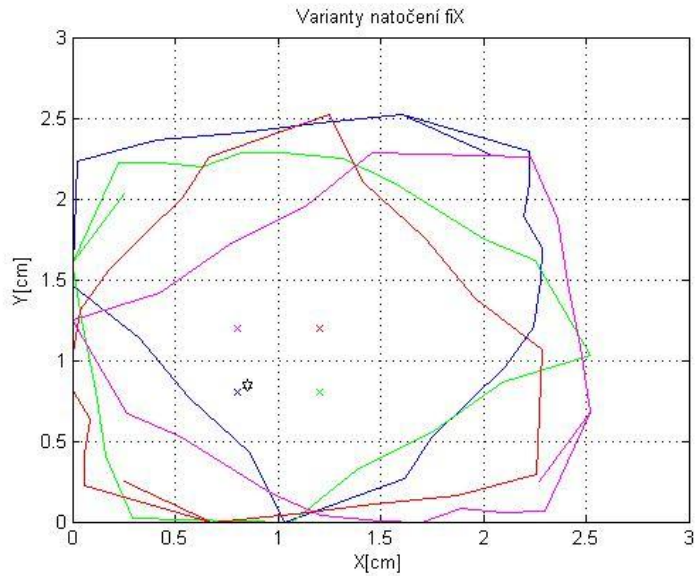
Obrázek 27: Obsahy kvádrů vzorového a zkoumaného objektu

$$\alpha(\Delta\varphi) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{|S(\varphi + \Delta\varphi) - S_{vz}(\varphi)|} d\Delta\varphi \quad (6.2)$$



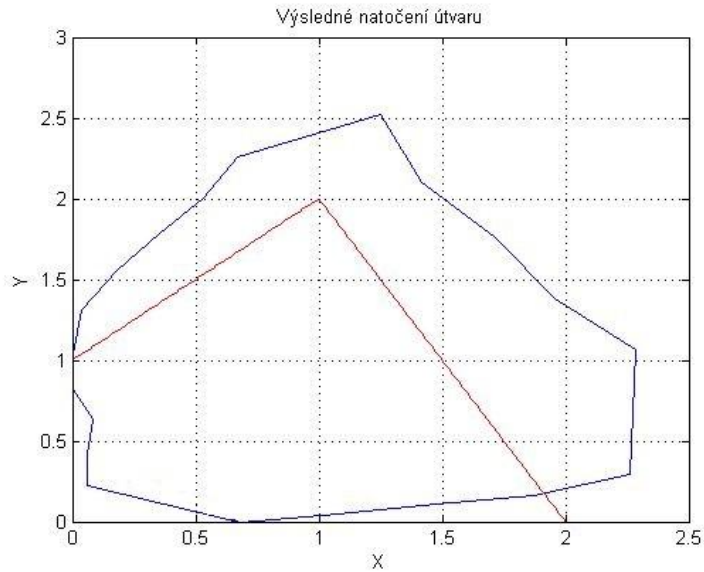
Obrázek 28: Diferenční funkce obsahů

Problém analýzy pomocí minimálního opsaného obdélníka je jeho symetričnost. Jak je vidět na přiloženém grafu, pro zkoumaný objekt získáváme hned čtyři maximální polohy, které jsou vzájemně posunuty o $\frac{\pi}{2}$ radiánů. Problém se dá řešit mnoha způsoby. V práci je problém vyřešen pomocí vyzkoušení všech variant natočení, která při předešlé analýze vyšla a zkoušky vzdáleností jejich středu od vzorového středu útvaru. Střed je definován jako aritmetický průměr všech X a Y hodnot objektu. Na obrázku (Obrázek 29) lze vidět zkoušku natočení ve všech čtyřech možných polohách, které vyšly z předchozí analýzy. Pro každý z těchto útvarů byla stanovena odchylka jeho středu od natočení vzorového útvaru a byla vybrána varianta s minimální hodnotou odchylky.



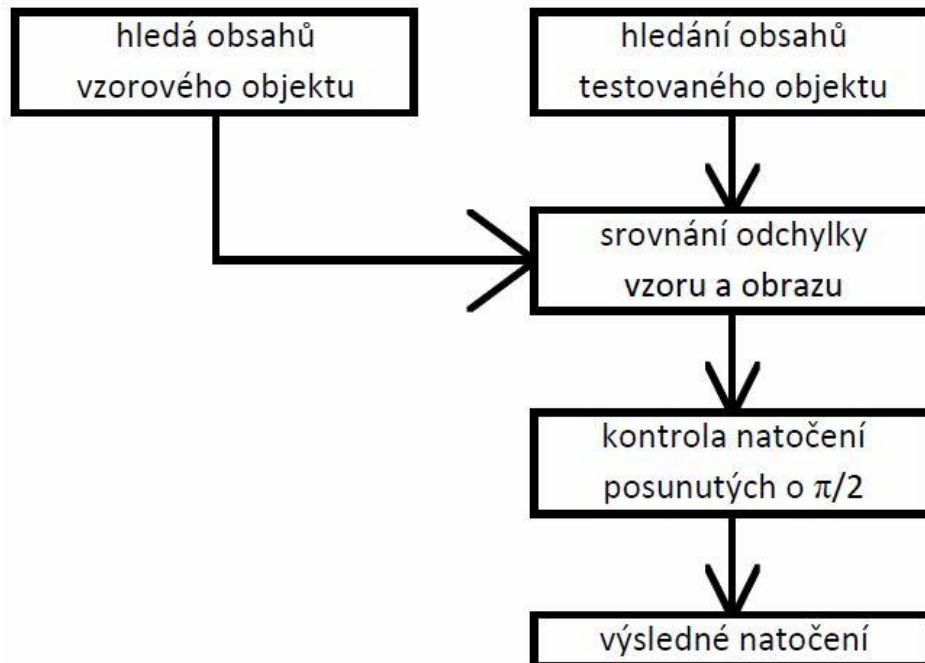
Obrázek 29: Varianty natočení o $\frac{\pi}{2}$

Po nalezení správné polohy už stačí pouze odečíst výsledný úhel, který byl získán pomocí analýzy. Na obrázku je zkoumaný tvar natočený do shodného postavení se vzorovým objektem. Z tohoto je vidět, že analýza je poměrně přesná a natočení zvládá do úrovně zadaného kroku rozlišení, v tomto případě úhel 1 stupeň. Analýza má ale svá úskalí. Nepříliš dobře se vyrovnává s nenadálými velkými výkyvy tvaru a tento způsob analýzy neumí rozlišit rozdílný tvar útvaru, který není na povrchu objektu, jako jsou díry a prohlubně. Na druhou stranu dokáže analýzu výrazně zrychlit a to hlavně při optimalizaci celého kódu. Analýza ve 2D není k samotné analýze obrazu používána, ale je zde uvedena pro názornost a pro jednoduché zobrazení řešení a postupů, které se v provedení 3D problému velice těžko názorně ukazují a vynášejí do smysluplných grafů.



Obrázek 30: Výsledné natočení zkoumaného objektu

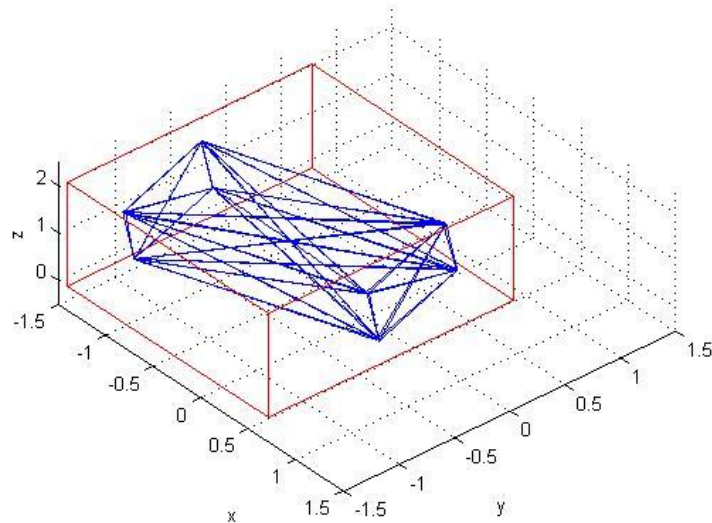
Pro případ potřeby detailnějšího nastudování je kód uložen na přiloženém CD a to ve skriptu pro tvorbu vzorového souboru „analyza_2d.m“ a soubor pro analýzu výsledného natočení s názvem „analyza_2d_testovací“. Program je přiložen ve formě skriptu, kde lze volit zkoumaný útvar. Výstupem jsou grafy (Obrázek 30) postupných stavů vývoje natočení a výsledný úhel natočení útvaru.



Obrázek 31: Schéma 2D analýzy

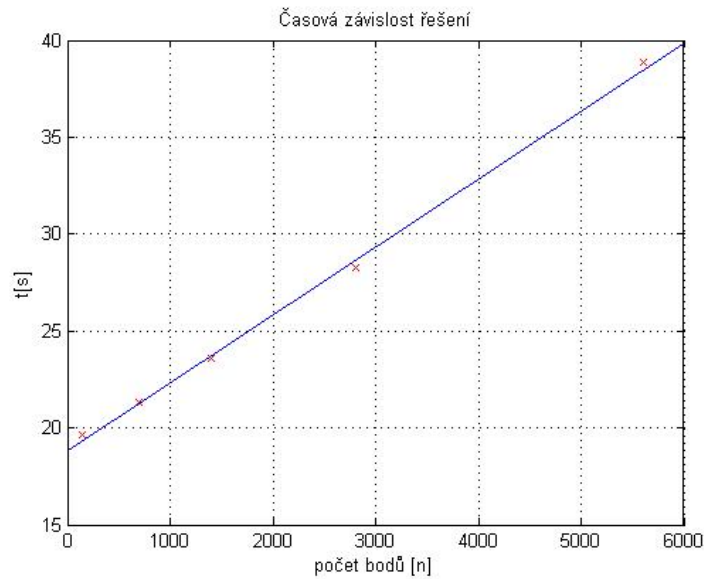
6.2. Metoda nejmenších opsaných kvádrů

Dalším krokem pro přenesení zkoumaného problému z teoretické roviny do reality bylo přidání třetího rozměru. Přejdem do 3D prostoru dochází k velkému růstu náročnosti řešení. Základní myšlenka řešení zůstává stále stejná, řešení pouze rozšíří hledané přímky na roviny a výslednou zkoumanou veličinou nebude obsah jednotlivých zkoumaných obdélníků, ale objem výsledných kvádrů (Obrázek 32).



Obrázek 32: Zkoumaný minimální opsaný kvádr

Zkoumání dané problematiky je podobné předchozímu řešení, ale má jisté odchylky. Základním problémem je natočení. V tomto řešení je využito dvojího způsobu zpracování informací, kdy natočení kolem osy Y je zprostředkováno pomocí transformační matice směrových cosinů pro rotaci kolem osy Y (6.3), (6.4). Tento prvek je nejproblematictější částí celého řešení, protože je přímo úměrně závislý na počtu bodů, které byly do řešení vloženy. Po optimalizaci byl čas řešení na počtu bodů přímo závislý. Závislost je vyjádřena v příloženém grafu a také rovnicí přímky časové závislosti (Obrázek 33), (6.5).



Obrázek 33: Časová závislost řešení

$$T_y = \begin{bmatrix} \cos \varphi_y & 0 & \sin \varphi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_y & 0 & \cos \varphi_y \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$A_1 = A_0 \cdot T_y \quad (6.4)$$

$$t = 0.0035 \cdot x + 18.834 \quad (6.5)$$

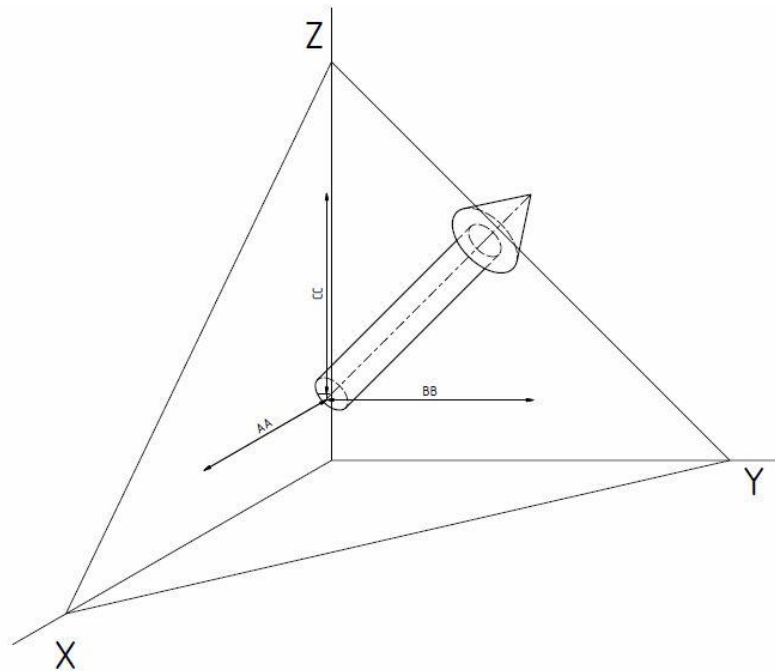
V příloženém skriptu „kvadr_rychly.m“ je uveden modelový případ s natočením kvádrů. Postup je rozdělen na více částí, v první části dochází k rotaci mraku bodů kolem osy Y. Tímto převádí mrak bodů z globálního souřadného systému do lokálního souřadného systému jedna (6.6). V druhé části dochází k tvorbě rovin pro tvorbu minimálního opsaného kvádrů zkoumanému útvaru. Jako proměnné zde figurují úhly φ_x a φ_z , které definují krajní roviny jednotlivých natočení pomocí úhlů svíraného normálovým vektorem zkoumané roviny a souřadnicových os. Pomocí těchto úhlů se dopočítávají výsledné koeficienty rovnice roviny (6.7 až 6.9), (Obrázek 34). Opět zde dochází k dopočítávání minimálních a maximálních d pro zkoumaný objekt. Tyto hodnoty jsou zapisovány do matice. Tato úprava umožňuje zrychlení algoritmu proti řešení, kdy se obě problematiky řeší současně. Úprava je výhodná hlavně pro velký počet bodů, protože převádí problém jednotlivých bodů, kterých může být libovolné množství, na matici jejíž velikost je definovaná pouze krokem natočení hledacích úhlů.

$$a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z = d \quad (6.6)$$

$$a = \cos(\varphi_z) \cdot \cos(\varphi_x) \quad (6.7)$$

$$b = \sin(\varphi_z) \cdot \cos(\varphi_x) \quad (6.8)$$

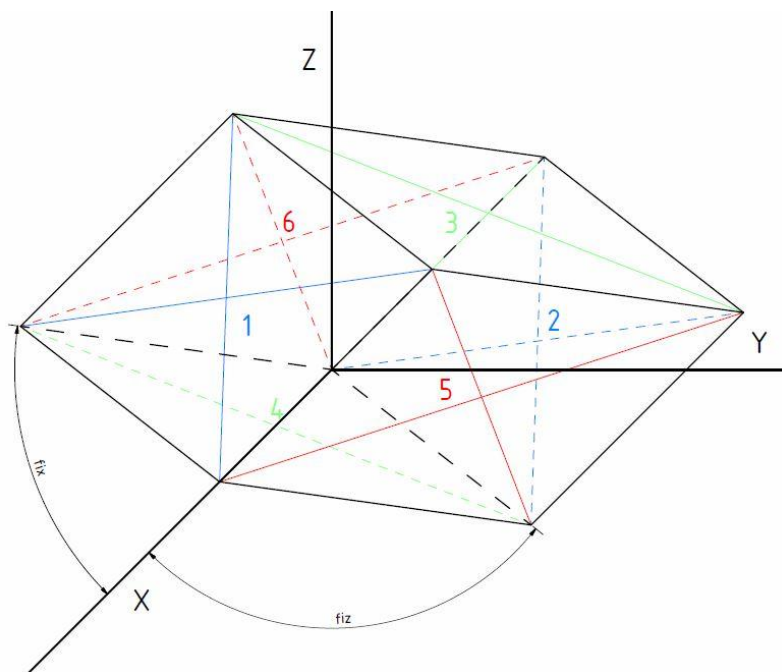
$$c = \sin(\varphi_x) \quad (6.9)$$



Obrázek 34: Normálový vektor zkoumané roviny

Po definici krajních hodnot d se přejde k tvorbě výsledných minimálních opsaných kvádrů. Každý kvádr je definován šesti rovinami, jejichž vztah je následující. První dvě roviny jsou z matice pro hledané úhly φ_x a φ_z , třetí a čtvrtá rovina jsou z téže matice, pouze je hledané místo posunuto na hodnotu, která přísluší úhlům $\varphi_x + \frac{\pi}{2}$ a φ_z . Pátá a šestá rovina jsou definovány hodnotami pro úhly $\varphi_x = 0$ a $\varphi_z + \frac{\pi}{2}$. Roviny jsou barevně vyznačeny na přiloženém obrázku (Obrázek 35). Těchto šesti rovin a jejich osm průsečíků dává dohromady hledaný minimální kvádr pomocí matice A (6.10). Čísla značí, pro kterou dvojici rovin jsou použité koeficienty- a_1 pro roviny jedna a dva, a_2 pro roviny tři a čtyři atd. Matice okrajových ploch A se vynásobí s vektorem příslušných hodnot d (6.11). Výsledkem je vektor vrcholů zkoumaného kvádru X . Pro výpočet objemu se vypočtou hranové vektory ze známých vrcholů. Pomocí smíšeného součinu

(6.12) se vypočte hodnota objemu pro danou konfiguraci φ_x a φ_z . Pro výpočet se napočítají veškeré varianty natočení a poté se z těchto variant hledají hodnoty minima, které by odpovídaly natočení vzorového objektu. Pro zjednodušení hledací funkce se vzorový objekt natočí do polohy minima. Tímto se zjednoduší hledání výsledného úhlu, bohužel je tento výpočet mnohem více náchylný na chybu, než provedení ve 2D rozměru. Protože ve 2D se hledala pouze odchylka křivky, ve 3D prostoru se hledá odchylka plochy.



Obrázek 35: Plochy opsaného kvádrů mraku bodů

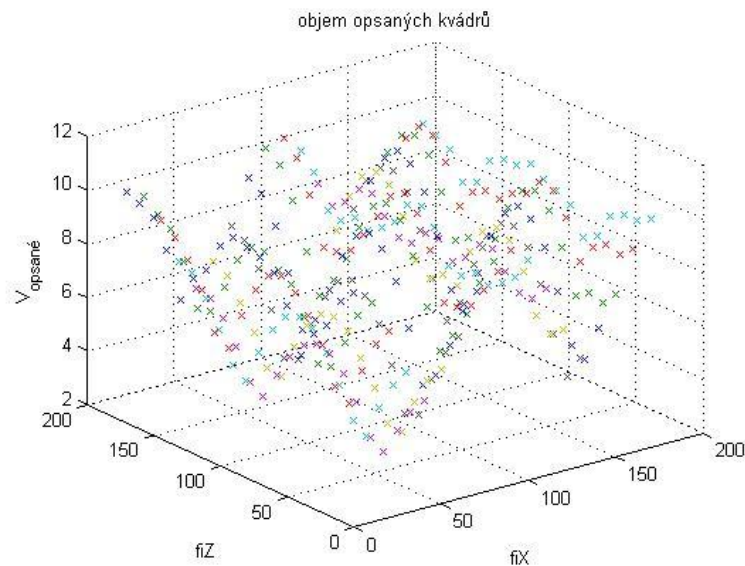
$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$X = (A)^{-1}D \quad (6.11)$$

$$V = (\vec{v}_1 \times \vec{v}_3) \vec{v}_5 \quad (6.12)$$

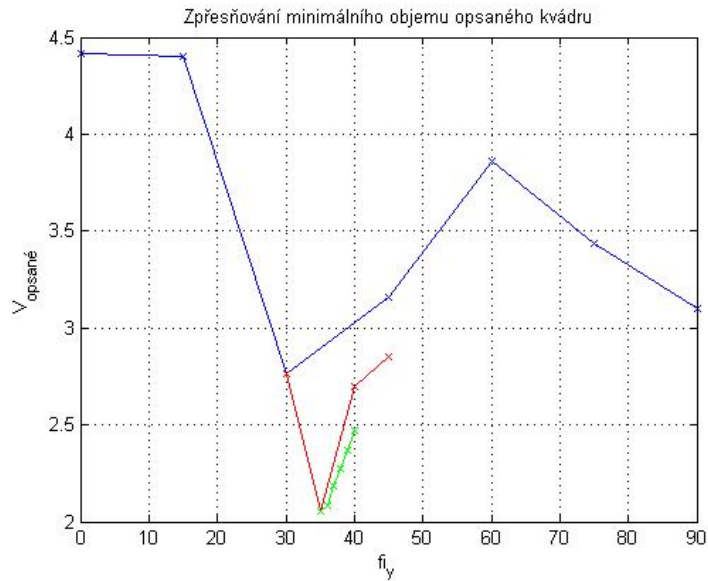
Hlavním problémem metody je, že při stoupajícím stupni detailu hledání natočení úhlů φ_x , φ_y a φ_z , vysoce stoupá časová náročnost, proto je třeba tento výpočet začít na malém rozlišení zkoumaných úhlů a postupně výpočet zpřesňovat. Na obrázku můžete vidět vynesení minimálních objemů v závislosti na úhlech natočení φ_x a φ_z pro zvolené

$\varphi_y=15^\circ$. Tento graf ukazuje první výpočet řešení a to pro krok úhlů φ_y patnáct stupňů a φ_x a φ_z deset stupňů (Obrázek 36).

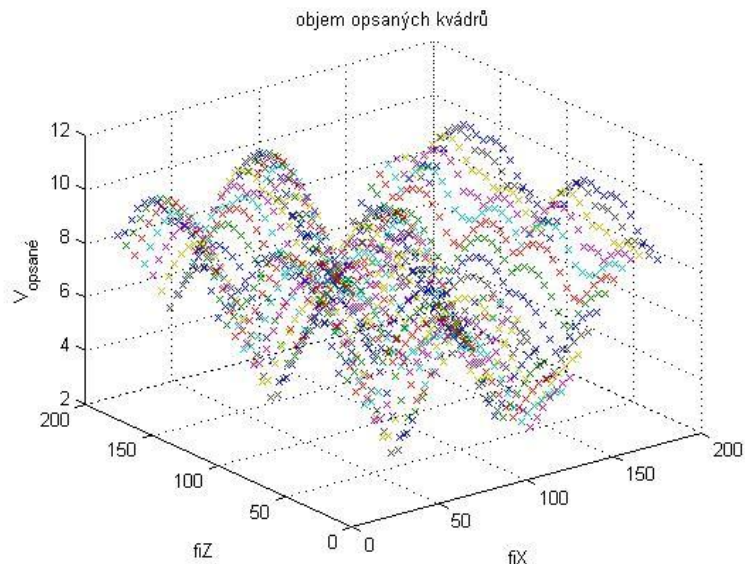


Obrázek 36: Objem opsaných kvádrů $\varphi_y = 10^\circ$

Výpočet se používá hlavně pro zpřesnění úhlu φ_y a postupné hledání minimální hladiny, na které se bude hledat výsledné řešení. Na grafu je vidět zpřesňování prohledávané oblasti (Obrázek 37). Nejprve se vybere oblast patnácti stupňů v okolí minima daného úhlu. Oblast je určena pomocí spádu vektoru k předchozímu nebo následujícímu kroku. Strana s menším spádem je brána jako lepší a proto je použita pro další výpočet minima. Vybraná oblast minima se určí jako minimum ze všech variant φ_x a φ_z pro dané natočení φ_y . Na dalším grafu lze vidět opět zpřesněné hledání na oblasti výpočtu, tentokrát pro parametry kroku ve φ_y pět stupňů a krok ve φ_x a φ_z také pět stupňů (Obrázek 38).



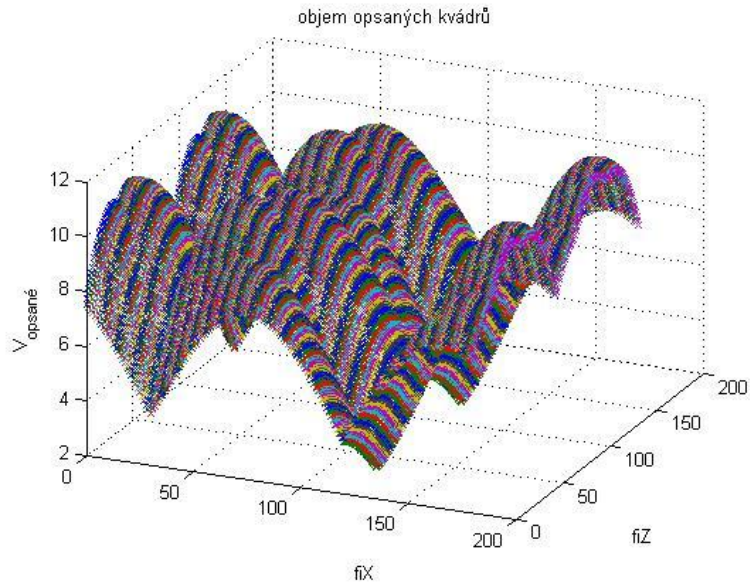
Obrázek 37: Hledání ideálního natočení φ_y (postupné zpřesňování)



Obrázek 38: Objem opsaných kvádrů $\varphi_y = 5^\circ$

Zdroj: autor

Opět proběhne stejná metodika selekce nejlepší oblasti φ_y . Zde se už výpočet dostává ke konečné přesnosti hledaného úhlu. Oblast hledání je zjemněna na přesnost s velikostí úhlu jeden stupeň (Obrázek 39). Nyní se už pouze dohledá výsledná minimální hodnota φ_y stejným postupem jako při předchozí analýze. Proti předchozí analýze 2D problému byl problém zjednodušen na pouhé hledání minima, což znamená, že vzorový objekt je předpokládán v poloze minima hledané funkce (6.13).



Obrázek 39: Objem opsaných kvádrů $\varphi_y = 1^\circ$

$$V_{vzor} = \min(V(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)) \quad (6.13)$$

Výsledkem tohoto procesu je přesné natočení úhlu φ_y , pro které má opsaný kvádr minimální objem. Stejně jako při výpočtu varianty pro 2D je nutno vyřešit shodné polohy vzniklé symetrií kvádrů, a proto je potřeba vyzkoušet hledané úhly φ_x a φ_z při variantách otočení o devadesát stupňů. Pro výslednou volbu byla opět použita metoda nejmenších čtverců na odchylku středu od ideálního zobrazení a to ve všech třech osách, střed je opět vypočten jako aritmetický průměr všech bodů kvádrů. Výsledkem jsou finální úhly natočení φ_x , φ_y a φ_z .

Pro potřeby bližšího seznámení s algoritmem je tento program nahrán na přiloženém CD pod názvem „kvadr_rychly.m“. Tato metoda by mohla být použita pro dané řešení, pokud by bylo možné nasnímat zkoumaný objekt ze všech stran a docílit dokonalého geometrického popsání objektu. Bohužel úloha je stanovena pro objekt ležící na podložce a pro tuto metodu není možné získat kompletní obraz anebo bez ztráty informací odstranit podložku, proto byla potřeba další modifikace, která bude popsána v následující kapitole.

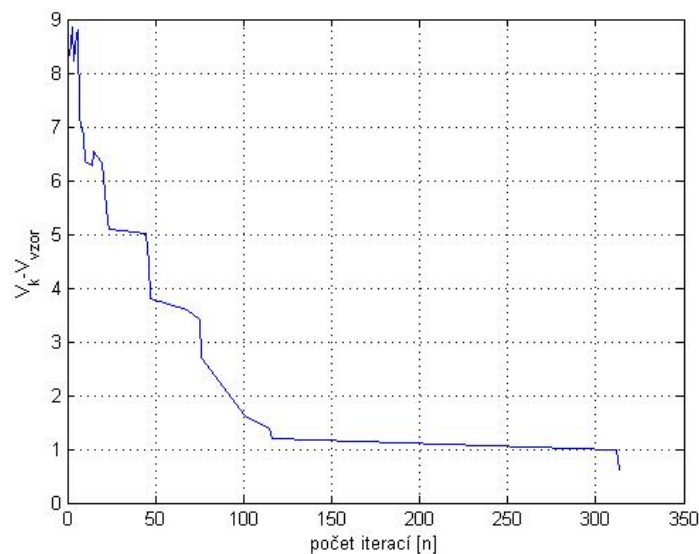
Pro nalezení cílového natočení, byla použita také optimalizační metoda. Pro nalezení ideálního natočení byla využita metoda simulačního žihání. Tato metoda optimalizuje cílovou funkci měřící vzdálenost obrazů modelu a reálného objektu při

hledání úhlů φ_x , φ_y a φ_z (6.14). Algoritmus využívá již dříve definovaných rovnic pro výsledný objem kvádrů. Metoda hledá globální extrém funkce. Výpočet postupně hledá minimum funkce, ale je zde přidáno Metropolisovo kritérium. Toto kritérium má dvě varianty řešení, kdy se určuje hodnota pravděpodobnosti P . Pokud je nově nalezená hodnota objemu menší než současná hodnota je pravděpodobnost změny stoprocentní (6.15), ale pokud je objem větší než současná hodnota, je pravděpodobnost změny popsána v rovnici (6.16). Parametr T klesá každý krok o 5%. Jako proměnné vstupují do funkce všechny tři úhly natočení kvádrů. Krok je náhodný a postupně se zmenšující od 45° až po necelý jeden stupeň. Výsledek není přesný, ale odchylka nepřesahuje jeden stupeň. Skript je nahrán na příloženém CD pod názvem „kvadr_testovací_zihani.m“. Metoda simulačního žihání byla použita pouze v této optimalizační metodě, protože neumožňuje předpřipravit si hledaná data, což je velkou nevýhodou při dalších výpočtech, když výpočet cílové funkce trvá kolem jedné vteřiny a pro simulované žihání je třeba ho opakovat více než stokrát. Na příloženém grafu je vidět postupná minimalizace výsledné funkce (Obrázek 40)

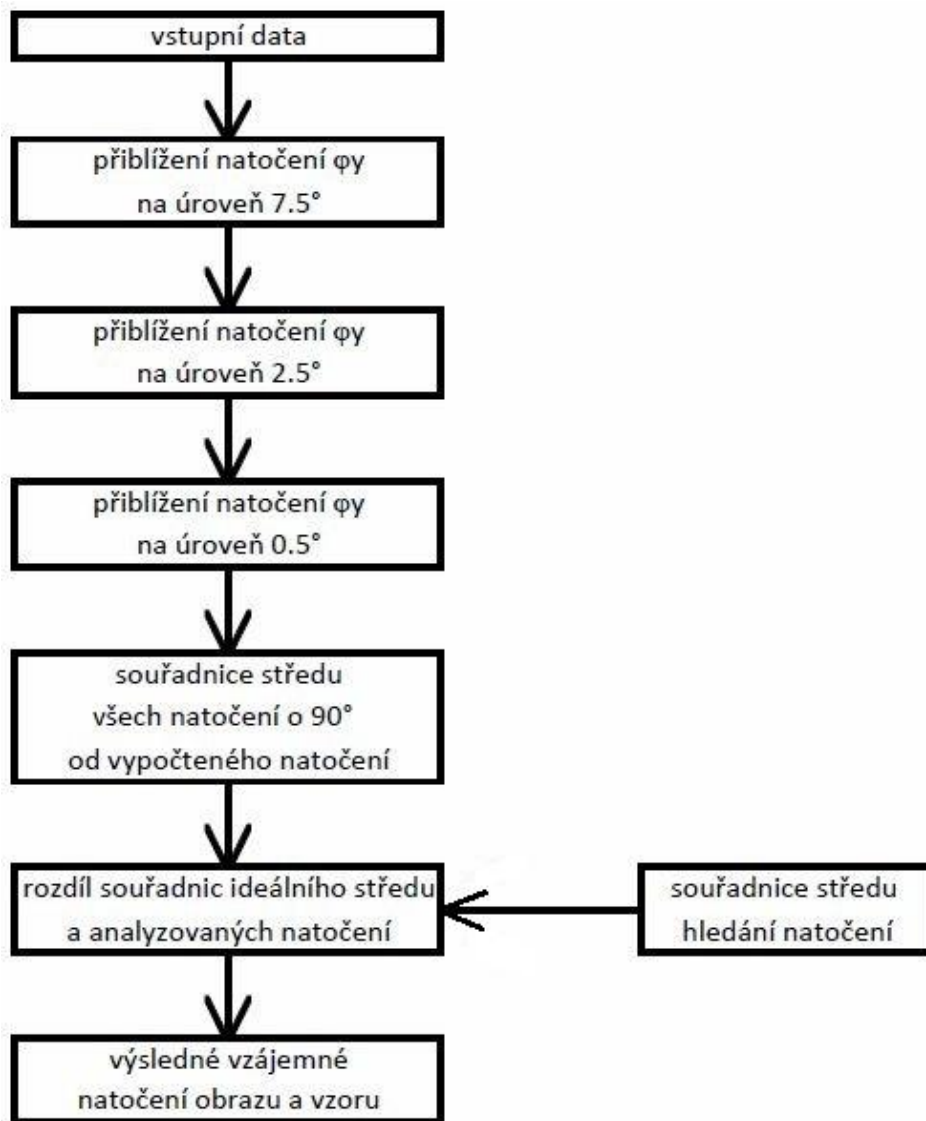
$$V(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z) = \left(\vec{v}_1(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z) \times \vec{v}_3(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z) \right) \cdot \vec{v}_5(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z) \quad (6.14)$$

$$P = 1 \text{ if } (f(V_k) \leq f(V_{k-1})) \quad (6.15)$$

$$P = e^{\frac{f(V_k) - f(V_{k-1})}{T}} \text{ if } (f(V_k) > f(V_{k-1})) \quad (6.16)$$



Obrázek 40: Zpřesňování hodnoty $V_k - V_{vzor}$ s počtem iteračních kroků

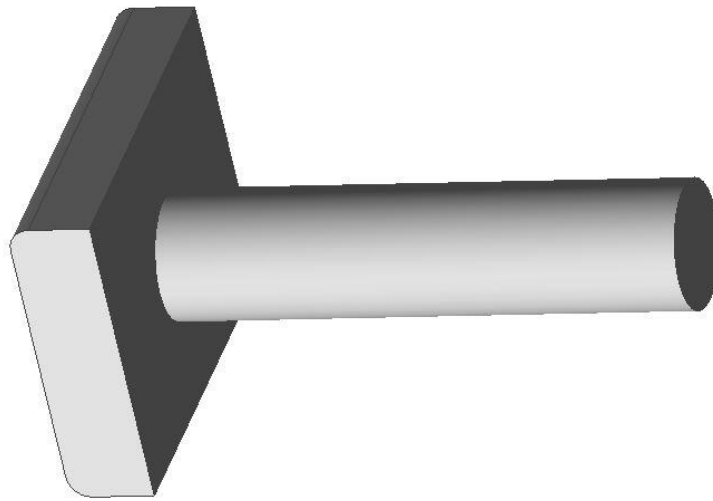


Obrázek 41: Schéma metody opsaných kvádrů

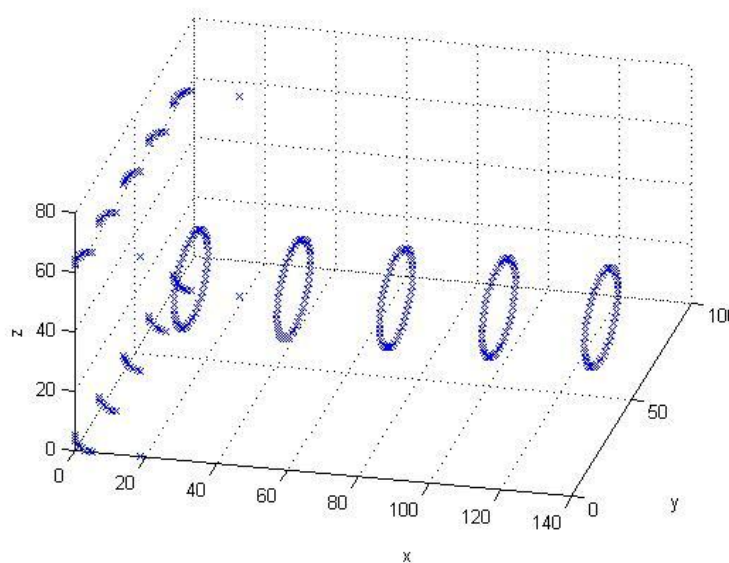
6.3. Práce se souborem ve formátu STL

Pro přenesení CAD modelů do programu Matlab® je použita funkce STL reader [12]. Tato funkce generuje soubor ve formátu matice bodů a k nim příslušných ploch. Software generuje body pro každou plochu zvlášť a tak je pro zrychlení a zmenšení objemu zpracovávaných dat potřeba tuto funkci upravit. Přesné výpočty a úpravy, které jsou na datech z programu na tvorbu STL prováděny funkcemi „tvorba_vzoru_funkce.m“ a „tvorba_krajnich_bodu_funkce.m“ je možné si prohlédnout na příloženém CD. Zde bude popsána pouze struktura funkcí a jejich odlišnosti. Na

přiložených obrázcích je vidět vstupující CAD model (Obrázek 42) a vystupující pole bodů (Obrázek 43).



Obrázek 42: CAD model objektu



Obrázek 43: Body zobrazující útvar výstup funkce STL reader

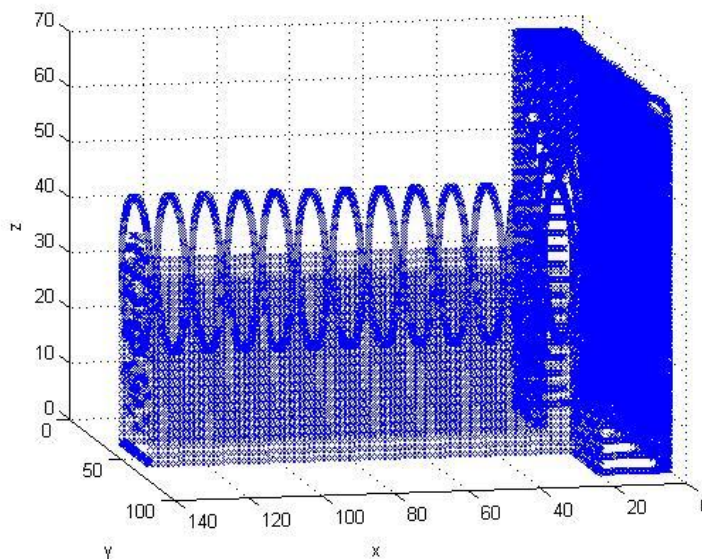
Nejprve bude popsána funkce „`tvorba_krajnich_bodu_funkce.m`“, tato funkce je zjednodušením funkce „`tvorba_vzoru_funkce.m`“ pro analýzu pomocí nejmenších opsaných hranolů. Tato metoda pracuje pouze s krajními body povrchových ploch, které používá formát STL k tvorbě zkoumaného objektu. Protože funkce využívá pouze krajních bodů ploch objektu, není zde nutná analýza ploch, ale postačí pouze zjednodušení vektoru bodů tak, aby se zde každý bod vyskytoval pouze jednou. Tento krok je potřeba, protože funkce STL tvoří každou plochu jako trojúhelníkovou plochu

mezi třemi vrcholovými body. Formát si vrcholové body pro každou plochu tvoří nezávisle na ostatních plochách, proto pro tvorbu dalších ploch nemůže využít už dříve vytvořené vrcholové body. Proto se v každé matici bodů vyskytují všechny body tolikrát, kolikrát jsou obsaženy v jedné z krajních ploch objektu.

Dalším důležitým bodem je analýza, jestli v soustavě není nulový bod ($[0, 0, 0]$), který se případně zařadí na první místo nového vektoru bodů. Tato část se musí provést z důvodů vyloučení vymazání tohoto bodu, který by jistě patřil mezi body krajní hlavně po zarovnání útvaru na kraj prvního kvadrantu. Díky ztrátě tohoto bodu by došlo ke zkreslení údajů. Nulový bod musí být analyzován přednostně, protože ukončení většiny algoritmů je závislé na nalezení bodu nulového bodu ve vektoru bodů.

Posledním krokem této funkce je vytvoření nového vektoru bodů zkoumaného tělesa, která v sobě obsahuje všechny body pouze jednou. Tato funkce by pro metodu nejmenších opsaných hranolů nebyla nutná, ale je zde využita hlavně pro zrychlení funkce díky zmenšení počtu bodů ve výsledné matici. Zmenšení může být až řádové.

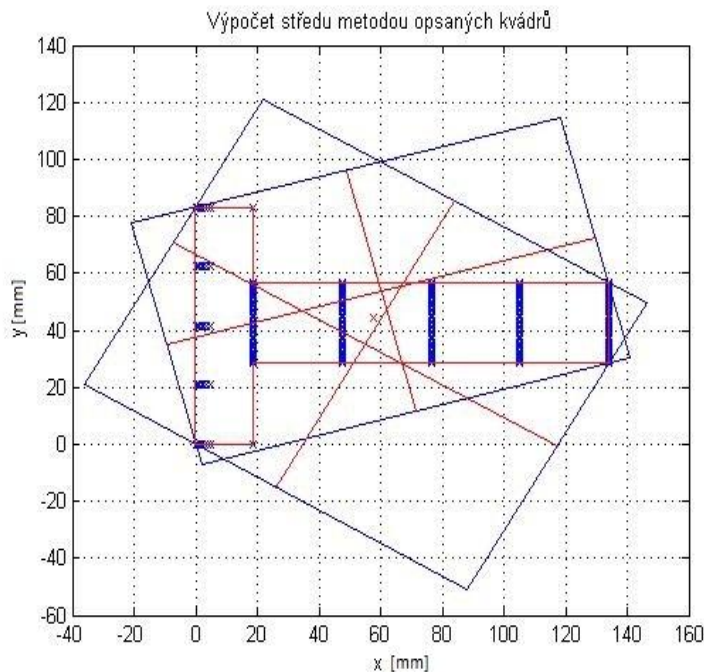
Druhá funkce „`tvorba_vzoru_funkce.m`“ zpracovává data pro metodu analýzy pomocí nejvzdálenějšího bodu. Tato část není pro analýzu pomocí nejmenších hranolů potřebná, pouze by prodlužovala dobu přípravy analýzy. Funkce využívá jak bodů, tak ploch, pro tvorbu nového vzorového objektu, které odpovídají určenému vzorovému objektu upravenému pro danou metodu analýzy. Na obrázku (Obrázek 44) je vidět objekt vytvořený z kvádrů a válců upravený pro tuto metodu. Po aplikaci funkce „`tvorba_vzoru_funkce.m`“, dochází k hustému výskytu bodů na krajních plochách, čímž se zmenšuje jejich počet a zrychluje se výpočet pomocí metody nejvzdálenějšího bodu.



Obrázek 44: Výsledný upravený útvar

Funkce obsahuje všechny předchozí části popsané u funkce „tvorba_krajnich_bodu_funkce.m“ a dále přidává část, která hledá maximální možnou výšku H , kterou může upravený model mít.

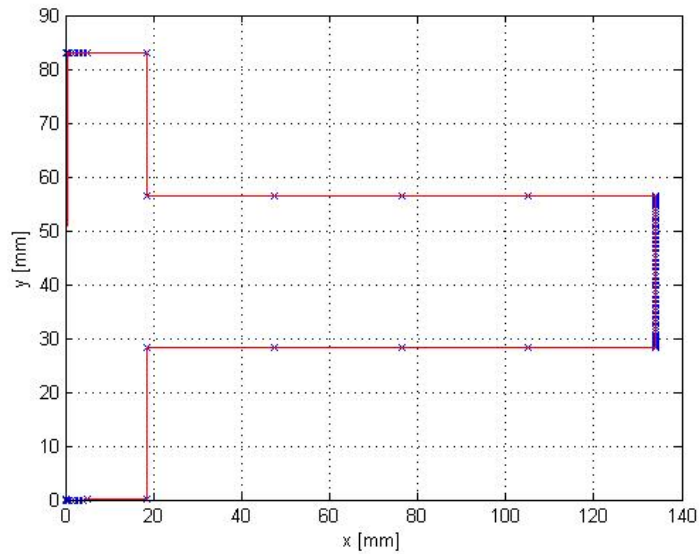
Dalším krokem je analýza geometrického středu objekt, dále středového bodu. Tato analýza vychází z metody opsaných obdélníků, kdy zkoumaný objekt je v půdorysu obcházen pomocí nejmenších opsaných obdélníků. Tato metoda je detailně popsána v kapitole zkoumání obrazu ve 2D. Základem zkoumání je opsaný obdélník tvořený přímkami s voleným úhlem φ_z a přímkami, které jsou na ně kolmé. Zde se pomocí rovnice (6.1) stanoví střední hodnota koeficientu d jako průměr maximální a minimální hodnoty d pro dané natočení přímky. Tyto hodnoty se stanoví jak pro přímky pod úhlem φ_z , tak pro přímky pod úhlem $\varphi_z + \frac{\pi}{2}$. Z těchto hodnot d se vytvoří dvě přímky a jejich průsečík je hledaným středem pro dané natočení (Obrázek 45). Výsledný střed pro analýzu vznikne jako aritmetický průměr všech hodnot středu.



Obrázek 45: hledání středu objektu

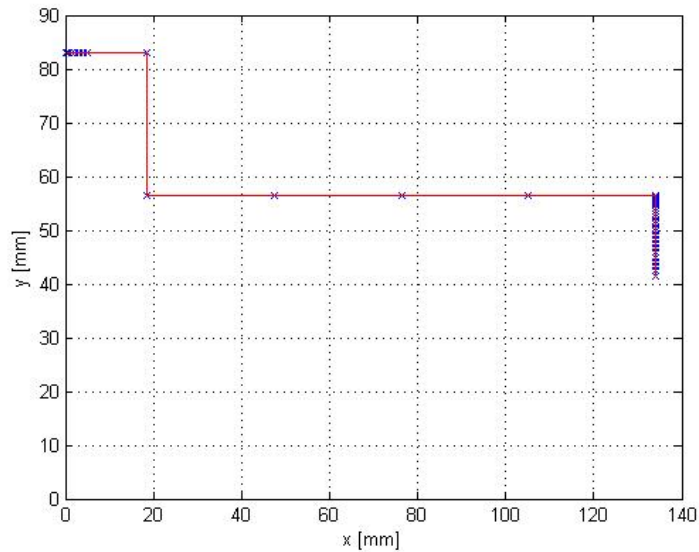
Algoritmus poté vytváří matici sousedních bodů, to jsou body, které spolu mají alespoň jednu společnou povrchovou rovinu pro všechny body systému. Tato matice z funkce nevystupuje, ale je základem další analýzy souboru. Matici dostaneme analýzou ploch, které vystoupily z funkce pro tvorbu STL. Funkce postupně prohledá všechny plochy a najde ty, ve kterých se daný bod vyskytuje. Protože došlo k nahrazení kompletní matice bodů maticí bodů, kde se body vyskytují pouze jednou, vytváří matici výskytu jednotlivých bodů v daných plochách, aby bylo možno zpětně vytvořit vzorový objekt.

Funkce je určena pro tvorbu vzorových souborů, proto je u ní potřeba i část pro natočení příslušné matice bodů pomocí transformačních matic rotace v kartézském systému.

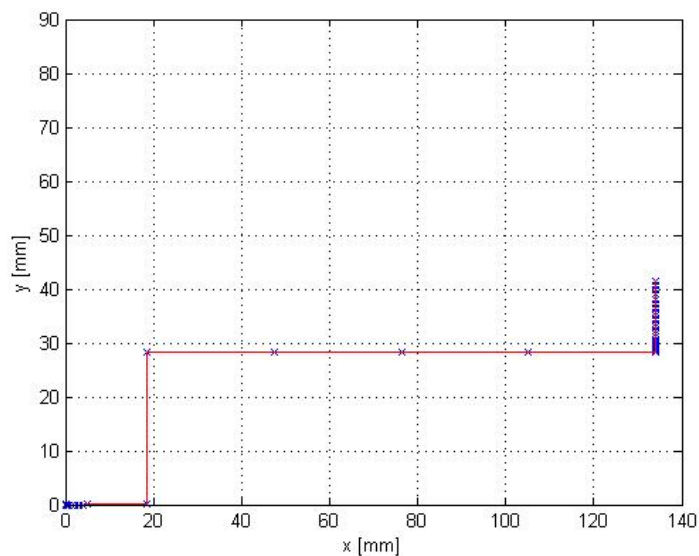


Obrázek 46: Výsledné krajní body útvaru

Nejdůležitější částí funkce je hledání bodů, které se vyskytují na hranici průřezu do půdorysu. Tato část funkce funguje na hledání nejkrajnějšího sousedního bodu. Funkce začíná na bodě s maximální hodnotou X a obchází útvar tak, aby na levé straně vektoru měla útvar a na pravé straně vektoru měla pouze volný prostor z hlediska momentálně zkoumaného bodu. Funkce při oběhu zapisuje krajní body, aby z nich mohla poté zrekonstruovat boční stěny jak je vidět na obrázku (Obrázek 46). Funkce je rozdělena do dvou částí, a to do části první, která začíná v bodě s maximální hodnotou X a obíhá útvar z pravé strany (Obrázek 47) a končí u bodu s nulovou hodnotou X . Druhá část funkce začíná ze stejného bodu, ale obíhá útvar z levé strany a končí u posledního bodu první analýzy (Obrázek 48).



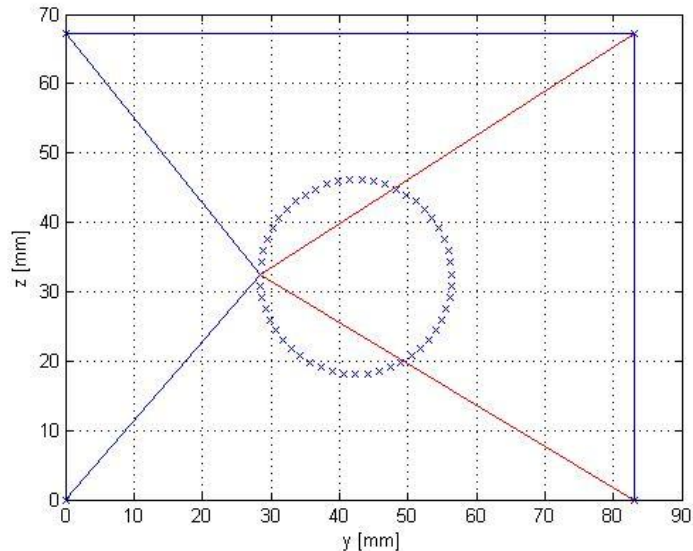
Obrázek 47: Nalezené krajní body pravé strany



Obrázek 48: Nalezení krajních bodů levé strany

Pro tuto část analýzy platí jisté podmínky. Pokud se útvar skládá z dvou jasně rozlišených geometrických útvarů stejně jako tomu je na obrázku (Obrázek 42), musí být výsledný soubor STL upraven. Je třeba v místě styku dvou krajních ploch těchto útvarů upravit sousední body. Nejlepší variantou je zapsání všech bodů jedné krajní plochy jako sousední body bodů v druhé krajní ploše. Jako příklad lze uvést sousední plochy na obrázku (Obrázek 42). Zde jsou sousední plochy obdélníku a kruhu. Pro vyhnutí se chybovým hlášením v problematických bodech systému je potřeba nahrát všechny krajní body obdélníku jako sousední body všech bodů kruhu. Na obrázku

(Obrázek 49) jsou modře vyznačeny spojnice vybraného bodu a jeho sousedních bodů obdélníka. Červeně jsou vyznačeny spojnice s body, které byly jako okrajové body do funkce uměle přidány.



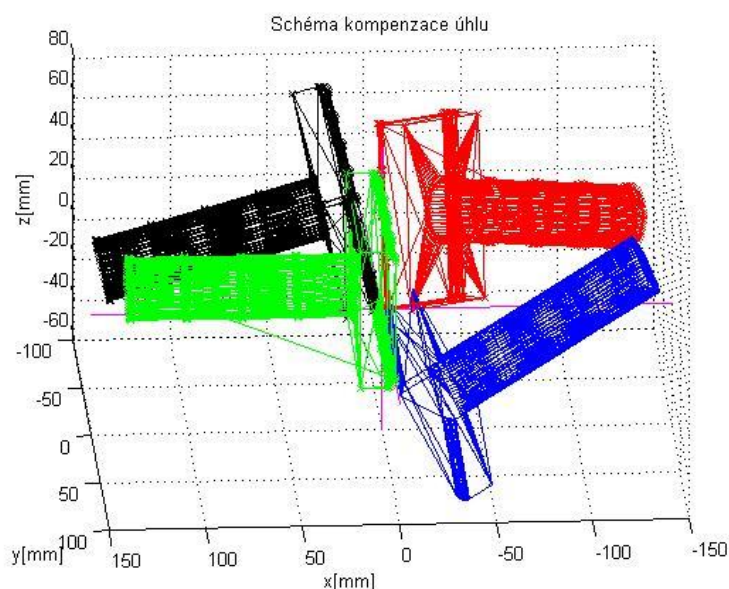
Obrázek 49: Vložení krajních bodů kváдру a do bodů kružnice

Další podmínkou pro tuto skladbu je natočení plochy užší částí podél osy X, jak je naznačeno na obrázku (Obrázek 43), kde osa válce je osa válce rovnoběžná s osou X. Funkce nemusí správně najít přechod z většího tělesa na menší, protože může docházet k přeskokům z okraje do vnitřní části útvaru. Pro ilustraci lze opět použít obrázek (Obrázek 42) kde by mohl nastat problém při přechodu z části ve tvaru kváдру na část ve tvaru válce. Tomuto problému se dá vyhnout tím, že se soubor nahraje v počáteční poloze ve správném natočení, to je souběžně s osou X (Obrázek 43). Funkce poté sama pomocí kompenzací úhlů natáčí systém tak, aby svíral stále stejný úhel φ_z (6.17). Na obrázku (Obrázek 50) jsou vidět postupné fáze natáčení vzorového útvaru. Zelený objekt je objekt v počáteční poloze. Modrý objekt je natočen pomocí transformační matice T_y (6.3) od původního objektu o úhel $\varphi_y = 150^\circ$. Druhou fází představuje červený objekt, který je od modrého objektu natočen pomocí transformační matice T_x (6.18), o $\varphi_x = 120^\circ$. Poslední útvar je černý model, který je pomocí transformační matice T_z (6.19) natočen o kompenzační úhel φ_z do polohy, kdy úhel počáteční polohy φ_{z_0} je shodný s úhlem natočení cílového objektu φ_{z_1} .

$$\varphi_z = \arctan(\tan(\varphi_y) * \sin(\varphi_x)) \quad (6.17)$$

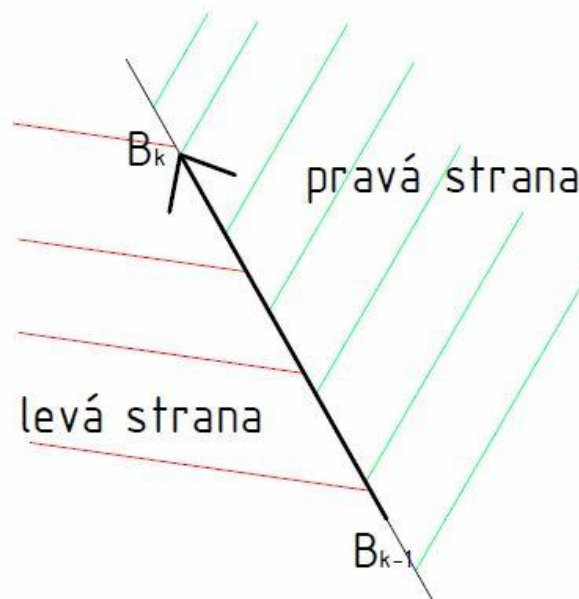
$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_x) & \sin(\varphi_x) \\ 0 & -\sin(\varphi_x) & \cos(\varphi_x) \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

$$T_z = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_z) & 0 & \sin(\varphi_z) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_z) & 0 & \cos(\varphi_z) \end{bmatrix} \quad (6.19)$$



Obrázek 50: Fáze kompenzace natočení úhlu φ_z

Při hledání nejbližšího bodu nejprve funkce dělí rovinu na pravou a levou stranu vzhledem ke zkoumanému vektoru. Vektor je vytvořen s pomocí právě nalezeného bodu a bodu nalezeného v předchozí části funkce. Funkce přednostně zkoumá body na pravé straně, pokud obíhá zkoumaný objekt z pravé strany. Pokud obíhá objekt z levé strany, zkoumá nejprve levou stranu, protože tyto body mají větší pravděpodobnost být dalším bodem řešení (Obrázek 51). Pro porovnání nejkrajnějších bodů používá funkce rovnici pro analytický výpočet skalárního součinu dvou vektorů (6.20). Kvůli symetrii funkce cosinus je třeba řešení rozdělit na dvě části. Funkce obchází celý útvar tak dlouho, dokud znovu nedosáhne počátečního bodu.



Obrázek 51: vektor hledání krajních bodů

$$\cos(\varphi) = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| \cdot |\vec{v}|} \quad (6.20)$$

Další částí je hledání ploch, které jsou uzavřeny v daném útvaru, to znamená, že jsou na spodní straně útvaru a jsou uzavřeny mezi horními plochami a plochami, které vznikly mezi zemí a krajními body útvaru. Jako příklad lze uvést plochy, které by vznikly na spodní straně válce na obrázku (Obrázek 44). Tyto plochy nemají pro analýzu žádný význam, pouze zpomalují výsledný algoritmus hledání ideálního natočení, a proto pro úsporu času a množství bodů jsou smazány. Funkce začíná od bodu s nejmenší hodnotou v ose Z a postupně maže všechny sousední body a plochy dokud nenarazí na krajní body zjištěné v předchozí části cyklu.

Poté je třeba vytvořit nový vektor ploch, který se vytvoří jako součet zredukovaného vektoru ploch a vektoru trojúhelníkových ploch krajních bodů a jejich nulových hodnot. Výsledek tohoto procesu je vidět na obrázku (Obrázek 44), kde je vidět zkoumaný útvar upravený touto metodou.

Posledním krokem je tvorba bodů na plochách. Body jsou procentuálně rozvrstveny podle obsahu ploch. Procentuální rozvrstvení je zvoleno kvůli lepšímu pokrytí ploch body, aby nedocházelo k přehnanému zahušťování na malých plochách. Rovnoměrná hustota nejlépe odpovídá datům, která jsou získána ze systému Optigo 200. Čím více se

podobají data ze systému a data z funkcí, tím větší šance je na přesné identifikování natočení systému.

Zde popsané funkce jsou implementovány do tvorby vzorových souborů, a proto musejí fungovat pro jakékoliv natočení systému. Ve funkci je vždy třeba upravit nahrání bodů na sousedních rovinách, případně tento krok zcela odstranit.

V této kapitole byly popsány funkce pro tvorbu vzorových útvarů a to jak pro metodu opsaných hranolů, tak i pro metodu nejbližšího bodu. Základem těchto funkcí bylo převést soubory z formátu STL do podoby, kterou bude dále možné zpracovávat. Funkce „tvorba_vzoru_funkce.m“ a „tvorba_krajnich_bodu_funkce.m“ se snaží o nahrazení STL modelu vhodným vektorem bodů, a to tak aby daný vektor bodů co nejvíce odpovídal vektoru bodů, který by byl získán, kdyby byl STL model analyzován 3D kamerou.



Obrázek 52: Schéma tvorby vzorového objektu

6.4. Metoda analýzy pomocí opsaných hranolů (klínů a kvádrů)

Metoda popsaná v kapitole 6.2 vyžadovala pro správnou identifikaci znalost zkoumaného objektu ze všech stran. Proto byla znovu modifikována a upravena, aby lépe splňovala požadavky, které jsou na ni kladeny zadáním úlohy.

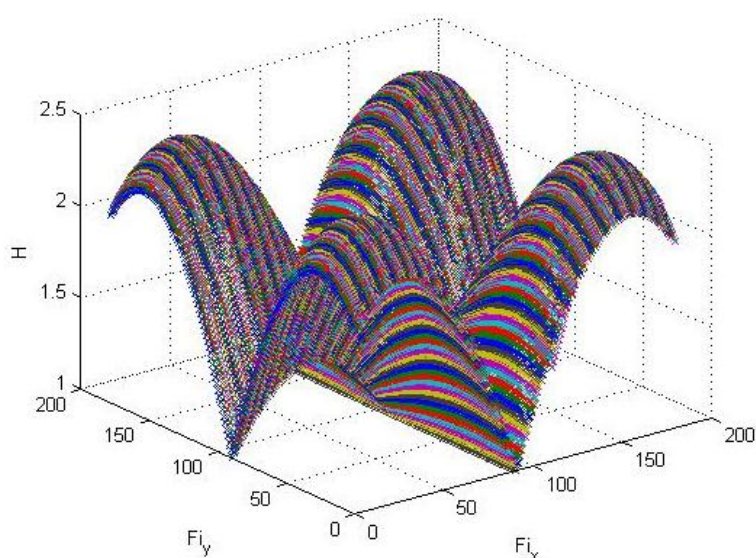
Základ metody je ve své podstatě stejný jako v předchozí kapitole 6.2. Úloha zkoumání objektu je rozdělena na dvě části. V první části za pomoci rovnice (6.6) definujeme všechny okrajové hodnoty rovin opsaných hledanému objektu. Všechny

hodnoty se dále uloží do matice, odkud mohou být kdykoli načteny pro zkoumání objektu. Tento krok je zde kvůli zmenšení závislosti výpočtového času na množství bodů, protože převádí problém soustavy libovolného počtu bodů na soustavu hodnot definující roviny v jednotlivých natočeních.

Samotné testování je rozděleno na dvě části, nejprve tvorbu vzorového útvaru, kdy se opět využívá CAD modelu a z něj vytvořeného souboru STL., který je následně pomocí funkce ‚tvorba_krajnich_bodu_funkce‘ upraven do podoby, která je využitelná pro zpracování natočení. Postup je analogický s hlavním programem a proto tento postup bude popsán až v dalších odstavcích kapitoly. Při tomto výpočtu se tvoří soubory, s kterými budou naměřené hodnoty porovnávány. Měření je prováděno ve variantách natočení (6.21), (6.22). Tímto jsou získány vzorové matice obsahující výšku jednotlivých variant, obsah opsaného obdélníka, půdorysu a objemy opsaných kvádrů, se kterými bude výsledný objekt srovnáván a z kterých bude získáno výsledné řešení. Na grafu (Obrázek 53) lze vidět průběh proměnné H , pomocí které se určí výsledné řešení. Hodnoty těchto matic je nutno vypočítat před samotnou analýzou zkoumaného objektu, neboť jsou časově náročné (řádově hodiny), ale pokud jsou soubory předpřipraveny, je možno výslednou analýzu provést do 5 sekund.

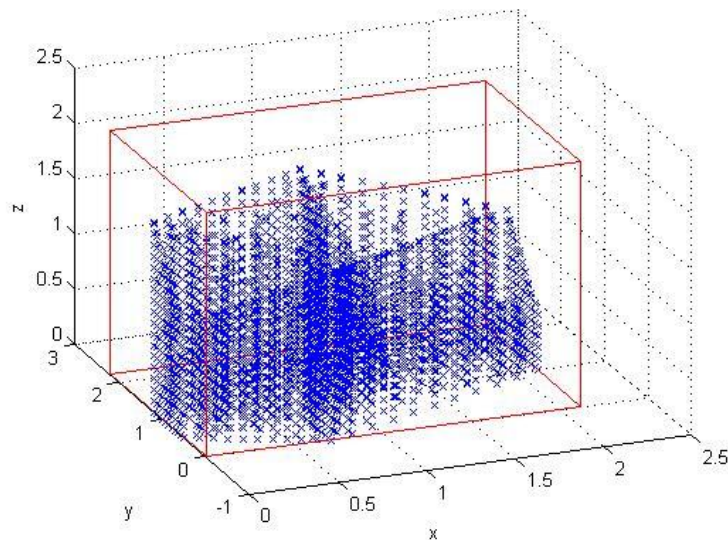
$$\varphi_x \in \langle 0^\circ: 180^\circ \rangle \quad (6.21)$$

$$\varphi_y \in \langle 0^\circ: 360^\circ \rangle \quad (6.22)$$

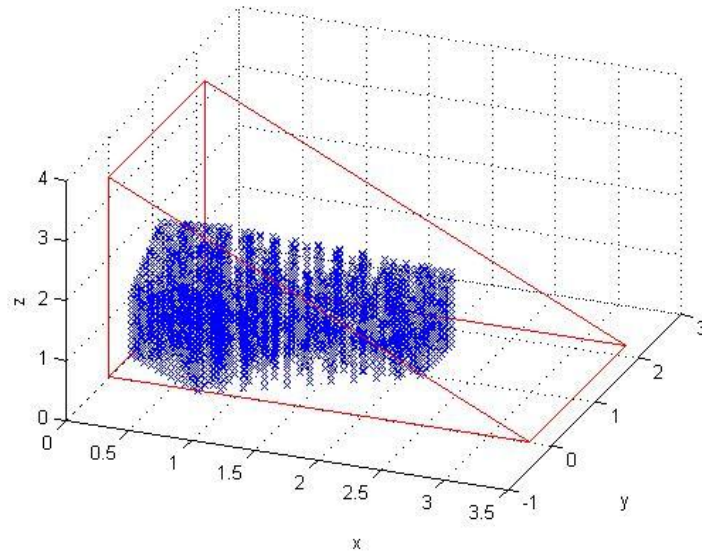


Obrázek 53: Hodnoty výšky pro různá natočení vzorového objektu

Nyní je třeba vysvětlit princip fungování celé metody. Metoda se opět opírá o variantu nejmenších opsaných geometrických útvarů. Zde ovšem není využívána rotace kolem všech souřadnicových os, ale pouze rotace kolem osy Z . Zbylé úhly natočení jsou nahrazeny proměnlivým úhlem hranolu, který je využit ke zkoumání útvaru. Pro zkoumání jsou využity dva druhy útvarů. Na obrázku (Obrázek 54) je vidět minimální kvádr, v kterém leží zkoumaný mrak bodů a na obrázku (Obrázek 55) je vidět minimální opsaný klín. Pro oba útvary je společné, že jejich základna splývá s nulovou rovinou Z . Tímto je odstraněn problém, s neznalostí spodní strany, neboť jak je vidět, útvary spodní stranu k analýze nepotřebují, a proto zde nevádí neúplný obraz kamery. Zároveň je při zapamatování výškové souřadnice možné odfiltrvat celou spodní část útvaru a nepoškodit tím informace potřebné pro analýzu.



Obrázek 54: Kvádr opsaný útvaru



Obrázek 55: Klín opsaný objektu

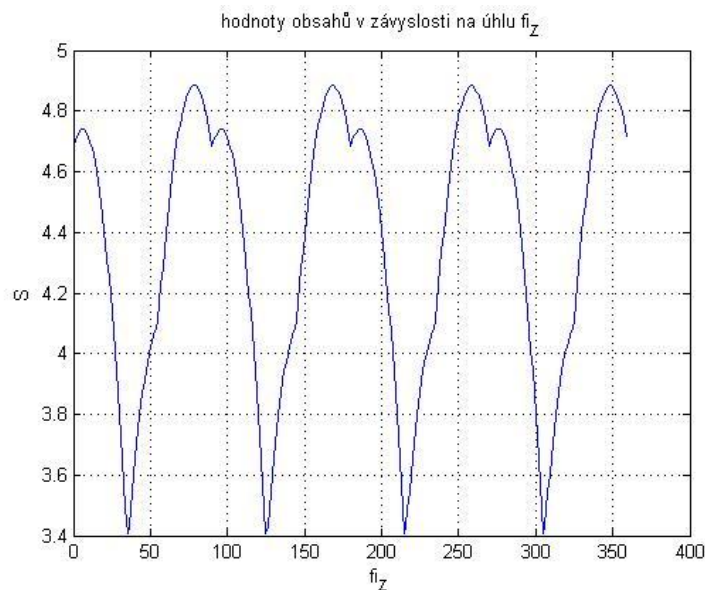
Principem metody je určování jednotlivých kritérií, jejichž optimalizací je stanoveno nejlepší řešení. Nejzákladnějším a nejjednodušeji získatelným kritériem je samotná výška objektu. Výška není úplně směrodatná, neboť v zadání je stanoveno, že objekt by měl být geometricky nepřesný, proto se na výšku nelze spolehnout, ale může sloužit pro selekci naprosto nevhodných řešení. Dalším kritériem je obsah opsaného obdélníka půdorysu objektu. Tento se získá jako obsah podstavy nejmenšího opsaného kvádrů. Tento parametr také není použit k výsledné rozhodovací funkci, ale opět pomáhá vyřadit nevhodná řešení. Posledním určujícím kritériem je objem nejmenších opsaných klínů. V dané úloze je zkoumaný objekt testován pomocí hranolů s proměnlivým úhlem šikmé roviny. Úhel se mění v rozmezí od 5 do 85 stupňů. Bohužel postupná analýza jednotlivými hranoly by byla moc časově náročná, proto je zde použito celkové integrální kritérium a to suma objemů všech útvarů s příslušným úhlem natočení. Posledním zkoumaným parametrem je změna objemu mezi jednotlivými po sobě jdoucími klíny (6.23), kde je znázorněn rozdíl mezi sumou objemů hranolů s úhlem skosení φ_x a úhlem skosení φ_{x-5} . Tento parametr by měl být schopen zachytit změnu ve sklonu ploch a tím pomáhat vyhledat správné natočení.

$$V_{del} = (V_{\varphi} - V_{\varphi-5})/V_{\varphi} \quad (6.23)$$

Nyní bude popsán přesný postup metody, jak dochází k vyhledání příslušných úhlů natočení. Pro tento modelový případ je základna, na které leží těleso, považována za rovinu s nulovou souřadnicí v ose Z . Úpravy řešení pro případ, kdy základna není rovnoběžná, jsou popsány v části experimentu při zkoumání reálných subjektů. Model je zarovnán tak, aby se nacházel v prvním kvadrantu souřadného systému. Hodnoty jsou zapsány tak, aby bylo po ukončení výpočtu možno jednoduše zarovnat zkoumaný objekt do jeho původního místa v souřadném systému. Zároveň je možno odečíst výšku zkoumaného útvaru h_s . Výška funguje jako první kritérium pro stanovení natočení úhlů φ_x a φ_y .

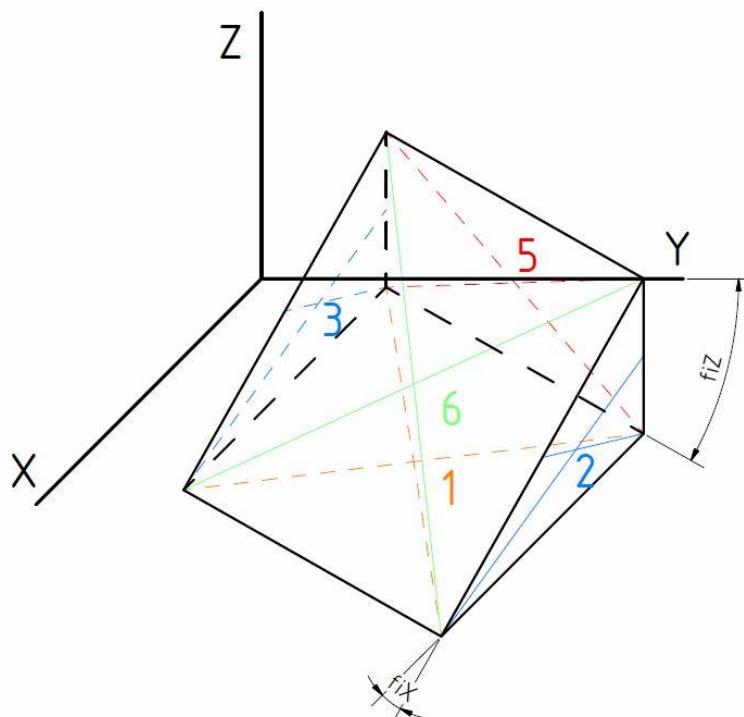
Dané řešení je velmi podobné jako v případě varianty testování nejmenším kvádrem, proto zde shodné části budou jen naznačeny a nikoliv znova vysvětlovány. Nejprve je třeba převést problém ze soustavy bodů na soustavu rovin. Toho se docílí stanovením maximálních a minimálních hodnot proměnné d v rovnicích (6.6). Tento krok je zde opět použit, aby snížil závislost časového řešení na počtu bodů.

V další části kódu je třeba vytvořit kvádry pro různé úhly natočení φ_z pro zjištění hodnot nejmenších obsahů. Tento postup je použit hlavně kvůli časové úspoře, protože pro tvorbu kvádrů stačí pouze znalost hodnot D již dříve vypočtených rovin. Pro výpočet použijeme rovnici (6.11) z kapitoly metoda nejmenších kvádrů a pro stanovení obsahu délky vektorů mezi body jedna a dva a body jedna a tři. Výsledné hodnoty si lze prohlédnout v příloženém grafu. Z těchto hodnot vznikne druhé kritérium.



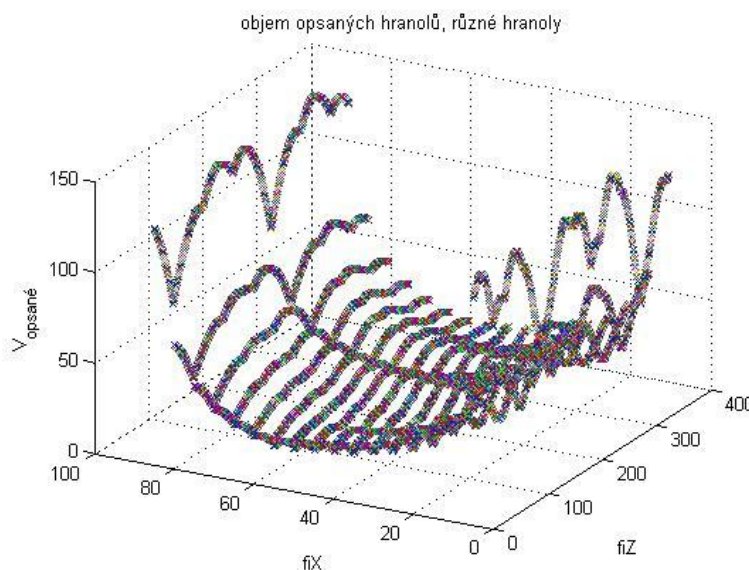
Obrázek 56: obsahy opsaných kvádrů zkoumaného objektu

V další části funkce je třeba vytvořit minimální opsané hranoly s předepsaným úhlem skosení šikmé strany. Výpočet opět využívá pouze spočtených bodů z matice hodnot d . Hranoly se skládají z nulové roviny Z , z dvou rovin kolmých k této rovině a svírajících úhel natočení $\varphi_z + \frac{\pi}{2}$ mezi normálovým vektorem a osou X . Další rovina představuje zadní stranu hranolu a je kolmá ke všem předchozím rovinám. Poslední rovinou je rovina šikmé plochy (Obrázek 57). Dohromady volenými průniky těchto ploch vznikne šest vrcholových bodů hledaného hranolu. Body jsou získány rovnicí (6.24), kde D je matice příslušných hodnot d pro dané plochy a Matice At je matice tři krát tři s proměnnými koeficienty. Koeficienty se volí podle tří ploch, ze kterých je počítán průnik. Pro každé natočení φ_z jsou tři různé matice At . Hodnoty jsou stanoveny stejně jako hodnoty a, b, c v rovnicích (6.7 až 6.9). Výsledkem každého cyklu je objem opsaného hranolu stanovený z délek vektorů mezi prvním a druhým bodem, prvním a třetím bodem a prvním a pátým bodem. Objem není potřeba dělit dvěma. Šlo by pouze o kosmetickou úpravu výsledku. Výsledky pro jednotlivé hranoly jsou vykresleny na obrázku (Obrázek 58). Provede se suma všech hodnot pro jednotlivé úhly zkosení φ_x . Jednotlivé hodnoty se pro řešení nepoužívají pro přílišnou náročnost.



Obrázek 57: Schéma krajních ploch klínu

$$X = (At)^{-1} \cdot D \quad (6.24)$$



Obrázek 58: objemy opsaných hranolů zkoumaného objektu

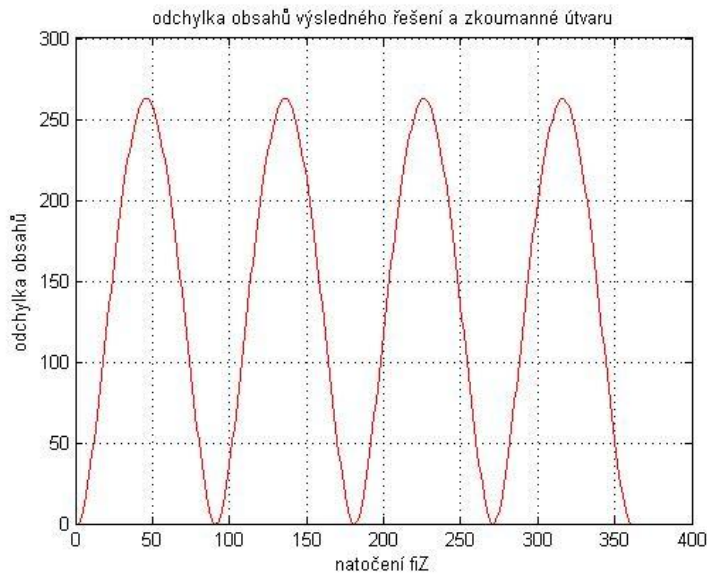
Z výsledných hodnot se napočítají hodnoty pro srovnání, tedy procentuální rozdíly mezi jednotlivými sumami objemů dle rovnice (6.23). Následně je do skriptu nahrán soubor s předpočítanými hodnotami výšek obsahů a rozdílů mezi objemy. Soubor má přes šedesát čtyři tisíc proměnných, proto je potřeba tento soubor zúžit. Jako první parametr pro zúžení se používá výška. Po použití parametru výšky se ponechávají pouze varianty, které mají výšku stejnou nebo maximálně o pět procent menší. Větší výšky jsou automaticky vyřazovány, protože předpoklad řešení zní, že zkoumaný objekt bude neopracovaný, tudíž musí být větší než jeho originální CAD model.

I po tomto dělení stále ve výpočtu zůstane velké množství možných řešení. Proto je použita selekce, tentokrát za pomoci celkové sumy obsahů. Opět je použit stejný předpoklad, že větší obsahy nejsou přípustné a odchylka je stanovena pomocí rozdílu mezi minimálními a maximálními obsahy, které dosud zůstávají. Výsledkem je, že počet řešení je redukován na méně než jeden tisíc řešení, z nichž většina se pohybuje v rozmezí do pěti stupňů od hledaného přesného řešení.

Nyní byla oblast řešení dostatečně zúžena, aby bylo možno provést rychlé finální hledání. Zde se využívá absolutní hodnoty rozdílu jednotlivých hodnot V_{del} , které se řadí od hodnot nejmenšího po hodnoty nejvyššího rozdílu. Toto řazení proběhne pro všechny hodnoty rozdílu a pak se jednotlivým řešením přiřadí počet bodů, podle toho

jak přesné byly v jednotlivých rozdílech objemů. Hodnoty s největším množstvím bodů projdou poslední kontrolu pomocí obsahu, jestli zde nebyla nějaká chyba měření. Pro vybraná maximální řešení se opět provede výpočet sumy obsahů nejmenších kvádrů. Zde se vyzkouší odchylka řešení, pokud přesáhne 10% opustí se nejlepší řešení a je přijato druhé nejlepší řešení.

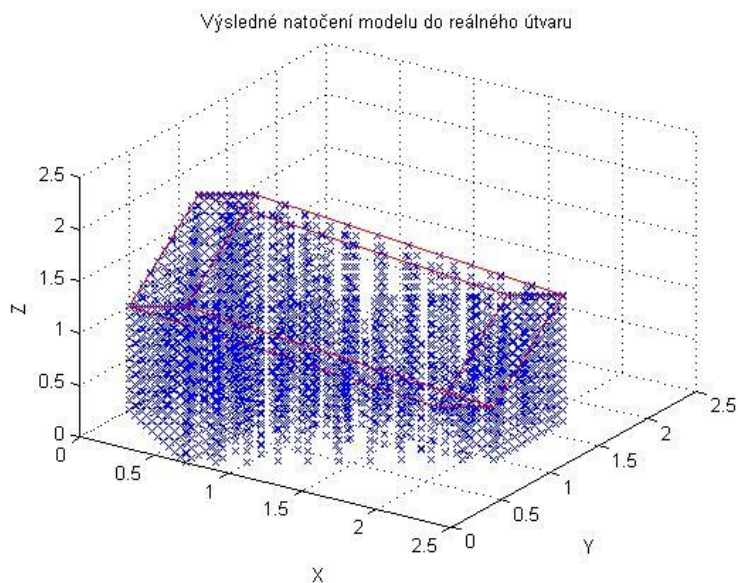
Výsledkem tohoto měření jsou úhly natočení φ_y a φ_x a je potřeba dopočítat poslední úhel φ_z . Zde se použije řešení podobné variantě pro hledání v 2D prostoru. Jelikož jsou spočteny jednotlivé hodnoty pro obsahy spodních podstav vzoru i měřeného objektu, lze aplikovat metodu nejmenších čtverců a nalézt hodnoty s minimální odchylkou (Obrázek 59).



Obrázek 59: Odchylka obsahů řešení a vzoru

Opět je zde problém se čtyřmi nejnižšími polohami. Zde je pro rozlišení ideálního řešení použita jiná varianta výpočtu. Pro řešení se porovnají všechny čtyři stavy, které jsou vzájemně otočeny o pravý úhel. V řešení se zde porovnávají maximální hodnoty na osách X a Y a jejich hodnoty v hladině Z. Výsledkem jsou hodnoty s nejmenším rozdílem od zkoumaného řešení.

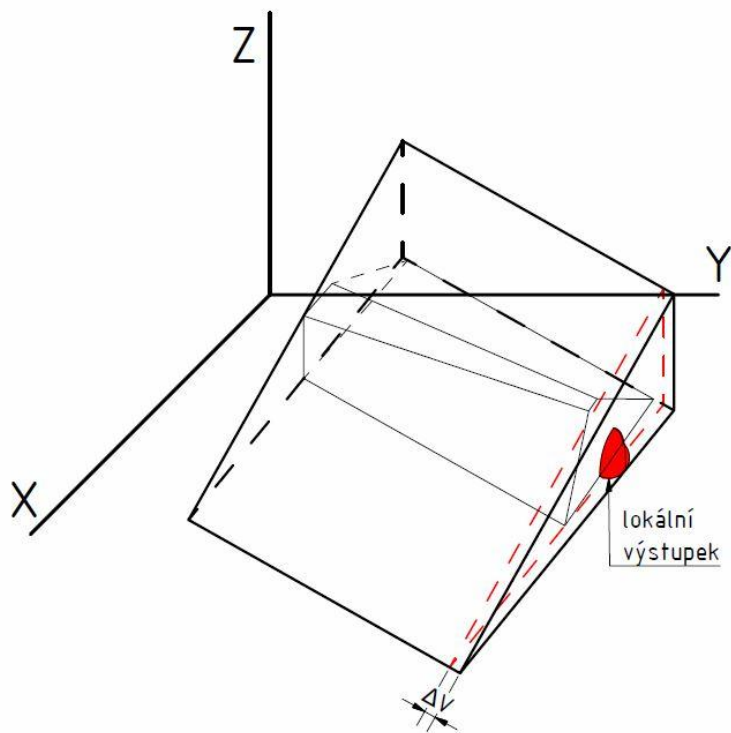
Výstupem tohoto řešení jsou tři úhly natočení, pod kterými je reálné řešení natočeno od ideální hodnoty (Obrázek 60).



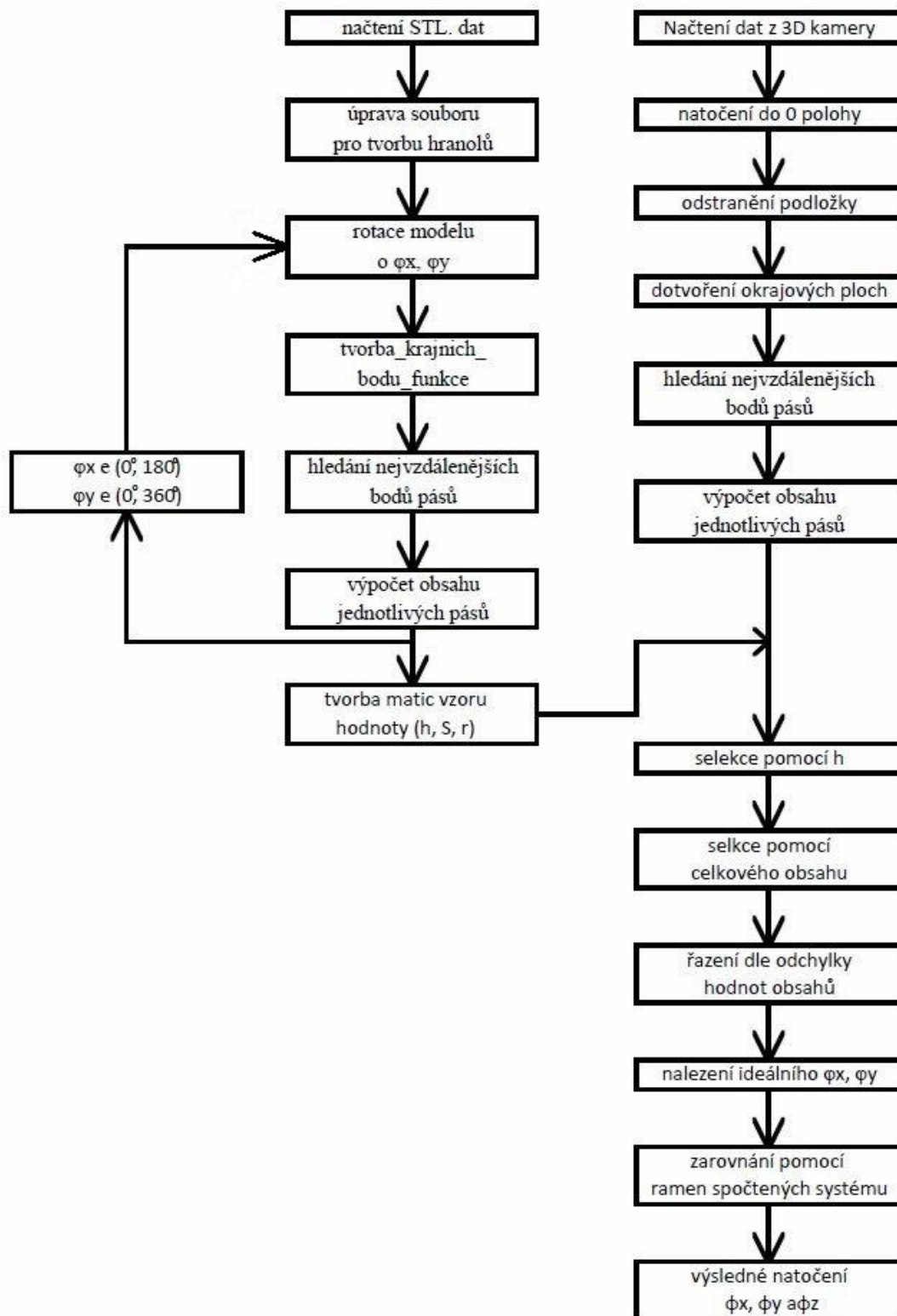
Obrázek 60: Výsledné natočení vzoru vůči zkoumanému objektu

Všechny funkce jsou nahrány na přiloženém CD a to jako skripty, kterými jsou pro tvorbu vzorového obrazu „testovani_vzor_obraz“, pro přetvoření do formy používaných matic „testovani_vzor_obraz_matic“ a pro výsledné testování dat pod názvem „testovani_hranoly“. V těchto skriptech je pouze ukázka jak probíhá analýza. Praktické použití těchto funkcí bude ukázáno v kapitole 7.

Tato metoda analýzy má svoji výhodu hlavně ve velké rychlosti výpočtu při připravených vzorových maticích a již předem připraveném STL souboru. Dokáže obraz analyzovat do několika sekund jen s minimální závislostí na počtu bodů. Problémem analýzy je použití minimálních objemů a tím velká citlivost hlavně na chyby v horní části zkoumaného objektu, jako jsou různé bubliny, které jsou pouze lokálního charakteru a jsou umístěny přímo na hranách. Příklad je uveden na obrázku (Obrázek 61), kde je vidět malý výstupek, který je vyznačen červeně. I tento malý výstupek může výrazně ovlivnit celkový objem.



Obrázek 61: Lokální chyba zkoumaného objektu



Obrázek 62: Schéma metody opsaných hranolů

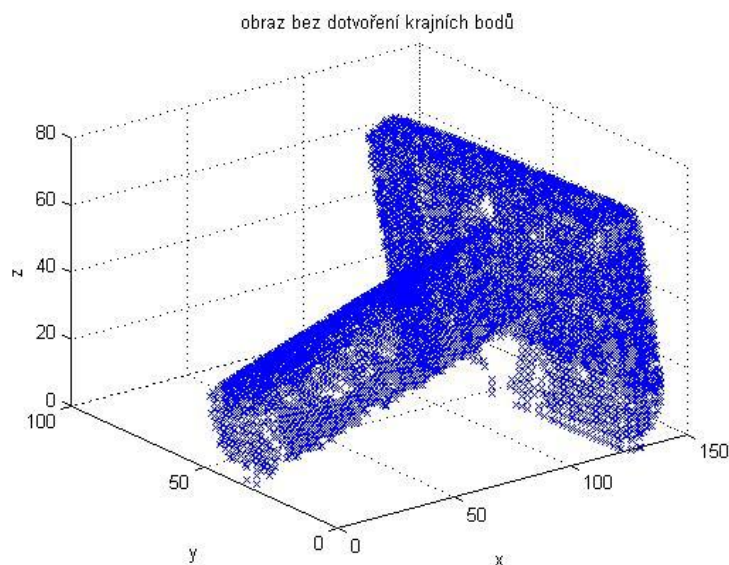
6.5. Metoda nejbližšího bodu

Tato metoda je poslední realizovanou metodou pro analýzu bodů a je zde hlavně snaha odstranit problematická místa předchozích metod, jako byly problémy s náhlými velkými výstupky, které mohly metodu nejmenších hranolů natolik ovlivnit, že metoda mohla dávat naprosto nesmyslné výsledky. Dále se tato metoda snaží o částečné popsání děr a prohlubní v modelu. Hlavním problémem této metody je opuštění konceptu převedení problému mnoha bodů na soustavu ploch, proto tato metoda i nadále zůstává velmi citlivá na množství bodů.

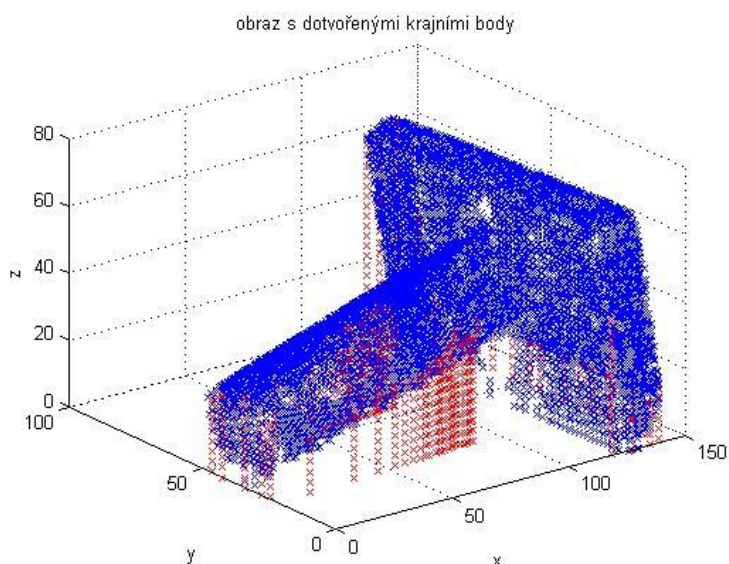
Metoda se ve svém základu opírá o rozdělení zkoumaného útvaru na výškové pásy a následné řešení vzdáleností v těchto pásech. Metoda stále zachovává zásadu, že výsledný 3D obraz útvaru není úplný. S touto problematikou se vypořádává pomocí funkce na zpracování STL souboru. Funkce opět využívá dvojího zpracování problému. Nejdříve jde o tvorbu matic, které charakterizují dané natočení a samotné analýzy zkoumaného útvaru. Výsledné matice jsou poté nahrány do řešení problému a pomocí srovnání těchto matic a změřeného obrazu se získá výsledné natočení.

Nyní bude detailněji popsána celá úloha. Základním předpokladem je, že získaný mrak bodů bude ze spodní strany neúplný a nedokonalý, tomuto je potřeba přizpůsobit i výpočtový algoritmus. Nejprve je třeba nalézt středový bod útvaru. Tento postup byl již popsán v kapitole o zpracování souboru STL, zde je postup naprosto identický, pouze místo vstupních dat ve formátu STL do souboru vstupuje mrak bodů, který byl naměřen, předem upraven, zbaven základny a srovnán tak, že základna je ve vodorovné poloze a pozici $Z=0$.

Další potřebnou úpravou je přidání bodů do řešení, tak aby odpovídaly zpracovanému vzorovému měření. Tento postup najde všechny okrajové body půdorysu útvaru a z bodů takto nalezených vytvoří okrajovou plochu, která bude vytyčena danými body a body s hodnotou $Z=0$. Na obrázcích je rozdíl mezi neupravenou (Obrázek 63) a upravenou (Obrázek 64) variantou.



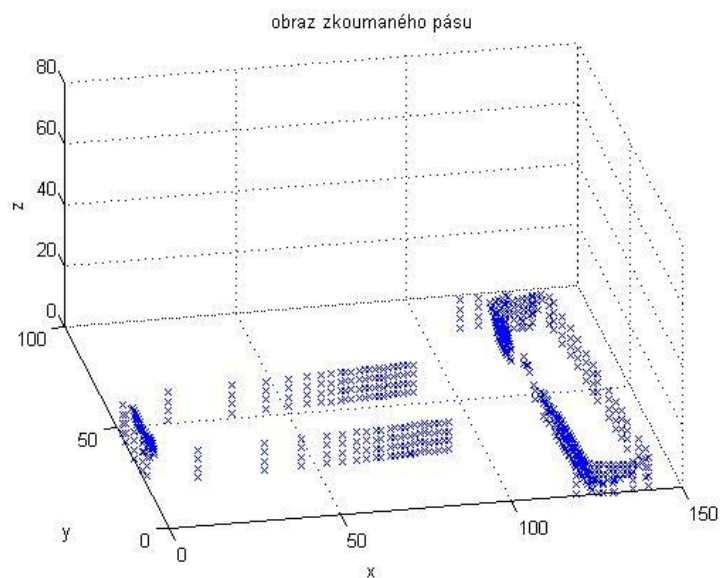
Obrázek 63: Obrázek bodů z 3D kamery



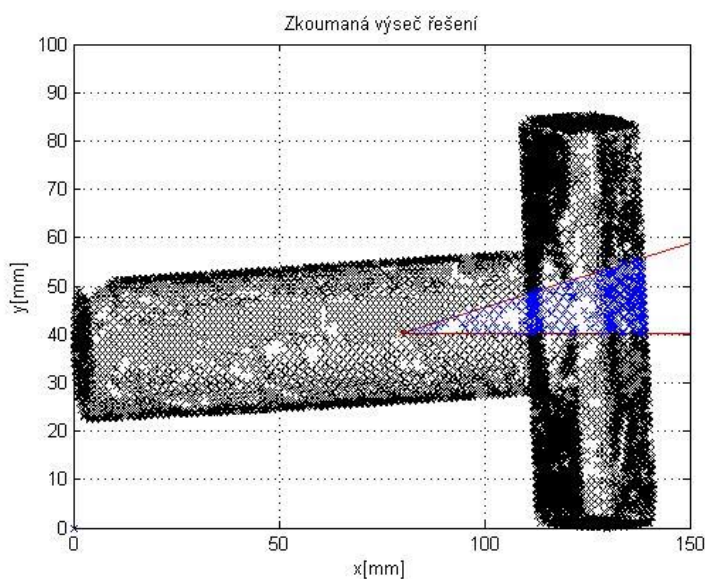
Obrázek 64: Obrázek bodů s přidanými krajními body

Nyní je obraz připraven pro analýzu vybranou metodou. Nejprve dělí útvar na výškové pásy (Obrázek 65). Jednotlivé výškové pásy budou analyzovány postupně, aby se zamezilo přenosu lokální chyby do celkového řešení, jako v metodě opsaných hranolů, kdy malý výstupek v blízkosti hrany výrazně zvětšil celkový objem. Analýza probíhá postupným dělením pásu na vybrané segmenty sevřené mezi dvěma krajními přímkami (Obrázek 66). Úhel, který tyto dvě přímky svírají, určuje podrobnost daného výpočtu. Úhel by neměl být nastaven příliš malý, protože by se mohlo stát, že výpočet

v daném pásu nezachytí žádné body, ale ani ne příliš velký, protože pro takovýto úhel by byly výsledky příliš nepřesné.



Obrázek 65: První výškový pás zkoumaného objektu

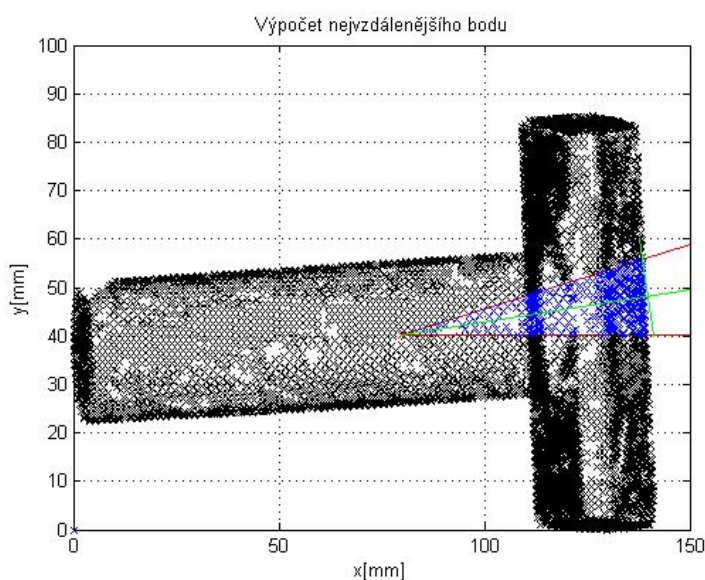


Obrázek 66: Výseč pro analýzu vzdáleného bodu

Po vytvoření výseče se v ní zahájí hledání nejvzdálenějšího bodu od středu útvaru. Nejvzdálenější bod se vyhledá pomocí přímky, která je kolmá na přímku, která je osou úhlu, který mezi sebou svírají krajní přímky výseče (Obrázek 67). V algoritmu se porovnává hodnota parametru b (6.1). Podle natočení zkoumané výseče se buď hledá minimální, nebo maximální hodnota tohoto parametru. Když je tato přímka procházející nejvzdálenějším bodem zkoumané výseče sestrojena, zjistí se její vzdálenost od středu

útvary. Tato vzdálenost se zapíše do matice, která bude reprezentovat daný objekt. Při hledání v matici vzorových řešení by tento parametr byl časově velice náročný, proto se dále ukládá celková suma všech těchto hodnot v daném pásu vynásobena úhlem výseče φ_t . Tento postup představuje numerický integrální výpočet obsahu dané plochy pásu (6.25). Tato hodnota společně s hodnotou výšky útvaru je základní hodnotou pro získání výsledného natočení modelu vůči zkoumanému objektu.

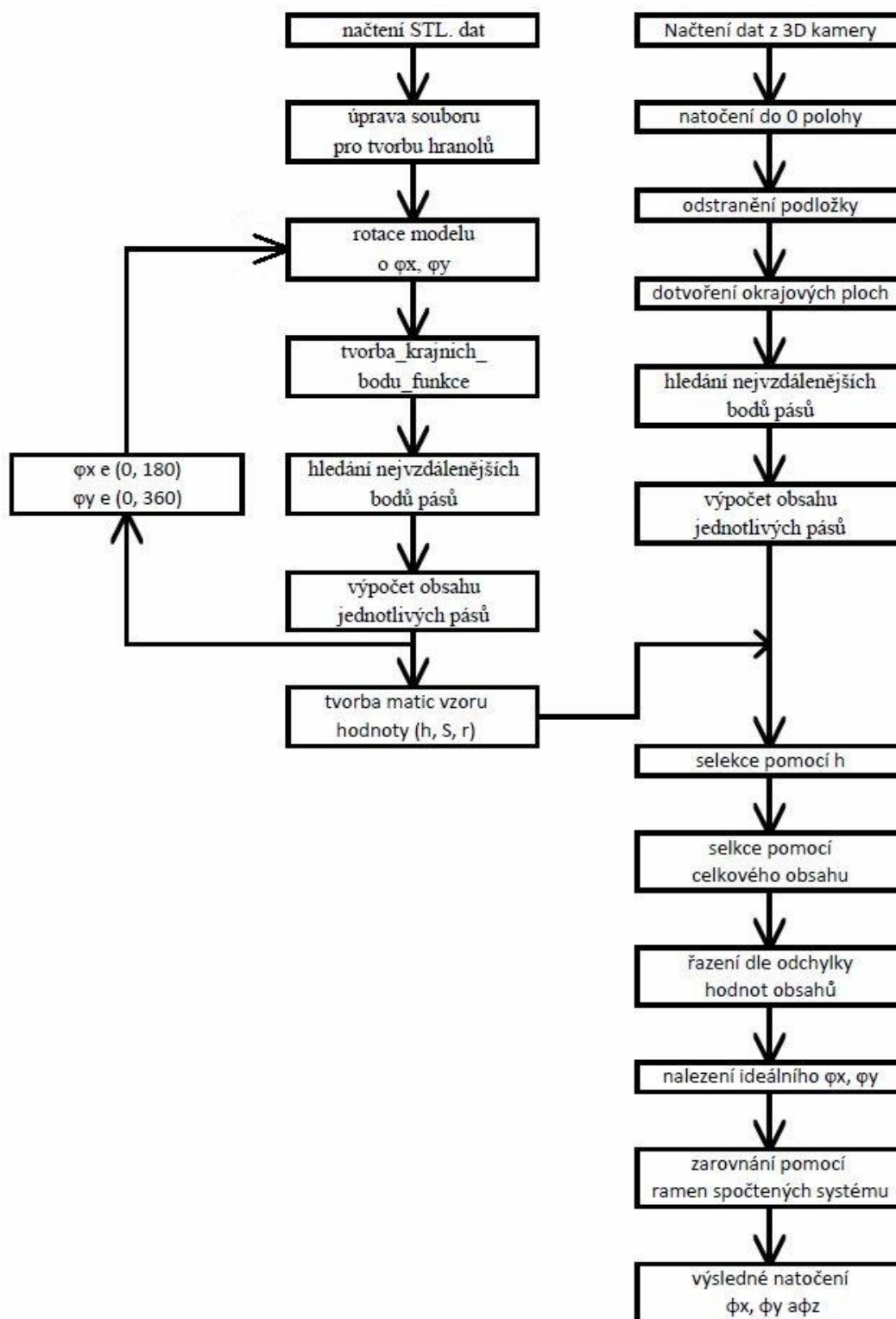
$$S = \int_0^{2\pi} r \cdot d\varphi \quad (6.25)$$



Obrázek 67: Nalezení nejvzdálenějšího bodu

Ideální úhel nastavení se opět vyhledá velmi podobným postupem, jaký byl použit pro hledání výsledného natočení pro metodu nejmenších hranolů. V první části se provede selekce pomocí výšky, podle tohoto postupu se vyřadí nejvíce odlišné útvary. Jako další parametr oddělení se použije celková suma obsahů všech pásů. Po této selekci se výsledná řešení začnou řadit pomocí odchylky obsahu v každém pásu. Výsledné řešení odpovídá natočení kolem osy X a osy Y. Dále je třeba napočítat natočení podle osy Z. K tomuto výpočtu se využije srovnání jednotlivých délek ramen nejvzdálenějších bodů. V této funkci se bude minimalizovat celková odchylka délek jednotlivých ramen. Po minimalizaci tohoto rozdílu jsou stanoveny celkové úhly natočení φ_x , φ_y a φ_z .

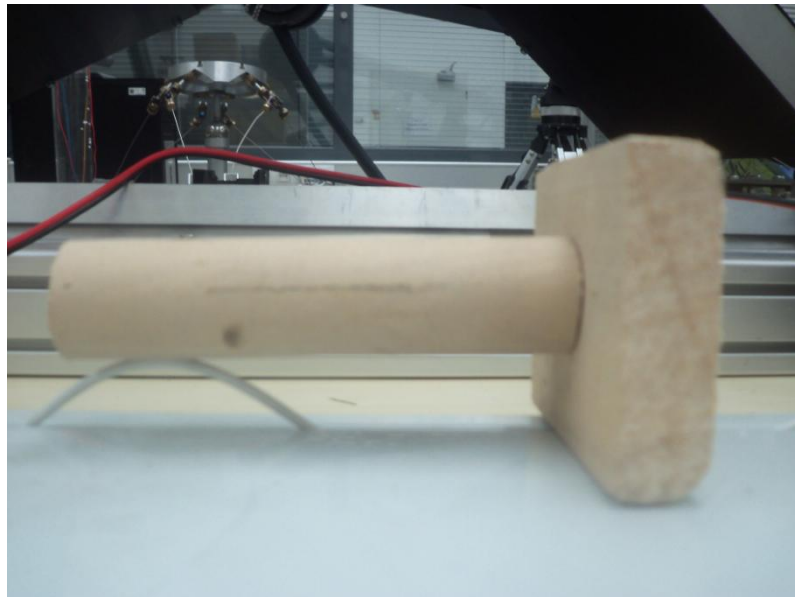
Pro tvorbu vzorových matic je použit skript „testovaci_nejvzdalenejsi_bod_vzor“, pro tvorbu srovnávacích matic soubor „testovani_nejvzdalenejsi_bod_vzor_matice“. Pro hledání reálných problémů byl použit soubor „testovaci_nejvzdalenejsi_bod“. Všechny tyto skripty jsou nahrány na příloženém CD.



Obrázek 68: Schéma metody nejvzdálenějšího bodu

7. Experiment

Závěrečnou částí diplomové práce je experimentální ověření vytvořených algoritmů. Experimentální ověření bylo provedeno pomocí systému „CogniTens - Optigo 200“. K ověření byly využity dva dřevěné modely vytvořené autorem práce (Obrázek 69), (Obrázek 70). Tyto dva modely znázorňují jednoduché tvary, které by měl systém zorientovat s přesností do pár stupňů. Měření bylo provedeno u prvního modelu (Obrázek 69) ve dvou natočeních a u druhého modelu (Obrázek 70) v jednom natočení. Cílem měření bylo zorientovat CAD model vůči experimentálně změřeným datům.



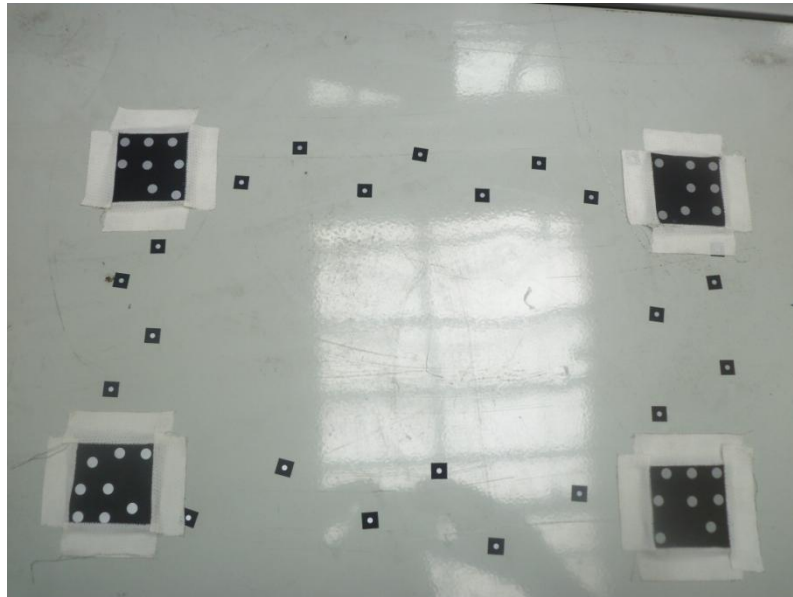
Obrázek 69: Zkoumaný objekt – kvádr s válcem



Obrázek 70: Zkoumaný objekt - kvádr zkosený

7.1 Příprava dat z 3D kamery

Nejprve bylo třeba vytvořit snímací oblast (Obrázek 71). Snímací oblast je vytvořena na rovném čistém povrchu. Tento povrch je polepen barevně kódovanými terči pro detailní zachycení mapovací oblasti pomocí systému „Optigo 10 Mapping Camera“. Dále je oblast polepena „retro reflexivními terči“, aby měl systém 3D kamery možnost vzájemného srovnání jednotlivých snímků pořízených z různých úhlů.

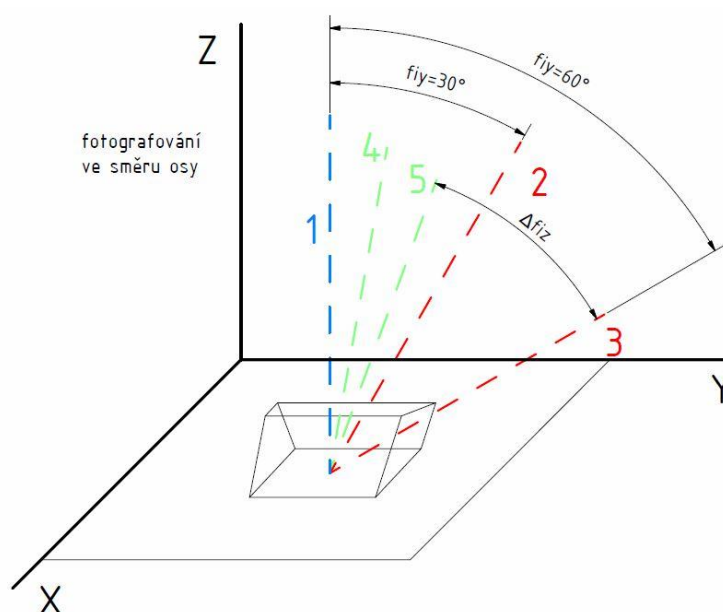


Obrázek 71: Podložka pro měření s referenčními body

V dalším kroku dojde k vytvoření mapovacího souboru. Tento postup byl popsán v kapitole 3. Pomocí tohoto postupu bylo zmapováno umístění retro-reflexivních terčů na snímací oblasti.

V následujícím kroku je potřeba vytvořit mrak bodů zkoumaného objektu. Tento mrak bodů bude vytvářen pomocí snímací hlavy (Obrázek 11). Nejprve je nutno měřicí zařízení zkalibrovat. Tento postup byl již popsán v kapitole 3. Následné měření je prováděno v následujícím pořadí. Nejprve je vytvořena fotografie pohledem na půdorys (Obrázek 72). Tato fotka se vytváří tak, aby základna vytvářeného mraku bodů, kterou představuje snímací podložka, byla co nejvíce rovnoběžná s rovinou Z. Tento krok je používán pro odstranění základny a bude v této kapitole ještě podrobně analyzován. Další snímek je pořízen v úhlu $\varphi_{y_2} = 30^\circ$ od osy Z v libovolném natočení $\varphi_{z_2} = konst.$ (Obrázek 72). Další snímek se vytvoří při stejném natočení $\varphi_{z_3} = \varphi_{z_2}$ a úhlu odklonu od osy Z $\varphi_{y_3} = 60^\circ$. Další snímky budou ve stejných natočeních jako snímky

dva a tři tedy $\varphi_{y_4} = 30^\circ$ a $\varphi_{y_5} = 60^\circ$, ale pro jiný úhel $\varphi_{z_4} = \varphi_{z_5} \neq \varphi_{z_2}$ (Obrázek 72). Tento postup je třeba opakovat do té doby, dokud není zkoumaný objekt nasnímán ze všech stran. Počet snímků není stanoven a liší se podle velikosti a složitosti objektu. Pro jednoduchý objekt typu druhého modelu (Obrázek 70) stačí deset snímků. Pro složité objekty je třeba postupovat po malých úhlech φ_z , takže výsledný obraz může být složen až ze sta snímků. Po nasnímání objektu je třeba v aplikaci Measurement systému CogniTens – Optigo 200 vytvořit globální obraz bodů. Tyto body jsou vstupem do dalších programů pro analýzu natočení.



Obrázek 72: Systém tvorby pohledů pomocí systému Optigo 200

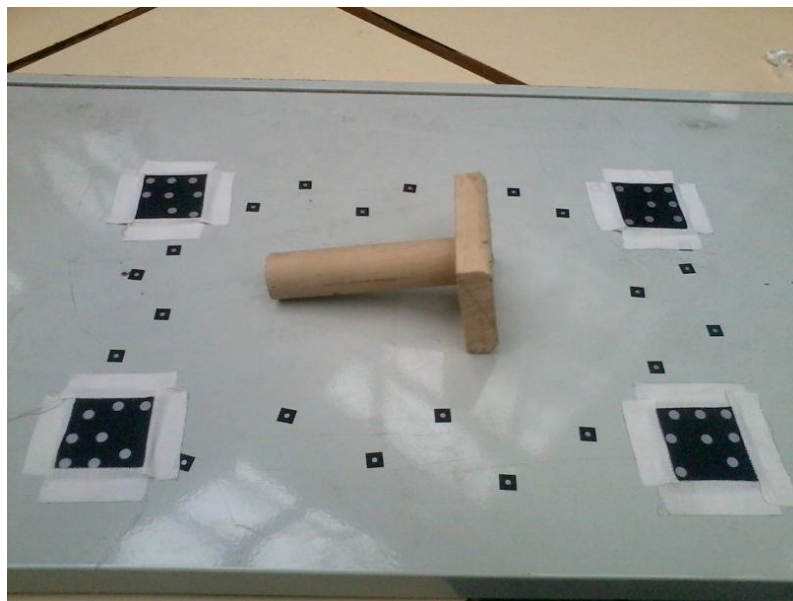
Po zpracování souboru je třeba u všech měření zarovnat systém tak, aby byla podložka rovnoběžná s rovinou Z a hodnoty nejnižších bodů podložky byly $Z=0$. Pro natočení systému do této podoby je využit předpoklad, že nasnímaná podložka má výrazně větší plochu než zkoumaný objekt. Proto se ve zkoumaném mraku bodů spojí bod s maximální a minimální hodnotou proměnné X . Odchylka mezi touto úsečkou a rovinou $Z=0$ stanovuje první úhel, o který je mrak bodů nutné otočit. Po otočení se vezme úsečka kolmá na již nalezenou úsečku a opět se změří její úhel natočení od základní roviny. Pomocí druhého otočení se systém nastaví do vodorovné polohy s rovinou $Z=0$. Nyní se systém bodů posune tak, aby nejnižší body podložky splývaly se základní rovinou $Z=0$ a body s hodnotou Z od 0 do 3 mm jsou smazány. Místo těchto bodů jsou z první vrstvy nahrány jiné body pouze s hodnotou $Z=0$. Tímto se zabrání

ztrátě hodnoty výšky, pro případ potřeby dalšího zarovnání na plochu jiné roviny. Výsledkem jsou body objektu zbavené bodů okolní podložky (Obrázek 77),(Obrázek 78).

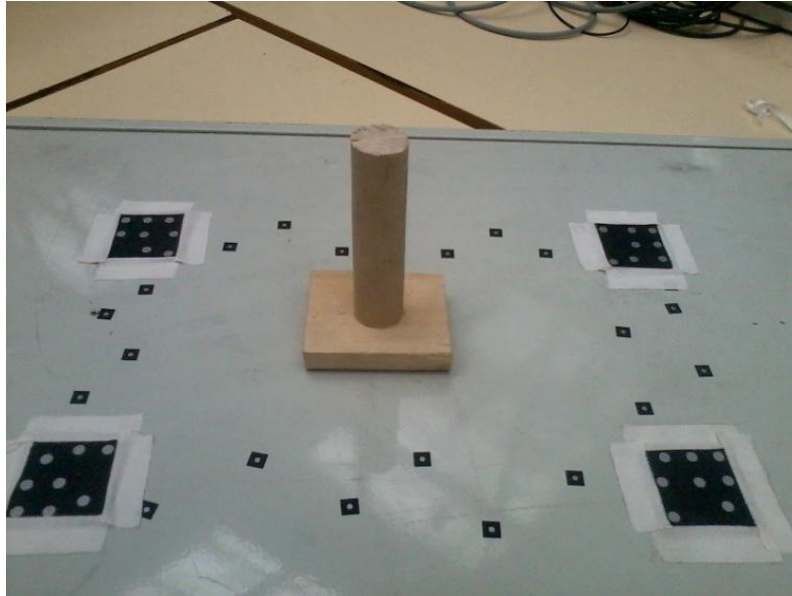
7.2 Měřený objekt kvádr s válcem

Prvním analyzovaným útvarem je objekt, který je spojením válce a zaobleného kvádru (Obrázek 69). Tento model představuje spojení dvou výrazně odlišných a specifických útvarů. Tento útvar byl analyzován ve dvou polohách natočení. Způsoby analýzy byly popsány v předchozích kapitolách. Na obrázcích (Obrázek 73), (Obrázek 74) je objekt vyfocen před analýzou v náhodně zvoleném natočení.

Nejprve je třeba provést oddělení bodů, které náleží podložce. Na obrázcích jsou vidět vytvořené systémy bodů zkoumaného objektu, které jsou nasnímány pomocí 3D kamery (Obrázek 75), (Obrázek 76). Na druhé sadě obrázků jsou vidět objekty zbavené podložky (Obrázek 77), (Obrázek 78).

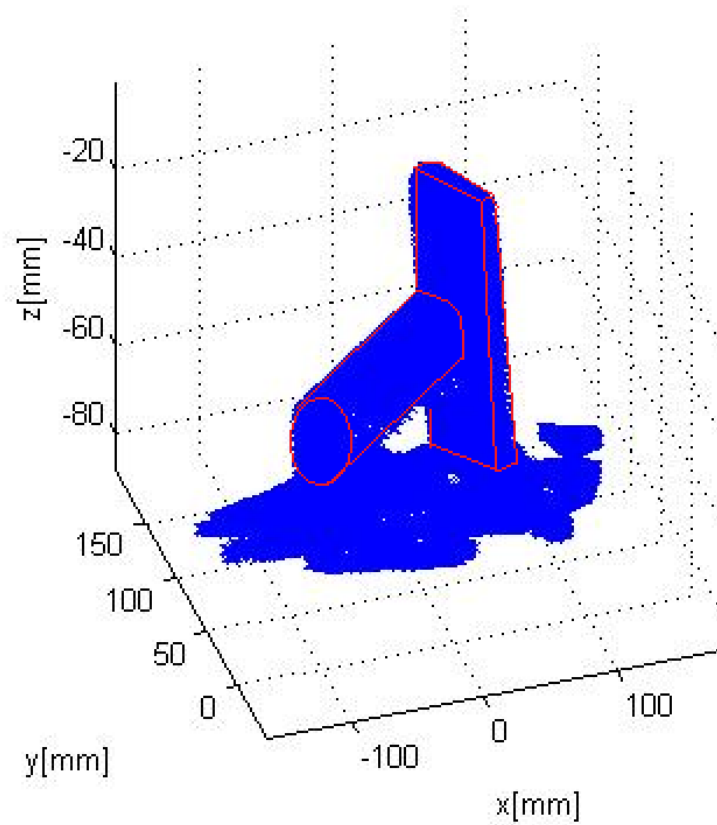


Obrázek 73: První varianta natočení pro analýzu (kvádr s válcem)

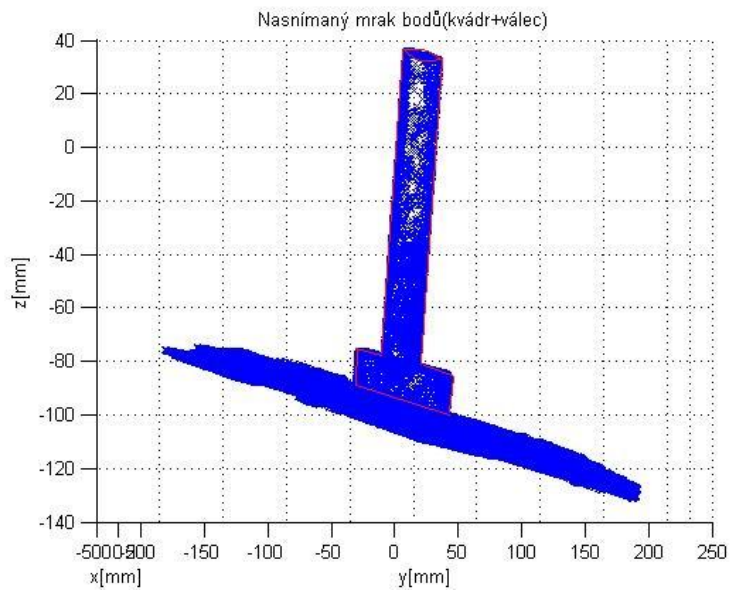


Obrázek 74: Druhá varianta natočení pro analýzu (kvádr s válcem)

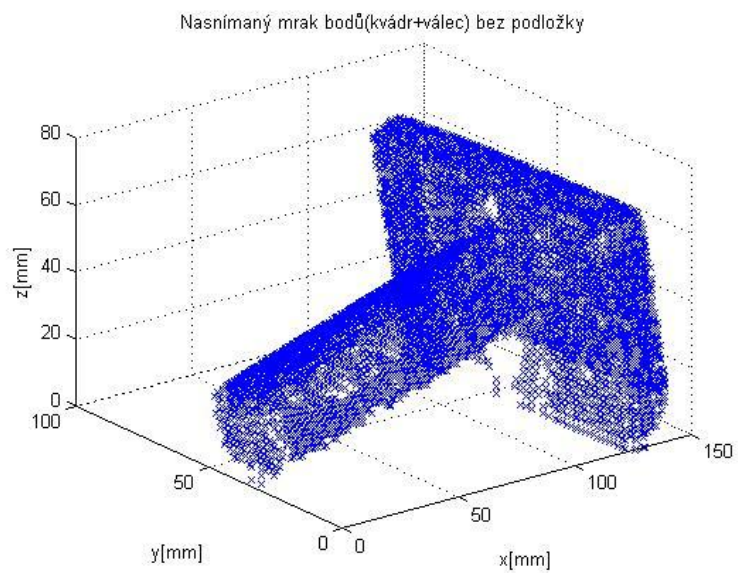
Nasnímaný mrak bodů (kvádr + válec)



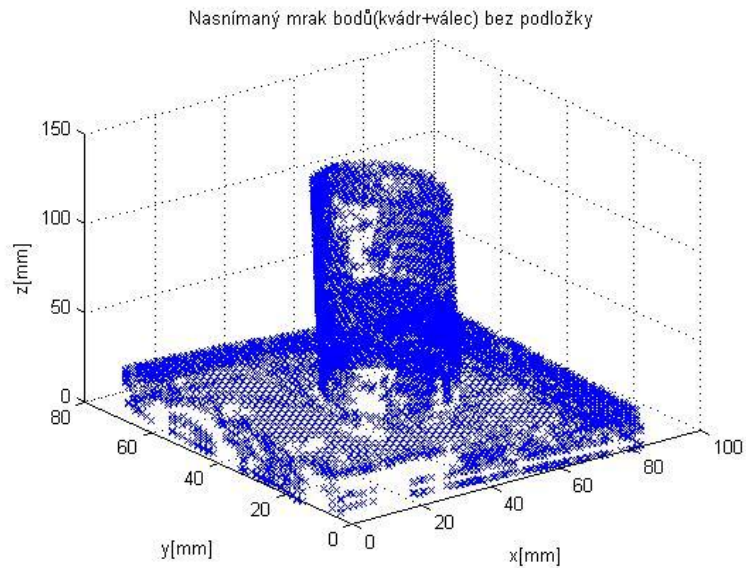
Obrázek 75: Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) s body podložky



Obrázek 76 Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) s body podložky

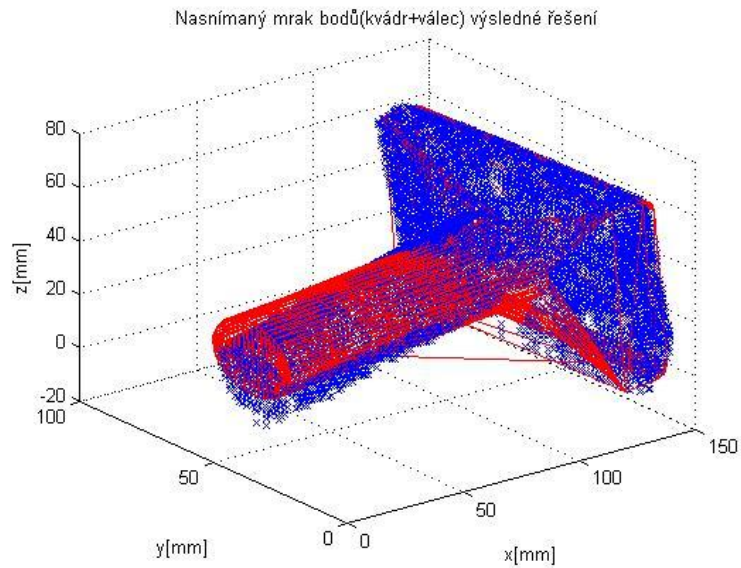


Obrázek 77 Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) s body podložky

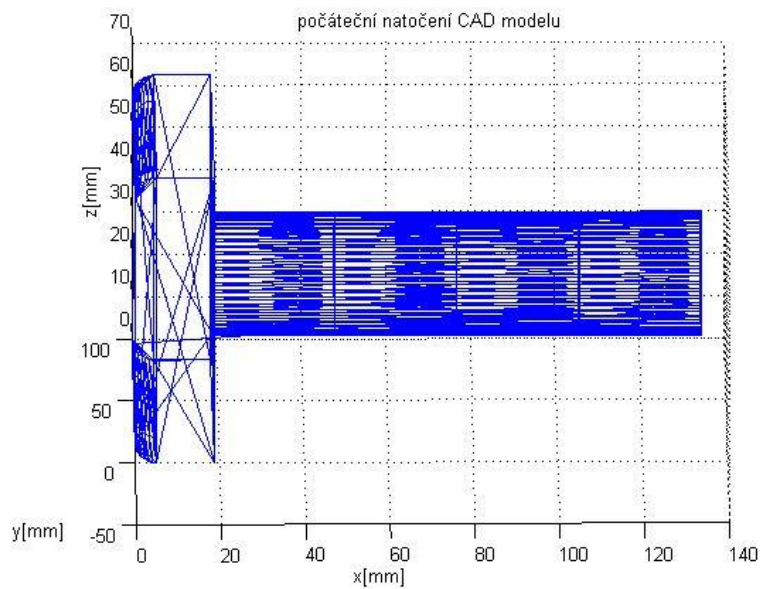


Obrázek 78 Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) s body podložky

Model kvádrů s válcem byl analyzován nejprve metodou nejmenších opsaných hranolů a to ve dvou variantách natočení. Metoda nejmenších opsaných hranolů byla popsána v kapitole 6. 4. V případě analýzy prvního natočení byly určeny úhly $\varphi_y = 356^\circ$, $\varphi_x = 178^\circ$ a $\varphi_z = 178^\circ$ (Obrázek 79). Úhly byly odměřeny od počátečního natočení CAD modelu viz (Obrázek 80). Analyzované úhly φ_x a φ_z jsou určeny velmi přesně, řádově $\pm 1^\circ$, pouze úhel φ_y je určen s chybou přibližně 3° . Odchylka úhlu φ_y mohla vzniknout i nepřesnostmi při tvorbě analyzovaného modelu, neboť vzorový objekt je vytvořen ze dřeva a rozměry byly získány pomocí posuvného měřidla. U objektu není garantována kolmost osy válcové části vůči kvádru. Tyto faktory mohly způsobit nepřesnosti v identifikaci výsledných úhlů, které jsou vidět na obrázku. Na obrázku je vidět červený CAD model zarovnaný pomocí změřených úhlů natočení s modrým systémem bodů (Obrázek 79).

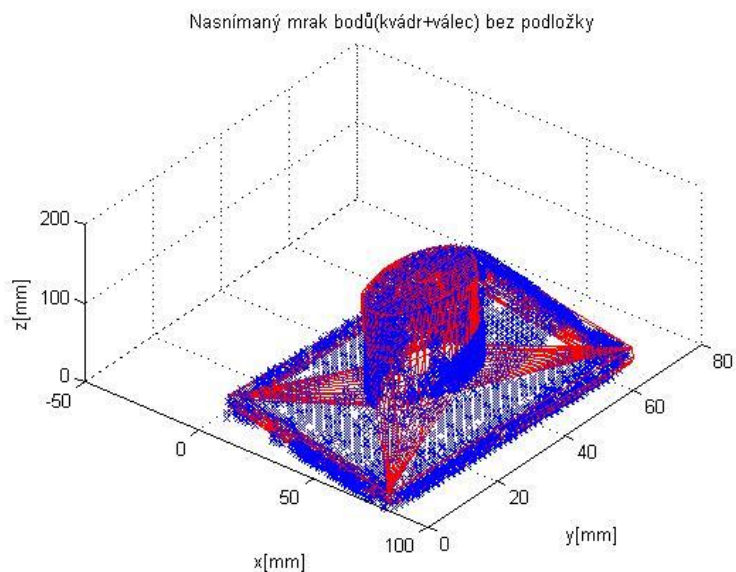


Obrázek 79: Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejmenších opsaných hranolů



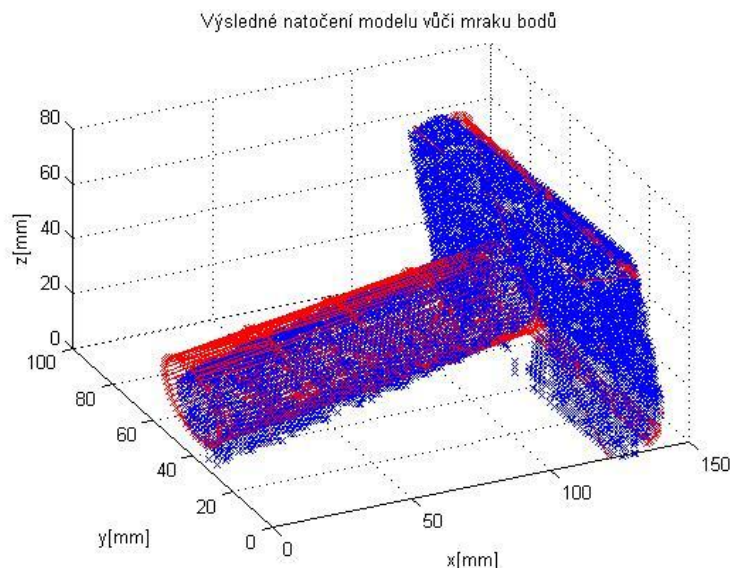
Obrázek 80: Základní natočení CAD modelu (kvádr s válcem)

U druhé varianty natočení objektu vyšly úhly natočení od základního objektu $\varphi_y = 90^\circ$, $\varphi_x = 2^\circ$ a $\varphi_z = 96^\circ$ (Obrázek 81). Tyto úhly již velice přesně popisují natočení zkoumaného objektu se vzorovým CAD modelem. Ve všech třech osách natočení není odchylka větší než půl stupně.



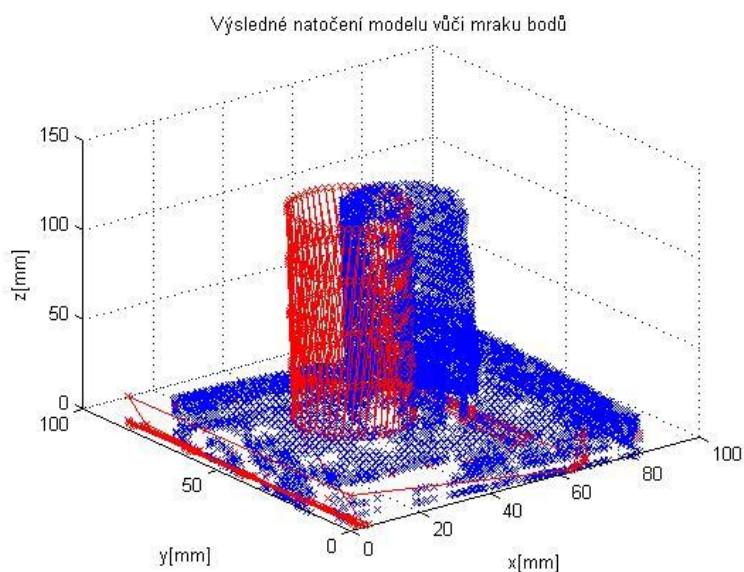
Obrázek 81: Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejmenších opsaných hranolů

Další metodou analýzy, která byla aplikována na tento objekt, byla metoda nejvzdálenějšího bodu. Tato metoda byla popsána v kapitole 6.5. Pro první variantu natočení vzorového modelu vyšly úhly natočení $\varphi_y = 9^\circ$, $\varphi_x = 179^\circ$ a $\varphi_z = 180^\circ$ (Obrázek 82). Toto měření našlo výsledné natočení velmi přesně s odchylkami analyzovaných úhlů do 3° .



Obrázek 82 Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejvzdálenějšího bodu

Pomocí této metody bylo analyzováno i druhé natočení tohoto objektu. Výsledné úhly natočení CAD modelu vůči měřenému objektu jsou $\varphi_y = 270^\circ$, $\varphi_x = 179^\circ$ a $\varphi_z = 0^\circ$ (Obrázek 83). V této variantě natočení zkoumaného objektu bylo správně určeno natočení podle os Y a X na rozdíl od natočení objektu kolem osy Z. Toto natočení je posunuto o 90° . Tato chyba je způsobena malými nepřesnostmi na horní části objektu, který není dokonale hladký. Tyto odchylky vytvářejí rozdílně dlouhá ramena proti symetrickému CAD modelu. Pro analýzu takového natočení by bylo lepší analyzovat úhel φ_z pomocí metody nejmenších opsaných hranolů.



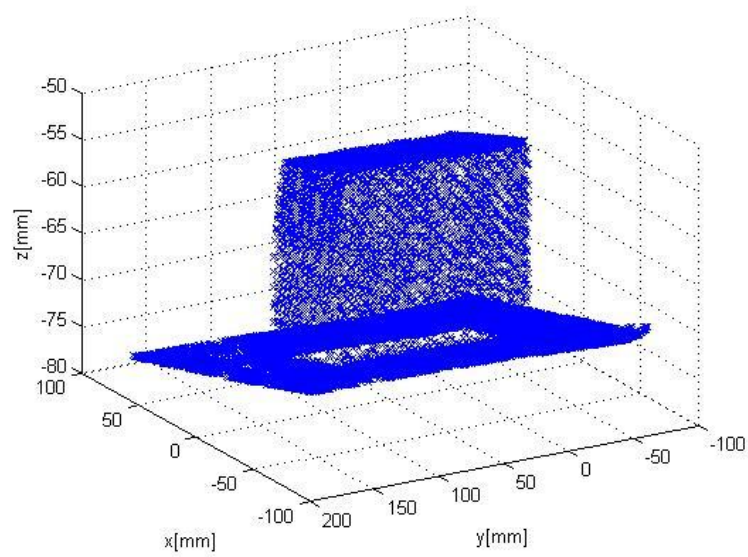
Obrázek 83 Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejvzdálenějšího bodu

7.3 Měřený objekt Zkosený kvádr

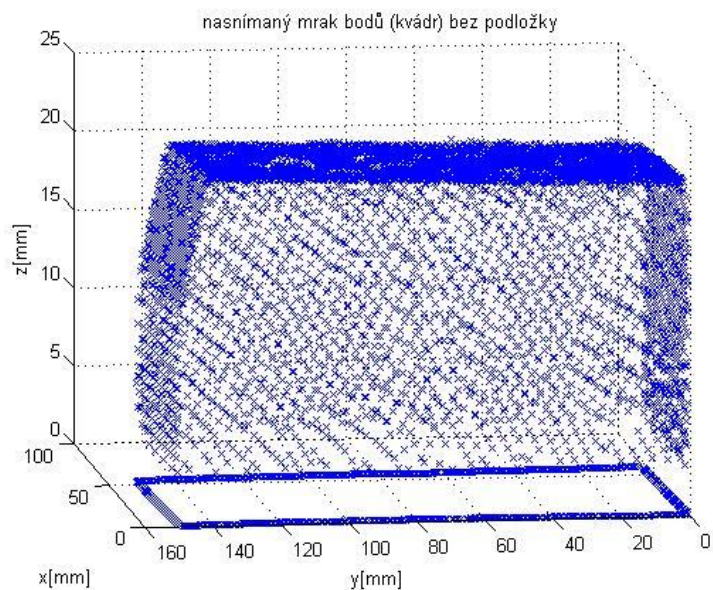
Druhým zkoumaným objektem je zkosený kvádr (Obrázek 70). Útvar byl analyzován v jedné poloze natočení. Natočení útvaru bylo opět zkoumáno pomocí dvou metod a to metody nejmenších hranolů a metody nejvzdálenějšího bodu. Na obrázku je objekt zachycen v náhodné poloze v jaké byl umístěn na snímací podložku (Obrázek 84). U objektu je opět potřeba nejprve odstranit body, které nenáleží zkoumanému objektu, ale náleží podložce, na kterou byl objekt umístěn. Na obrázcích (Obrázek 85), (Obrázek 86) je vidět systém bodů nasnímaných 3D kamerou před a po odfiltrování podložky.



Obrázek 84 Varianta natočení pro model (zkosený kvádr)

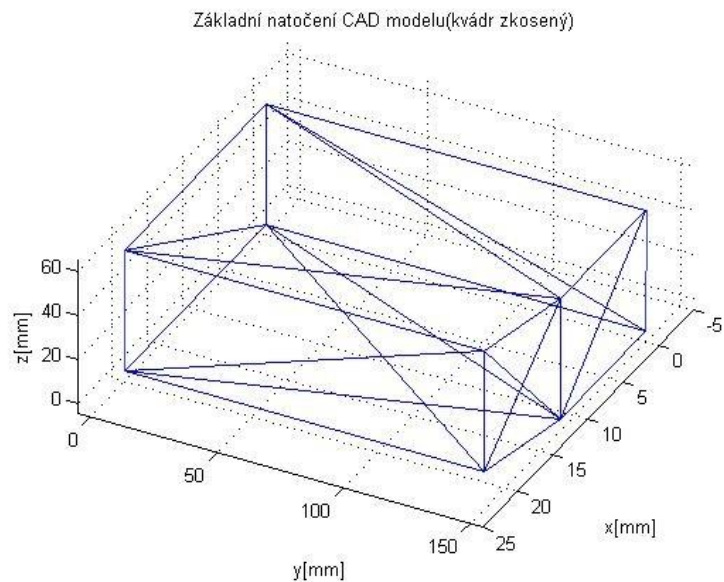


Obrázek 85: Mmrak bodů pro objekt (zkosený kvádr) s podložkou

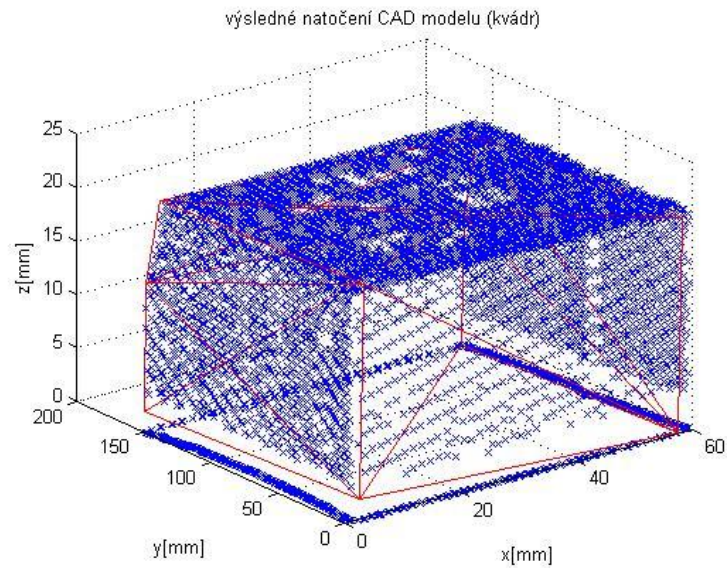


Obrázek 86: Mrak bodů pro objekt (zkosený kvádr) bez podložky

Nejprve byl tento objekt analyzován metodou nejmenších hranolů. Jako výsledné úhly natočení od vzorového CAD modelu (Obrázek 87) vyšly úhly $\varphi_y = 88^\circ$, $\varphi_x = 0^\circ$ a $\varphi_z = 359^\circ$ (Obrázek 88). Vypočtené úhly jsou přesné a odpovídají změřenému objektu do té míry, že vzorový CAD model je celý uvnitř mraku bodů.

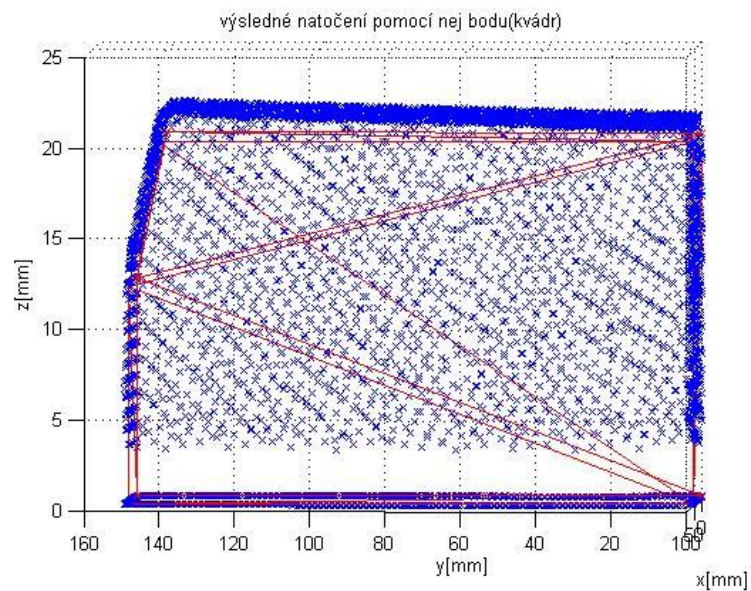


Obrázek 87: Základní natočení CAD modelu (zkosený kvádr)



Obrázek 88: Mrak bodů pro (zkosený kvádr) +natočení CAD modelu metodou nejmenších opsaných hranolů

Následně bylo toto natočení otestováno ještě metodou nejvzdálenějšího bodu. Pomocí této metody vyšly úhly natočení $\varphi_y = 90^\circ$, $\varphi_x = 0^\circ$ a $\varphi_z = 0^\circ$ (Obrázek 89). Toto natočení opět vyšlo velmi přesně a zarovnává CAD model zkoumaného objektu tak, že je celý obsažen ve zkoumaném objektu.



Obrázek 89: Mrak bodů pro (zkosený kvádr) +natočení CAD modelu metodou nejvzdálenějšího bodu

Experiment prokázal, že vytvořené metody jsou schopné identifikovat vzájemné natočení naměřených dat a CAD modelu s maximální odchylkou pár stupňů. Algoritmy řeší problematiku v krátkém čase, žádná ze zde uvedených analýz netrvala déle než 7 sekund. Vyvinuté metody ještě neprošly konečnou optimalizací a jsou implementovány v programu Matlab[®]. Je pravděpodobné, že po refaktorizaci kódu by byly metody schopny pracovat ještě efektivněji. Experiment také ukázal slabiny metod. Mezi ně patří nepřesně vyrobené úhly svírané osami jednotlivých částí objektu pro metodu nejmenších opsaných hranolů nebo problém se zarovnáním osově symetrických obrazů pro získání úhlu φ_z výsledného natočení pro metodu nejvzdálenějšího bodu. Skripty pro všechna tato řešení jsou nahrána na přiloženém CD.

8. Závěr

Cílem práce bylo analyzovat vzájemné natočení a polohu 3D modelu a měřeného objektu v prostoru na základě vzájemné podobnosti obou objektů.

V první kapitole je řešen úvod do problematiky, která je v práci řešena. Dále jsou v této části stanoveny cíle, kterých by v práci mělo být dosaženo.

V druhé kapitole byly analyzovány jednotlivé metody měření natočení 3D objektů. Byly vyhledány a sepsány optické metody, které by mohly být využity pro realizaci dané problematiky.

V třetí kapitole byl popsán systém CogniTens - Optigo 200, který je v práci použit pro získání 3D obrazu zkoumaného objektu. V kapitole byl zkoumán způsob přípravy experimentu a nástroje, které je možno využít pro analýzu vybraného objektu.

Ve čtvrté kapitole byly popsány některé alternativy, kterými by bylo možno systém Optigo 200 nahradit. Byly zde zkoumány některé varianty menších scannerů, které by větší a finančně náročný systém byly schopny nahradit.

Pátá kapitola se zabývala specifikacemi a omezeními zadané úlohy, jako je umístění objektu na podložce nebo podobnost CAD modelu a analyzovaného objektu.

Šestá kapitola v sobě zahrnuje jednotlivé metody analýzy natočení. Nejprve je zde problém řešen ve 2D a to metodou nejmenších opsaných kvádrů. Použitá metoda se ve 2D ukázala jako velice přesná, a byla následně rozšířena do 3D systému. Jejím rozšířením vznikla metoda nejmenších opsaných kvádrů. V případě této metody byl aplikován jak postup předpřípravy vzorových dat, tak metoda simulovaného žihání. Další úpravou metody nejmenších opsaných kvádrů byla metoda opsaných hranolů. Tato metoda byla upravena tak, aby byla schopna analyzovat objekty bez nasnímané spodní strany objektu. Metoda úspěšně využívá rotace hranolů s proměnlivým natočením jedné hrany, aby analyzovala co nejpřesněji horní stranu zkoumaného objektu. Poslední metodou analýzy natočení byla metoda nejvzdálenějšího bodu. Tato metoda odstraňuje problém ovlivnění celého řešení drobnou lokální chybou tím, že dělí objekt na jednotlivé výseče, které řeší separátně.

V sedmé kapitole jsou aplikovány poslední dvě metody, metoda nejmenších hranolů a metoda nejvzdálenějšího bodu. Metody jsou vyzkoušeny na datech, které jsou nasnímány systémem CogniTens - Optigo 200.

Práce by mohla být využita k rychlé analýze natočení objektů a pro nalezení ideálního místa úchopu robotickými systémy.

Cíle práce specifikované v zásadách pro vypracování 1, 2, 4, 5 a 6 byly splněny zcela, cíl 3 byl splněn pouze částečně. Vzhledem k tomu, že úloha orientace ve 3D se ukázala časově velmi náročnou, nebylo možné v daném čase zvládnout i úlohu vzájemné polohy.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma aktivní triangulace	7
Obrázek 2: Systém 2D triangulace	8
Obrázek 3: Možnosti 3D triangulace	9
Obrázek 4: Schéma stereo vidění.....	10
Obrázek 5: Teodolit	11
Obrázek 6: Schéma optické interferometrie	13
Obrázek 7: Výsledek holografické interferometrie	14
Obrázek 8: Skvrnová interferometrie: a) typické uspořádání, b) rozdílový inerferogram	14
Obrázek 9: Robot využívající interferometrie s bílým světlem.....	15
Obrázek 10: Schéma pro měření doby letu.....	16
Obrázek 11: Systém CogniTens - Optigo 200.....	17
Obrázek 12: Optigo 10 Mapping Camera.....	18
Obrázek 13. Barevné kódovací tyče	19
Obrázek 14: Barevné kódovací terče	19
Obrázek 15: Retro-reflexivní terče	19
Obrázek 16: Kalibrační box.....	20
Obrázek 17: Nastavení blesku fotoaparátu	21
Obrázek 18: Přenos nafocených dat.....	21
Obrázek 19: Tvorba nového projektu	22
Obrázek 20: Nastavení teploty prostředí	23
Obrázek 21:Proces kalibrace	23
Obrázek 22:Scanner Artec Spider.....	24
Obrázek 23: 3D Systems Capture Scanner	25
Obrázek 24: 3D scanner WLS400M.....	26

Obrázek 25: Neúplný obraz objektu	28
Obrázek 26: Znázornění opsaných obdélníků objektu	30
Obrázek 27: Obsahy kvádrů vzorového a zkoumaného objektu	31
Obrázek 28: Diferenční funkce obsahů	32
Obrázek 29: Varianty natočení α	33
Obrázek 30: Výsledné natočení zkoumaného objektu.....	34
Obrázek 31: Schéma 2D analýzy	34
Obrázek 32: Zkoumaný minimální opsaný kvádr.....	35
Obrázek 33: Časová závislost řešení	36
Obrázek 34: Normálový vektor zkoumané roviny	37
Obrázek 35: Plochy opsaného kvádru mraku bodů	38
Obrázek 36: Objem opsaných kvádrů $\alpha = 10^\circ$	39
Obrázek 37: Hledání ideálního natočení α (postupné zpřesňování)	40
Obrázek 38: Objem opsaných kvádrů $\alpha = 5^\circ$	40
Obrázek 39: Objem opsaných kvádrů $\alpha = 1^\circ$	41
Obrázek 40: Zpřesňování hodnoty $V_k - V_{vzor}$ s počtem iteračních kroků	42
Obrázek 41: Schéma metody opsaných kvádrů	43
Obrázek 42: CAD model objektu	44
Obrázek 43: Body zobrazující útvar výstup funkce STL reader	44
Obrázek 44: Výsledný upravený útvar	46
Obrázek 45: hledání středu objektu	47
Obrázek 46: Výsledné krajní body útvaru	48
Obrázek 47: Nalezené krajní body pravé strany	49
Obrázek 48: Nalezení krajních bodů levé strany	49
Obrázek 49: Vložení krajních bodů kvádru a do bodů kružnice	50
Obrázek 50: Fáze kompenzace natočení úhlu α	51

Obrázek 51: vektor hledání krajních bodů.....	52
Obrázek 52: Schéma tvorby vzorového objektu.....	54
Obrázek 53: Hodnoty výšky pro různá natočení vzorového objektu.....	55
Obrázek 54: Kvádr opsaný útvaru	56
Obrázek 55: Klín opsaný objektu	57
Obrázek 56: obsahy opsaných kvádrů zkoumaného objektu.....	58
Obrázek 57: Schéma krajních ploch klínu.....	59
Obrázek 58: objemy opsaných hranolů zkoumaného objektu	60
Obrázek 59: Odchylka obsahů řešení a vzoru	61
Obrázek 60: Výsledné natočení vzoru vůči zkoumanému objektu.....	62
Obrázek 61: Lokální chyba zkoumaného objektu	63
Obrázek 62: Schéma metody opsaných hranolů.....	64
Obrázek 63: Obraz bodů z 3D kamery	66
Obrázek 64: Obraz bodů s přidanými krajními body	66
Obrázek 65: První výškový pás zkoumaného objektu.....	67
Obrázek 66: Výseč pro analýzu vzdáleného bodu.....	67
Obrázek 67: Nalezení nejvzdálenějšího bodu.....	68
Obrázek 68: Schéma metody nejvzdálenějšího bodu	69
Obrázek 69: Zkoumaný objekt – kvádr s válcem	70
Obrázek 70: Zkoumaný objekt - kvádr zkosený.....	70
Obrázek 71: Podložka pro měření s referenčními body	71
Obrázek 72: Systém tvorby pohledů pomocí systému Optigo 200	72
Obrázek 73: První varianta natočení pro analýzu (kvádr s válcem).....	73
Obrázek 74: Druhá varianta natočení pro analýzu (kvádr s válcem).....	74
Obrázek 75: Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) s body podložky.....	74
Obrázek 76 Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) s body podložky.....	75

Obrázek 77 Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) s body podložky	75
Obrázek 78 Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) s body podložky	76
Obrázek 79: Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejmenších opsaných hranolů	77
Obrázek 80: Základní natočení CAD modelu (kvádr s válcem).....	77
Obrázek 81: Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejmenších opsaných hranolů	78
Obrázek 82 Mrak bodů pro 1. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejvzdálenějšího bodu.....	78
Obrázek 83 Mrak bodů pro 2. natočení (kvádr s válcem) +natočení CAD modelu metodou nejvzdálenějšího bodu.....	79
Obrázek 84 Varianta natočení pro model (zkosený kvádr)	80
Obrázek 85:Mrak bodů pro objekt (zkosený kvádr) s podložkou	80
Obrázek 86: Mrak bodů pro objekt (zkosený kvádr) bez podložky	81
Obrázek 87: Základní natočení CAD modelu (zkosený kvádr).....	81
Obrázek 88: Mrak bodů pro (zkosený kvádr) +natočení CAD modelu metodou nejmenších opsaných hranolů.....	82
Obrázek 89: Mrak bodů pro (zkosený kvádr) +natočení CAD modelu metodou nejvzdálenějšího bodu.....	82

Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka pro kalibrační nastavení.....	23
--	----

Seznam literatury

- [1] KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. *Elektrorevue* [online]. 2005 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [2] NOVOTNÝ, Jan. *Návrh speciálního měřícího zařízení pro kontrolu hran*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pernikář CSC.
- [3] POSPÍŠIL, Petr. *U: 3D triangulační technika rekonstrukce objektů*. Diplomová práce. VUT.
- [4] POSPÍŠIL, Jiří. *Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://igdm.vsb.cz/igdm/zamestnanci/pospisil/navody%20geo1.pdf>
- [5] *Matlab gui pro měření deformací digitální holografickou interferencí*. Liberec. Technická univerzita v Liberci.
- [6] MLATECOVÁ, Hana. *Optický proximní skener s měřením doby letu*. Brno, 2011. Diplomová práce. VUT.
- [7] HEXAGON. *Optigo User Manual*. 4.0. Cognitens Ltd, 2009.
- [8] HEXAGON. *CogniTens Mapping - User Manual*. 4.0. Cognitens Ltd, 2009.
- [9] *Skenování ve 3D* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.skenovani3d.cz/3d-skenery/artec-spider/>
- [10] [online]. 2014 [cit. 2015-5-15]. Dostupné z: http://geomagic.com/files/2014/1823/4234/Capture_Design_EN_Web.pdf
- [11] *Hexagon-metrologi* [online]. 2014 [cit. 2015-5-10]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/hexagon-metrology/3d-scanner-white-light-5623-568675.html>
- [12] *Matlab central* [online]. THE MATH WORKS. 2008 [cit. 2015-20-5]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22409-stl-file-reader>