

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

KOSTRA POLYGONÁLNÍHO MODELU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

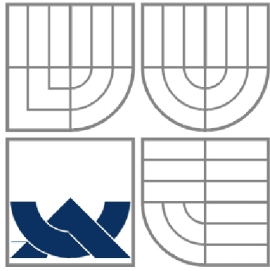
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

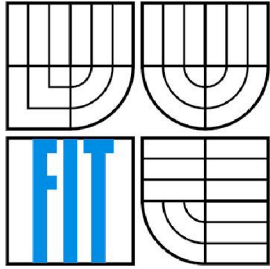
AUTHOR

ONDŘEJ BOREK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

KOSTRA POLYGONÁLNÍHO MODELU

SKELETON EXTRACTION FROM POLYGONAL MESHES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ BOREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŠPANĚL, Ph.D.

BRNO 2011

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá extrakcí kostry z modelu třírozměrného tělesa. Z existujících metod byla vybrána extrakce kostry pomocí os lokální válcové symetrie (ROSA – rotational symmetry axis), která je velmi odolná ke ztrátám vstupních dat a je vhodná pro tělesa složená z obecně válcových částí a jejich spojů (jako jsou například lidská a zvířecí těla). Bylo optimalizováno vyhledávání os lokální válcové symetrie. V experimentech byl zkoumán vliv vlastností tělesa (jako např. ztráta vstupních dat, zvrásnění povrchu, tvar) a vliv parametrů metody na kostru.

Abstract

This bachelor's thesis deals with skeleton extraction from 3D objects. The presented technique for skeleton extraction from incomplete points cloud is based on ROSA (ROtational Symmetry Axis) method, while the searching for rotational symmetry axis was optimized. The method is resistant to missing data and is suitable for objects made from cylindrical parts and joints of that parts (for example human and animals bodies). In experiments, both the influence of object properties (for example missing data, chill mark, shape) and the influence of method's parameters were examined.

Klíčová slova

Křivková kostra, získávání kostry, neúplná data, rotační symetrie.

Keywords

Curve skeleton, skeleton extraction, incomplete data, rotational symmetry.

Citace

Borek Ondřej: Kostra polygonálního modelu, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2011

Kostra polygonálního modelu

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michala Španěla, Ph.D.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Ondřej Borek

18. května 2011

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé práce, Ing. Michalovi Španělovi, Ph.D, za poskytnuté rady a konzultace v průběhu zpracování této práce.

© Ondřej Borek, 2011

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Metody získání kostry 3D modelu.....	3
2.1	Topologické ztenčování	3
2.2	Metoda odpuzujícího silového pole	4
2.3	Metoda smršťování a zužování	4
2.4	Dijkstrův algoritmus nejkratší cesty v grafu	6
2.5	Extrakce kostry z mračen bodů a povrchových normál	7
3	Detailní popis získání kostry z mračen bodů	9
3.1	Získání ROSA bodu	10
3.2	Extrakce kostry z ROSA bodů	14
4	Návrh nástroje na získání kostry polygonálního modelu.....	16
4.1	Optimalizace extrakce kostry pomocí ROSA	16
5	Implementace nástroje na extrakci kostry pomocí ROSA	20
6	Experimenty	22
6.1	Vliv ztráty dat modelu.....	22
6.2	Vliv tvaru modelu.....	23
6.3	Vliv tloušťky řezu	26
6.4	Vliv optimalizace určení počáteční orientace řezu.....	27
6.5	Vliv podmínky divergence normál při identifikaci relevantních bodů.....	29
7	Závěr	31

1 Úvod

3D modelem rozumíme trojrozměrnou geometrickou reprezentaci objektu reálného světa. 3D model zachycuje povrch a tvar objektu. Může zachycovat i vnitřní strukturu objektu například v lékařství snímky pořízené počítačovou tomografií (CT).

Pro snadnější zpracování a analýzu 3D objektů je často vhodné použít jejich zjednodušenou reprezentaci. Jednou z možností jak zjednodušit model je najít jeho kostru.

Kostra 3D modelu je jednorozměrná reprezentace modelu abstrahující objemovou informaci ale zachovávající geometrickou a topologickou informaci. Kostra je jednorozměrný křivkový model „přibližně“ uprostřed tvaru 3D objektu a nikdy nepřesáhne hranici tohoto modelu (leží uvnitř modelu).

Kostra obsahuje podstatně méně dat a je výpočetně snadnější s ní pohybovat. Využívá se k porovnávání a rekonstrukci tvarů, animaci a tvarování postav, virtuální endoskopii a analýze lékařských nálezů.

Cílem práce je zorientovat se v existujících metodách extrakce kostry třírozměrného objektu, vybrat a implementovat nástroj na získání kostry a experimentálně zkoumat vliv vlastností objektu a vliv parametrů extrakční metody na výslednou kostru, popřípadě na rychlost extrakce. Výsledkem výzkumu bude vymezení platnosti zvolené metody z hlediska tvaru zkoumaného objektu a výběr co nejvhodnějších vstupních parametrů metody. Zvolená metoda bude v případě potřeby optimalizována ať už v průběhu návrhu nástroje na získání kostry, nebo v důsledku nových experimentálních poznatků.

Kapitola 2 obsahuje rozbor metod získávání kostry z modelu a obsahem kapitoly 3 je detailní popis metody získání kostry z mračen bodů. V kapitole 4 je popsán návrh nástroje na získání kostry. V kapitole 5 je popsána implementace tohoto nástroje a kapitola 6 obsahuje popisy experimentů.

2 Metody získání kostry 3D modelu

3D modely se dělí podle údajů, které jsou v nich zaznamenávány:

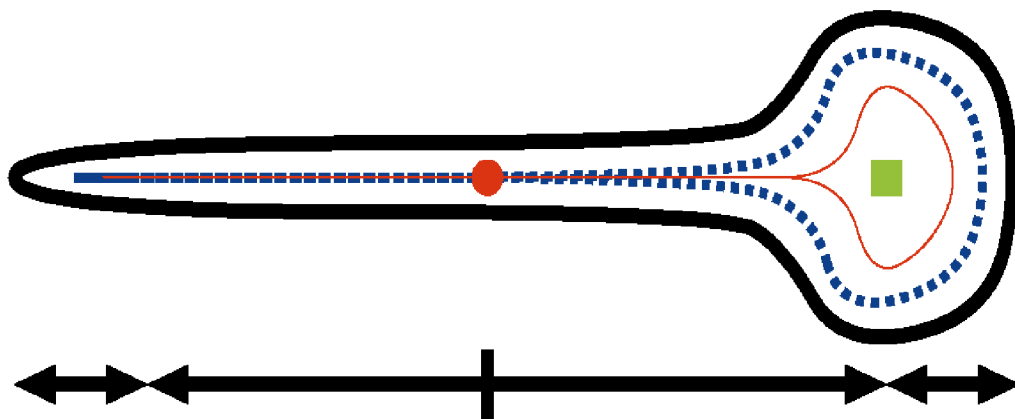
- modely složené z polygonů (mnohoúhelníků, typicky trojúhelníků někdy čtyřúhelníků), které pokrývají povrch modelovaného objektu (hraniční modely)
- modely složené z voxelů (třírozměrné krychličky) které vyplňují modelovaný objekt (objemové modely)
- modely složené z bodů na povrchu modelovaného objektu (hraniční modely), případně ještě normál na povrchu objektu (kde normála na povrchu objektu je jednotkový vektor kolmý k povrchu v daném místě)

Bylo publikováno mnoho metod na získávání kostry 3D modelu. V této kapitole je uvedeno několik z nich.

Metody získávání kostry se dají rozdělit na objemové a geometrické metody, podle toho s jakými daty pracují. Objemové metody používají jako vstup data ve formátu voxelů a používají se především v lékařství například na skeny CT. Geometrické metody pracují s 3D modely ve formě polygonů, tyto 3D modely tedy nenesou žádnou informaci o vnitřním složení objektu.

2.1 Topologické ztenčování

Metoda topologické ztenčování (někdy uváděná jako „loupání cibule“ [3]) požaduje vstup ve formátu voxelů. Postupně se odstraňují vrstvy voxelů z povrchu objektu až zůstane jen kostra. Voxel ale nemůže být odebrán, pokud by se tím rozpojil model nebo pokud by se porušila topologie modelu. Tato metoda je výpočetně náročná. Urychlit se dá rozdělením algoritmu na dvě fáze. V první fázi se označí povrchové voxel, které jsou potenciální kandidáti na odebrání. Ve druhé fázi se ze všech voxelů označených v první fázi odeberou ty, kterým po odebrání zůstane aspoň jeden vnitřní soused.



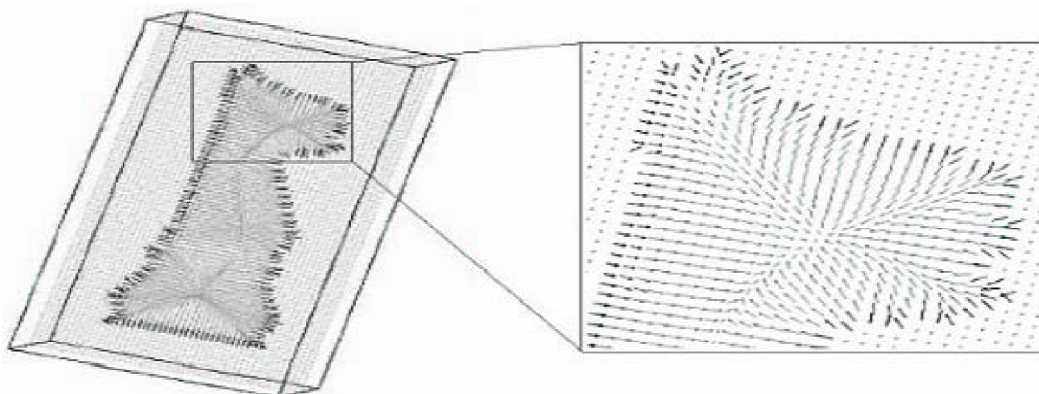
Obr. 2-1 příčný průřez tělesa, pro které metoda nefunguje dobře – převzato z [3]

Pro některé specifické modely, jako je ten, jehož příčný průřez vidíme na obrázku Obr. 2-1, metoda nefunguje dobře. Metoda topologické ztenčování našla pro uvedený model kostru v místě červeného bodu, ale správně by kostra procházela místem zeleného bodu.

2.2 Metoda odpuzujícího silového pole

Metoda odpuzujícího silového pole (popsaná v [2]) dokáže pracovat se vstupem ve formátu voxelů i polygonů. Pro vysvětlení bude dále předpokládán vstup ve formátu voxelů. Tato metoda pro každý voxel objektu spočítá sílu směřující od hranice modelu směrem dovnitř modelu. Její velikost závisí na tom, jak blízko je voxel od hranice. Čím blíž je, tím je síla větší. Vznikne pole sil, přičemž všechny směřují do místa, kde je kostra modelu.

Každý hraniční voxel (takový, že aspoň jedna jeho stěna není sdílena sousedním voxelům) je považován za bodový náboj a síla každého nehraničního voxelu se spočítá jako suma sil vzniklých tak, že v počítaném bodě umístíme bodový náboj stejné polaroty jako hraniční bodový náboj (budou se odpuzovat).



Obr. 2-2 pole odpuzujících sil pro 3D model šachové figurky – převzato z [2]

Síla je počítána podle následujícího vzorce

$$\vec{F}_{PC} = \frac{\vec{CP}}{R^m} \quad (1)$$

, kde \vec{F}_{PC} je síla v bodě P (počítaný bod) směřující od C (hraniční bod), \vec{CP} je normalizovaný vektor z C do P, který dává síle směr a R je vzdálenost mezi body C a P. Konstanta m udává, jak rychle bude síla klesat s rostoucí vzdáleností mezi body C a P.

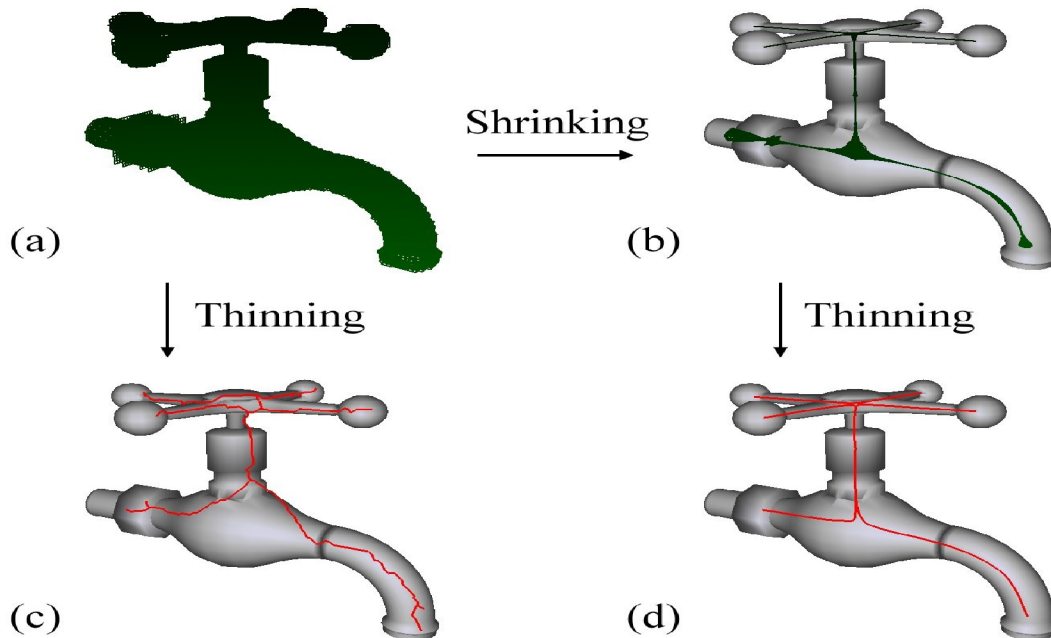
Jelikož algoritmus počítá se všemi hraničními voxely pro výpočet jednoho nehraničního voxelu, můžou být některé modely pro tuto metodu problémové, například model hřebenu. V tomto případě by do výpočtu kostry jednoho zubu z hřebenu neměly být zahrnuty ostatní zuby. To znamená, že pro výpočet síly je nutné brát v potaz jen ty hraniční voxely, které jsou „viditelné“ z místa, pro které je síla počítána. Hraniční voxel je z daného místa uvnitř modelu viditelný tehdy a jen tehdy, když se celá úsečka spojující hraniční voxel s daným místem nachází uvnitř modelu.

Tento princip ale zpomaluje výpočet a dá se vynechat, pokud je konstanta m v rovnici (1) dostatečně velká, tudíž hraniční body ležící daleko od počítaného bodu se projeví méně.

2.3 Metoda smršťování a zužování

Tato metoda (popsaná v [1]) opět pracuje s modely ve formátu voxelů. Voxely jsou nejprve rozděleny na hraniční a vnitřní. Vnitřní voxely mají 6 sousedů, to znamená, že ke každé jejich stěně přiléhá další voxel, zatímco hraniční jsou na povrchu modelu. Poté se zkracují hrany mezi sousedními voxely, ovšem zároveň jsou hraniční voxely tlačeny na své původní pozice.

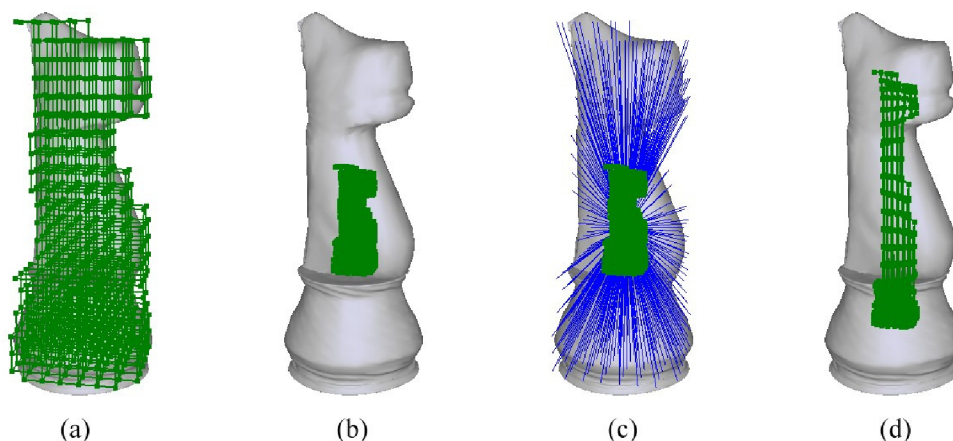
To je důležité, protože pouhým zkracováním hran by se model smrškával až do podoby jednoho bodu. Smršťování probíhá iterativně. Po smršťování přichází fáze zužování, ve které jsou hraniční voxely odstraněny a tím je získána kostra 3D modelu. Oproti získávání kostry rovnou zúžením, při použití smršťování je kostra hladší a blíže ose modelu, jak je vidět ve srovnání na obrázcích Obr. 2-3(c) a Obr. 2-3(d). Obr. 2-3(a) ukazuje původní 3D model a Obr. 2-3(b) ukazuje model po aplikování smrštění.



Obr. 2-3 rozdíl mezi použitím pouhého zúžení a použitím smrštění před zúžením – převzato z [1]

2.3.1 Smršťování

Smršťování probíhá pomocí zkracování hran mezi sousedními uzly. Pokud by zkracování bylo homogenní, vedlo by pouze ke zmenšení celého modelu. Pro zachování geometrie modelu jsou proto zavedeny síly tlačící hraniční voxely zpět na jejich počáteční pozice a jsou nazývány hraniční podmínky. Tyto síly omezují přemísťování hraničních voxelů a tím zachovávají rysy modelu, jak je vidět na obrázku Obr. 2-4. Obr. 2-4(a) ukazuje původní model, Obr. 2-4(b) ukazuje smrštěný model bez aplikování hraničních podmínek, na obrázku Obr. 2-4(c) je znázornění hraničních podmínek (modré čáry) a Obr. 2-4(d) ukazuje zachování geometrie modelu aplikováním hraničních podmínek. Smršťování je iterativní proces.



Obr. 2-4 použití hraničních podmínek pro zachování geometrie modelu – převzato z [1]

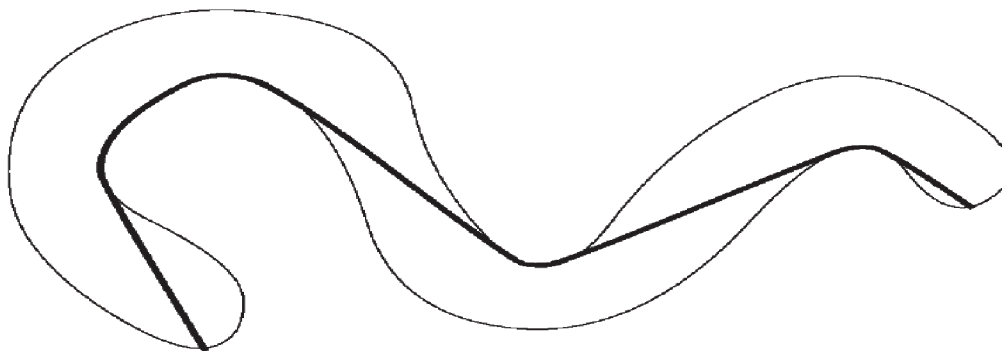
2.3.2 Zužování

Poté co bylo aplikováno smrštění máme stále 3D model, kdežto kostra má být jednorozměrná. Toto se vyřeší zužováním. Během zužování je opakovaně odstraňována vrstva hraničních voxelů, až zůstanou jen uzly kostry. Uzly jsou spojeny po hranách. V podstatě se jedná o metodu topologické zužování jak byla popsána v kapitole 2.1.

2.4 Dijkstrův algoritmus nejkratší cesty v grafu

Tato metoda (popsaná v [3]) používá Dijkstrův algoritmus pro nalezení nejkratší cesty v grafu. Tento algoritmus má široké uplatnění a používá se například v počítačových sítích při směrování. Pracuje s grafem, který nemusí být orientovaný a má kladně ohodnocené hrany. Model z voxelů je převeden na graf tak, že voxely jsou namapovány na vrcholy grafu a hrany v grafu odpovídají sousedství voxelů. Algoritmus má dvě fáze, v první jsou označeny vrcholy v grafu nejkratšími vzdálenostmi z jednoho vybraného vrcholu (zdroje) do těchto vrcholů. Druhá fáze vytvoří nejkratší cestu zpětným cestováním do zdroje.

Dijkstrův algoritmus tedy najde nejkratší cestu, ale ta má ke kostře modelu ještě daleko, jak je vidět z obrázku Obr. 2-5.



Obr. 2-5 nejkratší cesta ležící částečně na hranici objektu – převzato z [3]

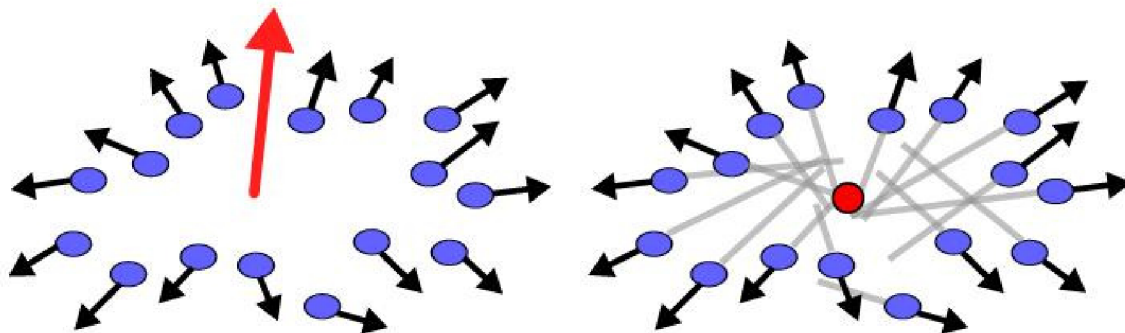
Nejkratší cesta sice leží uvnitř objektu, ale na hranici a ne přibližně uprostřed, jak se dá očekávat u kostry objektu. Proto je v algoritmu ještě upravena druhá fáze, to znamená fáze zpětné

označení cesty do zdroje. Jako zpětná cesta do zdroje se použije cesta přes středy shluků s pokud možno stejnou vzdáleností od zdroje.

2.5 Extrakce kostry z mračen bodů a povrchových normál

Vstupem metody jsou informace o bodech na povrchu tělesa a normálových vektorech kolmých k povrchu tělesa v daných bodech povrchu. Tato metoda je popsána v práci [4]. Metoda je vhodná pro tělesa, která jsou složena z částí, které se tvarem podobají válci, a spoju těchto „válcových částí“ (proto je mimo jiné vhodná pro extrakci kostry lidských a zvířecích těl).

Pro části tělesa jsou hledány zobecněné středy a osy lokální rotační symetrie (osy „válcových částí“ ROSA = rotational symmetry axis). V následujícím obrázku jsou modrými kolečky znázorněny body na povrchu tělesa, černé šipky představují normálové vektory kolmé k povrchu tělesa, červenou šipkou je znázorněna orientace hledané osy lokální rotační symetrie a červeným kolečkem je znázorněn hledaný střed lokální rotační symetrie.

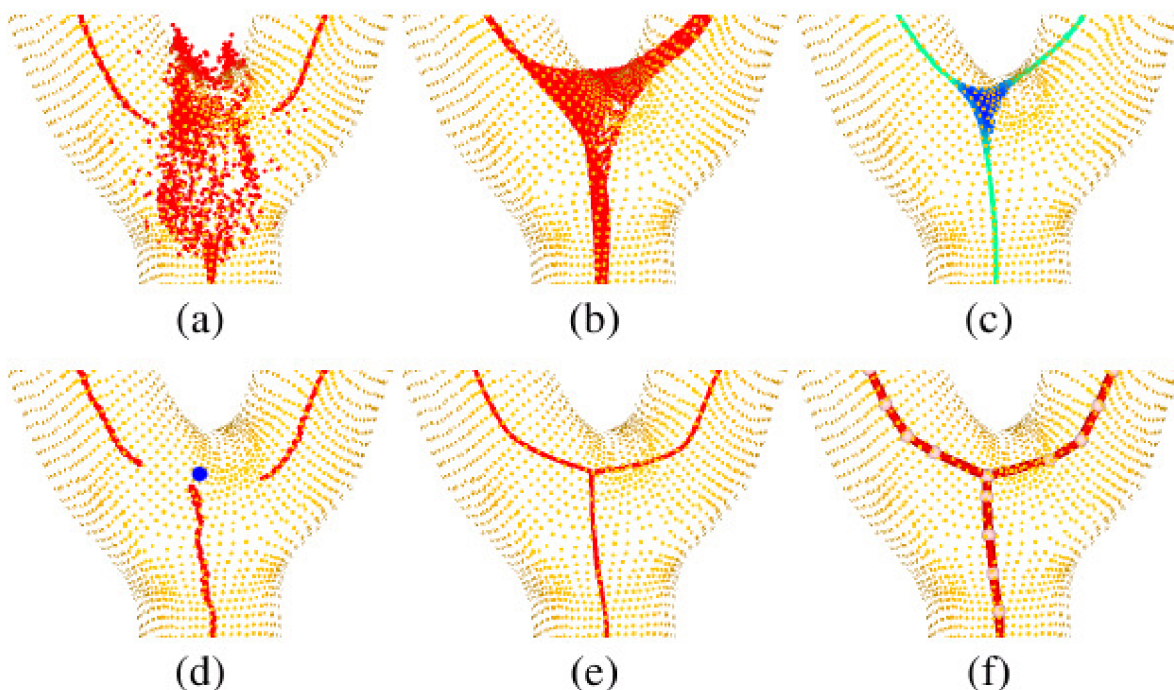


Obr. 2-6 ROSA bod – převzato z [4]

Orientace osy symetrie (viz levá část obrázku) se spočítá tak, aby minimalizovala rozptyl úhlů mezi vektorem osy a normálovými vektory. Střed symetrie (viz pravá část obrázku) je volně řečeno „průsečík“ normálových přímk (je to bod spočítaný tak, aby minimalizoval součet čtverců vzdáleností tohoto bodu od normálových přímk).

Výsledná kostra je volně řečeno složena z jednorozměrných křivek, které se dotýkají os symetrie ve středech symetrie (osy symetrie jsou tečnami kostry). Získání kostry ze středů a os lokálních rotačních symetrií je poměrně složitá procedura detailně popsána v kapitole 3.

Následující obrázek ilustruje postup extrakce kostry.



Obr. 2-7 Extrakce kostry z ROSA bodů – převzato z [4]

Protože v místech spojů „válcových částí“ tělesa jsou nalezené středy symetrie rozptýlené v prostoru a „neleží“ na jednorozměrné křivce (viz část a), provádí se Laplaceovo vyhlazení za použití principu prostorové koherence (viz dále Vyhlazení s pomocí prostorové koherence v kap. 3.2), kterým se středy symetrie posunou blíže k výsledné kostře (viz část b).

Následuje zeštíhlování kostry ve „válcových částech“ tělesa v blízkosti spoje pomocí algoritmu MLS (moving least squares), čímž se středy symetrie opět posunou blíže k výsledné kostře (viz část c).

Poté se provede centrování ve „válcových částech“ v blízkosti spoje a zkolabování spoje do jednoho bodu (viz část d).

Nakonec se znovu provede Laplaceovo vyhlazení za použití principu prostorové koherence (výsledek viz část e) a snížení lineární hustoty bodů kostry a spojení zbývajících bodů křivkovými segmenty (výsledek viz část f).

Tato metoda extrakce kostry dává správný tvar kostry i při ztrátě podstatné části vstupních dat, protože tato ztráta je vykompenzována využitím informace uložené v normálových vektorech.

3 Detailní popis získání kostry z mračen bodů

V této kapitole je popsán postup získání kostry z mračen bodů pomocí ROSA (ROSA = osa lokální rotační symetrie) tak, jak byl navržen v práci [4].

Definice základních pojmů v kontextu této práce

orientovaný bod - uspořádaná dvojice (p, n) , kde p je bod a n je jednotkový vektor umístěný do bodu p

normála tělesa – jednotkový vektor kolmý k povrchu tělesa, orientovaný směrem ven z tělesa

normála řezu – jednotkový vektor kolmý k rovině řezu

vzorek tělesa – orientovaný bod (p, n) , kde p je pozice na povrchu tělesa a n je normála tělesa v bodě p

normálová přímka – přímka procházející pozicí p vzorku tělesa ve směru normály n vzorku tělesa

model/mračno bodů – množina všech vzorků tělesa

válcová část tělesa – část tělesa, která se tvarově podobá obecnému válci (i kónickému)

spoj tělesa – spojení minimálně tří válcových částí tělesa

ROSA bod - orientovaný bod (r, v) takový, že současně:

- jeho orientace v minimalizuje rozptyl úhlů mezi v a normálami tělesa v oblasti rotační symetrie (jinými slovy, v je spočítán tak, aby tyto úhly s normálami byly co nejhodnější, v souladu s pojetím rotační symetrie),
- jeho pozice r minimalizuje součet čtverců vzdáleností od všech normálových přímek v oblasti rotační symetrie

vzorek kostry - bod, který leží na právě počítané struktuře kostry

křivková kostra – kostra složená z jednorozměrných křivek a případných spojů těchto křivek

Vymezení problému

Vstupem je model (vstupní mračno bodů) tělesa, které, co se týče tvaru, sestává z *obecně válcových částí* (tyto části nazýváme větve) a případných *spojů*, jak je zřejmé na Obr. 3-1. Výstupem je hladká kostra tvořená jednorozměrnými křivkami, jejíž body jsou středy lokální rotační symetrie a tečny jsou osy lokální rotační symetrie.

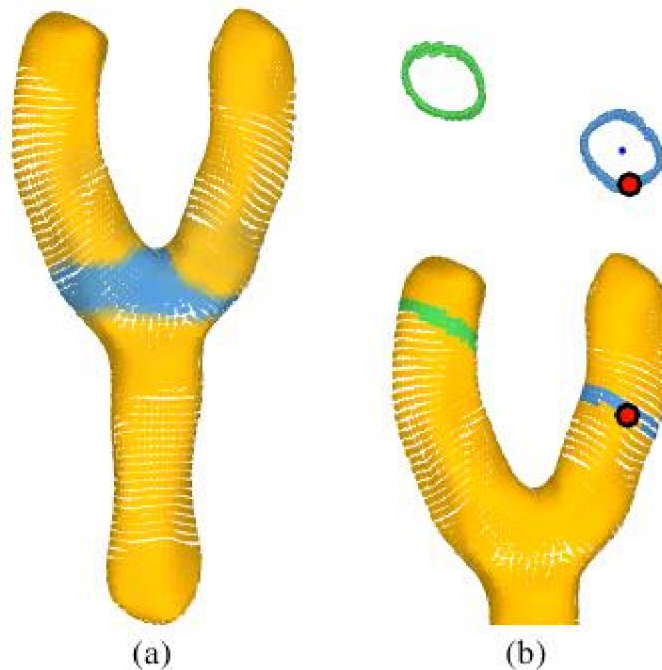
Uvedená podmínka kladená na tvar tělesa (těleso je složeno z obecně válcových částí a spojů) je v reálném světě splněna u široké třídy těles – lidských a zvířecích těl. Proto se jedná o rozumný předpoklad, protože pouze taková tělesa by měla připouštět smysluplnou křivkovou kostru; například servírovací podnos, baseballová čepice nebo bowlingová koule nepatří do této kategorie a nemají žádnou přirozenou křivkovou kostru.

Popis algoritmu extrakce křivkové kostry pomocí ROSA

Větve jsou dobře popsány pomocí rotační symetrie, spojové části tělesa (spojové válcových částí), jsou typicky neválcové a vyžadují speciální přístup viz kap 3.2.

Je vypořováváno, že každý bod příslušející k ose rotační symetrie obecně válcové části tělesa spadá do úzkého "pásu", který je přibližně rovinný; viz Obr. 3-1(b). To je popudem k použití rovinných řezů při hledání těch částí tělesa, které vykazují rotační symetrii. Samozřejmě ne všechny rovinné řezy obsahují požadovanou rotační symetrii. Proto se postupně hledá nejlepší rovinný řez pro každý bod vstupního mračna bodů, přičemž se řez v daném bodě ukotví a iteračním postupem, při

kterém se natáčí rovina řezu, se nalezne optimální orientace řezu, při které je lokální rotační symetrie maximální. Ukotvení řezu má tři výhody. Za prvé, kotvící bod je zárodkem (počátečním bodem) hledání odpovídající množiny bodů tělesa v blízkosti řezu při hledání ROSA bodu (de facto hledání středu a osy lokální rotační symetrie) - detaily viz kap. 3.1. Za druhé, ukotvení rovinného řezu naznačuje přirozený vztah mezi bodem povrchu tělesa a jemu odpovídajícím bodem na počítané kostře (každý bod (vzorek) tělesa má svůj obraz na kostře). Konečně, tento přístup zjednodušuje hledání optimálního rovinného řezu.



Obr. 3-1 ROSA-oblasti větví a spoje – převzato z [4]

(a) spoj válcových částí tělesa je zbarvený modře, (b) optimální rovinný řez a pozice vzorků z relevantního okolí (modrá barva) ukotvené ve vzorku (červené kolečko). Při extrakce křivkové kostry mračna bodů pomocí ROSA se nejprve vyhledá ROSA bod pro každý vzorek modelu a poté se provede extrakce kostry z ROSA bodů.

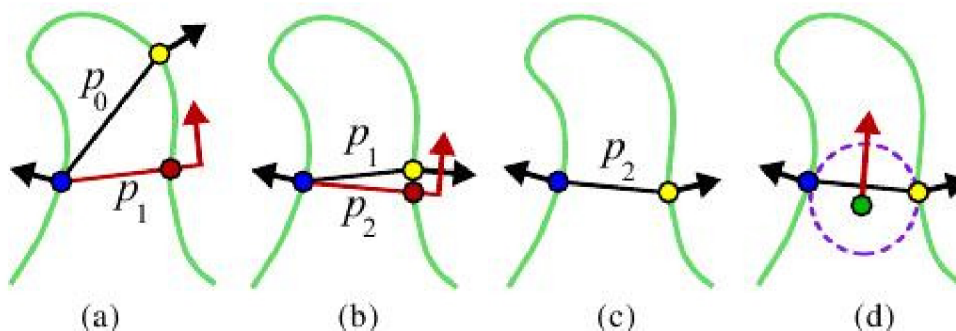
Ve zbytku této kapitoly je detailně popsáno získání ROSA bodu pro jeden vzorek mračna a extrakce kostry z ROSA bodů.

3.1 Získání ROSA bodu

Pro pozici daného vzorku tělesa se najde pozice a orientace ROSA – viz předchozí definice ROSA bodu v kap.3. Namísto současného hledání optimální pozice a optimální orientace ROSA bodu (což vede k vícerozměrnému hledání) se nejprve optimalizuje orientace ROSA bodu (která je totožná s normálou optimálně orientovaného řezu) a teprve potom se optimalizuje pozice ROSA bodu (viz pozice ROSA bodu), což obojí vede na řešení lineárního problému a může být řešeno uzavřenou formou.

Názorný popis nalezení optimální orientace řezu

Normála minimalizuje rozptýl úhlů s normálami množiny relevantních vzorků tělesa v blízkosti rovinného řezu - viz Obr. 3-1(b). Optimální orientace řezu se najde iterativně, jak je ilustrováno pro dvourozměrná tělesa na Obr. 3-2(a-c).



Obr. 3-2 ROSA – nalezení optimální orientace řezu – převzato z [4]

Orientace roviny řezu (který je stále ukotvený v modrém bodě na povrchu tělesa) se postupně mění z p_0 do p_2 a konverguje. Normála řezu pro následující iterační krok (červená šipka) tvoří stejný velký úhel s normálami tělesa (černé šipky). Po dosažení konvergence (d) se pozice ROSA bodů (zelená) určí jako průsečík normálových přímek tělesa a leží na středové ose.

Vztah ROSA bodů ke středovým osám

Obr. 3-2(d) odhaluje, že pro dvourozměrná tělesa existuje těsná spojitost mezi středovou osou a ROSA body. Skutečně, pokud iterace konvergují, prosté geometrické argumenty ukazují, že optimální ROSA bod je středem kružnice, která je tečná k povrchu tělesa ve dvou bodech (dvoutečná kružnice). Tento bod leží přesně na středové ose, pokud je dvoutečná kružnice uvnitř tělesa. Vzhledem k tomu, že se nepožaduje, aby byla kružnice uvnitř, množina ROSA bodů (množina středů všech kružnic dvojtečných k hranici tělesa) se obecně vztahuje k symetrii hraniční (povrchové) křivky tělesa [5]. Nicméně vzhledem k tomu, že do hledání ROSA bodu je zahrnuta také orientaci bodů, množina ROSA bodů je vymezena více, než jen množinou symetrie hraniční křivky tělesa.

Ve zbytku této kapitoly je detailně popsán postup nalezení ROSA bodu pro daný vzorek tělesa.

3.1.1 Detailní popis nalezení ROSA bodu

Roviny řezu a relevantní okolí

Nechť \mathbf{p}_i je libovolný vzorek tělesa. Uvažujme rovinu řezu π_i procházející bodem \mathbf{p}_i , s orientací \mathbf{v}_i a identifikujme úzký pás vzorků tělesa ve vzdálenosti menší než δ od π_i . Hodnota tloušťky δ se použije globálně a je to volný parametr nastavený na 2,5% délky vnitřní tělesové úhlopříčky boxu, který ohraničuje vstupní mračno bodů (všechny vzorky tělesa). Stanovení orientace řezu bude popsáno později.

U komplexních těles může řez protínat několik různých částí tělesa. Proto je nejprve nutné v pásu těsně okolo řezu π_i blíže identifikovat pro daný vzorek tělesa \mathbf{p}_i jeho relevantní okolí \mathbf{N}_i , které obsahuje další vzorky příslušející stejné části tělesa jako vzorek \mathbf{p}_i . Vzorky z tohoto okolí jsou pak využity při výpočtu ROSA bodu. *Poznámka:* Zatímco pouhé pozice bodů na povrchu tělesa mohou vést k nejednoznačnostem při hledání relevantního okolí \mathbf{p}_i (pokud došlo ke ztrátě vstupních dat), normály tělesa mohou při identifikaci relevantního okolí \mathbf{N}_i efektivně nahradit chybějící (ztracená) data.

Aby nebyly do relevantního okolí \mathbf{N}_i chybně zahrnuty vzorky z jiných částí komplexního tělesa využije se Mahalanobisova vzdálenost, která v sobě kombinuje euklidovskou vzdálenost pozic vzorků

tělesa spolu s informací o normálách vzorků tělesa. Použije se formulace Mahalanobisovy vzdálenosti dle [6] na výpočet vzdálenosti \mathbf{d}_{Mah} mezi dvěma orientovanými body (p_1, n_1) a (p_2, n_2)

$$d_{Mah}(p_1, n_1; p_2, n_2) = \|p_1 - p_2 + 2((p_1 - p_2)n_2)n_2\| \quad (2)$$

Vypočítaná vzdálenost \mathbf{d}_{Mah} se porovnává s vhodně vybranou prahovou hodnotou ϵ_{Mah} při konstrukci grafu všech takových vzorků tělesa, pro které existuje hrana v grafu tehdy a jen tehdy, když

$$d_{Mah}(p_j, p_k) < \epsilon_{Mah} \quad (3)$$

Relevantní okolí \mathbf{N}_i vzorku tělesa \mathbf{p}_i je pak získáno jako uzly grafu konstruovaného pomocí Mahalanobisovy vzdálenosti: provádí se hledání do šířky (po generacích - breadth first search) počínaje vzorkem \mathbf{p}_i a rekurzivně se přidávají do uzlů grafu vzorky tělesa z úzkého pásu podél řezu π_i . Zatímco okolí \mathbf{N}_i se mění se změnou prahové hodnoty ϵ_{Mah} , vypočítaný ROSA bod zůstává celkem stabilní, protože definice ROSA bodu je odolná vůči ztrátě dat. A proto se volí poměrně agresivní prahová hodnota ϵ_{Mah} v experimentech.

Výpočet orientace ROSA bodu (optimální orientace řezu)

Pro vzorek \mathbf{p}_i chceme najít takovou optimální rovinu řezu π_i^* procházející pozicí vzorku \mathbf{p}_i , která nejlépe modeluje jeho lokální rotační symetrii. Slovy, normála řezu π_i^* by měla být rotačně symetrická vzhledem k normálám vzorků tělesa v relevantním okolí \mathbf{N}_i . Tomu odpovídající optimalizace je obtížný a nelineární problém, a proto ho řešíme iterativně. Začínáme s počáteční orientací \mathbf{v}_i^0 a iterativně opravujeme, přičemž řešíme následující variační problém zahrnující rozptyl úhlů mezi normálou řezu a normálami vzorků tělesa v relevantním okolí:

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \arg \min_{\mathbf{v} \in R^3, \|\mathbf{v}\|=1} \text{var}\{\langle \mathbf{v}, \mathbf{n}(p_j) \rangle : p_j \in N_i(t), t \geq 0\} \quad (4)$$

kde $\mathbf{N}_i(t)$ je relevantní okolí v t-té iteraci pro rovinu řezu a $\mathbf{n}(p_j)$ normála v bodě p_j . Rovnice (4) má uzavřenou formu řešení, protože může být přepsána na tvar, který minimalizuje kvadratickou formu

$$\mathbf{v}_i = \arg \min_{\mathbf{v} \in R^3, \|\mathbf{v}\|=1} (\mathbf{v}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{v}) \quad (5)$$

přičemž $\|\mathbf{v}\| = 1$, kde

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \overline{X^2} - \overline{X}^2 & 2\overline{XY} - 2\overline{X}\overline{Y} & 2\overline{XZ} - 2\overline{X}\overline{Z} \\ 2\overline{XY} - 2\overline{X}\overline{Y} & \overline{Y^2} - \overline{Y}^2 & 2\overline{YZ} - 2\overline{Y}\overline{Z} \\ 2\overline{XZ} - 2\overline{X}\overline{Z} & 2\overline{YZ} - 2\overline{Y}\overline{Z} & \overline{Z^2} - \overline{Z}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Zde X označuje náhodnou proměnnou pro x-ovou souřadnici normál vzorků tělesa v okolí $\mathbf{N}_i(t)$, obdobně pro Y a Z a čára nad výrazy v matici označuje průměrnou hodnotu výrazu v rámci relevantního okolí $\mathbf{N}_i(t)$ – např. čára nad výrazem X^2 označuje průměrnou hodnotu druhé mocniny x-ové souřadnice normál vzorků tělesa v rámci relevantního okolí. Kvadratický problém může být řešen pomocí rozkladu na singulární hodnoty.

Prvotní orientace \mathbf{v}_i^0 je vybírána náhodně z množiny normálových vektorů, které jsou kolmé k normále vzorku tělesa \mathbf{p}_i , protože u těles složených převážně z obecně válcových částí je velmi pravděpodobné, že normála v bodě \mathbf{p}_i je rovnoběžná s optimální rovinou řezu.

Experimentálně byla vyzkoušena dosti rychlá konvergence orientace roviny do optimální polohy, přičemž není potřeba více než deset iterací, než se orientace roviny ustálí. Nicméně doposud nebyl podán důkaz konvergence. Problematická lokální minima jsou ojedinělá a tyto výskyty mohou být korigovány při uplatnění prostorové koherence během zpracování spojů.

Výpočet pozice ROSA bodu (bodu kostry)

Mějme optimální rovinu řezu π_i^* procházející pozicí vzorku tělesa p_i . Pozici ROSA bodu r_i^* spočítáme jako střed rotační symetrie. Opět se využije informace o normálách vzorků tělesa v relevantním okolí. Vypočítají se souřadnice takového bodu, pro který je součet čtverců jeho vzdáleností od normálových přímk minimální

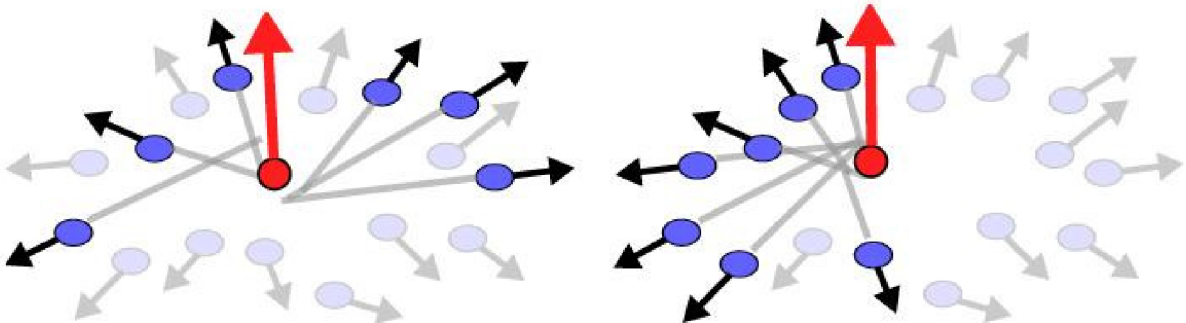
$$r_i^* = \arg \min_{r \in R^3} \sum_{p_j \in N_i^*} \| (r - p_j) \times n(p_j) \|^2 \quad (7)$$

kde N_i^* je relevantní okolí pro optimální rovinu řezu.

Problém rovnice (7) je opět standardní kvadratická minimalizace a má uzavřenou formu řešení pomocí parciálních derivací.

Odolnost výpočtu ROSA bodu vůči neúplným vstupním datům

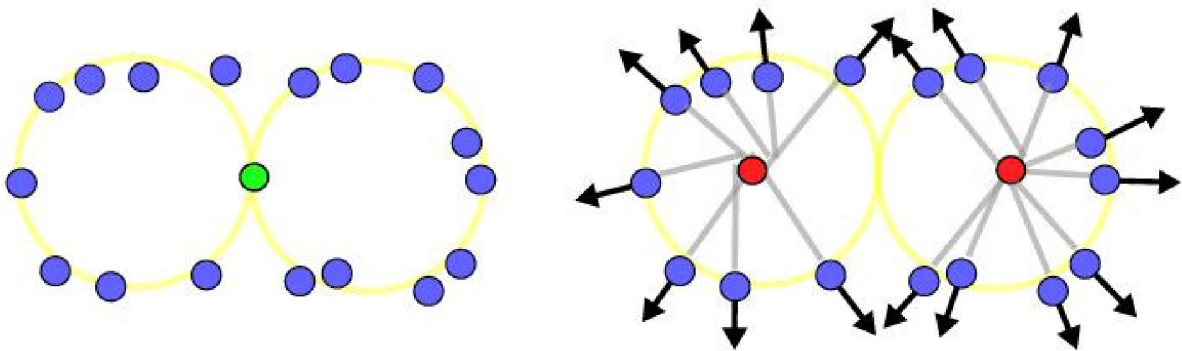
Následující obrázek ilustruje odolnost výpočtu ROSA bodu vůči ztrátě podstatné části vstupních dat.



Obr. 3-3 výpočet ROSA bodu při ztrátě vstupních dat – převzato z [4]

Z obrázku je zřejmé, že výpočet ROSA bodu dává platné výsledky i při ztrátě více než poloviny vstupních dat.

Následující obrázek porovnává vliv ztráty vstupních dat při výpočtu bodu kostry pomocí ROSA a při výpočtu bodu kostry jako hmotného středu (průměru) poloh bodů na povrchu tělesa.

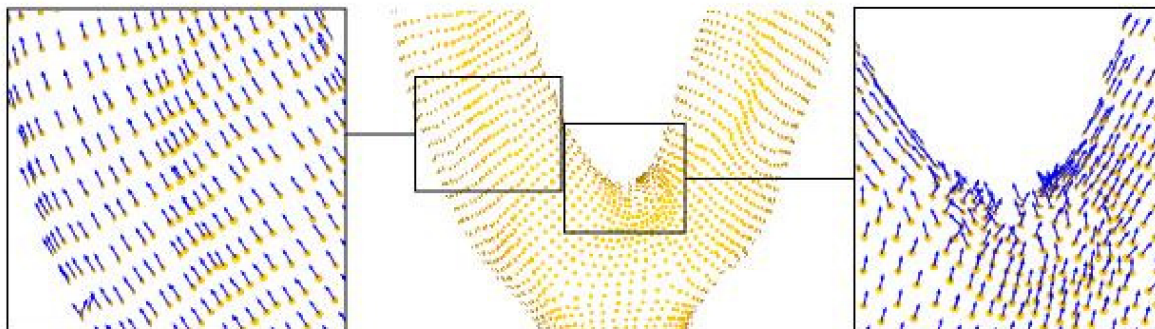


Obr. 3-4 výpočet bodu kostry pomocí ROSA a jako průměr poloh bodů povrchu

Vlevo: chybějící data v případě dvou dotýkající se válcových oblastí bez informace o orientaci povrchových normál tělesa, bod kostry spočítaný jako průměr poloh bodů (zelený bod) vede k chybné interpretaci dat. Vpravo: povrchové normály tělesa odhalují dva shluky vzorků tělesa vedoucí ke dvěma ROSA bodům (červené body), což vede ke správnému posouzení tvaru tělesa. Je možné bezprostředně rozdílnost mezi výpočtem bodu kostry pomocí ROSA a výpočtem bodu kostry jako hmotného středu (průměru) poloh bodů, který je citlivý na chybějící vstupní data.

3.2 Extrakce kostry z ROSA bodů

Vypočítané ROSA body dohromady tvoří počáteční mračno vzorků kostry. Na následujícím obrázku jsou zvětšené detaily oblasti větve a oblasti spoje, na kterých jsou zobrazeny vypočítané optimální orientace řezu.



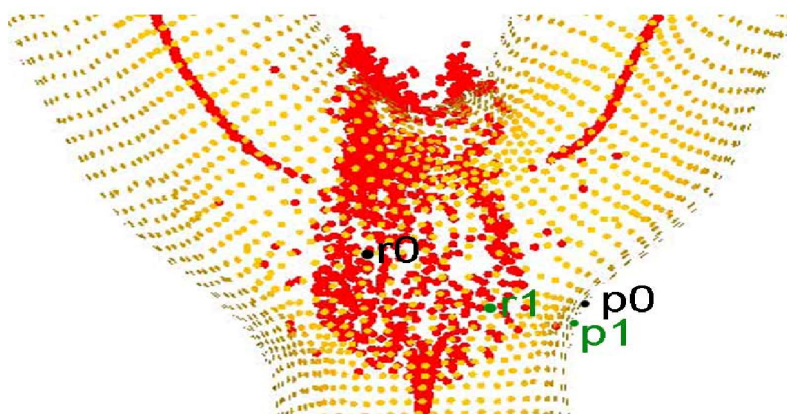
Obr. 3-5 ROSA – orientace řezů v oblastech větví a spojů – převzato z [4]

V oblasti větve se optimální orientace řezu chová dobře (je rovnoběžná s větví), ale v oblasti spoje nedostatek rotační symetrie vnáší šum do optimální orientace řezu. Tento problém je řešen dále v této kapitole v několika krocích:

- vyhlazení při použití principu prostorové koherence
- zeštíhlování kostry válcových částí v blízkosti spoje pomocí algoritmu MLS (moving least squares)
- centrování a získání jednorozměrné křivky

Vyhazení s pomocí prostorové koherence

Oblasti spojů jsou obecně neválcové a nemají smysluplný optimální řez. Nedostatek rotační symetrie vnáší šum do optimální orientace řezu. Pro odstranění tohoto nedostatku se provede Laplaceovo vyhlazení za použití principu prostorové koherence. Princip prostorové koherence říká, že blízkým vzorkům povrchu tělesa by měly odpovídat blízké vzorky na kostře. Při Laplaceově vyhlazování se pro každý vzorek kostry v oblasti spoje vypočítá jeho nová pozice jako průměr pozic jeho „sousedních“ vzorků kostry. Na následujícím obrázku jsou znázorněny pozice dvou vzorků tělesa \mathbf{p}_0 a \mathbf{p}_1 a pozice jim odpovídajících vzorků kostry \mathbf{r}_0 a \mathbf{r}_1 .



Obr. 3-6 vzorky tělesa a jim odpovídající vzorky kostry

Řekneme, že vzorky kostry \mathbf{r}_0 a \mathbf{r}_1 jsou *sousední* tehdy a jen tehdy, pokud Mahalanobisova vzdálenost (viz rovnice (2)) jim odpovídajících vzorků tělesa \mathbf{p}_0 a \mathbf{p}_1 splňuje vztah rovnice (3). Tímto

vyhlazením se vzorky kostry v oblasti spoje „přitáhnou“ blíže k sobě a odhalí jasněji spojení větví viz Obr. 2-7(b). Navíc to může vést k odstranění šumu způsobeného nalezením neoptimální orientace řezu (vlivem „uvíznutí“ v lokálním minimu při hledání optimální orientace řezu).

Zeštíhlování pomocí algoritmu MLS

Mračno vzorků kostry, které je prostorově koherentní, je potřeba ještě dále zeštíhlit, aby se přiblížilo jednorozměrné struktuře. To je nutné zejména v oblastech větví v blízkosti spojů, protože zde předcházející vyhlazování může narušit linearitu v mračnu vzorků kostry. Proto se provede zeštíhlení mračna vzorků kostry pomocí algoritmu MLS (moving least squares) [7]. MLS techniky jsou dobře známé při rekonstrukci křivky nebo povrchu a v našem jednorozměrném případě se opakovaně promítají vzorky kostry na křivky, které je lokálně nejlépe prokládají prostřednictvím PCA (principal component analysis). Lokální PCA a dobře zeštíhlené oblasti větví poskytují jednoduchou a robustní cestu k rozlišení vzorků kostry příslušejících větví od vzorků kostry příslušejících spoji. Konkrétně se provede standardní měření linearity

$$\psi(r_i) = \lambda_i^{(1)} / (\lambda_i^{(1)} + \lambda_i^{(2)} + \lambda_i^{(3)}) \quad (8)$$

u vzorku kostry r_i , kde $\lambda_i^{(j)}$ je j-tá největší vlastní hodnota z lokální PCA v bodě r_i . Algoritmus MLS se aplikuje na r_i jen tehdy, pokud je splněna následující nerovnost

$$\psi(r_i) < \varepsilon_{MLS} \quad (9)$$

indikující, že r_i se nachází ve větvi. Použití jednorozměrné MLS na vzorky kostry ve spoji není smysluplné, protože vzorky v této oblasti jsou rozesety v třírozměrné oblasti. Hodnota přípustné odchylky ε_{MLS} je pomocí experimentů opatrně nastavená na 0,4. Obr. 2-7(b-c) ukazují účinek provedeného zeštíhlení.

Centrování a získání jednorozměrné křivky

Kroky provedené doposud při zpracování spoje mohou narušit vystředování mračna vzorků kostry. Proto se provede opětovné centrování vzorků kostry v souladu s tím, zda leží buď na větvi nebo ve spoji. Skalární pole ψ definované výše (viz rovnice (8)) pro vzorky poskytuje prostředky potřebné k dosažení následujícího. Opětovné vycentrování uvnitř větve se provede podle rovnice (7). Konkrétně vzorek kostry ve větvi r_i se posune do pozice ROSA bodu, který se vypočítá pro vzorky tělesa, které přísluší vzorkům kostry v malém okolí r_i . Vzorky kostry ve spoji zkolabují do jediného vzorku „centra spoje“ – viz Obr. 2-7(d), přičemž výpočet pozice vzorku se provede podle rovnice (7) pro všechny vzorky tělesa ležící v oblasti spoje.

Znovu se provedou přesuny vzorků kostry pomocí Laplaceova vyhlazování za použití principu prostorové koherence. Výsledné mračno vzorků kostry má již v oblasti spoje podobu čar, které jsou napojeny na „centrum spoje“ – viz Obr. 2-7(e). V konečném mračnu vzorků kostry se sníží lineární hustota vzorků (vynecháním některých vzorků kostry) a zbývající vzorky kostry se spojí krátkými křivkami [7] k získání klasické jednorozměrné křivkové kostry, jak je ukázáno na Obr. 2-7(f).

4 Návrh nástroje na získání kostry polygonálního modelu

Pro získání kostry polygonálního modelu jsem vybral metodu konstruující kostru pomocí os lokální rotační symetrie (ROSA – rotational symmetry axis) v těch oblastech modelu, které se podobají obecnému válci („válcových“ částech tělesa). Metoda ROSA byla prezentována v práci [4], ze které vychází návrh nástroje na extrakci kostry a je detailně popsána v kap. 3.

Vstupem nástroje bude soubor obsahující data modelu. Jako vstupní formát modelu jsem zvolil formát binární STL. Tento formát je v současnosti podporován v mnoha softwarových balíčcích a je široce rozšířený při rychlém vytváření prototypů a modelů v průmyslu. STL formát popisuje geometrii povrchu třírozměrných těles. Existují dvě verze STL formátu - ASCII a binární, přičemž binární je běžnější, protože soubory v tomto formátu jsou při stejném obsahu podstatně menší.

Výstupem nástroje bude soubor obsahující souřadnice bodů kostry.

Platnost metody ROSA je omezena na modely objektů, které jsou složeny z částí obecně podobných válců a ze spojů těchto částí. Metoda obsahuje parametry jako tloušťka řezu, mez Mahalanobisovy vzdálenosti.

Již v průběhu studia metody ROSA jsem dospěl ke třem možným optimalizačním procesům extrakce kostry (zdůvodněným a popsáným v dále v kap. 4.1):

- rozšíření formulace lokální rotační symetrie o požadavek, aby se úhly mezi osou lokální rotační symetrie a povrchovými normálami tělesa co nejvíce blížily pravému úhlu,
- optimalizace výběru počáteční orientace řezu, která by mohla podstatně zrychlit proces extrakce,
- požadavek divergence sousedních normál v relevantním okolí.

Protože cílem této práce je vytvořit nástroj na extrakci kostry, s jeho pomocí experimentálně zkoumat rozsah platnosti metody ROSA, studovat vliv optimalizací a popřípadě nalézt optimální hodnoty parametrů extrakce, musí nástroj na extrakci splňovat následující požadavky:

- načítat vstupní soubor s daty modelu ve formátu binární STL
- umožňovat nastavení tloušťky řezu,
- umožňovat nastavení meze Mahalanobisovy vzdálenosti
- umožňovat zapínat a vypínat optimalizace tak, aby bylo možno porovnávat výsledky extrakce provedené bez optimalizace a s optimalizací
- výstup bude probíhat textového souboru, do kterého se budou zapisovat souřadnice ROSA bodů

Na vizualizaci výsledků nástroje na extrakci kostry (textový soubor se souřadnicemi ROSA bodů) bude použit další program, který bude umět zobrazovat body a vektory do grafu.

V následující podkapitole jsou podrobně popsány uvedené optimalizace metody ROSA, o které jsem metodu ROSA rozšířil.

4.1 Optimalizace extrakce kostry pomocí ROSA

Rozšíření formulace lokální rotační symetrie

Výpočet optimální orientace řezu \mathbf{v} pomocí rovnice (4) může vést k nesprávným výsledkům v případě ztráty většiny vstupních dat. Pokud např. relevantní okolí vzorku tělesa \mathbf{N}_i obsahuje pouze dva vzorky tělesa s normálami tělesa $\mathbf{n}_1=(0,707; 0,707; 0)$ a $\mathbf{n}_2=(-0,707; 0,707; 0)$, potom matice \mathbf{M} (viz rovnice (6)) má pouze jeden nenulový člen $\mathbf{M}_{11}=1/2$ a minimalizace kvadratické formy (viz rovnice (5)) se redukuje na řešení rovnice $\mathbf{v}_x^2=0$, což odpovídá libovolnému jednotkovému vektoru ležícímu v rovině $x=0$. Jedním z takových vektorů je např. $\mathbf{v}=(0; 1; 0)$. Vektor \mathbf{v} svírá jak s normálou \mathbf{n}_1 , tak také s normálou \mathbf{n}_2 úhel 45 stupňů, ačkoli bychom u lokálně válcově symetrické části tělesa očekávali, že se budou oba úhly blížit 90 stupňům (tj. úhel mezi normálou tělesa a rovinou řezu se bude blížit nule). Proto jsem změnil požadavek lokální válcové symetrie z „úhly mezi \mathbf{v} a \mathbf{n}_i mají být co nejvíce stejné“ na „úhly mezi \mathbf{v} a \mathbf{n}_i se mají co nejvíce blížit pravému úhlu“. Definoval pojem **odchylka normály tělesa od roviny řezu** (jako úhel mezi normálou tělesa a rovinou řezu), přičemž je zřejmé, že odchylku \mathbf{o} normály tělesa \mathbf{n} od roviny řezu s orientací \mathbf{v} lze vypočítat pomocí skalárního součinu vektorů \mathbf{n} a \mathbf{v} vyjádřených v ortonormální bázi

$$o = \arcsin(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \quad (10)$$

Změnil jsem postup hledání optimální orientace řezu tak, že minimalizují součet čtverců odchylek normál tělesa $\mathbf{n}(p_j)$ v relevantním okolí \mathbf{N}_i od roviny řezu s orientací \mathbf{v} .

$$\mathbf{v}_i^{t+1} = \arg \min_{\mathbf{v} \in R^3, \|\mathbf{v}\|=1} \sum_{p_j \in N_i(t)} \arcsin^2(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}(p_j)) \quad (11)$$

Nutnou podmínkou pro hledanou orientaci řezu \mathbf{v}_i^{t+1} je, že všechny parciální derivace součtu čtverců odchylek podle složek vektoru \mathbf{v} v bodě \mathbf{v}_i^{t+1} jsou rovny nule, což vede na soustavu tří nelineárních rovnic.

$$\sum_{p_j \in N_i(t)} \frac{\arcsin(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}(p_j))}{\sqrt{1 - (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}(p_j))^2}} n_k(p_j) = 0 \quad \text{pro } k = 1, 2, 3 \quad (12)$$

kde $\mathbf{n}_k(p_j)$ je k -tá souřadnice j -té normály tělesa v relevantním okolí $\mathbf{N}_i(t)$ i -tého vzorku tělesa. Tuto soustavu rovnic řeším pomocí Newtonovy iterační metody - kdy se v každé rovnici funkce na levé straně rovnice nahradí nultým a prvním členem Taylorova rozvoje této funkce okolo konkrétní orientace řezu \mathbf{v}_0 (zvolená počáteční orientace řezu). To vede na lineární soustavu rovnic pro výpočet korekce $\Delta \mathbf{v}$ počáteční orientace řezu \mathbf{v}_0 .

$$\mathbf{M} \cdot \Delta \mathbf{v} = \mathbf{F}$$

kde pro prvky matice \mathbf{M} platí

$$M_{kl} = \sum_{p_j \in N_i(t)} \left(\frac{1}{1 - (\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{n}(p_j))^2} + \frac{(\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{n}(p_j)) \cdot \arcsin(\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{n}(p_j))}{(1 - (\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{n}(p_j))^2)^{3/2}} \right) \cdot n_k(p_j) \cdot n_l(p_j) \quad (13)$$

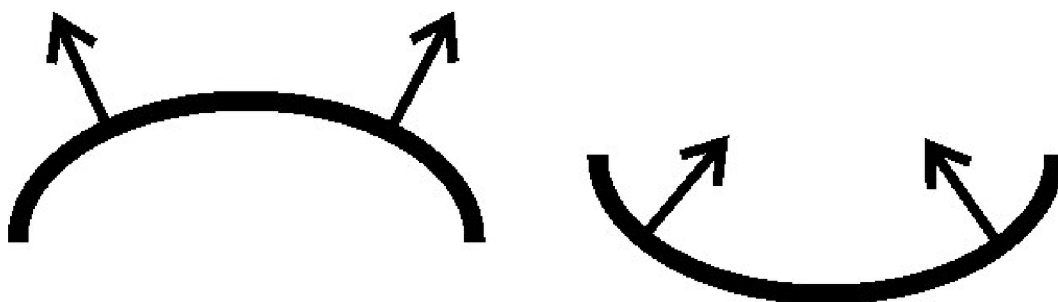
$$F_k = - \sum_{p_j \in N_i(t)} \frac{\arcsin(\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{n}(p_j))}{\sqrt{1 - (\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{n}(p_j))^2}} n_k(p_j)$$

kde $k, l = 1, 2, 3$.

Optimalizace výběru počáteční orientace řezu

Vhodný výběr počáteční orientace řezu může podstatným způsobem snížit počet iterací potřebných k nalezení optimální orientace řezu. Snahou je, aby počáteční orientace byla co nejbližší k optimální orientaci řezu. Představme si, že se nacházíme v nějakém bodě na sedlové ploše (taková místa najdeme snadno např. na pneumatice či na zahnutém válci) a zkusíme porovnávat různé řezy procházející daným bodem, přičemž pro orientaci řezu platí pouze podmínka uvedená v 3.1.1 (prvotní orientace \mathbf{v}_i^0 je vybírána náhodně z množiny normálových vektorů, které jsou kolmé k normále

vzorku tělesa p_i). Na následujícím obrázku jsou znázorněny normály tělesa v oblasti řezu pro dvě různé orientace řezu.



Obr. 4-1divergence a konvergence povrchových normál řezu

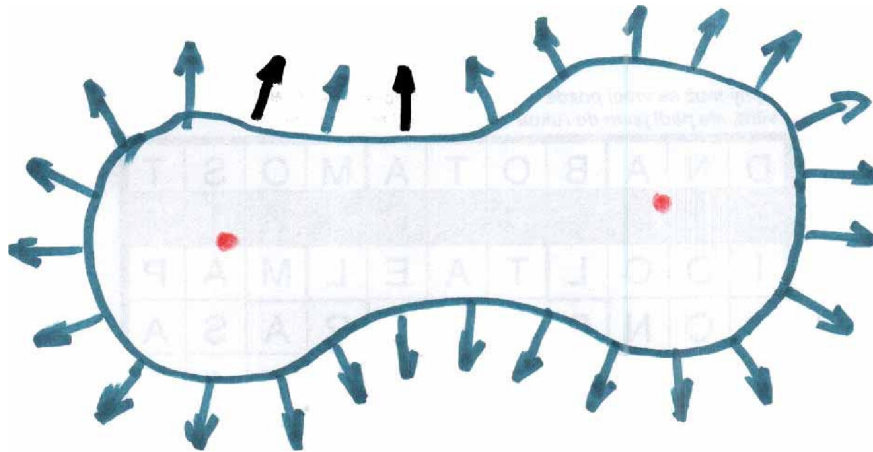
Zatímco pro první orientaci řezu (v levé části obrázku) se povrchové normály tělesa rozbíhají (divergují), pro druhou orientaci řezu (v pravé části obrázku) se povrchové normály tělesa sbíhají (konvergují). Přitom je zřejmé, že divergující povrchové normály tělesa v blízkosti řezu jsou příznakem optimální orientace řezu v oblasti s lokální válcovou symetrií (u ideálního válce je optimální řez kolmý k ose válce a povrchové normály v blízkosti řezu se paprskovitě rozbíhají nejvíce). Proto při výběru prvotní orientace vyhledám v blízkém kruhovém okolí vzorku takové dvě povrchové normály, které se nejvíce rozbíhají, a prvotní orientaci řezu potom stanovím jako jednotkový vektor kolmý k oběma nalezeným povrchovým normálám. Je zřejmé, že o rozbíhavosti (sbíhavosti) rozhoduje jak úhel mezi normálami, tak také vzájemná poloha normál. Divergence (rozbíhavost) dvou vektorů vypovídá (volně řečeno) o tom, jak rychle se vzdalují. Divergenci (rozbíhavost) d dvou normál n_1 a n_2 umístěných na povrchu tělesa v bodech p_1 a p_2 počítám jako „rychlost“ s jakou se vzájemně vzdalují body p_1 a p_2 , pokud se pohybují jednotkovou rychlostí ve směru normál n_1 a n_2 . Při této fyzikální abstrakci počítám rozbíhavost jako jejich vzájemnou rychlost promítnutou do spojnice jejich poloh, tj. v ortonormální bázi jako skalární součin jednotkového vektoru směřujícího z p_1 do p_2 s vektorem vzájemné „rychlosti“ bodu 2 vůči bodu 1 (tj. $n_2 - n_1$).

$$d(p_1, n_1, p_2, n_2) = \frac{p_2 - p_1}{\|p_2 - p_1\|} \cdot (n_2 - n_1) \quad (14)$$

Experimenty prokázaly, že v oblastech s lokální válcovou symetrií u hladkých těles lze tímto postupem nalézt prvotní orientaci řezu, která je velice blízká optimální orientaci řezu. Optimální orientace byla získána zpravidla již v prvním iteračním kroku.

Divergence sousedních normál v relevantním okolí

Výpočet pozice ROSA bodu se provádí podle rovnice (7) jako výpočet „průsečíku“ normálových přímk (vypočítá se bod, který je nejbližší ke všem přímkám) povrchových normál z relevantního okolí daného vzorku tělesa. Přitom při konstrukci relevantního okolí jsou do tohoto okolí postupně přidávány další a další „sousední“ vzorky tělesa, pokud jejich Mahalanobisova vzdálenost je menší než zvolená mez (viz rovnice (3)). I přes tuto selekci mohou být do relevantního okolí zahrnuty vzorky tělesa, které přísluší k jiné ose rotační symetrie, jak ilustruje následující obrázek.



Obr. 4-2 řez v oblasti spoje

Dva červené body reprezentují dvě různé osy rotační symetrie. Normály na povrchu tělesa v levé části obrázku se rozbíhají (divergují), jakoby „vybíhaly“ z bodu reprezentujícího levou osu symetrie. Obdobná situace je v pravé části obrázku, kde normály jakoby „vybíhaly“ z bodu reprezentujícího pravou osu symetrie. Povrchové normály ve střední části obrázku konvergují a je v principu těžké rozhodnout, ke které ose symetrie se vztahují. Tato situace může reálně nastat v oblasti spoje, viz Obr. 2-7. Proto jsem přidal další kritérium (*kritérium divergence povrchových normál sousedních vzorků*), které musí splňovat vzorky tělesa zahrnuté do relevantního okolí. Do relevantního okolí nejsou zahrnuty sousední vzorky tělesa, jejichž normály konvergují (tj. divergence spočítaná podle rovnice (14) je menší než nula).

5 Implementace nástroje na extrakci kostry pomocí ROSA

Pro extrakci kostry z polygonálního modelu jsem implementoval v jazyce C++ program využívající grafických knihoven OpenMesh, které poskytují podporu pro práci s polygonálními modely. Extrakce kostry v oblastech spojů „válcových“ částí tělesa není v této práci řešena. Program se spouští z příkazové řádky a při jeho spuštění se zadávají následující parametry:

- **jméno souboru**, které obsahuje popis polygonálního modelu; tento parametr je povinný
- **mez Mahalanobisovy vzdálenosti sousedních vzorků** – zadává se koeficient, kterým se vynásobí průměrná délka hrany modelu
- **koeficient zvětšení/zmenšení tloušťky řezu**; tímto koeficientem se násobí **standardní tloušťka řezu** – definovaná v kap. 3.1.1 jako 2,5% délky vnitřní tělesové úhlopříčky boxu, který ohraničuje model (default hodnota je 1)
- **vypnutí kritéria divergence normál sousedních vzorků řezu** (default hodnota je „zapnuto“)
- **vypnutí kritéria maximální divergence pro nastavení počáteční orientace řezu** - viz dále „Výpočet orientace ROSA bodu (optimální orientace řezu)“ v kap. 3.1.1, (default hodnota je „zapnuto“)

Program extrahuje kostru v několika následujících krocích:

- načtení modelu
- zajištění rovnoměrného pokrytí modelu
- výpočet povrchových normál ve vrcholech polygonů
- extrakce kostry z vrcholů a povrchových normál
- zápis výsledků do výstupního souboru

Ve zbytku kapitoly je popsána implementace programu a jeho výstupy.

Načtení polygonálního modelu

Program načítá polygonální model ze souboru, jehož jméno bylo zadáno při spuštění. Soubor obsahuje data modelu zapsaná ve formátu binární STL. Povrch tělesa je popsán jako nestrukturovaná množina trojúhelníků. Pro každý trojúhelník jsou uloženy jeho tři vrcholy a jeho normála směřující ven z tělesa. Pro každý vrchol a normálu jsou uvedeny tři souřadnice (v ortonormální bázi). Pokud nejsou souřadnice normály uvedeny (protože jsou nepovinné), lze je dopočítat z vrcholů trojúhelníku, protože pořadí vrcholů vyhovuje pravidlu pravé ruky. Detailní popis binárního STL formátu lze najít na internetu na adrese http://en.wikipedia.org/wiki/STL_%28file_format%29#Binary_STL. Modely složené z jiných víceúhelníků, než jsou trojúhelníky, je potřeba nejprve převést do trojúhelníkové reprezentace.

Zajištění rovnoměrného pokrytí modelu

Po načtení modelu je před samotnou extrakcí kostry potřeba zajistit, aby vrcholy trojúhelníků pokrývaly plochu tělesa přibližně rovnoměrně. Proto se nejprve vypočítá *původní průměrná délka hrany v modelu* (hrana = strana trojúhelníku) a trojúhelníky, u kterých je délka některé strany větší než *původní průměrná délka hrany modelu* jsou opakovaně děleny (půleny) tak dlouho, dokud nejsou délky jejich stran menší, než *původní průměrná délka hrany modelu*.

Výpočet povrchových normál

Pro každý vrchol modelu se vypočítá povrchová normála. Pro daný vrchol se vypočítá normála jako průměr normál trojúhelníků, které obsahují daný vrchol.

Extrakce kostry

Pro jednotlivé vrcholy modelu se počítají osy lokální rotační symetrie (ROSA). Tyto osy jsou reprezentovány jako ROSA-body, kdy pozice ROSA-bodu se nachází na ose a orientace ROSA-bodu určuje orientaci osy v prostoru. Podrobný popis postupu nalezení ROSA bodů je v kap. 3.1 a optimalizace tohoto postupu je v kap. 4.1. V obecně válcových (a tedy rotačně symetrických) oblastech tělesa, se pozice ROSA bodu nacházejí na kostře. Pozice ROSA bodů v těchto lokálně „válcových“ částech tělesa jsou nakonec pospojovány krátkými křivkami do jednorozměrné kostry tělesa.

Zápis výsledků do výstupního souboru

Výstupem programu je textový soubor, ve kterém jsou vypsány dvojice sousedících ROSA-bodů (pro každý ROSA bod jsou vypsány jeho souřadnice). Výstupní soubor se ukládá do stejného adresáře, ve kterém je vstupní soubor. Jméno výstupního souboru se vytvoří ze jména vstupního souboru přidáním koncovky „.pcls“.

Pro vytváření grafické prezentace vypočítaných ROSA bodů v podobě jednorozměrné kostry jsem vytvořil awk-skript, který z trojrozměrných údajů výše uvedeného výstupního souboru vytvoří tři soubory obsahující dvourozměrné pohledy na kostru shora, zepředu a z boku. Tyto tři pohledy na kostru zobrazují pomocí programu IJAGraph, který jsem implementoval v programovacím jazyce Java.

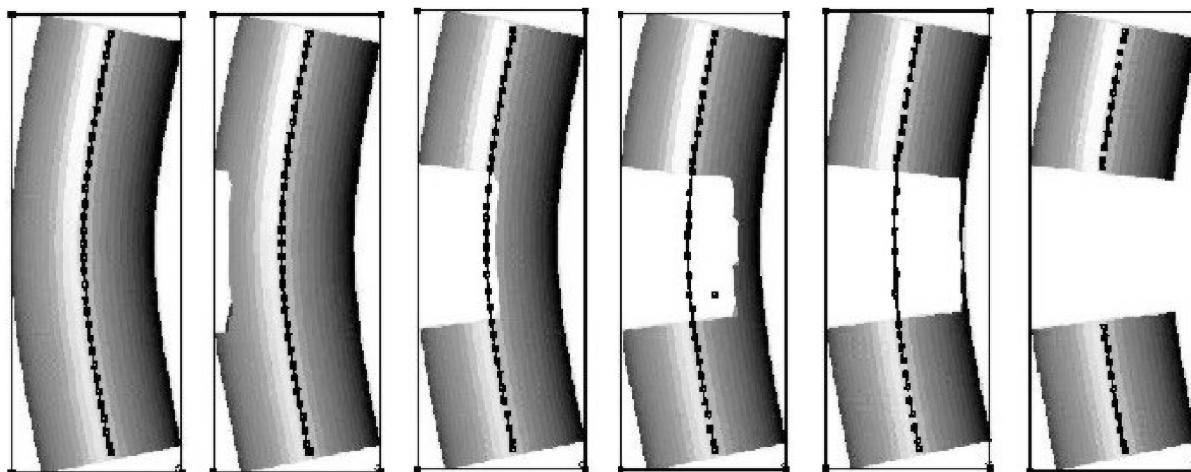
6 Experimenty

V experimentech jsem zkoumal vliv vlastností modelu (jako např. ztráta vstupních, poloměr zakřivení, tvar, zvrásnění povrchu) a vliv parametrů metody extrakce kostry (jako např. hodnota meze Mahalanobisovy vzdálenosti sousedních vzorků tělesa, tloušťka řezu, použití kriteria divergence povrchových normál sousedních vzorků tělesa, optimalizace počáteční orientace řezu apod.) na výslednou kostru.

V následujících podkapitolách jsou zkoumány vlivy jednotlivých vlastností modelu a jednotlivých parametrů metody na kostru modelu.

6.1 Vliv ztráty dat modelu

Z podstaty extrakční metody ROSA plyne, že o případné deformaci kostry rozhoduje míra lokální ztráty dat. Proto jsem připravil jednoduchý model tvořený mírně zahnutou trubicí. U tohoto modelu jsem postupně zvětšoval míru lokální ztráty dat a přitom jsem porovnával výslednou kostru, přičemž míru lokální ztráty dat jsem počítal jako podíl (počet ztracených bodů v daném místě) / (maximální počet bodů v daném místě). Výsledky pokusů ilustruje následující obrázek.

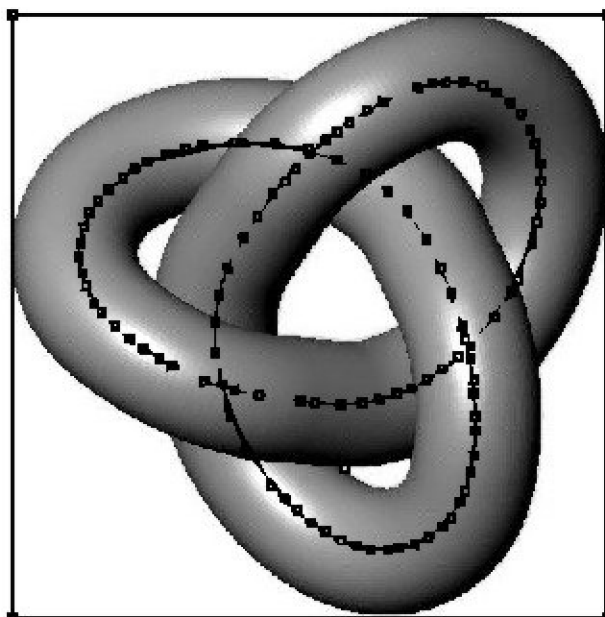


Obr. 6-1 Kostra při různé míře lokální ztráty dat

Při extrakci byly použity default hodnoty vstupních parametrů, viz 5. V pořadí odleva je lokální míra ztráty dat 22%, 53%, 71%, 87% a 100%.

Z obrázku je zřejmé, že až do cca 70% ztracených lokálních dat extrahovaná kostra odpovídá kostře nepoškozeného tělesa. Při cca 90% ztracených lokálních dat se původně prohnutá kostra v poškozeném místě napřímila. Při 100% ztracených lokálních dat je kostra v poškozeném místě přerušena.

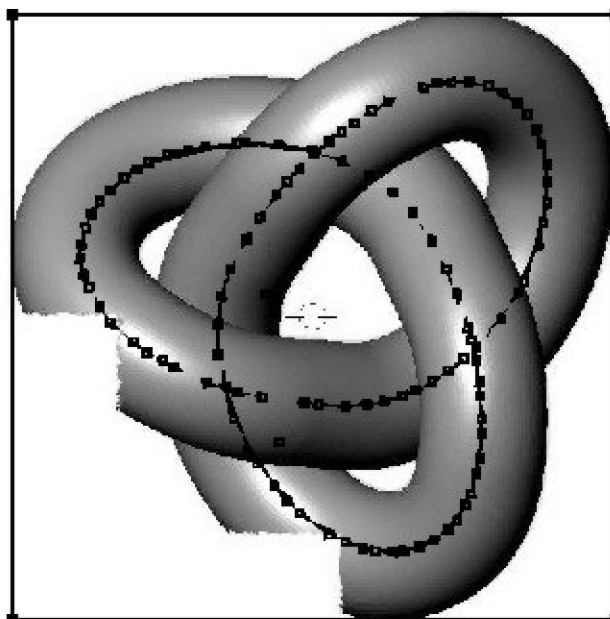
Vliv ztráty vstupních dat jsem dále zkoumal na komplikovanějším modelu uzlu, který jsem získal na internetové adrese http://www.eng.nus.edu.sg/LCEL/RP/u21/wwwroot/stl_library.htm. Tento model obsahuje 76 452 trojúhelníků. Následující obrázek obsahuje pohled na uzel shora, přičemž je do uzlu promítnuta jeho kostra.



Obr. 6-2 nepoškozený model s kostrou

Poté jsem uzel ručně na dvou místech „poškodil“, přičemž se počet trojúhelníků v jeho modelu snížil na 73 389, a extrahoval jsem jeho kostru při stejném nastavení parametrů extrakce.

Následující obrázek obsahuje pohled na „poškozený“ uzel shora, přičemž je do uzlu promítnuta jeho kostra.



Obr. 6-3 poškozený model s kostrou

Z obrázků je zřejmé, že výsledná kostra je platná i v místech, kde největší míra lokální ztráty dat dosahovala až 50%.

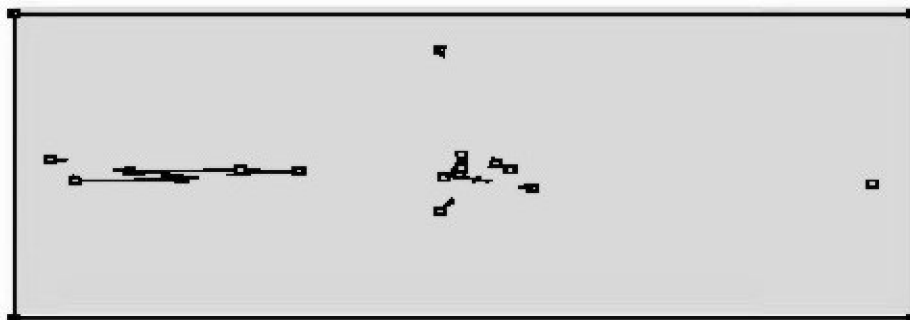
6.2 Vliv tvaru modelu

Při zkoumání vlivu tvaru modelu na výslednou kostru jsem hledal odpověď na otázku, pro které tvary objektů dává extrakční metoda založená na hledání rotační symetrie „smysluplnou“ kostru. Pro výzkum jsem vybral jednoduché tvary obsahující lokální rotační symetrii, jako kvádr a pneumatika

(toroid). Sledoval jsem počet os lokální rotační symetrie pro jednotlivé body na povrchu objektu. Dále jsem zkoumal vliv hran a vrypů na povrchu na proces extrakce kostry. Nakonec jsem sledoval deformace kostry v těch částech tělesa, ve kterých jsou jeho „válcové“ části ostře zahnuté.

Kostra kvádrů

Následující obrázek obsahuje pohled na kvádr, přičemž je do kvádrů promítnuta jeho kostra.



Obr. 6-4 Kostra kvádrů

Při extrakci byly použity default hodnoty vstupních parametrů, viz 5.

Na kostře jsou patrné dvě osy rotační symetrie – vodorovná čára uprostřed a svislá čára uprostřed. Třetí osa není při tomto pohledu patrná, protože se jeví pouze jako bod v průsečíku os. Tento výsledek se dal očekávat, protože pro povrchové body existuje více než jedna osa lokální symetrie. Přitom tyto osy opravdu vyhovují požadavkům na lokální symetrii formulovaným v rovnicích 4 a 7 – na kvádr lze pohlížet jako na velice zdeformovaný válec, protože použitá formulace rotační symetrie neklade žádné omezení na tvar průřezu tělesa – nemusí to být nutně kružnice.

V použité extrakční metodě je klíčové nalezení *relevantní množiny* bodů na povrchu tělesa, které se nacházejí v blízkosti řezu optimálně orientovaného z hlediska rotační symetrie. Přitom rovina musí procházet daným povrchovým bodem, pro který hledám lokální symetrii. Pro body takové *relevantní množiny* se pak vypočítá osa jejich rotační symetrie. Je zajímavé, že v případě vrcholů kvádrů, jsou takovou *relevantní množinou* všechny body libovolné ze tří strany, pro které je tento vrchol společný. Pro vrcholy kvádrů existují tři osy rotační symetrie, pro ostatní body existují dvě osy rotační symetrie. Každý povrchový bod kvádrů má tedy dva nebo tři svoje „obrazy“ na kostře. Tímto způsobem jsou na povrchu kvádrů navzájem svázány vzdálené body, které mají společný „obraz“ na kostře, a obráceně jsou na kostře svázány její vzdálené body, které jsou obrazy společného bodu na povrchu.

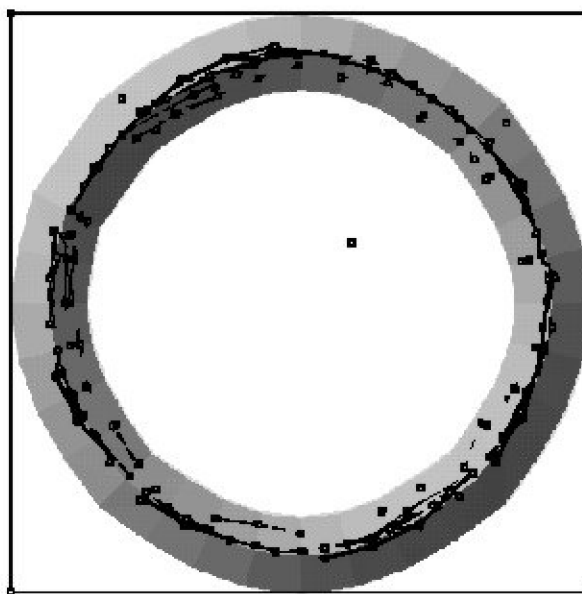
Z výše uvedeného je zřejmé, že v případě kvádrů nemá smysl aplikovat princip prostorové koherence, který říká, že blízkým vzorkům povrchu tělesa by měly odpovídat blízké vzorky na kostře (viz kap. 3.2).

Kostra koule

Oproti kvádrů, pro jehož jednotlivé povrchové body lze nalézt dvě až tři osy lokální rotační symetrie, pro každý povrchový bod koule lze nalézt dokonce nekonečně mnoho os lokální rotační symetrie, které se protínají ve středu koule. Abstrakce koule pomocí kostry složené z nekonečného počtu os však není smysluplná. Pokud abstrahujeme pouze tvar, postačovala by abstrakce pomocí poloměru.

Kostra pneumatiky

Následující obrázek obsahuje pohled na pneumatiku (toroid), přičemž je do ní promítnuta její kostra.



Obr. 6-5 Kostra pneumatiky

Při extrakci byly použity default hodnoty vstupních parametrů, viz 5.

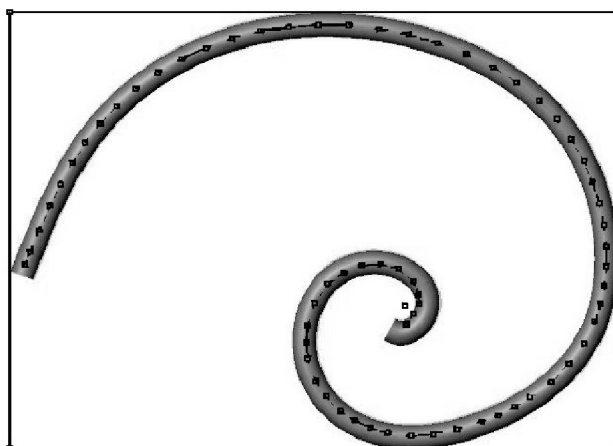
Na obrázku je patrná kostra procházející vnitřkem pneumatiky. Jednotlivými body této vnitřní kostry procházejí osy lokální rotační symetrie (jsou to tečny této vnitřní kostry). Kromě toho ale existuje ještě vnější osa rotační symetrie procházející středem kruhu pneumatiky (kolmo k obrázku). Tato vnější osa je společná pro všechny body povrchu pneumatiky. Relevantní (rotačně symetrické) množiny povrchových bodů tvoří kružnice, které by se na našem obrázku jevily jako soustředné. I taková vnější osa je „platnou“ osou rotační symetrie a může být v principu použita na doplnění chybějících vstupních dat modelu, pokud došlo k jejich ztrátě.

Tělesa se zvrásněným povrchem

Případné hrany a vrypy na povrchu zkoumaného objektu mohou způsobit (v souvislosti se zvolenou hodnotou meze Mahalanobisovy vzdálenosti sousedních povrchových bodů – viz rovnice (3)) rozpad *relevantní množiny* rotačně symetrických povrchových bodů v blízkosti konkrétního řezu na několik podmnožin. Tento rozpad může mít za výsledek „rozechvění“ kostry - pozice ROSA bodů (viz 3.1.1) jsou rozesety v blízkosti výsledné kostry. Tomu se lze bránit vyhlazením povrchu před samotnou extrakcí kostry. Míru vyhlazování je však potřeba uvážit případ od případu. Přílišné vyhlazení by mohlo vést k deformaci výsledné kostry – vyhlazení tělesa ad absurdum může změnit těleso na kouli.

Tělesa s ostře zahnutou válcovou částí

Pro výzkum kostry v „ostře“ zahnutých válcových částech jsem si vytvořil válec stočený do spirály, ve kterém se poloměr zakřivení válce plynule zmenšuje – viz následující obrázek.



Obr. 6-6 Kostra trubice stočené do spirály

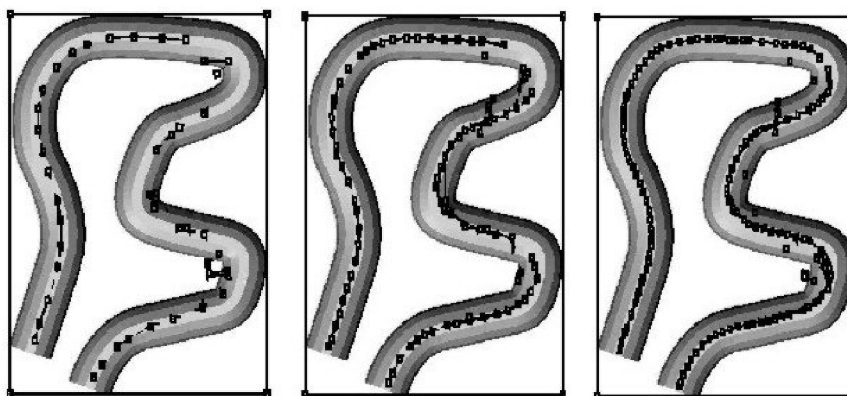
Při extrakci byly použity default hodnoty vstupních parametrů, viz 5.

Z obrázku je zřejmé, že pro „malý“ poloměr zakřivení trubice její kostra neprochází jejím středem, ale přimyká se k vnitřní straně oblouku. K tomuto přimknutí dochází, pokud je poloměr zakřivení trubice srovnatelný s tloušťkou řezu, jak je ukázáno dále v kapitole 6.3.

6.3 Vliv tloušťky řezu

Při hledání kostry tělesa se hledá směr osy lokální rotační symetrie tak, že se hledá taková orientace řezu tělesa, která maximalizuje rotační symetrii povrchových relevantních normál v pásu v blízkosti řezu (viz rovnice 11). *Tloušťkou řezu* nazývám tloušťku tohoto pásu v blízkosti řezu. *Standardní tloušťka řezu* je 2,5% délky vnitřní tělesové úhlopříčky boxu, který opisuje zkoumané těleso (viz Roviny řezu a relevantní okolí v kap. 3.1.1). *Tloušťku řezu* lze pro extrakci zvětšit nebo zmenšit pomocí číselného koeficientu, kterým se vynásobí *standardní tloušťka řezu* – viz kap. 5.

Pro studium vlivu tloušťky řezu jsem pro zohýbanou trubici provedl extrakci kostry při různých šířkách řezu, jak ilustruje následující obrázek.



Obr. 6-7 Kostra tělesa pro různé tloušťky řezu

Při extrakci levé kostry byla nastavena tloušťka řezu na dvojnásobek *standardní tloušťky řezu*, prostřední kostra byla získána při *standardní tloušťce řezu* a při extrakci kostry vpravo byla nastavena tloušťka řezu na 0,6 násobek *standardní tloušťky řezu*. Tloušťka řezu se udává relativně vzhledem

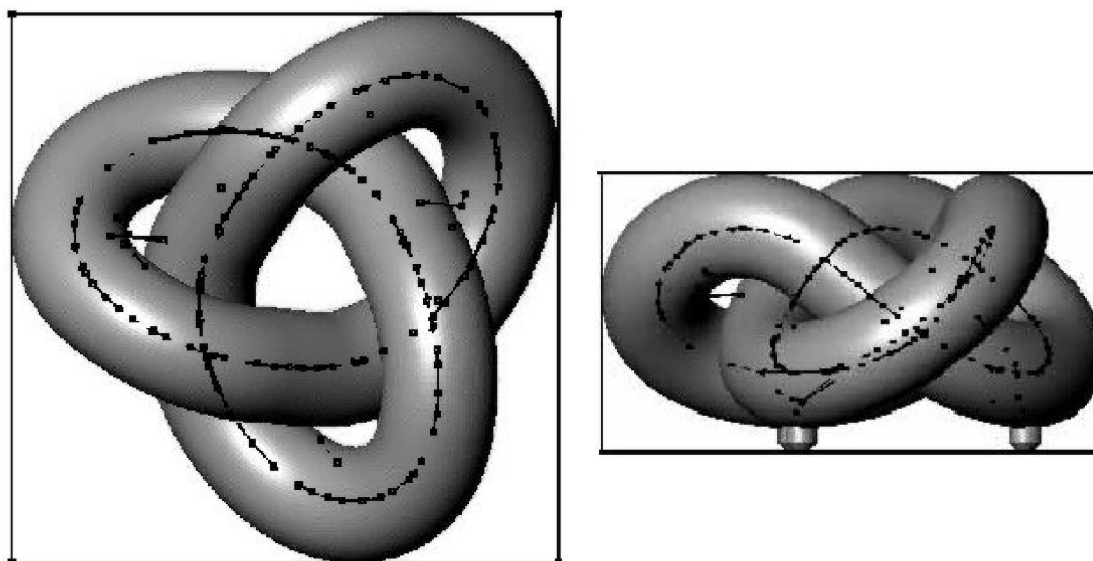
k velikosti tělesa – proto je vyjadřována v jednotce *standardní tloušťky řezu*, která je úměrná velikosti tělesa a je definována jako 1/40 délky tělesové úhlopříčky boxu opsaného tělesu.

Je zřejmé, že při větších tloušťkách řezu se kostra přimyká k vnitřní straně oblouku v „ostře“ zahnutých částech trubice. Naopak při nejmenší tloušťce řezu prochází kostra středem po celé délce trubice. K přimknutí dochází, pokud je poloměr zakřivení trubice srovnatelný s tloušťkou řezu. V tomto případě dochází k narovnávání (vyhlazování) „ostrých“ záhybů kostry vlivem zprůměrování obdobně jako při počítání plovoucího průměru funkce dochází k „ořezání“ jejich peaků.

Ostře zahnutá trubice se navíc chová jako spoj dvou válcových částí, kde je při dané tloušťce řezu obtížné (a někdy i nemožné) najít přísně válcovou symetrii povrchových normál dle rovnice (11).

6.4 Vliv optimalizace určení počáteční orientace řezu

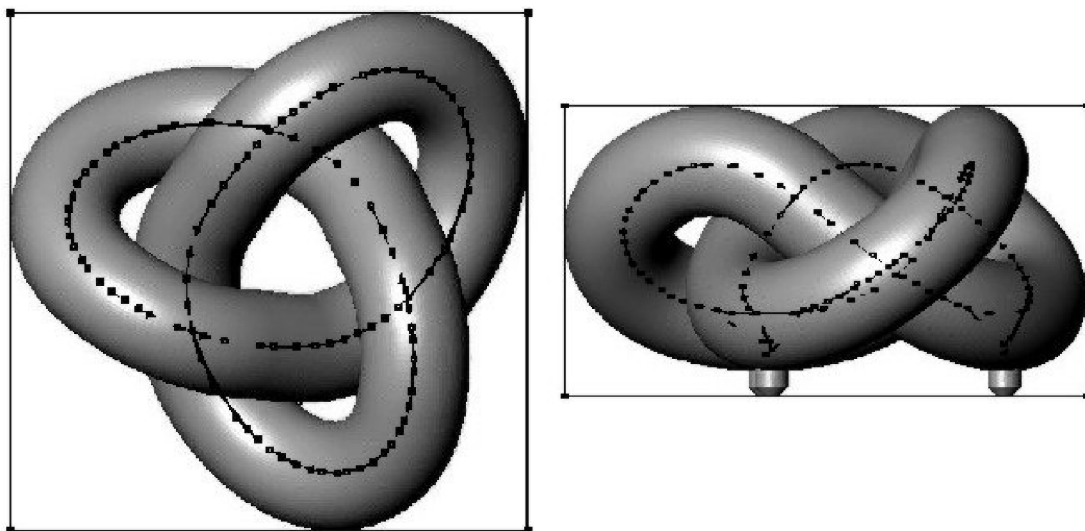
Rychlost extrakce kostry s optimalizací určování počáteční orientace řezu a rychlost extrakce bez této optimalizace jsem porovnal při extrakci kostry uzlu. Výpočet probíhal pod operačním systémem openSUSE 10.3 (i586), na počítači s procesorem AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+ pracujícím na frekvenci 1802 MHz. Po dobu výpočtu neběžela žádná jiná úloha. Na následujícím obrázku je zobrazena výsledná kostra uzlu vypočítaná bez použití optimalizace.



Obr. 6-8 Kostra uzlu získaná bez optimalizace

V levé části obrázku je uzel spolu s kostrou při pohledu shora, v pravé části obrázku je uzel spolu s kostrou při pohledu zepředu.

Na následujícím obrázku je zobrazena výsledná kostra uzlu vypočítaná s použitím optimalizace.



Obr. 6-9 Kostra uzlu získaná s pomocí optimalizace

V levé části obrázku je uzel spolu s kostrou při pohledu shora, v pravé části obrázku je uzel spolu s kostrou při pohledu zepředu.

Z porovnání obrázků kostry získané s optimalizací s obrázky kostry získané bez optimalizace je vidět, že se výsledná kostra shoduje.

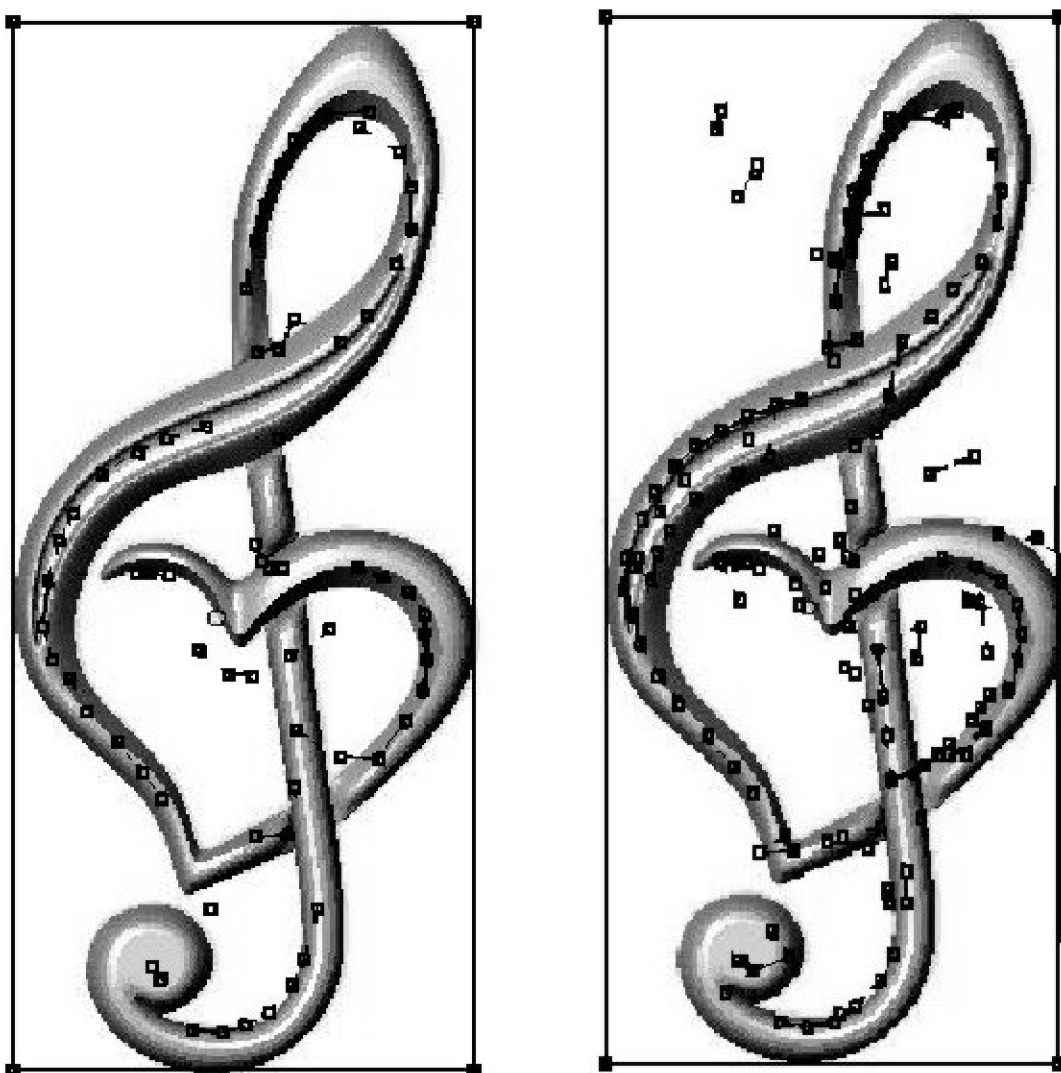
Samotná extrakce kostry (bez načítání modelu) s pomocí optimalizace trvala 584 s.

Samotná extrakce kostry (bez načítání modelu) bez pomoci optimalizace trvala 2947 s.

Extrakce s pomocí optimalizace byla tedy pětkrát rychlejší .

6.5 Vliv podmínky divergence normál při identifikaci relevantních bodů

Zkoumal jsem, jak se optimalizace extrakce pomocí kriteria divergence normál projeví na výsledné kostře (viz Divergence sousedních normál v relevantním okolí v kap. 4.1). Na modelu houslového klíče (získaného na internetu na adrese <http://cnc3dart.narod.ru/free.html>) jsem provedl extrakci kostry jak s použitím kriteria divergence sousedních normál, tak také bez něj, jak ukazuje následující obrázek.



Obr. 6-10 Získání kostry s pomocí kriteria divergence normál

V levé části obrázku je kostra získaná bez kriteria divergence normál a v pravé části obrázku je kostra získaná s pomocí kriteria divergence normál.

Je vidět, že houslový klíč vpravo obsahuje v nejtlustší části dvě „páteře“. To je způsobeno podélnou hrubší rýhou uprostřed této části klíče, takže její příčný průřez je tvarově podobný průřezu na Obr. 4-2. Použití kriteria divergence normál dává tedy reálnější kostru. Použití kriteria divergence normál je však použitelné pouze na tělesa s hladkým povrchem, u těles se zvrásněným povrchem je nelze použít.

Na obrázku je také vidět, že vypočítané ROSA body (potenciální body kostry) se v místě spojů (v místech křížení se částí houslového klíče navzájem dotýkají a v místech s „ostrým“ záhybem, který

se chová jako spoj viz kap. 6.2) nacházejí mimo houslový klíč. Takové ROSA body by se v dalších krocích extrakce kostry posunuly za použití principu prostorové koherence, algoritmu MLS a vystředování do cílové pozice uvnitř tělesa (viz kap. 3.2).

7 Závěr

V této práci byl v kapitole 4 navržen nástroj na extrakci tělesa pomocí os lokální rotační symetrie. Návrh vychází z práce [4] a byl doplněn o následující rozšíření a optimalizace:

- formulace lokální válcové symetrie byla rozšířena o požadavek pravých úhlů mezi povrchovými normálami tělesa a osou symetrie,
- v iterační metodě hledání orientace osy symetrie byla provedena optimalizace výběru počáteční orientace tak, že již tato počáteční orientace je pro obecně válcové části velmi blízká optimální orientaci,
- postup nalezení bodu osy rotační symetrie byl rozšířen o požadavek divergence povrchových normál tělesa.

Experimenty

Kapitola 6 obsahuje popis experimentů, ve kterých byl zkoumán vliv tvaru tělesa a parametrů extrakční metody na výslednou kostru.

Při experimentech bylo ověřeno, že zvolená metoda extrakce dává správné výsledky (nedeformovanou kostru) i v případě ztráty podstatné části vstupních dat modelu. Metoda je vhodná pro tělesa složená z obecně válcových částí a jejich spojů.

Optimalizací určování počáteční orientace řezu se několikanásobně zkracuje doba samotné extrakce kostry.

Postup nalezení bodu osy rotační symetrie rozšířený o požadavek divergence povrchových normál tělesa vede k přesnějšímu nalezení bodů kostry v místech, ve kterých se válcové části tělesa dotýkají.

Metoda poskytuje zkreslené výsledky v oblastech, kde jsou „válcové“ části tělesa zahnuté natolik ostře, že poloměr zahnutí je srovnatelný s tloušťkou řezu. Tyto situace lze řešit zmenšením tloušťky řezu při extrakci.

Další rozvoj použité metody extrakce kostry

Použitou metodu extrakce kostry lze dále rozvíjet ve dvou směrech. Jednak je možné rozvíjet a optimalizovat samotnou extrakci kostry a také je možné ji rozšířit tak, aby poskytovala bohatší výsledky.

V metodě je dobře formulován požadavek na minimalizaci rozptylu úhlů mezi osou a povrchovými normálami tělesa. Protože ale chybí obdobný požadavek, který by nějakým způsobem omezoval rozptyl vzdáleností povrchových bodů od osy, vyhovují současné definici rotační symetrie i takové části tělesa, které se tvarem zcela odlišují od válce. Formulace požadavku rotační symetrie by proto mohla být rozšířena tak, aby v průběhu extrakce mohly být detekovány části tělesa, které se tvarem velmi odlišují od válce.

Výsledkem použité extrakční metody je kostra tuhého (nedeformovatelného) tělesa. Kostra je složená z tuhých křivek a také vzájemné polohy křivek v oblasti spoje jsou neměnné. Přidáním kloubů do kostry by vznikla datově velice úsporná abstrakce všech potenciálních tvarů deformovatelného tělesa. Kandidátem na kloub by byly spoje „válcových“ částí, ale klouby se mohou vyskytovat i uvnitř „válcové“ části, aby ji bylo možné ohýbat. Detekce kloubů by se mohla provádět manuálně nebo také automatizovaně ze dvou po sobě blízce následujících stavů modelu. Abstrakce pomocí kostry s klouby by pak mohla být použita při identifikaci deformovatelných těles (zvířat a lidí) porovnáním obrazu tělesa s modelem.

Literatura

- [1] Yu-Shuen, W., Tong-Yee, L.: Curve-Skeleton Extraction Using Iterative Least Squares Optimization [online]. [cit. 25-4-2011]. Dostupné na URL: <<http://www.cs.nctu.edu.tw/~yushuen/data/skeleton08.pdf>>
- [2] Cornea, N., Silver, D., Yuan, X., Balasubramanian, R.: Computing Hierarchical Curve-Skeletons of 3D Objects [online]. [cit. 26-4-2011]. Dostupné na URL: <<http://www.hci.iastate.edu/REU09/pub/Main/BiologyInVRBlog/fulltext-skeleton.pdf>>
- [3] Bitter, I., Kaufman, A., Sato, M.: Penalized-Distance Volumetric Skeleton Algorithm [online]. [cit. 30-4-2011]. Dostupné na URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.137.3065&rep=rep1&type=pdf>>
- [4] Tagliasacchi, A., Zhang, H., Cohen-Or, D.: Curve Skeleton Extraction from Incomplete Point Cloud [online] [cit. 14-4-2011]. Dostupné na URL: <http://www.cs.sfu.ca/~haoz/pubs/sig09_rosa.pdf>
- [5] Giblin, P. J., Brassett, S. A.: Local symmetry of plane curves [online]. [cit. 6-5-2011]. Dostupné na URL: <<http://www.bmva.org/bmvc/1994/bmvc-94-053.pdf>>
- [6] Lehtinen, J., Zwicker, M., Turquin, E., Kontkanen, J., Durand, F., Sillion, F., Aila, T.: A meshless hierarchical representation for light transport [online]. [cit. 14-4-2011]. Dostupné na URL: <http://people.csail.mit.edu/jaakko/meshless/lehtinen2008siggraph_paper.pdf>
- [7] Lee, I.: Curve reconstruction from unorganized points [online]. [cit. 6-5-2011]. Dostupné na URL: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.103.6770&rep=rep1&type=pdf>>

Seznam příloh

Příloha 1. CD s programem

Příloha 1

CD - přeložený spustitelný program,

- ukázkový vstup
- pomocný skript k zobrazení výsledků
- program IJAGraph na zobrazení výsledků
- zdrojové soubory
- návod
- plakát prezentující práci