



FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA INFORMATIKY
A VÝPOČETNÍ TECHNIKY



Bakalářská práce

Zobecněná rotační symetrie množiny bodů v prostoru

Vít Gregor



PLZEŇ

2023



FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA INFORMATIKY
A VÝPOČETNÍ TECHNIKY

Bakalářská práce

Zobecněná rotační symetrie množiny bodů v prostoru

Vít Gregor

Vedoucí práce

Prof. Dr. Ing. Ivana Kolingerová

© Vít Gregor, 2023.

Všechna práva vyhrazena. Žádná část tohoto dokumentu nesmí být reprodukována ani rozšiřována jakoukoli formou, elektronicky či mechanicky, fotokopírováním, nahráváním nebo jiným způsobem, nebo uložena v systému pro ukládání a vyhledávání informací bez písemného souhlasu držitelů autorských práv.

Citace v seznamu literatury:

GREGOR, Vít. *Zobecněná rotační symetrie množiny bodů v prostoru*. Plzeň, 2023. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra informatiky a výpočetní techniky. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Ivana Kolingerová.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vít GREGOR**
Osobní číslo: **A20B0094P**
Studijní program: **B0613A140015 Informatika a výpočetní technika**
Specializace: **Informatika**
Téma práce: **Zobecněná rotační symetrie množiny bodů v prostoru**
Zadávající katedra: **Katedra informatiky a výpočetní techniky**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s existujícími metodami nalezení osy rotační symetrie množiny bodů v prostoru.
2. Prostudujte existující metodu a programové vybavení poskytnuté vedoucí práce.
3. Navrhněte řešení pro případ, kdy osou je lomená čára. Předpokládejte, že osa samu sebe neprotíná.
4. Navržené řešení implementujte s případným využitím existujícího programového vybavení.
5. Ověřte na sadě netriviálních případů a zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah bakalářské práce: **doporuč. 30 s. původního textu**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Dodá vedoucí bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Dr. Ing. Ivana Kolingerová**
Katedra informatiky a výpočetní techniky

Datum zadání bakalářské práce: **3. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **4. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Miloš Železný, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Přemysl Brada, MSc., Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. října 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Západočeská univerzita v Plzni má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Plzni dne 05. května 2023

.....

Vít Gregor

V textu jsou použity názvy produktů, technologií, služeb, aplikací, společností apod., které mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.

Abstrakt

Tato bakalářská práce *Zobecněná rotační symetrie množiny bodů v prostoru* se zabývá hledáním zobecněné rotační symetrie v 3D objektech. Zobecněnou symetrii reprezentuje lomená čára, která vznikne spojením os, podle kterých jsou jednotlivé části objektu rotačně symetrické. Práce se zabývá nejprve předzpracováním 3D objektu v podobě rozdělení objektu na části. Na jednotlivé části objektu je pak aplikováno již existující programové vybavení pro nalezení rotační symetrie. Nakonec jsou výsledné osy spojeny v jednu lomenou čáru zobecněné rotační symetrie.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the generalized rotational symmetry of 3D objects. Generalized rotational symmetry is represented by the rotational symmetry axes of parts of the 3D object, that are connected together. Firstly, the object should be segmented to smaller parts. Then, the existing software for finding rotational symmetry axes is applied for segmented parts. Finally, the rotational symmetry axes are connected together.

Klíčová slova

symetrie • rotační symetrie • zobecněná rotační symetrie • 3D objekty • lomená čára • segmentace objektu

Obsah

1	Úvod	3
2	Analytická část	5
2.1	Geometrická transformace	5
2.1.1	Změna měřítka a zrcadlení	5
2.1.2	Rotace	6
2.2	Definice symetrie	7
2.3	Algoritmy pro hledání rotační symetrie	7
2.3.1	Metoda Lukáše Hrudy	7
2.4	Algoritmy pro segmentaci	8
2.4.1	K-Means	9
2.4.2	Hierarchické algoritmy	9
2.4.3	Dělení založené na detekci hran	9
2.4.4	Dělení založené na růstu oblasti (region growing)	10
3	Řešení	11
3.1	Popis programového řešení	11
3.2	Předzpracování	12
3.2.1	Rozdělení objektu na části	13
3.2.2	Natočení objektu	14
3.3	Napojení na používaný software	16
3.4	Úprava výsledků dílčích objektů	17
3.5	Hledání zobecněné rotační symetrie	17
3.5.1	Hledání průsečíků	17
3.5.2	Uložení a vizualizace výsledku	18
4	Experimenty	21
4.1	Ruční dělení objektu	21
4.1.1	Způsob hodnocení	21
4.1.2	Testování prvního objektu	22
4.1.3	Testování druhého objektu	23

4.2	Válce	24
4.2.1	Hodnocení	25
4.3	Komolé kužely	26
4.3.1	Hodnocení	27
4.4	Hledání zobecněné rotační symetrie pro ručně rozdělené objekty .	28
4.4.1	Předzpracování	28
4.4.2	Hledání průsečíků	28
4.5	Hledání zobecněné rotační symetrie pro automaticky rozdělené objekty	29
4.5.1	Rozdělení objektů na části	29
4.5.2	Předzpracování	30
4.5.3	Tvorba lomené čáry	30
4.6	Výsledky a hodnocení	30
5	Závěr	45
	Bibliografie	47
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek	53
	Seznam výpisů	55
	Přílohy	57
	Uživatelská příručka	59
	Nastavení programu	59
	Formát vstupních souborů	60
	Spuštění	60
	Popis odevzdávaného souboru	61

Cílem této bakalářské práce je navrhnout metodu pro nalezení zobecněné rotační symetrie množiny bodů v prostoru a implementovat potřebné programové vybavení. Tato zobecněná rotační symetrie bude reprezentována lomenou čarou, která vznikne spojením dílčích os rotační symetrie jednotlivých částí zpracovávaného objektu. Tyto části budou získány automatickým nebo ručním rozdělením těchto objektů.

Tato práce byla podpořena z projektu GAČR 21-08009K Zobecněné symetrie a ekvivalence geometrických dat.

První část bude věnována definici pojmu symetrie, poté budou představeny metody, které lze použít pro hledání osy rotační symetrie, včetně metody Ing. Lukáše Hrudy vyvinuté na Katedře informatiky a výpočetní techniky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. V dalším kroku budou popsány algoritmy pro rozdělení 3D objektu na části, na které bude možné vybranou metodu pro hledání rotační symetrie postupně aplikovat.

Další část bude věnována řešení této práce. Bude navržen algoritmus pro rozdělení objektů na menší části. Dále bude řešena úprava vstupních dat pro zpracování vybranou metodou pro nalezení rotační symetrie a následně bude navržen postup, který z os rotační symetrie dílčích objektů vytvoří lomenou čáru, podle které je objekt zobecněně rotačně symetrický.

Poslední kapitola bude věnována experimentům, na základě kterých bylo navrženo řešení, a bude se zabývat také testováním a vyhodnocením výsledků práce.

Tato část práce se zabývá teoretickými poznatky k problematice definice symetrie, hledání osy rotační symetrie a rozdělení 3D objektů na části.

V kapitole 2.1 bude popsán pojem geometrická transformace, který poté bude použit v kapitole 2.2 pro definici symetrie. V kapitole 2.3 budou popsány různé možnosti řešení problému hledání osy rotační symetrie a v kapitole 2.4 pak budou popsány různé postupy pro rozdělení 3D objektů na části.

2.1 Geometrická transformace

Tato podsekcce se bude věnovat vysvětlení pojmu geometrická transformace. Všechny poznatky zde uvedené jsou převzaty z [Žár+10]. 3D objekty se skládají z bodů, které jsou definovány třemi souřadnicemi, tedy $P = [X, Y, Z]$, kde P je bod a X , Y a Z jsou jeho souřadnice. Geometrická transformace je funkce T , která transformuje bod $P = [X, Y, Z]$ do podoby $P' = [X', Y', Z']$. Pro provedení geometrické transformace je nutné aplikovat funkci T na všechny body objektu nebo alespoň na ty body, které objekt jednoznačně určují. Existují různé geometrické transformace. Základními transformacemi jsou translace, rotace a změna měřítka. Pro definici symetrie je důležitá především transformace změna měřítka (definice reflexní symetrie) a transformace rotace (definice rotační symetrie).

2.1.1 Změna měřítka a zrcadlení

Změna měřítka je geometrická transformace, která slouží ke změně rozměrů objektu. Transformace je popsána transformační maticí S , která je uvedena v rovnici 2.1.

$$S(s_x, s_y, s_z) = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ kde } s_x, s_y, s_z \neq 0 \quad (2.1)$$

Inverzní transformační matice je uvedena v rovnici 2.2.

$$S^{-1}(s_x, s_y, s_z) = S\left(\frac{1}{s_x}, \frac{1}{s_y}, \frac{1}{s_z}\right), \text{ kde } s_x, s_y, s_z \neq 0 \quad (2.2)$$

Pomocí transformace škálování lze realizovat zrcadlení podle určité roviny. Pro zrcadlení podle roviny XY se použijí hodnoty $s_x = 1, s_y = 1$ a $s_z = -1$. Pro zrcadlení podle roviny ZX se použijí hodnoty $s_x = 1, s_y = -1$ a $s_z = 1$. Pro zrcadlení podle roviny YZ se použijí hodnoty $s_x = -1, s_y = 1$ a $s_z = 1$.

2.1.2 Rotace

Transformace rotace slouží k otočení objektu kolem jedné ze souřadných os nebo kolem obecné osy. Transformace kolem souřadné osy x je popsána maticí R_x (rovnice 2.3) a matice k ní inverzní je R_x^{-1} (rovnice 2.4). Transformace kolem souřadné osy y je popsána maticí R_y (rovnice 2.5) a matice k ní inverzní je R_y^{-1} (rovnice 2.6). Transformace kolem souřadné osy z je popsána maticí R_z (rovnice 2.7) a matice k ní inverzní je R_z^{-1} (rovnice 2.8). U všech těchto rovnic se počítá s řádkovými vektory.

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R_x^{-1}(\alpha) = R_x(-\alpha) \quad (2.4)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$R_y^{-1}(\beta) = R_y(-\beta) \quad (2.6)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$R_z^{-1}(\gamma) = R_z(-\gamma) \quad (2.8)$$

Rotaci kolem obecné osy je možno provést pomocí aplikace několika dílčích transformací kolem souřadných os.

2.2 Definice symetrie

Symetrii lze definovat několika různými způsoby. Zde bude uvedena definice použitá v práci [Hru+22], která využívá pojmu geometrická transformace.

Dokonalou symetrii definujeme jako geometrickou transformaci $T(X)$, pro kterou platí, že $T(X) = X$, tedy objekt je invariantní vůči této transformaci. V praktických úlohách ale postačuje, pokud se $T(X)$ shoduje s X pouze přibližně. Existuje několik druhů symetrií, například reflexní symetrie, kde T je zrcadlení podle určité roviny. Tato práce se zabývá rotační symetrií, kde transformace T je rotací kolem osy o určitý úhel.

2.3 Algoritmy pro hledání rotační symetrie

Existuje již několik metod, kterými lze rotační symetrii určovat. Některé z nich dokáží najít pouze osu rotační symetrie, jinými lze také určit, jaký je úhel rotace.

Jedna z metod pro nalezení rotační symetrie určuje osu rotační symetrie pomocí minimalizace součtu úhlů mezi normálou právě zpracovávaného bodu a rovinou definovanou kandidátskou osou rotační symetrie a zpracovávaným bodem objektu [Eci+18].

Jiná metoda je založena na vyhledávání kružnicových struktur v objektu [Sip17]. Skládá se ze dvou kroků. v prvním kroku jsou v sadě vhodně navzorkovaných bodů, které jsou součástí objektu, nalezeny kružnicové struktury na základě podobnosti v prostoru povrchové funkce. Následující krok je zaměřen na hledání sady nejvhodnějších kružnicových struktur pomocí shlukové analýzy. Podle nich se pak určuje osa rotační symetrie.

Další metoda, která na rozdíl od předchozích dvou dokáže určit i úhel rotace, pracuje s histogramem orientace objektu [SS97]. Metoda je založena na myšlence, že symetrie objektů je podobná symetrii histogramu orientace. Úhel rotace je určen pomocí aplikace korelačních operací na dva histogramy orientace téhož objektu po různých transformacích.

2.3.1 Metoda Lukáše Hrudy

Jedna z metod, kterou lze použít pro nalezení rotační symetrie, byla vytvořena na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni Ing. Lukášem Hrudou [Hru+22]. Jedná se o rozšíření již existující metody na nalezení reflexní symetrie pomocí maximalizace míry symetrie od téhož autora [HKV21].

Tato metoda je založena na poznatku, že objekt, u kterého lze nalézt rotační symetrii, má často také několik symetrií reflexních, jejichž průnikem je osa rotační

symetrie objektu. Metoda tedy nejprve nalezne reflexní symetrie a poté pomocí nich určí kandidátské osy rotační symetrie.

Hledání rovin reflexní symetrie. Původní metoda pro nalezení reflexní symetrie využívá dvě sady bodů vzniklé zjednodušením vstupní sady bodů. Menší sada bodů obsahuje 100 bodů a slouží k výrobě kandidátských rovin reflexní symetrie.

Větší sada obsahuje 1000 bodů a slouží k výpočtu míry symetrie pro jednotlivé kandidátní roviny (v případě algoritmu pro hledání rotační symetrie je počet bodů zvýšen na 3000). Z těchto kandidátních rovin je pak vybráno několik málo rovin s nejvyšší mírou symetrie, které budou dále zpracovány (ve výchozím nastavení je vybíráno pět rovin). Pro účely hledání rotačních symetrií je vybráno 30 rovin.

Nakonec je provedena numerická optimalizace a poté je na základě nejvyšší míry symetrie vybrána výsledná rovina symetrie. V případě metody pro nalezení rotační symetrie je ale tento krok vynechán a pro zjištění rotační symetrie se použijí všechny roviny získané v předchozím kroku.

Nalezení osy rotační symetrie. Kandidátské osy rotační symetrie jsou tvořeny tak, že se z nalezených rovin reflexní symetrie vytvoří páry, jejichž průsečík představuje kandidátskou osu. Z vytvořených os je vybráno několik málo kandidátů s nejvyšší mírou rotační symetrie.

Nakonec je provedena optimalizace a následně je vybrána osa rotační symetrie s nejvyšší mírou rotační symetrie.

Určení úhlu rotace. Úhel rotace nelze určovat pomocí míry symetrie. Úhel rotační symetrie je určen tak, že se na základě výsledné osy rotační symetrie vygenerují rotace o různé úhly (prvočísla od 43 stupňů do 180 stupňů). Pro všechny tyto rotace je vypočtena míra symetrie a pokud je větší než $2/3$ míry symetrie získané rotační symetrie, prohlásí se úhel rotace za kandidáta na úhel rotační symetrie.

2.4 Algoritmy pro segmentaci

U členitých objektů by bylo vhodné, aby byla osa rotační symetrie hledána v různých částech objektu zvlášť. Za tímto účelem je vhodné provést segmentaci, tedy rozdělení objektu na několik částí.

Existuje několik metod, kterými lze toto dělení provést, například metody založené na shlukování, jako je K-means, K-medoids [Mac67], nebo hierarchické algoritmy [GMR17]. Lze také využít různé složitější metody, které využívají konvoluční neuronové sítě. Další metody využívají například detekce hran [HTV06], nebo vyhledávání geometrických primitiv v objektu [GMR17].

2.4.1 K-Means

K-means a K-medoids jsou jednoduchými metodami pro vytváření shluků. Informace v této sekci jsou převzaty z [Mac67].

K-means na základě kritéria nejmenší vzdálenosti přiřazuje postupně všechny body ke středům shluků, tzv. centroidům, které jsou na počátku algoritmu náhodně inicializovány. Pro určení vzdálenosti lze použít manhattanskou vzdálenost, euklidovskou vzdálenost nebo v některých případech také kosinovou vzdálenost. Po přiřazení všech bodů jsou středy shluků přepočítány podle rovnice 2.6. Bod S je středem shluku i , n je počet shluků, m je počet bodů ve shluku i a X_j jsou body patřící do shluku i . Algoritmus končí, když se obsah shluků přestane měnit (a zároveň s tím se přestanou posouvat i středy).

$$S_i = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m X_j, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

K-Medoids. Metoda K-Medoids funguje podobně jako metoda K-Means, s tím rozdílem, že v případě metody K-Medoids je centroid vždy součástí zpracovávané množiny bodů. Po výpočtu středu podle rovnice 2.6 se tedy musí najít bod s nejmenší vzdáleností k vypočtenému středu a ten je prohlášen za centroid.

2.4.2 Hierarchické algoritmy

Hierarchické algoritmy jsou založeny na spojování menších shluků ve větší [GMR17]. Základem jsou shluky o velikosti jednoho bodu. v každé iteraci jsou na základě zvoleného kritéria vytvořeny dvojice shluků, které se spojí. Kritériem může být například nejmenší vzdálenost mezi shluky.

2.4.3 Dělení založené na detekci hran

Dělení na části je možno provést pomocí detekce hran [HTV06]. Algoritmy pro dělení na základě detekce hran se skládají ze dvou částí. v první části jsou nalezeny hrany objektu a v druhé části jsou na základě nalezených hran určeny výsledné části objektu.

Hrany se skládají z bodů, jejichž lokální polohové vlastnosti překročí určitou mez. Lze je tedy definovat jako místa, kde objekt prudce mění svůj tvar. Tyto polohové vlastnosti jsou například normály nebo gradienty.

Pro oddělení nalezeného segmentu od objektu v místě hrany lze využít například oříznutí podle roviny.

2.4.4 Dělení založené na růstu oblasti (region growing)

Dělení založené na růstu oblasti je metoda segmentace, která dokáže rozdělit objekt na části, jejichž body mají podobné vlastnosti [GMR17].

Algoritmus funguje tak, že nejprve jsou pro každou část určeny počáteční body. Z těchto bodů se pak vychází a prohledávají se všechny sousední body a ty s podobnými vlastnostmi se přidají do shluku. Vlastnosti, podle kterých segmentace probíhá, mohou být různé, například orientace povrchu nebo zakřivení.

Tato kapitola se zabývá návrhem řešení práce a popisem jeho implementace. Nejprve bude popsáno předzpracování objektu, jehož součástí je rozdělení objektu na části a natočení jednotlivých objektů do svislé polohy. Na takto zpracovaná data bude následně nasazeno programové vybavení Ing. Lukáše Hrudy.

Další část bude věnována zpracování výstupních dat, která poskytne převzaté programové vybavení, a nakonec bude z těchto dat vytvořena lomená čára popisující zobecněnou rotační symetrii objektu. Také bude popsán způsob vizualizace nalezeného výsledku.

3.1 Popis programového řešení

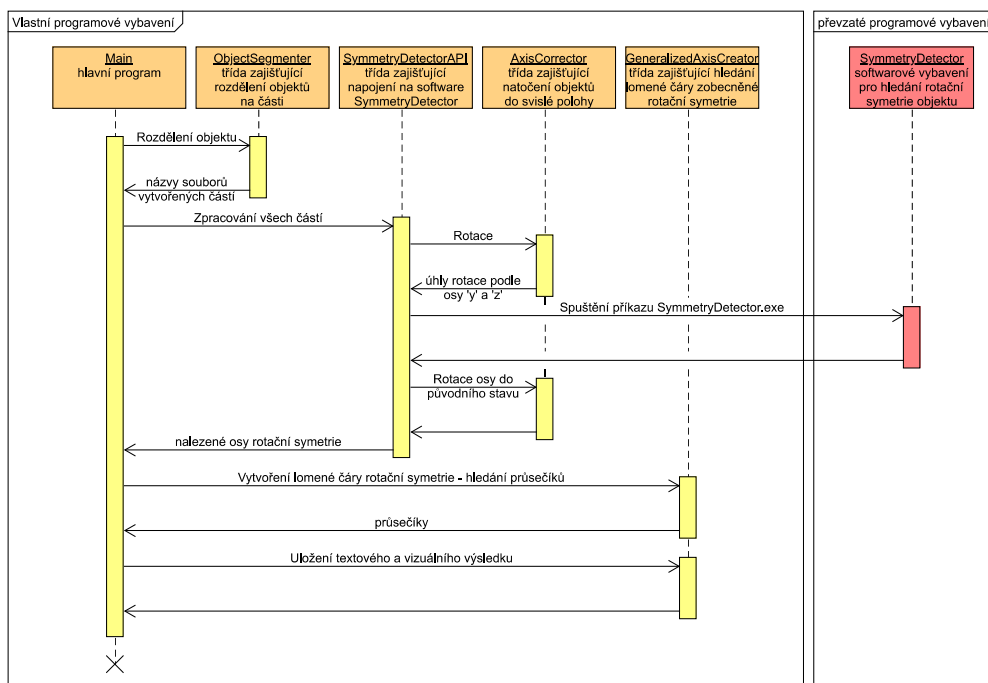
Řešení bylo implementováno v programovacím jazyku C#. Součástí programového řešení této práce jsou algoritmy pro předzpracování vstupních dat, jako je rozdělení objektu na části a pootočení dílčích objektů do svislé polohy. Detekce rotační symetrie je prováděna pomocí externího programového vybavení od Ing. Lukáše Hrudy. Vlastní řešení dále obsahuje vybavení pro následné zpracování výsledků externího softwaru (natočení os zpět o úhly, o které byly dílčí objekty pootočeny při předzpracování). Program dále z takto upravených výsledků umí vytvořit lomenou čáru, která reprezentuje zobecněnou rotační symetrii objektu.

Vstupem programu je jeden objekt ve formátu mračna bodů (.pc) zadaný jako parametr příkazové řádky, jehož zobecněnou rotační symetrii je potřeba určit. V takovém případě je na začátku prováděna automatická segmentace tohoto objektu. Program podporuje také zpracování objektů, které jsou rozděleny ručně. V takovém případě je vstupem více objektů (také mračna bodů (.pc)) představujících po sobě jdoucí ručně rozdělené části objektu. V případě použití ručního dělení je automatické dělení vynecháno.

Sekvenční diagram programu je vidět na obrázku 3.1. Činnosti, které jsou součástí programového řešení této práce, jsou na tomto obrázku umístěny v obdélníku popsaném jako *Vlastní programové vybavení*. Převzatý program je umístěný v obděl-

níku popsaném jako *Převzaté programové vybavení*. V případě, že je použito ruční rozdělení objektu, je první krok, tj. automatické rozdělení objektu, vynechán.

Uživatelská příručka k tomuto programu je umístěna v příloze 1.



Obrázek 3.1: Sekvenční diagram programu pro nalezení zobecněné rotační symetrie. V obdélnících v horní části obrázku jsou popsány jednotlivé součásti (včetně převzatých). Níže jsou znázorněny činnosti. U šipek směřujících vpravo je uveden název činnosti, u šipek směřujících vlevo je uvedena návratová hodnota nebo nic, pokud činnost nemá návratovou hodnotu nebo pokud její návratová hodnota není pro běh programu podstatná.

3.2 Předzpracování

Před nasazením programového vybavení Ing. Lukáše Hrudy je třeba provést předzpracování, tj. úpravu vstupních dat. V případě, že byl jako parametr příkazové řádky uveden pouze jeden soubor představující mračno bodů, je součástí předzpracování nejprve jeho automatické rozdělení na menší části. Pokud bude využito ruční rozdělení, je automatická segmentace vynechána.

V případě využití automatického i ručního rozdělení je pak prováděno natočení dílčích částí objektu do svislé polohy za účelem dosažení co nejlepších výstupů z programu Ing. Lukáše Hrudy. Toto natočení vede k lepším výsledkům například v případě pravidelných válců (ověřeno experimenty v kapitole 4). V případě pravi-

delného válce je rotace prováděna tak, aby byla osa, podle které je válec vytažen, rovnoběžná s osou y .

3.2.1 Rozdělení objektu na části

Pro rozdělení objektu na části bylo navrženo řešení založené na postupném procházení objektu a provádění řezů. Na počátku je vybrán startovací bod, od kterého začíná být objekt prohledáván. Dochází k postupnému posouvání rezné roviny po malých přírůstcích. Dílčí část je odříznuta, pokud najednou dojde k prudké změně tvaru objektu (například v místě ohybu). Algoritmus řešení tohoto problému je popsán níže. Pro správné fungování algoritmu je vhodné použití vzorkování, které má body pouze na plášti, nikoli uvnitř objektu.

1. Nalezení počátku, odkud začíná prohledávání objektu.
 - a) Sestrojení kvádru, který ohraničuje objekt (anglicky bounding-box).
 - b) Na objektu jsou poblíž každé strany kvádru hledány kružnicové struktury.
 - i. U aktuálně zkoumané stěny je vytvořen průřez o šířce δ objektem směrem dovnitř kvádru. Pro šířku δ je třeba volit malé hodnoty (řádově desetiny až jednotky - záleží na hustotě vzorkování).
 - ii. Podle rovnice 3.1 se spočítá centroid C bodů, které jsou součástí průřezu. Body průřezu jsou označeny jako X a jejich počet je n .

$$C = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n X_j \quad (3.1)$$

- iii. Podle rovnice 3.2 se vypočítá rozptyl $Var(L)$ vzdáleností L_j od centroidu k bodům, které jsou součástí průřezu. Počet bodů průřezu je n a průměrná vzdálenost je označena \bar{L} . Čím více se rozptyl blíží nule, tím se nalezená struktura bodů více podobá kružnici (u ideální kružnice by byly všechny body od centroidu stejně daleko).

$$Var(L) = \sum_{j=1}^n (L_j - \bar{L})^2 \quad (3.2)$$

- c) Centroid u stěny kvádru, kde je vypočtený rozptyl nejmenší, je prohlášen za počátek P . Počáteční vektor \vec{n} je normála na tuto stěnu směrem dovnitř ohraničujícího kvádru. Vektor \vec{n} musí být normalizován.
2. Výpočet kroku s , o který se bude rezná rovina posouvat. Krok s je počítán jako část tělesové úhlopříčky ohraničujícího kvádru. V implementaci řešení této práce je jako krok použita dvacetina této úhlopříčky.

3. Pokud byl objekt ořezán tak, že už z něj nezůstávají žádné body, algoritmus je ukončen (tedy každý bod byl přidělený do nějaké části).
4. Posun bodu P ve směru vektoru \vec{n} o krok s , tj $P' = P + s \cdot \vec{n}$.
5. Vytvoření průřezu o šířce δ ve směru vektoru \vec{n} a výpočet centroidu C podle rovnice 3.1. Doporučení pro parametr δ je uvedeno v kroku 1. b. i.
6. Výpočet odchylky ϵ centroidu C od osy definované bodem P a vektorem \vec{n} . Pokud je tato odchylka dostatečně malá, pokračuje se na krok 3 (v implementaci je zvolena tolerance 1.0). Pokud je odchylka příliš velká, dojde k vypočtení nového normálového vektoru \vec{n} řezné roviny podle rovnice 3.3. Následně dojde k odříznutí dosud prošlé části objektu podle řezné roviny a následně se pokračuje na krok 3.

$$\vec{n} = \frac{1}{|C - P|} \cdot (C - P) \quad (3.3)$$

3.2.1.1 Limity metody

Navržená metoda má některé požadavky a omezení, které musí zpracovávané objekty splňovat, aby metoda produkovala správné výsledky.

Prvním požadavkem na objekt je, že musí být navzorkován tak, aby obsahoval body pouze na plášti objektu, nikoli uvnitř objektu. Pokud by objekt byl navzorkován i uvnitř, metoda pro hledání kružnicových struktur v objektu by nefungovala správně.

Druhé omezení se týká tvaru objektu. Navržená metoda není vhodná pro objekty, které mají tvar okruhu, části okruhu, popřípadě spirály a další objekty, u kterých by mohlo dojít při ořezu podle roviny k zařazení většího množství informace do segmentu, než je třeba. Tato informace pak bude chybět při dalším procházení objektu a výsledek segmentace nebude uspokojivý. Takto složité objekty je pak třeba řešit ručním rozdělením na menší části a aplikováním automatické segmentace na tyto části.

3.2.2 Natočení objektu

Na základě konzultace s autorem používaného programového vybavení Ing. Lukášem Hrudou bylo zjištěno, že v případě pravidelných válců metoda vrací v různých případech dva různé správné výsledky. Jedním výsledkem je osa rotační symetrie procházející válcem podélně, u druhého výsledku prochází osa kolmo na válec. Pro tuto práci je ale druhý výsledek nepoužitelný a programu je potřeba pomoci k vrácení výsledku, kdy osa rotační symetrie prochází válcem podélně.

Pomocí experimentů v kapitole 4 bylo zjištěno, že správný výsledek byl vrácen, pokud byla osa válce zarovnána podle souřadnicové osy y . Proto byla navržena rotace částí objektu tak, aby byly postaveny do svislé polohy. Díky tomu bude větší pravděpodobnost na detekci správného výsledku u pravidelných válců. Výše popsáný problém se týká především válců. V případě experimentů s kužely bylo zjištěno, že osa rotační symetrie bude nalezena vždy správně.

Algoritmus pro natočení objektu je popsán níže.

1. Vypočítá se centroid C zpracovávané části objektu podle rovnice 3.4. Jednotlivé body jsou označeny X_j a jejich počet je n .

$$C = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n X_j \quad (3.4)$$

2. Je vytvořen seznam různě natočených rovin (v implementaci jich je celkem 63). Každá z těchto rovin prochází centroidem C .
3. Vytvoří se průřez objektem o šířce δ ve směru normálového vektoru definujícího rovinu. Pro každou rovinu jsou v průřezu hledány kružnicové struktury.
 - a) Pomocí rovnice 3.4 je spočítán centroid C_P průřezu.
 - b) Podle rovnice 3.5 je spočítán rozptyl vzdáleností bodů P_j průřezu od centroidu C_P (vzdálenosti označeny jako L_j). Průměrná vzdálenost je označena \bar{L} a počet bodů v průřezu je označen n .

$$Var(L) = \sum_{j=1}^n (L_j - \bar{L})^2 \quad (3.5)$$

4. Návrat k bodu 3, dokud nejsou zpracovány všechny testované roviny, jinak se pokračuje na bod 5.
5. Vybere se rovina, u které byl spočten nejmenší rozptyl. Rovina je definována bodem P a normálovým vektorem \vec{n} . Podle této roviny je objekt rozdělen na dvě mračna bodů A a B . Rozdělení objektu je prováděno pomocí skalárního součinu $(X_j - P) \cdot \vec{n}$. Do jednoho shluku jsou umístěny všechny body X_j , pro které je skalární součin větší nebo roven 0, ostatní body X_j jsou umístěny do druhého shluku.
6. Podle rovnice 3.4 jsou vypočteny centroidy C_A a C_B obou vzniklých částí.
7. Za osu rotace objektu je prohlášena přímka, která prochází body C_A i C_B zároveň.

8. Zjistí se úhel od nalezené osy a podle tohoto úhlu je provedena rotace objektu.
- Rozložením nalezené osy je získán vektor, který leží v rovině ZX .
 - Podle rovnice 3.6 je spočítán úhel rotace kolem osy y . Jako vektor \vec{n} je použit vektor $[1, 0, 0]$ a jako vektor \vec{u} se použije vektor v rovině ZX získaný v minulém kroku.
 - Provede se rotace objektu podle souřadnicové osy y .
 - Provede se rotace osy nalezené v kroku 7 podle souřadnicové osy y .
 - Rozložením rotované osy je získán vektor, který leží v rovině XY .
 - Podle rovnice 3.6 je vypočten úhel rotace kolem osy z . Jako vektor \vec{n} použije vektor $[0, 1, 0]$ a jako vektor \vec{u} se použije vektor v rovině XY získaný v předchozím kroku.
 - Provede se rotace kolem osy z .

$$\alpha = \arccos\left(\frac{|\vec{n} \cdot \vec{u}|}{|\vec{n}| \cdot |\vec{u}|}\right) \quad (3.6)$$

3.2.2.1 Požadavek na objekty

Navržená metoda má požadavek na vzorkování objektu. Aby co nejlépe fungovala metoda pro hledání kružnicových struktur, musí obsahovat body pouze na plášti objektu, nikoli uvnitř.

3.3 Napojení na používaný software

Program používá pro detekci rotační symetrie externí software Ing. Lukáše Hrudý. Proto muselo být navrženo řešení, jakým způsobem bude program se zmíněným programovým vybavením komunikovat. Bylo zvoleno řešení, kdy je externí software spuštěn z vlastního programu a čeká se na jeho dokončení. Do stávajícího softwarového vybavení Ing. Lukáše Hrudý tedy nebylo nijak zasahováno.

Napojení je realizováno tak, že je z vlastního programu spuštěn proces příkazové řádky (na systému Windows je spuštěn proces `cmd.exe`, na Linuxu je spuštěn terminál `/bin/bash`), ve které je spuštěn příkaz pro spuštění programu na nalezení rotační symetrie s parametrem představujícím cestu k souboru s částí objektu, pro který je rotační symetrie hledána. Následně program vyčkává na dokončení procesu příkazové řádky. Software Ing. Lukáše Hrudý uloží výsledek do souboru, ve kterém se nachází informace o ose rotační symetrie, jako je bod, kterým osa prochází, a směrový vektor této osy. Dále soubor obsahuje úhel rotační symetrie, který ale nebude pro další zpracování využíván.

Projekt obsahuje XML konfigurační soubor (`Settings.config`), ve kterém je nutno specifikovat cestu, na které se nachází spustitelný soubor programového vybavení Ing. Lukáše Hrudý. Pro specifikaci cesty ke spustitelnému souboru se používá element `configuration/symmetry_detector_path`. Bez nastavené cesty k externímu softwarovému vybavení nebude program fungovat.

3.4 Úprava výsledků dílčích objektů

Před zpracováním dílčích objektů softwarem Ing. Lukáše Hrudý došlo k pootočení objektu, kdy byly prováděny dvě rotace (první byla kolem osy y , druhá kolem osy z). Výsledky, které vrátil externí program, tedy budou těmito rotacemi ovlivněny.

Z tohoto důvodu je třeba provést následné zpracování výsledků, a to tak, že je nutné rotovat nalezenou osu rotační symetrie pomocí dvou zpětných rotací, nejprve kolem osy z , poté podle osy y . Tímto krokem je získána osa rotační symetrie objektu v původní poloze.

3.5 Hledání zobecněné rotační symetrie

Tato část bude věnována hledání zobecněné rotační symetrie. Tato zobecněná rotační symetrie je reprezentována lomenou čarou, která vznikne složením os rotační symetrie dílčích objektů. Hlavním smyslem této části je tedy hledání bodů, ve kterých tato lomená čára mění svůj směr. To jsou takové body, kde se protínají osy rotační symetrie sousedních dílčích objektů. Následující podkapitoly se tedy budou věnovat hledání průsečíků os rotační symetrie, textové reprezentaci získaného výsledku a jeho vizualizaci.

3.5.1 Hledání průsečíků

K nalezení lomené čáry popisující zobecněnou rotační symetrii je třeba nalézt průsečíky os všech sousedních dílčích objektů. Pro tento účel byl navržen algoritmus založený na přibližování bodů po dvou sousedních osách směrem k sobě. Pokud vzdálenost mezi těmito dvěma k sobě se blížícími body klesne pod určitou mez, za průsečík je označen jeden z těchto bodů. Navržený algoritmus pro nalezení průsečíků os rotační symetrie sousedních objektů je popsán níže.

1. Zpracovávají se dvě sousední osy, které jsou definovány body P_1 a P_2 a směrovými vektory \vec{u}_1 a \vec{u}_2 .
2. Pokud byl nalezen průsečík, přejde se na krok 1 s tím, že se bude zpracovávat druhá osa z původních a osa po ní následující. Pokud už byly zpracovány všechny osy sousedních objektů, algoritmus končí.

3. Zjistí se parametry posunu t_1 a t_2 .
- a) Provedou se 4 pokusy o přiblížení bodů k sobě. Podle rovnic 3.7 a 3.8 se vypočítají nové body s využitím celkem 4 možností nastavení parametrů t_1 a t_2 . Tyto možnosti parametrů jsou popsány v tabulce 3.1.

Pořadí	t_1	t_2
1	0.1	0.1
2	-0.1	0.1
3	0.1	-0.1
4	-0.1	-0.1

Tabulka 3.1: Možnosti nastavení parametrů t_1 a t_2 .

$$P'_1 = P_1 + u_1 \cdot t_1 \quad (3.7)$$

$$P'_2 = P_2 + u_2 \cdot t_2 \quad (3.8)$$

- b) U každého ze čtyř pokusů o přiblížení se spočítá vzdálenost mezi nově spočítanými body P'_1 a P'_2 . Vybere se takové nastavení parametrů t_1 a t_2 , pro které je tato vzdálenost nejmenší.
4. Pomocí parametrických rovnic přímky (rovnice 3.7 a 3.8) jsou postupně počítány nové pozice bodů a vzdálenosti mezi nimi, a to až do doby, kdy vzdálenost mezi body P_1 a P_2 v předchozí iteraci je menší než vzdálenost mezi body P'_1 a P'_2 v nové iteraci. Pokud vzdálenost klesne pod určitou mez δ , bod p_1 je prohlášen za průsečík (v implementaci je mez δ nastavena na hodnotu 1,5).
5. Přejde se na krok 2.

3.5.2 Uložení a vizualizace výsledku

Výsledek je uložen ve dvou formátech. Jeden formát je textový, který obsahuje všechny osy rotační symetrie definované počátečním bodem a směrovým vektorem. Každá z těchto informací je na samostatném řádku. Na řádcích mezi každými popisy os je zaznamenán bod, který je průsečíkem, pokud průsečík neexistuje, je zaznamenáno null.

Jestliže se tedy lomená čára skládá ze dvou os, na první řádce bude bod definující první osu, na druhé řádce bude směrový vektor první osy, na třetí řádce bude průsečík těchto os, na čtvrté řádce bude bod definující druhou osu a na poslední řádce bude směrový vektor druhé osy.

Druhý formát, který program ukládá, je mračno bodů, které je vhodné pro vizuální zobrazení výsledku. Mračno bodů je generováno algoritmem uvedeným níže.

1. Postupně se procházejí všechny osy, pokud již byly zpracovány všechny, přechází se na krok 5.
2. Je určen počáteční bod vykreslování aktuální osy.
 - a) Jestliže průsečík mezi minulou osou a aktuální osou existuje, jako počáteční bod je zvolen tento průsečík.
 - b) Jestliže se jedná o osu, jejíž počátek nelze definovat průsečíkem (tj. jedná se o první osu nebo o osu, pro kterou je její průsečík s minulou osou `null`, počáteční bod je definován jako $S = P + \vec{n} \cdot s$, kde S je počáteční bod, P je bod, kterým je definována osa, \vec{u} je směrový vektor zpracovávané osy. Parametr s určuje vzdálenost od bodu P (v implementaci použito $s = 50$).
3. Je určen koncový bod vykreslování aktuální osy.
 - a) Jestliže průsečík mezi aktuální osou a následující osou existuje, jako koncový bod je zvolen tento průsečík.
 - b) Jestliže se jedná o osu, jejíž konec nelze definovat průsečíkem (tj. jedná se o poslední osu, nebo o osu, pro kterou je její průsečík s následující osou `null`, koncový bod je definován jako $S = P - \vec{n} \cdot s$. Významy použitých proměnných jsou uvedeny v kroku 2.b.
4. Podle parametrické rovnice přímky jsou po malých přírůstcích generovány body od počátečního bodu do koncového bodu. Poté se přejde na krok 1.
5. Postupně se procházejí všechny průsečíky, pokud již byly zpracovány všechny, algoritmus končí.
6. Pokud průsečík existuje, je generována koule o průměru 5 jednotek podle obecné rovnice kulové plochy (rovnice 3.9). Bod $P = (X_p, Y_p, Z_p)$ je průsečík. Za poloměr r se dosazuje 2.5. Po vygenerování koule se přechází na krok 5.

$$(X - X_p)^2 + (Y - Y_p)^2 + (Z - Z_p)^2 = r^2 \quad (3.9)$$

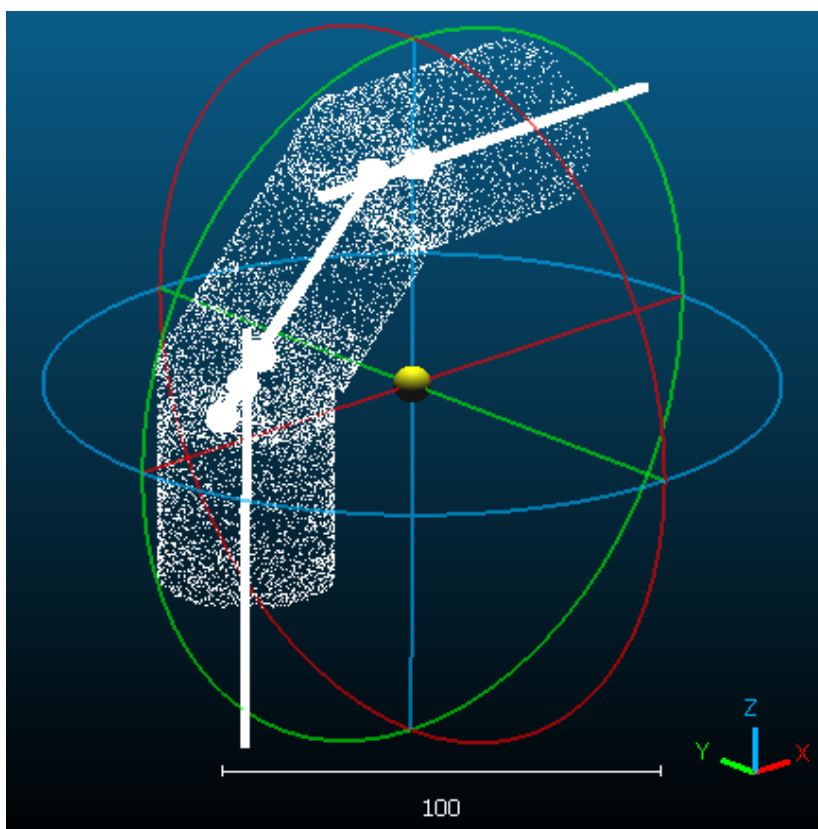
Soubor s vizuálním výsledkem lze zobrazit například pomocí programu CloudCompare[23]. Ukázka textové reprezentace zobecněné rotační symetrie je vidět ve výpisu 3.1. Ukázka vizuální reprezentace zobrazené pomocí programu CloudCompare je vidět na obrázku 3.2.

Výpis 3.1: Ukázka textové reprezentace lomené čáry zobecněné rotační symetrie.

```
73.58855865 -0.11269735 87.40585860
0.99992440 -0.00202109 0.01213114
```

3. Řešení

```
53.59007050 -0.07227540 87.16323562
53.64034936 0.00985144 88.30120908
-0.99999987 0.00030822 0.00028214
39.34035112 0.01425904 88.30524372
30.94603919 -0.01424712 79.15262872
0.71715259 -0.00092128 0.69691552
4.12453212 0.02020908 53.08798811
4.48927810 0.08332569 52.89245099
-0.70720879 0.00433334 -0.70699142
-7.46255058 0.15655918 40.94429592
-7.47787985 -0.03259295 41.09777712
-0.71035520 -0.00059882 -0.70384318
-1.08468304 -0.02720351 47.43236582
-0.04519295 0.02053708 9.54808213
0.003500977 -0.00052954 0.99999375
```



Obrázek 3.2: Ukázka vizuální reprezentace nalezené lomené čáry zobecněné rotační symetrie (Je zobrazena uvnitř zpracovávaného objektu, ten není součástí vizuální reprezentace, kterou program vytvořil).

Tato část práce bude věnována experimentům a hodnocení dosažených výsledků. V první části budou provedeny experimenty s ručním rozdělením objektů, které ověří vhodnost nasazení programového vybavení vyvinuté na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni Ing. Lukášem Hrudou, viz kapitola 2.3.1. Druhá část bude věnována testování a hodnocení výsledků řešení navrženého v kapitole 3.

Experimenty byly prováděny na počítači s procesorem AMD Ryzen 5 3500 (frekvence 3.6 GHz (turbo: 4 GHz), 6 jader), 16 GB operační paměti (frekvence 2666 MHz) a operačním systémem Windows 10 Home.

4.1 Ruční dělení objektu

Nejprve bude vyzkoušena aplikace metody Ing. Lukáše Hruďy na ručně rozdělené části členitých objektů. Pro provedení experimentu byly vytvořeny dva objekty s kruhovým profilem. Každý z těchto objektů je navržen tak, aby jej bylo možné rozdělit na tři útvary válcovitého typu (v některých případech se nebude jednat o pravidelný válec, ale například o válec se seřízlými podstavami).

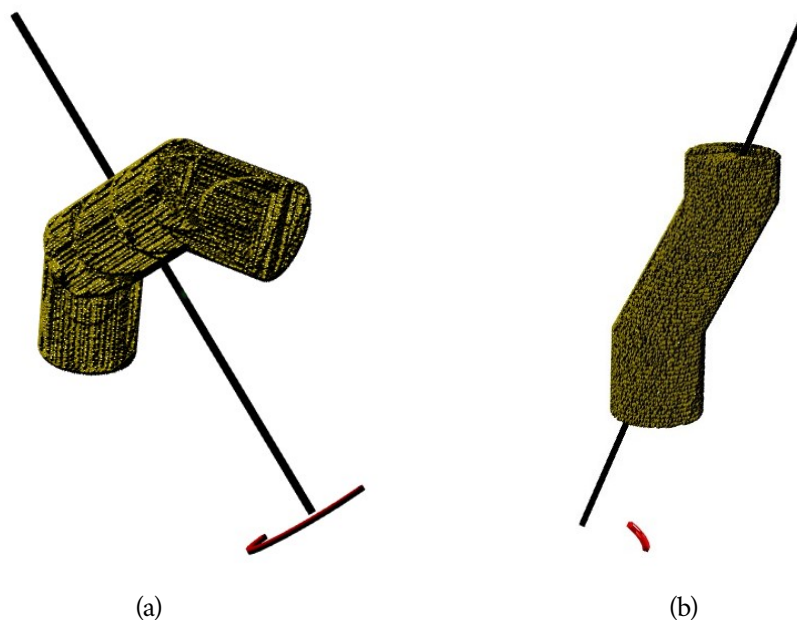
Objekty byly vytvořeny pomocí vlastního programu na generování jednoduchých objektů s kruhovým profilem. Z těchto objektů byla vytvořena mračna bodů náhodným vzorkováním pomocí programu CloudCompare. Pro ruční segmentaci objektů byl využit rovněž program CloudCompare.

Oba objekty včetně nalezené globální osy rotační symetrie (nejedná se tedy ještě o lomenou čáru zobecněné rotační symetrie) pomocí programového vybavení Ing. Lukáše Hruďy jsou vidět na obrázku 4.1.

4.1.1 Způsob hodnocení

Metoda vrací část objektu s nalezenou osou rotační symetrie. Osa rotační symetrie by měla vypadat tak, aby ji bylo možno navázat na osy sousedních částí, tj. aby osa rotační symetrie procházela válcem podélně. V takovém případě bude osa označena jako **použitelná** pro další zpracování.

Existuje ale ještě jeden typ výsledku, který je z pohledu metody Ing. Lukáše Hrudy správný, ale je pro další zpracování nepoužitelný (tento problém byl popsán v kapitole 3.2.2). Jedná se o osu rotační symetrie kolmou na válec. V tomto případě bude osa označena jako **nepoužitelná** pro další zpracování.



Obrázek 4.1: Objekty, u kterých bude prováděno ruční rozdělení, s nalezenou globální osou rotační symetrie.

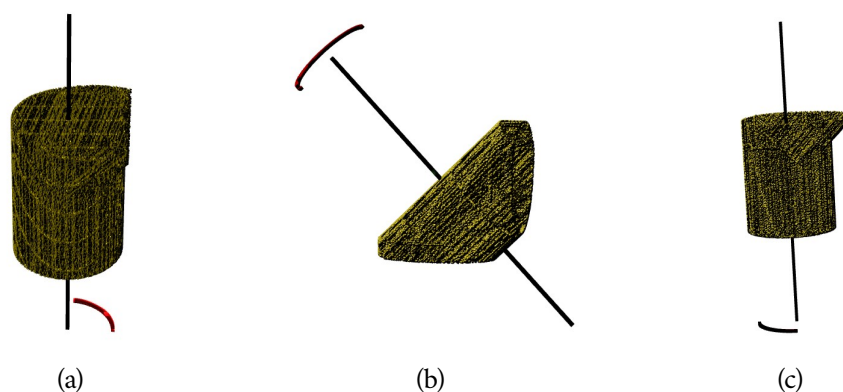
4.1.2 Testování prvního objektu

První testovaný objekt je vidět na obrázku 4.1a). Objekt představuje část potrubí s ohybem o devadesát stupňů, přičemž tento ohyb je řešen postupně pomocí dvou dílčích ohybů o 45 stupňů.

Rozdělení tohoto objektu bylo vyzkoušeno ve dvou variantách. První variantou je, že se od objektu oddělí obě koncové části v podobě dvou pravidelných válců a prostřední část je zbytkem po tomto oddělení (tedy válcovitý útvar se seříznutými podstavami). Druhá varianta je, že prostřední část bude pravidelným válcem a krajní části budou zbytkem po tomto oddělení (bude se tedy jednat o dva válcovité útvary, přičemž každý z nich bude mít seříznutou pouze jednu podstavu).

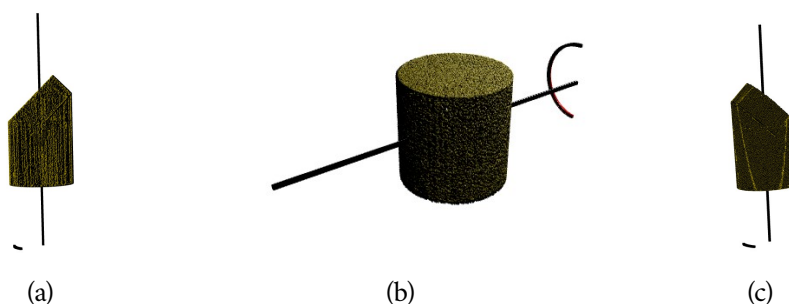
Výsledky pro první variantu jsou vidět na obrázku 4.2. Na obrázcích 4.2a) a 4.2c) jsou vidět koncové části objektu, u kterých je nalezená osa rotační symetrie **použitelná** pro další zpracování. V případě části na obrázku 4.2b) metoda našla osu, která je **nepoužitelná** pro další zpracování.

Výsledky druhé varianty jsou vidět na obrázku 4.3. Výsledek dopadl podobně jako u předchozí varianty, tedy u okrajových částí byla nalezena osa **použitelná**



Obrázek 4.2: Výsledky pro první variantu objektu potrubí zahnutého o 90 stupňů.

pro další zpracování, u prostřední části byla nalezena osa **nepoužitelná** pro další zpracování.



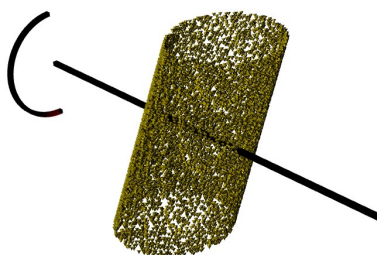
Obrázek 4.3: Výsledky pro druhou variantu objektu potrubí zahnutého o 90 stupňů.

4.1.3 Testování druhého objektu

Druhý testovaný objekt je vidět na obrázku 4.1b). Objekt představuje část potrubí, na kterém dochází k vychýlení směru, ale po chvíli zase k následnému vrácení se do původního směru.

Rozdělení tohoto objektu proběhlo tak, že byly odděleny koncové části ve tvaru pravidelných válců od prostřední části. Prostřední část je tedy válcovitý útvar s podstavami seříznutými jiným způsobem, než tomu bylo v kapitole 4.1.3.

Pro obě válcové koncové části metoda vrátila výsledek **použitelný** pro další zpracování. Výsledek pro prostřední část je vidět na obrázku 4.4. Obrázek 4.4 ukazuje, že metoda našla osu, která je pro další zpracování **nepoužitelná**.



Obrázek 4.4: Výsledek zkosené části druhého testovaného objektu.

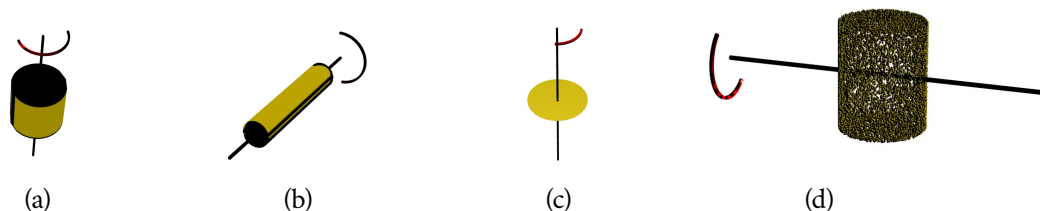
4.2 Válce

Vzhledem k nepoužitelným výsledkům u prostředních částí dvou testovaných objektů v kapitole 4.1, z nichž jedna byla dokonce pravidelným válcem, je třeba zjistit, jak metoda Ing. Lukáše Hrudy reaguje na vstupní data v podobě pravidelných válců.

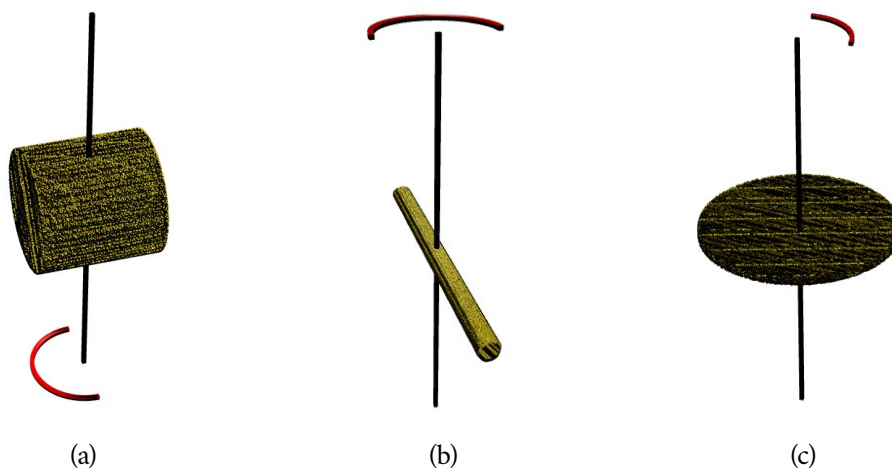
Bylo provedeno několik experimentů s válci různých velikostí, s různými poměry výšky válce ku jeho průměru a s osou válce nakloněnou různými směry. První z testovaných válců má průměr stejně velký jako výšku (na obrázcích 4.6, 4.5 a 4.7 se jedná o obrázek a)). Druhý válec má výšku podstatně větší, než je jeho průměr (na obrázcích 4.6, 4.5 a 4.7 se jedná o obrázek b)). Třetí testovaný válec má výšku podstatně menší než je jeho průměr (na obrázcích 4.6, 4.5 a 4.7 se jedná o obrázek c)).

Válce byly vytvořeny pomocí vlastního programu na generování pravidelných válců. Program generuje válce ve formátu `obj`. Válce byly poté převedeny do formátu mračna bodů pomocí programu `CloudCompare`. Tento program byl také použit pro rotování válců do různých poloh.

Nejprve budou tyto válce vyzkoušeny ve svislé poloze, tedy s osou válce rovnoběžnou se souřadnicovou osou y . Výsledky testovaných válců jsou vidět na obrázku 4.5. Pro válce na obrázcích 4.5a), 4.5b) a 4.5c), metoda našla výsledek **použitelný** pro další zpracování. Válec rotovaný podle obecné osy (na obrázku 4.5d)) metoda zpracovala s výsledkem, který je **nepoužitelný** pro další zpracování.

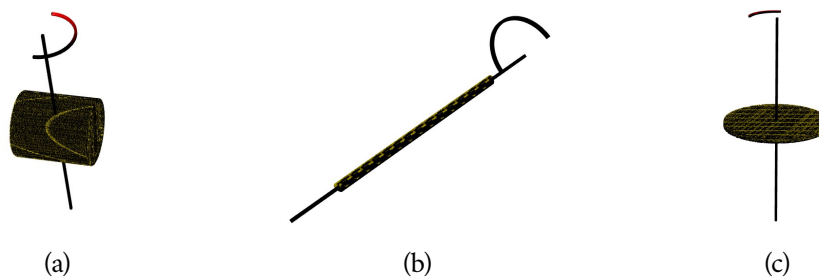
Obrázek 4.5: Výsledky pro různé typy válců rotovaných podle osy y . Válec na obrázku d) je rotován podle obecné osy.

Na obrázku 4.6 jsou vidět výsledky pro výše popsané válce, které mají osu rovnoběžnou se souřadnicovou osou x . U válců na obrázcích 4.6a a 4.6b byly nalezeny osy rotační symetrie **nepoužitelné** pro další zpracování. V případě válce na obrázku 4.6c byla nalezena osa **použitelná** pro další zpracování.



Obrázek 4.6: Výsledky pro různé typy válců rotovaných podle osy x .

Výsledky válců s osou rovnoběžnou se souřadnicovou osou z jsou vidět v sadě obrázků 4.7, 4.7b a 4.7c. U válce na obrázku 4.7a byla nalezena osa **nepoužitelná** pro další zpracování. V případě válců na obrázcích 4.7b a 4.7c byly nalezeny osy **použitelné** pro další zpracování.



Obrázek 4.7: Výsledky pro různé typy válců rotovaných podle osy z .

4.2.1 Hodnocení

Experimentem bylo zjištěno, že v případě válců s osou rovnoběžnou se souřadnicovou osou y metoda spolehlivě najde použitelnou osu rotační symetrie. V případě válců s osami rovnoběžnými s osou x nebo z byla použitelná osa rotační symetrie nalezena pouze v několika případech. U válců rotovaných podle obecné osy (obrázky 4.3b a 4.5d) nebyla nalezena použitelná osa rotační symetrie nikdy.

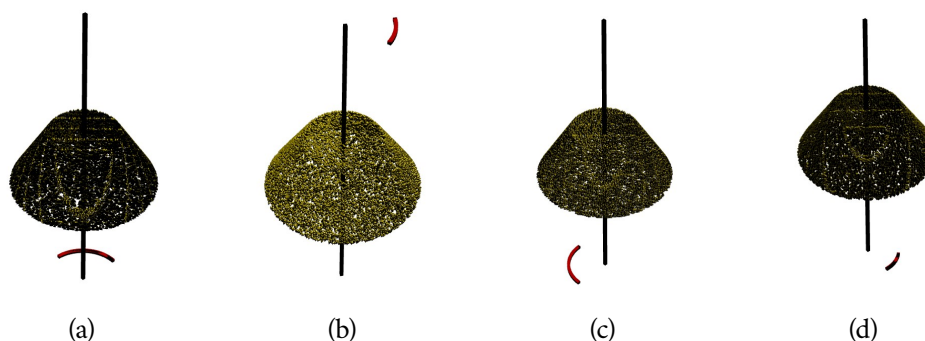
4.3 Komolé kužely

V této sekci budou provedeny experimenty s rotačními objekty, které mají po celé své délce proměnlivý poloměr. Pro jednoduchost byly vybrány komolé kužely. Bylo otestováno několik typů komolých kuželů s různými poloměry podstav a s různou výškou rotované podle os x , y , z a také podle obecné osy. Na obrázcích 4.8, 4.9, 4.10 budou kužely rotované podle osy x zobrazovány na obrázku a), kužely rotované podle osy y budou na obrázku b), kužely rotované podle osy z budou na obrázku c) a kužely rotované podle obecné osy budou na obrázku d).

Kužely byly vytvořeny pomocí vlastního programu na generování komolých kuželů, který vytváří kužely ve formátu (obj). Převedení do podoby mračna bodů a pootočení do různých poloh bylo provedeno pomocí programu CloudCompare.

Středně vysoký komolý kužel. První testovaný kužel je vytvořen tak, že má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy. Jeho výška se rovná průměru horní podstavy.

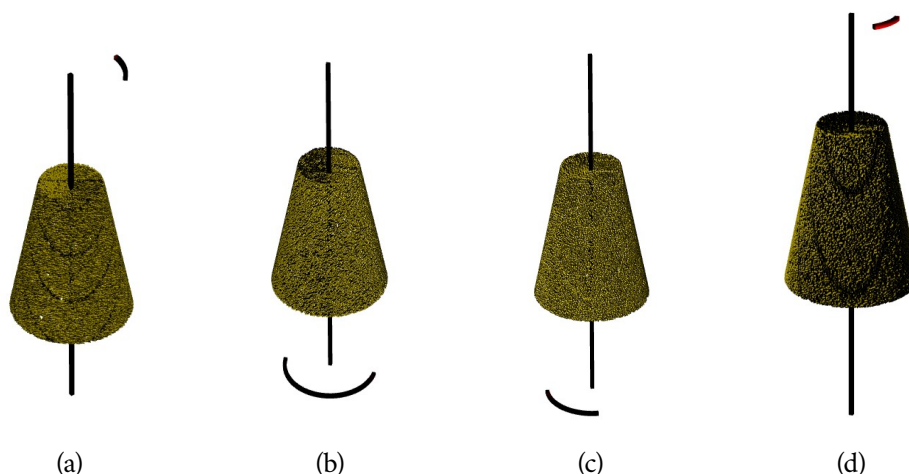
Výsledky pro tento komolý kužel jsou vidět na obrázku 4.8. U tohoto kuželu byla pro všechny testované rotace nalezena osa rotační symetrie **použitelná** pro další zpracování.



Obrázek 4.8: Výsledky pro kužel, který má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy s výškou rovnou průměru horní podstavy.

Vysoký komolý kužel. Druhý testovaný kužel má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy a jeho výška je rovná součtu průměrů horní a dolní podstavy.

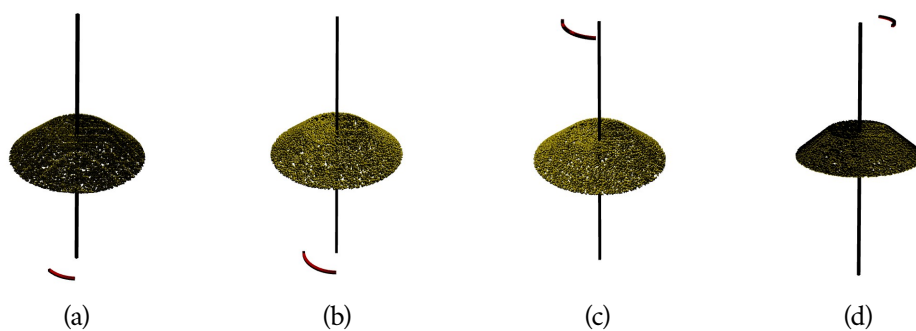
Výsledky pro tento komolý kužel jsou vidět na obrázku 4.9. V případě tohoto kuželu byla pro všechna testovaná natočení nalezena osa rotační symetrie **použitelná** pro další zpracování.



Obrázek 4.9: Výsledky pro kužel, který má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy s výškou, která se rovná součtu průměrů horní a dolní podstavy.

Nízký komolý kužel. Třetí testovaný kužel má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy a výšku rovnou průměru horní podstavy.

Výsledky pro tento kužel jsou vidět na obrázku 4.10. U tohoto kuželu byla pro všechny testované případy nalezena osa rotační symetrie **použitelná** pro další zpracování.



Obrázek 4.10: Výsledky pro kužel, který má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy s výškou rovnou průměru horní podstavy.

4.3.1 Hodnocení

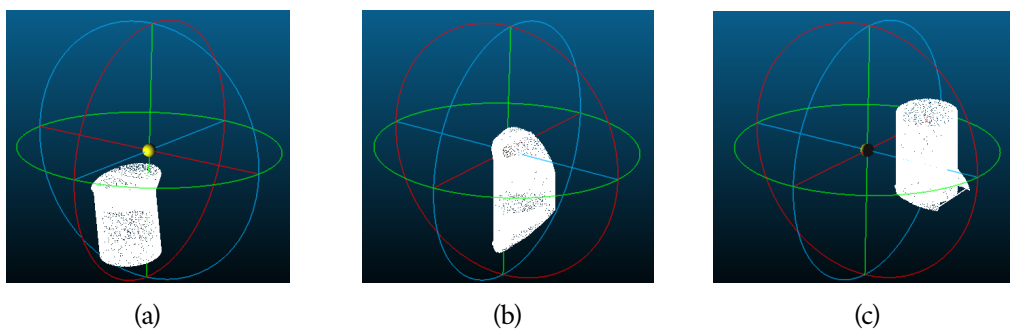
V případě všech testovaných komolých kuželů byly pro všechny zkoušené rotace nalezeny osy rotační symetrie **použitelné** pro další zpracování. Komolé kužely tedy zpracovává program Ing. Lukáše Hrudu bez problémů.

4.4 Hledání zobecněné rotační symetrie pro ručně rozdělené objekty

V této sekci bude vyzkoušeno nasazení metody pro hledání zobecněné rotační symetrie na ručně rozdělený objekt představující část potrubí s ohybem o 90 stupňů (tvořen dvěma dílčími ohyby o 45 stupňů) z kapitoly 4.1. Tento objekt je vidět na obrázku 4.1a. Nejprve bude provedeno předzpracování, tj. natočení dílčích objektů do svislé polohy. Výsledky tohoto předzpracování pro každý objekt budou následně zobrazeny a popsány. Nakonec bude vytvořena a zobrazena lomená čára popisující zobecněnou rotační symetrii objektu.

4.4.1 Předzpracování

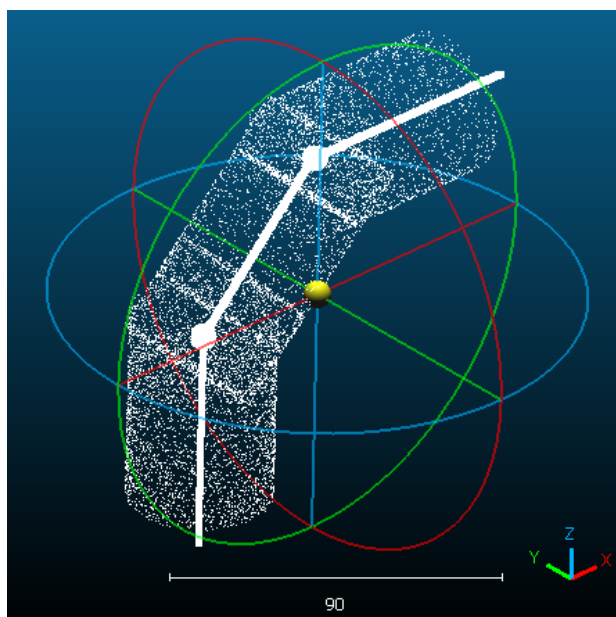
Dílčí objekty vzniklé ručním dělením natočené do svislé polohy pro objekt představující potrubí s ohybem o 90 stupňů jsou vidět na obrázku 4.11. Ve všech případech proběhlo natočení válce do svislého směru úspěšně, a to i přes to, že části na obrázcích 4.11a a 4.11c obsahují na jednom ze svých konců nerovnosti.



Obrázek 4.11: Výsledky rotace dílčích částí objektu představujícího část potrubí zatačející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.

4.4.2 Hledání průsečíků

Výsledek tvorby lomené čáry popisující zobecněnou rotační symetrii ručně rozděleného objektu představujícího potrubí s ohybem o 90 stupňů je vidět na obrázku 4.12. Program vytvořil správnou lomenou čáru a našel oba průsečíky. Výsledek neobsahuje žádné velké nepřesnosti.



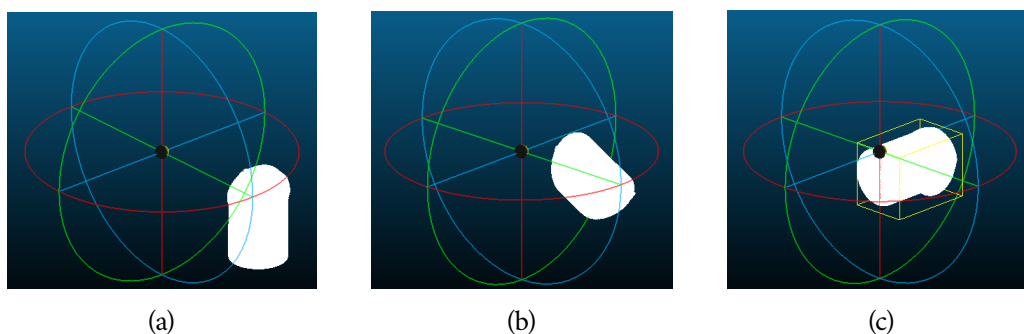
Obrázek 4.12: Nalezená lomená čára zobecněné rotační symetrie objektu představující část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.

4.5 Hledání zobecněné rotační symetrie pro automaticky rozdělené objekty

V této sekci bude vyzkoušeno nasazení metody pro hledání zobecněné rotační symetrie na automaticky rozdělený objekt z kapitoly 4.1 představující potrubí zatáčející o 90 stupňů. Tento objekt je vidět na obrázku 4.1a. Nejprve bude provedeno předzpracování skládající se z automatické segmentace objektu a následného natočení objektu do svislé polohy. Výsledky automatické segmentace i předzpracování budou následně zobrazeny a popsány. Nakonec bude vytvořena lomená čára rotační symetrie a bude zobrazen výsledek.

4.5.1 Rozdělení objektů na části

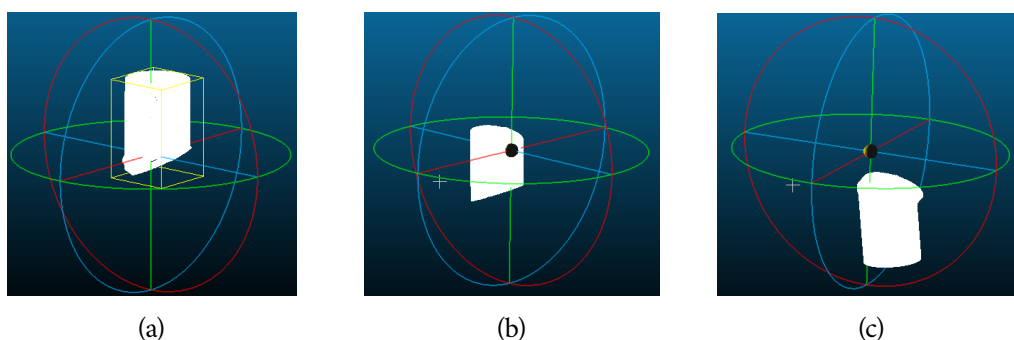
Výsledky automatické segmentace objektu představující potrubí zatáčející o 90 stupňů jsou vidět na obrázku 4.13. Objekt byl rozdělen na tři části. Vzniklé krajní části jsou válcovité útvary se seříznutou jednou podstavou. Prostřední část je válcovitý útvar se seříznutými oběma podstavami.



Obrázek 4.13: Výsledky segmentace objektu představující část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.

4.5.2 Předzpracování

Dílčí objekty natočené do svislé polohy pro objekt představující potrubí zatáčející o 90 stupňů jsou vidět na obrázku 4.14. Ve všech případech proběhlo natočení válce do svislého směru úspěšně.



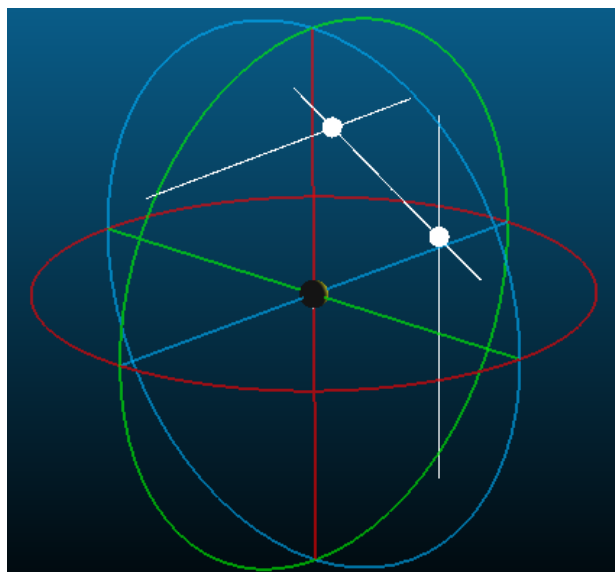
Obrázek 4.14: Výsledky rotace dílčích částí objektu představující část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.

4.5.3 Tvorba lomené čáry

Výsledek tvorby lomené čáry reprezentující zobecněnou rotační symetrii objektu představujícího potrubí zatáčející o 90 stupňů je vidět na obrázku 4.15. Program vrátil správný výsledek.

4.6 Výsledky a hodnocení

Tato část bude věnována výsledkům bakalářské práce a jejich zhodnocení. Program byl otestován na několika netriviálních objektech. Níže budou ukázány výsledky pro sedm objektů, z nichž pět představuje různými způsoby ohnuté potrubí. Zbýlé dva objekty jsou složitější, jeden představuje krokodýla, druhý hada.



Obrázek 4.15: Nalezená lomená čára zobecněné rotační symetrie objektu představujícího část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.

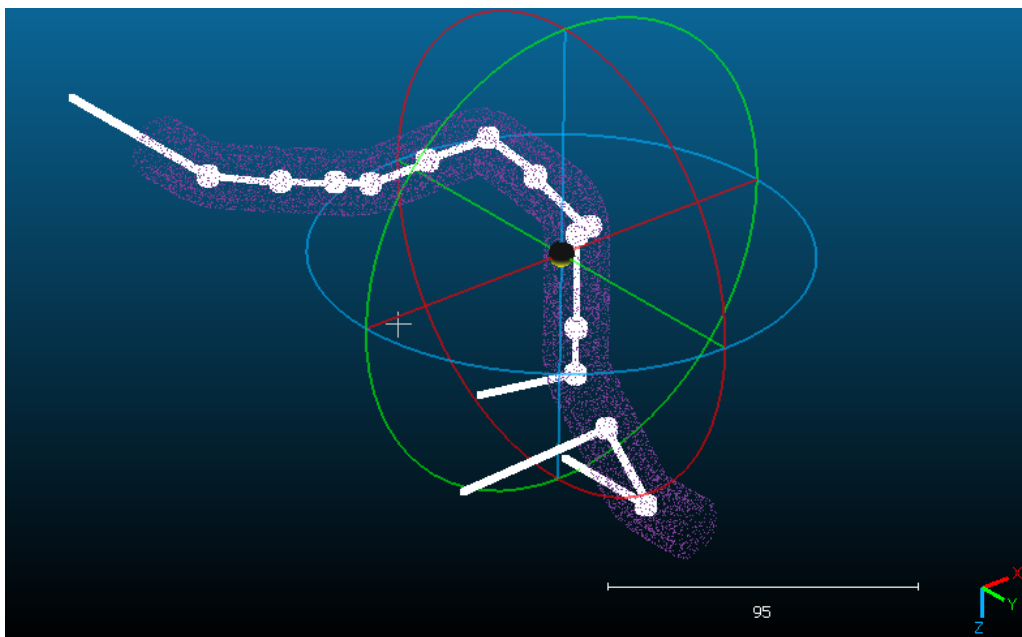
Pro tvorbu všech těchto objektů byl použit modelovací software Autodesk Tinkercad [Aut23]. Náhodné vzorkování objektů bylo prováděno pomocí programu CloudCompare. Poslední dva objekty (krokodýl a had) byly převzaty ze standardní knihovny objektů v programu Autodesk Tinkercad.

U každého testovaného objektu bude ukázána vizualizace výsledku a v případě, že se ve výsledku budou vyskytovat chyby, budou vyobrazeny také segmenty, ve kterých k chybám došlo. Také budou uvedeny možné příčiny těchto chyb. Objekty představující potrubí používaly velikost kroku při segmentaci rovnou dvacetině tělesové úhlopříčky bounding boxu, u hada a krokodýla byl použit krok rovný desetině úhlopříčky bounding boxu.

Výsledky pro první potrubí. První objekt představuje potrubí, které má celkem tři ohyby o 90°. Každý z těchto ohybů je vytvořen tak, že nejprve je proveden ohyb o 45°, poté je po krátké rovné části proveden další ohyb o 45°. Mračno bodů představující objekt je vyobrazeno na obrázku 4.16 fialovou barvou.

Výsledek pro první potrubí je vidět na obrázku 4.16. U tohoto výsledku byla nalezena kvalitní lomená čára rotační symetrie s výjimkou prvního zákrutu, kde v dílčích objektech byly nalezeny dvě nepoužitelné osy. Mezi těmito dvěma osami nebyl nalezen žádný průsečík, a proto se výsledná lomená čára rotační symetrie rozpadla na dvě části.

Segmenty, pro které program našel nepoužitelné osy jsou vidět na obrázku 4.17. Segment na obrázku 4.17a) se nachází v kloubu potrubí a má velmi malé roz-



Obrázek 4.16: Výsledek prvního testovaného objektu, který představuje potrubí. Fialově je znázorněno mračno bodů představující testovaný objekt. Bíle je zobrazen výsledek.

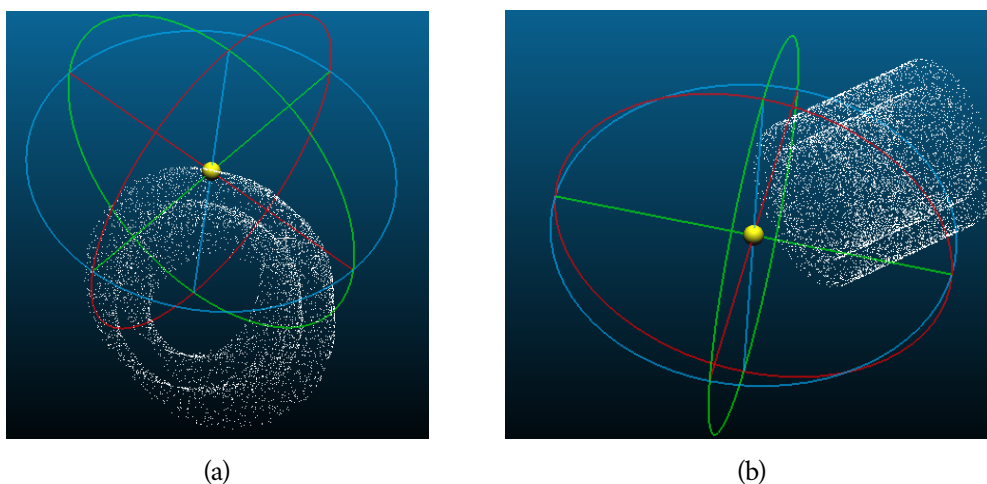
měry. Bylo zjištěno, že byla nepřesně provedena rotace objektu do svislé polohy při předzpracování, což pravděpodobně vedlo k nalezení nepoužitelné osy rotační symetrie. Ten samý problém s předzpracováním nastal také v případě druhého segmentu na obrázku 4.17b).

Za účelem ověření tvrzení z předchozího odstavce, že za špatně nalezenou osu může chybná rotace objektu při předzpracování, byl proveden experiment. Dva problémové segmenty byly pomocí programu CloudCompare ručně natočeny do správné polohy. Z výsledků tohoto experimentu na obrázku 4.18 je vidět, že program Ing. Luáše Hrudý našel osy rotační symetrie použitelné pro další zpracování. Tedy příčinou problémů u tohoto objektu byla opravdu špatná rotace.

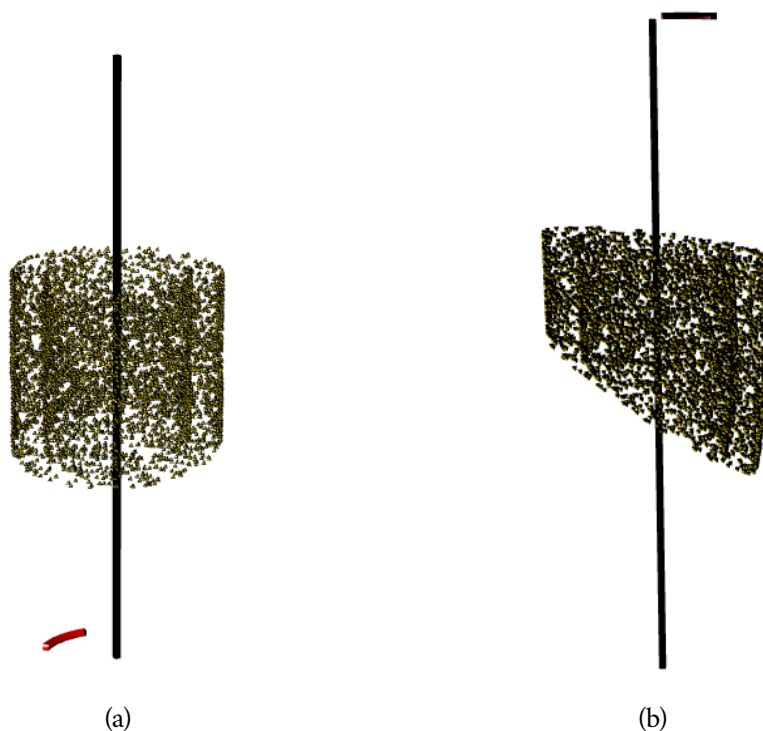
Výsledky pro druhé potrubí. Druhé potrubí je tvořeno postupně ze tří ohybů o 30° a dále jednoho ohybu o 60° . Potrubí je zakončeno jedním ohybem o 30° .

Výsledná lomená čára zobecněné rotační symetrie je vidět na obrázku 4.19. U druhého potrubí byla nalezena pouze jedna nepoužitelná dílčí osa rotační symetrie, a z toho důvodu nebyl nalezen také jeden průsečík. Výsledná lomená čára rotační symetrie se tedy i v tomto případě rozdělila na dvě části. Ve zbylé části objektu byl ale výsledek kvalitní.

Segment, na kterém došlo k chybě, je vidět na obrázku 4.20. V tomto případě proběhlo natočení segmentu do svislé polohy při předzpracování správně. Mož-



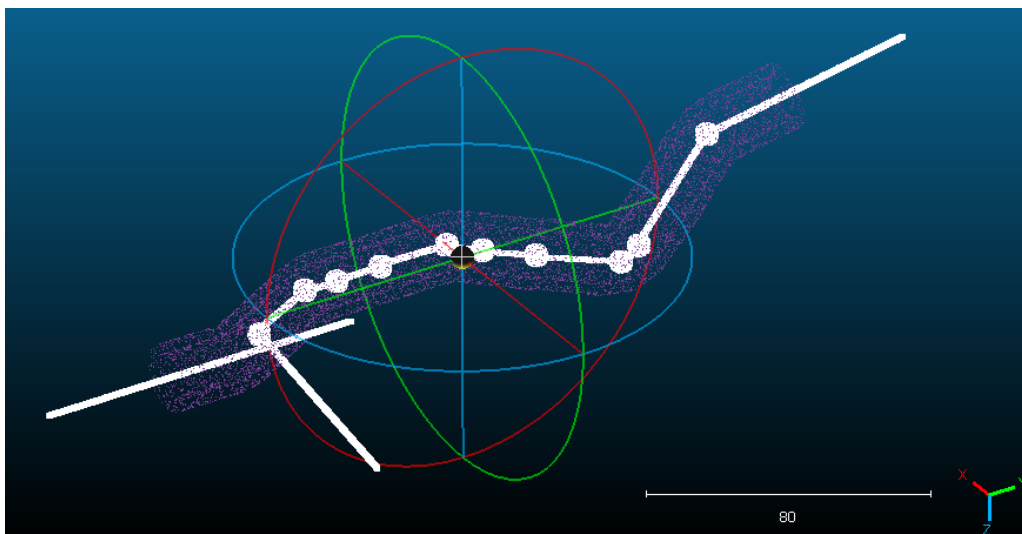
Obrázek 4.17: Segmenty prvního potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.



Obrázek 4.18: Rotační symetrie segmentů ručně správně narotovaných do svislé polohy.

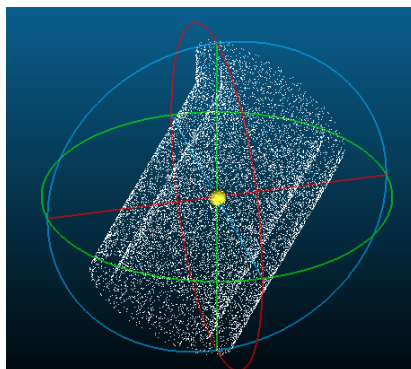
nou příčinou chyby tedy v tomto případě je výstupek na jednom konci objektu (na obrázku 4.20 nahoře).

Pro ověření výše uvedeného důvodu nalezení nepoužitelné osy rotační symetrie problémového segmentu byl proveden experiment. Byl oříznut výstupek segmentu,



Obrázek 4.19: Výsledek hledání zobecněné rotační symetrie u druhého potrubí. Fialově je zobrazeno mračno bodů testovaného objektu, bíle je znázorněný nalezený výsledek.

který se na obrázku 4.20 nachází v horní části objektu. Výsledná osa rotační symetrie upraveného segmentu je vidět na obrázku 4.21 a je použitelná.

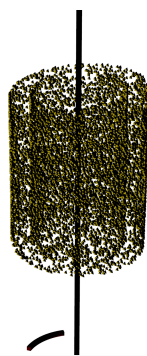


Obrázek 4.20: Segment druhého potrubí, u kterého byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.

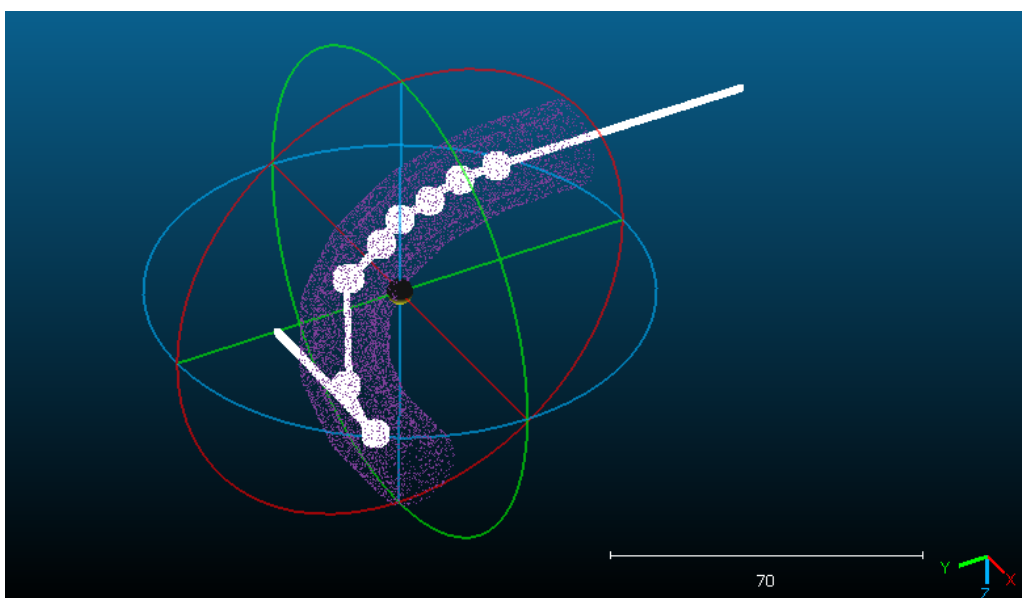
Výsledky pro třetí potrubí. Třetí potrubí je tvořeno pouze jedním dlouhým zakulaceným ohybem o 90° .

Výsledek pro tento objekt je vidět na obrázku 4.22. V tomto případě byla nalezena lomená čára zobecněné rotační symetrie celá správně, pouze na jednom konci objektu je nepřesnost ve vizualizaci, osa segmentu je ale nalezena správně.

Výsledky pro čtvrté potrubí. Čtvrté potrubí je tvořeno dvěma po sobě následujícími dlouhými zakulacenými záhyby o 90° . Mračno bodů představující popsany



Obrázek 4.21: Rotační symetrie problémového segmentu druhého potrubí s oříznutým výstupkem.

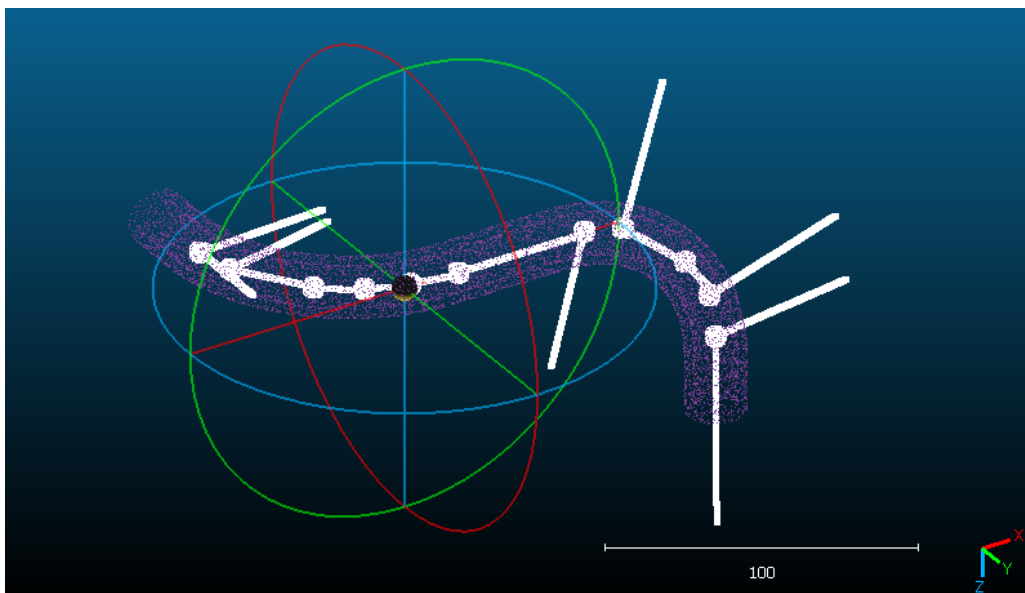


Obrázek 4.22: Výsledek hledání zobecněné rotační symetrie u třetího objektu představujícího potrubí se zakulaceným ohybem o 90 stupňů. Fialově je vyobrazeno mračno bodů představující objekt. Bíle je znázorněn nalezený výsledek.

objekt je vidět na obrázku 4.23 a je obarveno fialovou barvou.

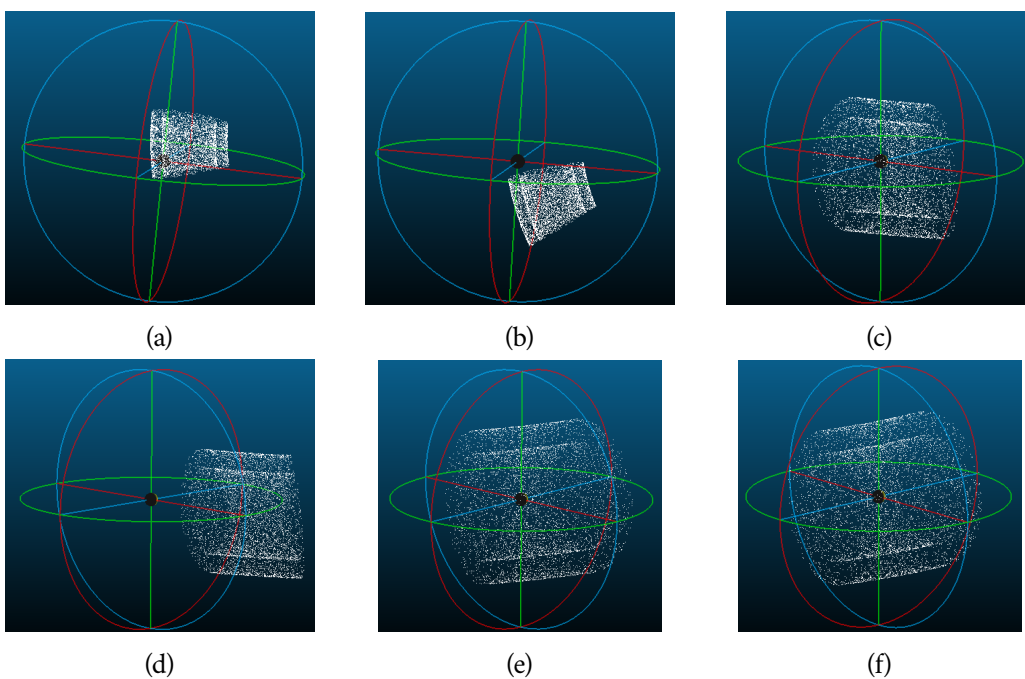
Výsledek pro tento objekt je vyobrazen bílou barvou na obrázku 4.23. Ve výsledku lze najít šest nepřesností, tj. míst, kde byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie dílčího objektu. V místech nepřesností nebyly nalezeny průsečíky a proto se výsledná lomená čára zobecněné rotační symetrie rozpadla na čtyři části. I u tohoto objektu ale byla úspěšnost nasazené metody velká.

Segmenty, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie jsou vyobrazeny na obrázku 4.24. Jedna z možných příčin je pro všechny vyobrazené objekty stejná. Části jsou tak malé, že se při předzpracování nepovedlo jejich natočení do svislé polohy. Program Ing. Lukáše Hrudý pak mohl vyhodnotit osu kolmo na válec



Obrázek 4.23: Výsledek pro čtvrté potrubí. Fialově je obarveno mračno bodů představující toto potrubí. Bíle je znázorněn výsledek.

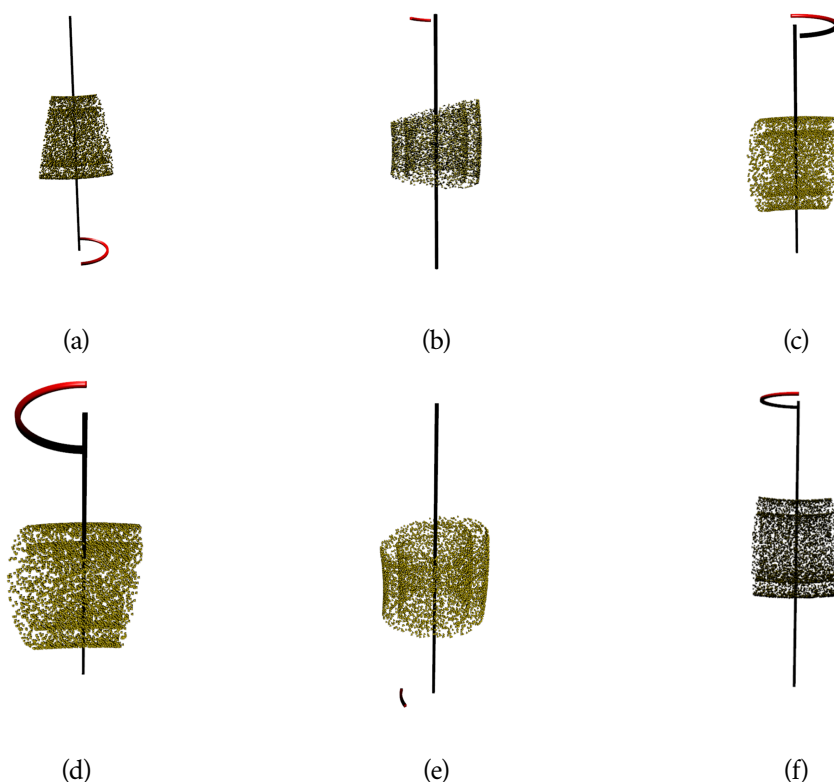
jako lepší.



Obrázek 4.24: Segmenty čtvrtého potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.

K ověření uvedené příčiny chyb u problémových segmentů byl proveden experiment s ručním natočením problémových segmentů do svislé polohy. Výsledky

pokusu jsou vidět na obrázku 4.25. Na obrázcích b) a e) byly nalezeny použitelné osy rotační symetrie. V ostatních případech byly nalezeny osy rotační symetrie nepoužitelné. Hlavním důvodem neúspěchu u objektů na obrázcích a), c), d) a f) tedy není špatné natočení objektu. V těchto případech může být příčinou špatný tvar objektu (například špatné úhly seříznutí).

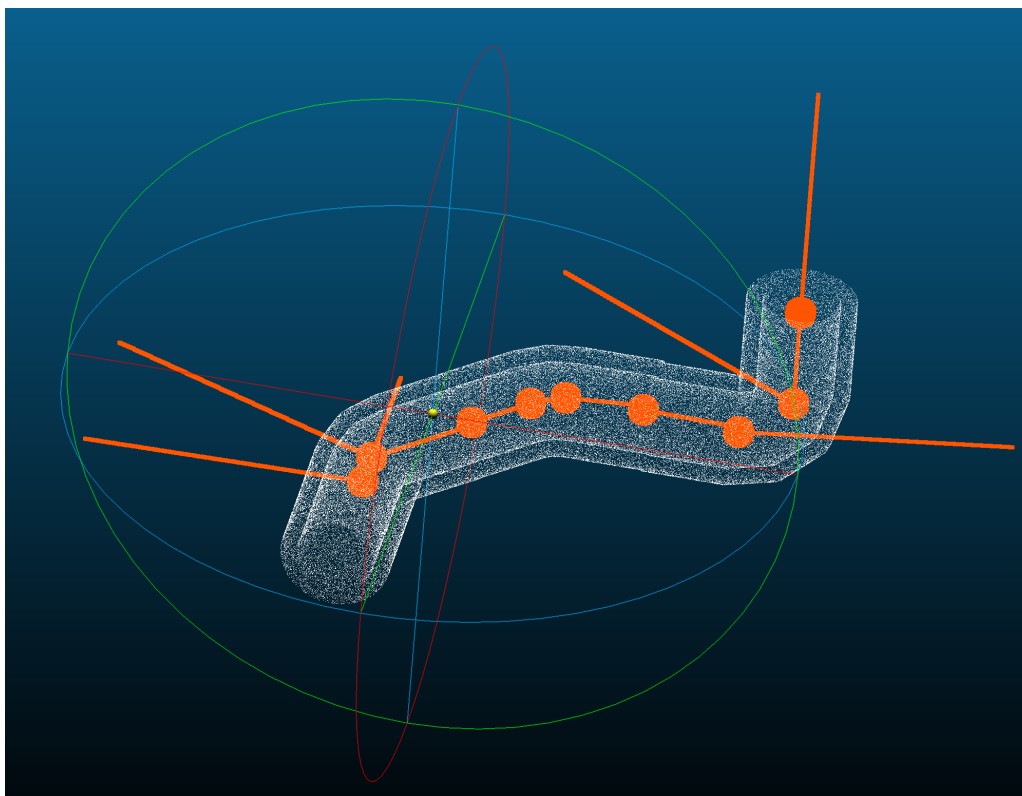


Obrázek 4.25: Rotační symetrie problémových segmentů čtvrtého potrubí natočených do svislé polohy.

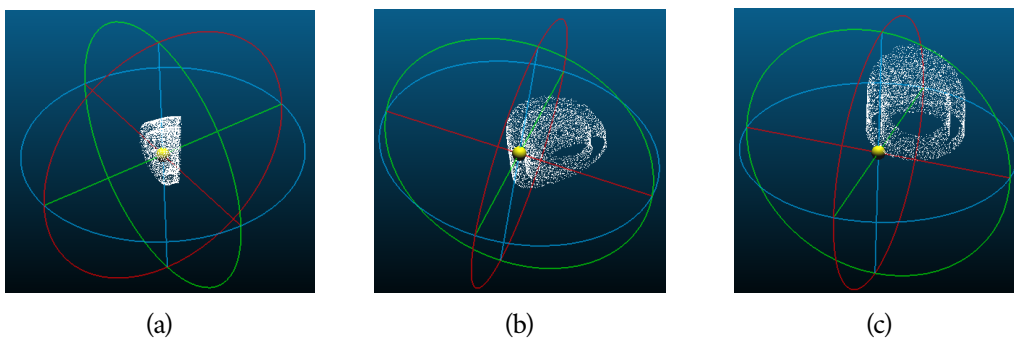
Výsledky pro páté potrubí. Páté potrubí je složené ze dvou ohybů o 45° a následně jedním prudkým ohybem o 90° . Mračno bodů představující tento objekt je vidět na obrázku 4.26 a je obarveno bílou barvou.

Výsledek pro toto potrubí je vyobrazen oranžovou barvou na obrázku 4.26. Ve výsledku lze najít tři nepoužitelné osy, kvůli kterým nebyly nalezeny průsečíky a výsledek je proto rozdělen na tři části. Ostatní dílčí osy rotační symetrie byly nalezeny správně.

Segmenty, u nichž byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie jsou vyobrazeny na obrázku 4.27. V tomto případě je možnou příčinou špatné natočení dílčího objektu při předzpracování. Proto mohla být nalezena špatná osa rotační symetrie.

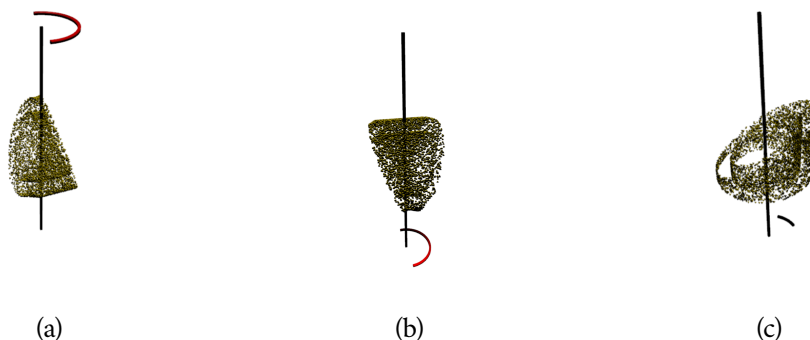


Obrázek 4.26: Výsledek pro páté potrubí. Fialově je obarveno mračno bodů představující toto potrubí. Bíle je znázorněn nalezený výsledek.



Obrázek 4.27: Segmenty pátého potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.

Za účelem ověření příčiny špatně nalezené osy rotační symetrie u problémových segmentů byl proveden experiment. Dílčí objekty byly ručně natočeny do svislé polohy a na takto natočených objektech byla hledána osa rotační symetrie. Výsledky experimentu jsou vidět na obrázku 4.28. U objektu na obrázku 4.28c) byla nalezena osa rotační symetrie použitelná. U ostatních segmentů byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie. Příčina problémů u prvních dvou segmentů tedy pravděpodobně bude ve špatném tvaru dílčího objektu.



Obrázek 4.28: Segmenty pátého potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.

Výsledky - krokodýl. Mračno bodů představující krokodýla je vidět na obrázku 4.29 a je obarveno bílou barvou.

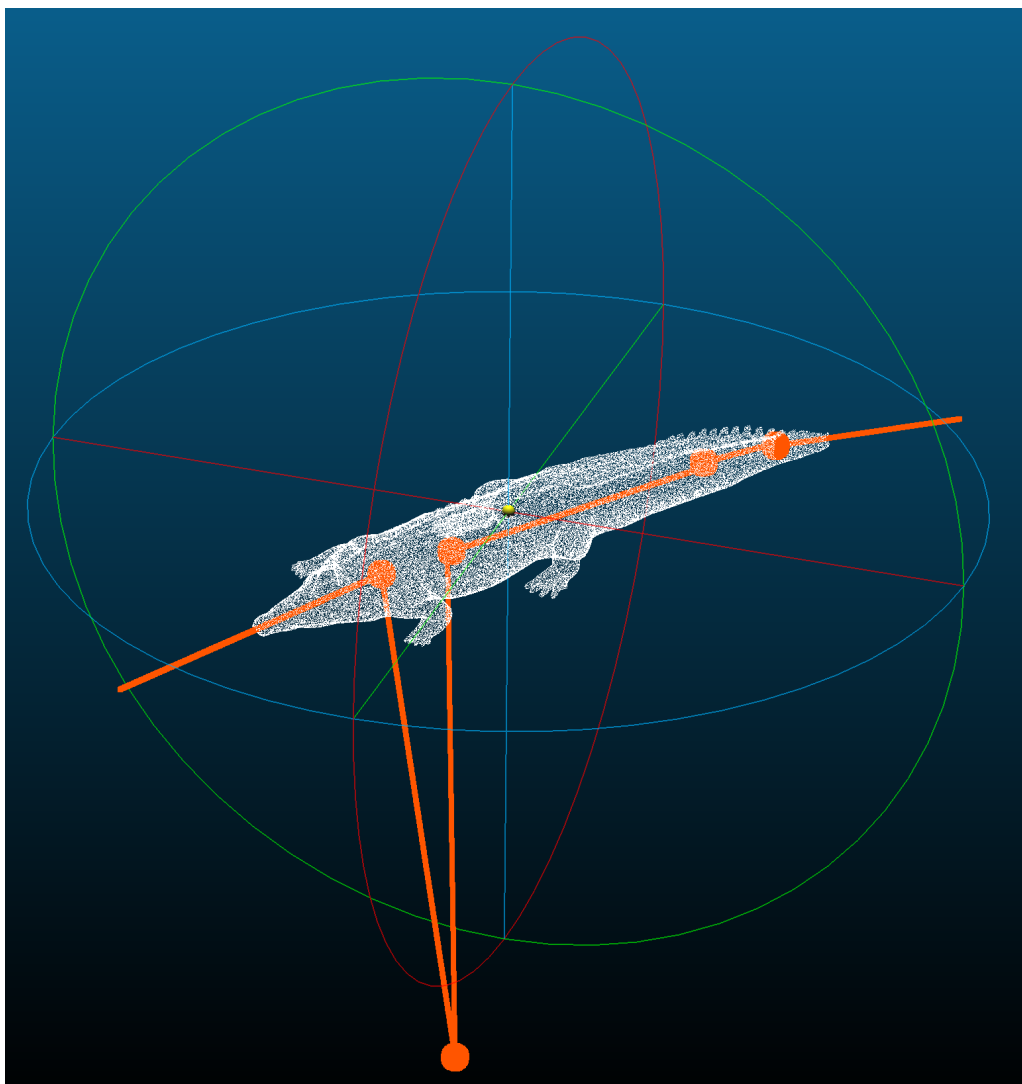
Výsledek pro objekt krokodýla je vyobrazen oranžovou barvou na obrázku 4.29. Ve výsledku jsou nalezeny dvě nepoužitelné osy v oblasti předních končetin. V tomto případě byl mezi dvěma nepoužitelnými osami nalezen průsečík, a výsledek tedy představuje souvislou lomenou čáru.

Segmenty, u kterých došlo k chybě, jsou zobrazeny na obrázku 4.30. Pravděpodobná příčina je špatná segmentace objektu, kdy tyto segmenty byly seříznuty tak, že z jedné nohy zbylo více, než z druhé. Z toho důvodu, při počítání centroidů u výpočtu osy pro natočení do svislé polohy, noha, ze které zbylo více bodů, ovlivnila centroid jedné z částí a segmenty pak byly natočené podle špatné osy. Program Ing. Lukáše Hrudy pak mohl najít špatnou osu rotační symetrie.

Za účelem ověření pravdivosti příčiny uvedené výše byl proveden experiment, kdy obě problémové části krokodýla byly ručně natočeny do svislé polohy. Výsledky pro takto natočené segmenty jsou vidět na obrázku 4.31. Z obrázků je vidět, že se i přes správné natočení segmentů nepodařilo najít použitelnou osu rotační symetrie. Z toho důvodu byl proveden ještě jeden experiment, kdy od správně ručně natočených segmentů byly odříznuty zbytky nohou. Na obrázku 4.32 s výsledky je ale vidět, že ani tato úprava nepomohla s nalezením použitelné osy rotační symetrie. Další možnou příčinou problémů u segmentů krokodýla je příliš složitý tvar segmentů.

Výsledky - had. Mračno bodů představující hada je vidět na obrázku 4.33 a je obarveno bílou barvou.

Výsledek pro tento objekt je vidět na obrázku 4.33, kde je obarven oranžovou barvou. U tohoto objektu dopadlo hledání zobecněné rotační symetrie nejhůře.

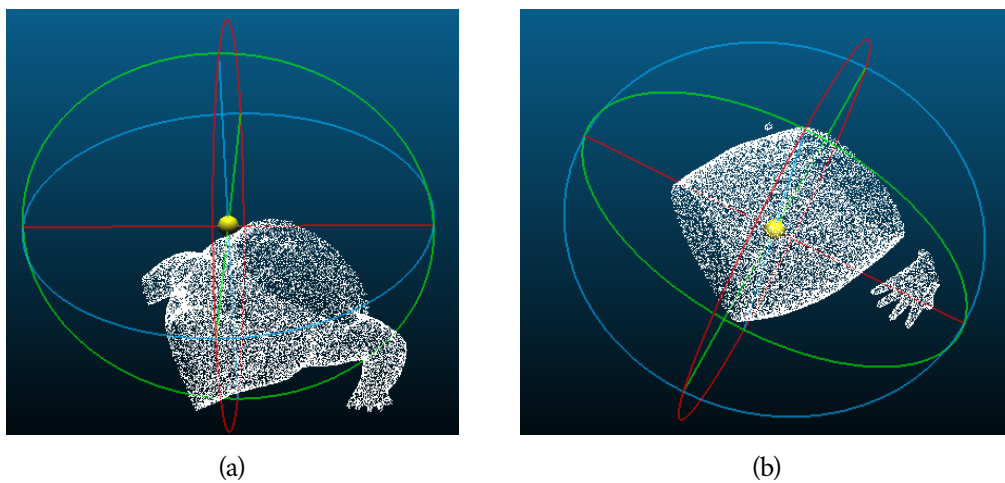


Obrázek 4.29: Výsledek pro objekt představující krokodýla. Bíle je znázorněno mračno bodů představující krokodýla, oranžově je vyobrazen nalezený výsledek.

Dobře nebyla nalezena ani jedna dílčí osa rotační symetrie.

Na obrázku 4.34 jsou vidět všechny segmenty hada. Možnou příčinou je špatné rozdělení objektů, kdy první segment na obrázku 4.34a) je příliš malý a naopak ostatní segmenty jsou příliš velké a komplexní.

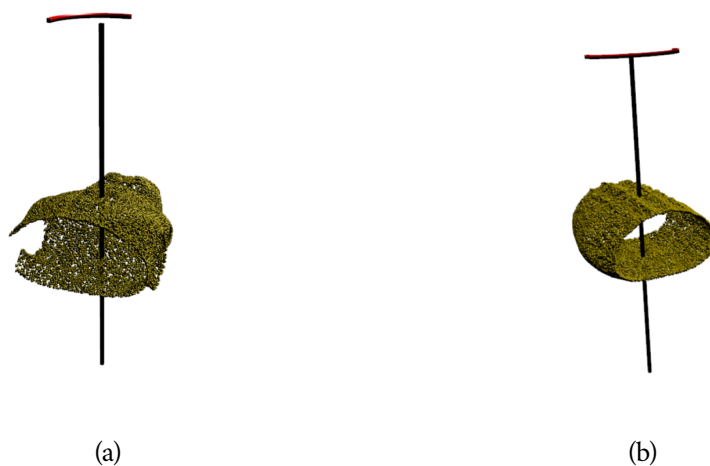
V případě těchto segmentů byl proveden experiment pouze pro segment na obrázku 4.34a), u ostatních segmentů je příliš složitý tvar segmentů zřejmý. Výsledek experimentu je vidět na obrázku 4.35. I přes ruční natočení do svislé polohy byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.



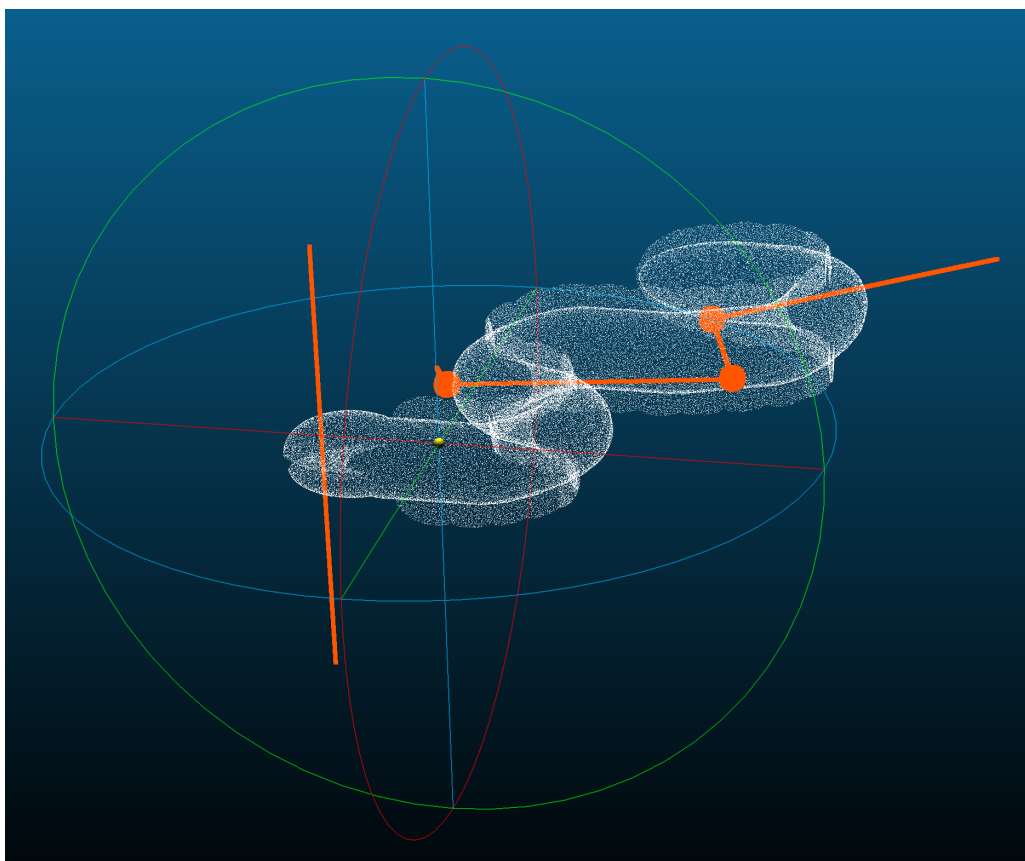
Obrázek 4.30: Segmenty krokodýla, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.



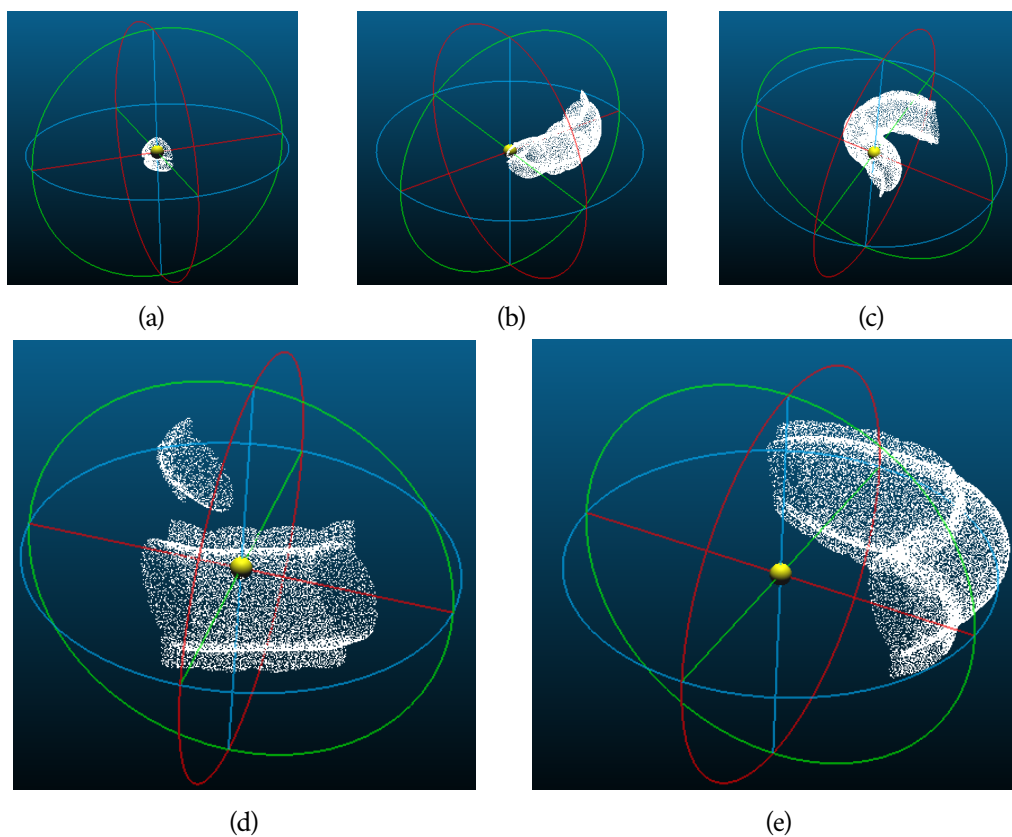
Obrázek 4.31: Výsledky pro správně ručně natočené problémové segmenty krokodýla.



Obrázek 4.32: Výsledky pro správně ručně natočené problémové segmenty krokodýla s oříznutými nohama.



Obrázek 4.33: Výsledek pro objekt představující hada. Mračno bodů představující hada je obarveno bílou barvou. Výsledek je znázorněn oranžovou barvou.



Obrázek 4.34: Segmenty hada, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.



Obrázek 4.35: Výsledek hledání rotační symetrie prvního segmentu hada natočeného do svislé polohy.

Cílem této bakalářské práce *Zobecněná rotační symetrie množiny bodů v prostoru* bylo navrhnout řešení pro nalezení zobecněné rotační symetrie 3D objektu. Zobecněná rotační symetrie je reprezentována lomenou čarou, která vznikne spojením dílčích os rotační symetrie.

V první části byly zpracovány teoretické podklady, jako je definice pojmu geometrická transformace, pomocí něž byla následně definována symetrie. Analytická část se také zabývala různými známými metodami pro nalezení rotační symetrie objektu, včetně metody vyvinuté na Katedře informatiky a výpočetní techniky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni Ing. Lukášem Hrudou. Nakonec byly zpracovány poznatky ohledně možností automatického rozdělení objektů na části.

Druhá část byla věnována návrhu řešení bakalářské práce. Nejprve byla popsána navržená metoda rozdělení objektu na části pomocí postupného procházení objektem a jeho odřezávání v místech změny. Dále bylo provedeno natočení vstupních částí do svislé polohy a následně byly tyto části předány na vstup programového vybavení Ing. Lukáše Hrudy. Z výsledků externího programu byla vytvořena lomená čára zobecněné rotační symetrie, která byla uložena do textového formátu a do formátu mračna bodů, který lze vizualizovat pomocí softwaru CloudCompare.

Poslední část byla věnována experimentům, testování a vyhodnocení výsledků navrženého řešení.

Bibliografie

- [Aut23] AUTODESK. *Autodesk Tinkercad*. 2023. Dostupné také z: <https://www.tinkercad.com>.
- [23] *CloudCompare*. 2023. Dostupné také z: <http://www.cloudcompare.org>.
- [Eci+18] ECINS, A.; FERMÜLLER, C.; ALOIMONOS, Y. Seeing behind the scene: Using symmetry to reason about objects in cluttered environment, in: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)s. 2018, s. 7193–7200.
- [GMR17] GRILLI, E.; MENNA, F.; REMONDINO, F. A review of point clouds segmentation and classification algorithms. 2017.
- [HTV06] H. RABBANI, F. v. d.; TAHIR; VOSSELMANN, G. Segmentation of point clouds using smoothness constraint. 2006, s. 248–253.
- [Hru+22] HRUDA, L.; KOLINGEROVÁ, I.; LÁVIČKA, M.; MAŇÁK, M. Rotational Symmetry Detection in 3D Using Reflectional Symmetry Candidates and Quaternion-Based Rotation Parameterization. 2022.
- [HKV21] HRUDA, Lukáš; KOLINGEROVÁ, Ivana; VÁŠA, Libor. Robust, fast and flexible symmetry plane detection based on differentiable symmetry measure. 2021.
- [Mac67] MACQUEEN, J. *Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*. Los Angeles: University of California, 1967.
- [Sip17] SIPIRAN, I. Analysis of partial axial symmetry on 3d surfaces and its application in the restoration of cultural heritage objects, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. 2017, s. 2925–2933.
- [SS97] SUN, C.; SHERRAH, J. 3d symmetry detection using the extended gaussian image. *IEEE transactions on pattern analysis 570 and machine intelligence* 19. 1997, s. 164–168.

- [Žár+10] ŽÁRA, Jiří; BENEŠ, Bedřich; SOCHOR, Jiří; FELKEL, Petr. *Moderní počítačová grafika*. 2. vyd. Brno: Computer Press, 2010.

Seznam obrázků

3.1	Sekvenční diagram programu pro nalezení zobecněné rotační symetrie. V obdélnících v horní části obrázku jsou popsány jednotlivé součásti (včetně převzatých). Níže jsou znázorněny činnosti. U šipek směřujících vpravo je uveden název činnosti, u šipek směřujících vlevo je uvedena návratová hodnota nebo nic, pokud činnost nemá návratovou hodnotu nebo pokud její návratová hodnota není pro běh programu podstatná.	12
3.2	Ukázka vizuální reprezentace nalezené lomené čáry zobecněné rotační symetrie (Je zobrazena uvnitř zpracovávaného objektu, ten není součástí vizuální reprezentace, kterou program vytvořil).	20
4.1	Objekty, u kterých bude prováděno ruční rozdělení, s nalezenou globální osou rotační symetrie.	22
4.2	Výsledky pro první variantu objektu potrubí zahnutého o 90 stupňů.	23
4.3	Výsledky pro druhou variantu objektu potrubí zahnutého o 90 stupňů.	23
4.4	Výsledek zkosené části druhého testovaného objektu.	24
4.5	Výsledky pro různé typy válců rotovaných podle osy y . Válec na obrázku d) je rotován podle obecné osy.	24
4.6	Výsledky pro různé typy válců rotovaných podle osy x .	25
4.7	Výsledky pro různé typy válců rotovaných podle osy z .	25
4.8	Výsledky pro kužel, který má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy s výškou rovnou průměru horní podstavy.	26
4.9	Výsledky pro kužel, který má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy s výškou, která se rovná součtu průměrů horní a dolní podstavy.	27
4.10	Výsledky pro kužel, který má průměr dolní podstavy dvakrát větší než průměr horní podstavy s výškou rovnou průměru horní podstavy.	27
4.11	Výsledky rotace dílčích částí objektu představujícího část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.	28

4.12	Nalezená lomená čára zobecněné rotační symetrie objektu představující část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.	29
4.13	Výsledky segmentace objektu představující část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.	30
4.14	Výsledky rotace dílčích částí objektu představující část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.	30
4.15	Nalezená lomená čára zobecněné rotační symetrie objektu představujícího část potrubí zatáčející o 90 stupňů. Souřadnicová osa x je vyznačena červeně, y zeleně a z modře.	31
4.16	Výsledek prvního testovaného objektu, který představuje potrubí. Fialově je znázorněno mračno bodů představující testovaný objekt. Bíle je zobrazen výsledek.	32
4.17	Segmenty prvního potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.	33
4.18	Rotační symetrie segmentů ručně správně narotovaných do svislé polohy.	33
4.19	Výsledek hledání zobecněné rotační symetrie u druhého potrubí. Fialově je zobrazeno mračno bodů testovaného objektu, bíle je znázorněn nalezený výsledek.	34
4.20	Segment druhého potrubí, u kterého byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.	34
4.21	Rotační symetrie problémového segmentu druhého potrubí s oříznutým výstupkem.	35
4.22	Výsledek hledání zobecněné rotační symetrie u třetího objektu představujícího potrubí se zakulaceným ohybem o 90 stupňů. Fialově je vyobrazeno mračno bodů představující objekt. Bíle je znázorněn nalezený výsledek.	35
4.23	Výsledek pro čtvrté potrubí. Fialově je obarveno mračno bodů představující toto potrubí. Bíle je znázorněn výsledek.	36
4.24	Segmenty čtvrtého potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.	36
4.25	Rotační symetrie problémových segmentů čtvrtého potrubí natočených do svislé polohy.	37
4.26	Výsledek pro páté potrubí. Fialově je obarveno mračno bodů představující toto potrubí. Bíle je znázorněn nalezený výsledek.	38
4.27	Segmenty pátého potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.	38
4.28	Segmenty pátého potrubí, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.	39

4.29	Výsledek pro objekt představující krokodýla. Bíle je znázorněno mračno bodů představující krokodýla, oranžově je vyobrazen nalezený výsledek.	40
4.30	Segmenty krokodýla, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.	41
4.31	Výsledky pro správně ručně natočené problémové segmenty krokodýla.	41
4.32	Výsledky pro správně ručně natočené problémové segmenty krokodýla s oříznutými nohami.	42
4.33	Výsledek pro objekt představující hada. Mračno bodů představující hada je obarveno bílou barvou. Výsledek je znázorněn oranžovou barvou.	42
4.34	Segmenty hada, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie.	43
4.35	Výsledek hledání rotační symetrie prvního segmentu hada natočeného do svislé polohy.	43

Seznam tabulek

3.1	Možnosti nastavení parametrů t_1 a t_2	18
-----	--	----

Seznam výpisů

3.1	Ukázka textové reprezentace lomené čáry zobecněné rotační symetrie.	19
5.1	Ukázka obsahu konfiguračního souboru.	59
5.2	Ukázka obsahu vstupního souboru.	60

Přílohy

Příloha 1: Uživatelská příručka

Příloha 2: Popis odevzdávaného souboru

Uživatelská příručka

Program `GeneralizedSymmetry` slouží k nalezení zobecněné rotační symetrie 3D objektu. V tomto dokumentu bude popsáno přeložení a prvotní nastavení programu. Poté budou popsány možnosti spuštění a formát vstupních souborů.

Program byl vyvinut a otestován na platformě `Microsoft Windows`. Program využívá `.NET 3.1`. Na ostatních operačních systémech nebyl program otestován, a nelze na nich tedy plně garantovat jeho správnou funkčnost (program ale byl vyvíjen jako multiplatformní).

Součástí odevzdání bakalářské práce je spustitelný soubor `GeneralizedSymmetry.exe`, program tedy není nutné překládat. V případě, že bude nutno program znovu přeložit (například kvůli nutnosti využití novější verze `.NET`), lze využít například vývojářskou sadu `Microsoft Visual Studio 2022` (v horním menu nabídka `Sestavit` → `Sestavit řešení`).

Pro překlad lze použít také `.NET CLI`. V tomto případě je třeba ve složce s projektem spustit v příkazové řádce příkaz `dotnet build`. Tento způsob je vhodný také pro překlad na systému `Linux`. Pokud při překladu vznikl nový adresář se spustitelným souborem (například pro jinou verzi `.NET`), je třeba do něj přepokopírovat soubor `Settings.config` ze složky projektu a provést jeho správné nastavení.

Nastavení programu

K nastavení programu slouží `XML` konfigurační soubor `Settings.config`, který je umístěn ve stejném adresáři, jako je spustitelný soubor programu. Soubor je třeba otevřít v textovém editoru a do elementu `configuration/symmetry_detector_path` zapsat cestu ke spustitelnému souboru programového vybavení Ing. Lukáše Hrudý (`SymmetryDetector`). Implicitně je v tomto souboru uvedena relativní cesta ke spustitelnému souboru programu `SymmetryDetector`. Při využití operačního systému `Windows` a zachování adresářové struktury bakalářské práce není třeba soubor `Settings.config` měnit.

Výpis 5.1: Ukázka obsahu konfiguračního souboru.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<configuration>
  <symmetry_detector_path>
    ..\..\SymmetryDetector\Client\bin\
    Release\Client.exe
  </symmetry_detector_path>
</configuration>
```

Formát vstupních souborů

Do programu vstupují soubory typu mračna bodů (s příponou .pc). Soubor musí mít na své první řádce uveden počet bodů celého mračna bodů. Na dalších řádkách pak musí být tyto body definovány. Každý popis bodu musí povinně obsahovat informace o x , y a z souřadnici bodu (reálné číslo). Popis může obsahovat i další údaje (například barvu bodu), ty ale nebudou využity.

Výpis 5.2: Ukázka obsahu vstupního souboru.

```
5
-72.07949829 14.00086880 5.67869997
-69.04130554 10.50597572 6.61945343
-66.54854584 7.63850307 6.59634590
-69.79814148 11.37658024 5.90843582
-72.39109039 14.35929394 5.85062218
```

Spuštění

Program se spouští z příkazové řádky s parametry představujícími cesty k souborům s objekty. Pro spuštění je třeba zadat příkaz `GeneralizedSymmetry.exe <obj_1> <obj_2> . . . <obj_n>` ve složce se spustitelným souborem programu. Podle počtu zadaných parametrů příkazové řádky (<obj_1> <obj_2> . . . <obj_n>) se pak provede buď automatické rozdělení objektu, nebo se rovnou začne tvořit osa zobecněné rotační symetrie pro ručně rozdělené objekty. Pokud není zadán ani jeden parametr, uživateli se zobrazí chybová hláška a program je ukončen.

Ruční rozdělení objektu. Pokud uživatel rozdělí objekt předem, do parametrů příkazové řádky budou zapsány názvy souborů představujících jednotlivé dílčí části objektu. Aby program fungoval správně, je třeba dílčí objekty zadávat do parametrů postupně tak, aby na sebe navazovaly. V případě nedodržení návaznosti dílčích objektů program sice poběží, ale nevrátí správný výsledek.

V případě zadání více dílčích objektů jako parametrů příkazové řádky je přeskočena fáze automatické segmentace a program začíná rovnou hledáním os rotační symetrie dílčích objektů.

Automatické rozdělení objektu. V případě, že uživatel chce využít automatické rozdělení objektu, do parametrů příkazové řádky zapisuje pouze jednu cestu k celému objektu, u kterého bude zobecněná rotační symetrie hledána.

Popis odevzdávaného souboru

Všechny elektronické přílohy této bakalářské práce jsou umístěny v jediném souboru A20B0094P_prilohy.zip. Adresářová struktura tohoto souboru je popsána níže.

1. Aplikace_a_knihovny - obsahuje vlastní program, převzaté programové vybavení a uživatelskou příručku.
 - a) GeneralizedSymmetry - obsahuje vlastní řešení bakalářské práce.
 - .vs
 - GeneralizedSymmetry - složka projektu obsahující zdrojové kódy programu.
 - bin
 - * Debug
 - netcoreapp3.1 - obsahuje všechny soubory přeloženého programu pro režim ladění.
 - * Release
 - netcoreapp3.1 - obsahuje všechny soubory přeloženého programu.
 - obj
 - Properties
 - b) SymmetryDetector - obsahuje převzaté programové vybavení Ing. Lukáše Hrudý.
2. Text_prace - obsahuje zdrojové soubory a text práce ve formátu .pdf.
 - a) diagramy - obsahuje stavový diagram.
 - b) experimenty - obsahuje obrázky s výsledky experimentů.
 - c) img - obsahuje obrázky, se kterými pracuje šablona bakalářské práce.
 - d) obrazky
 - predzpracovani - obrázky s výsledky předzpracování.
 - rozdeleni - obrázky s dílčími objekty rozdělenými pomocí automatické segmentace.
 - symetrie - obrázky s lomenými čarami zobecněné rotační symetrie.
 - vysledky - obrázky s výsledky pro netriviální objekty.
 - spatne - obrázky se segmenty, u kterých byla nalezena nepoužitelná osa rotační symetrie a obrázky s pokusy o jejich opravu.

- e) `texmf` - obsahuje písmo.
- 3. `Vstupni_data` - obsahuje vstupní mračna bodů.
- 4. `Vysledky` - obsahuje výsledky pro soubory uložené ve složce `Vstupni_data` a to jak v textové podobě, tak v podobě mračen bodů.

101011000011100010 1100001
1010110001 10001 10001



11010011101101001 1010101
01100001 1010101
111000101011101