



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

DIGITALIZACE A MODELOVÁNÍ REÁLNÝCH POVRCHŮ PRO OBRÁBĚNÍ

ON THE DIGITIZING AND MODELING OF REAL SURFACES FOR
MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin ŠNEJDAR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Šnejdar

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Digitalizace a modelování reálných povrchů pro obrábění

v anglickém jazyce:

On the digitizing and modeling of real surfaces for machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studie digitalizace a modelování reálných povrchů pro obrábění včetně matematického popisu vybraných aplikací.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

Soudobé technologie digitalizace reálných povrchů.

Matematický popis vybraných aplikací a postupů modelování.

Aplikace digitalizace a modelování na reálném obráběném povrchu.

Závěry

Seznam odborné literatury:

- Vessaz Ch. et al. Design optimization of a 2D blade by means of milling tool path. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 6 (2013). pp. 157–166.
- Yan-Ping Lin et al. Reverse engineering in CAD model reconstruction of customized artificial joint. Medical Engineering & Physics 27 (2005), pp. 189–193.
- Bagci, E. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. Advances in Engineering Software 40 (2009). pp. 407–418.
- Motavalli, S.: Review of Reverse Engineering Approaches. Computers ind. Engng Vol. 35, Nos 1-2, (1998), pp. 25-28
- Wang Y. et al. An adaptive normal estimation method for scanned point clouds with sharp features. Computer-Aided Design 45 (2013) pp. 1333–1348.
- Bao Li et al. Robust normal estimation for point clouds with sharp features. Computers & Graphics 34 (2010), pp. 94–106.
- Bénière, R. et al. A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models. Computer-Aided Design 45 (2013) pp. 1382–1393.
- Zou, Q., Zhao, J. Iso-parametric tool-path planning for point clouds. Computer-Aided Design 45 (2013), pp. 1459–1468.
- Foucault, G. et al. Generalizing the advancing front method to composite surfaces in the context of meshing constraints topology. Computer-Aided Design 45 (2013) pp. 1408–1425.
- Gomes, R.B. et al. Efficient 3 D object recognition using foveated pointclouds. Computers & Graphics 37(2013), pp. 496–508.
- Park, M.K. Feature-aware filtering for point-set surface denoising. Computers & Graphics 37(2013), pp. 589–595.
- <http://www.mcae.cz/>

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá postupy digitalizace a modelování reálných povrchů pro obrábění. Práce zahrnuje technologické postupy a jednotlivé etapy procesu vedoucí k získání výsledného povrchu. Cílem této práce je seznámení se s procesy a postupy reverzního inženýrství, který je demonstrován na konkrétním případě s použitím programu Mathematica.

Klíčová slova

reverzní inženýrství, digitalizace, modelování, Bézierovy křivky

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the procedures of the digitizing and modeling of real surfaces for machining. The work includes technological procedures and individual phases of the process leading to acquisition of resultant surface. The aim of this work is familiar with the procedures and phases in reverse engineering, which is demonstrated on a particular example using the Mathematica software.

Key words

reverse engineering, digitizing, modeling, Bezier curves

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠNEJDAR, M. *Digitalizace a modelování reálných povrchů pro obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 48 s, 3 přílohy. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Digitalizace a modelování reálných povrchů pro obrábění** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

14.4.2014

Martin ŠNEJDAR

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto zejména panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. a panu Ing. Davidu Pratovi za cenné připomínky a rady, kterými přispěli k vytvoření této bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 SOUDOBÉ TECHNOLOGIE DIGITALIZACE REÁLNÝCH POVRCHŮ	10
1.1 Popis metody.....	10
1.2 Aspekty použití metody reverzního inženýrství	11
1.3 Aplikace reverzního inženýrství	11
1.4 Digitalizace	12
1.5 3D skenery	12
1.5.1 Základní rozdělení 3D skenerů	13
1.5.2 Další rozdělení 3D skenerů.....	19
1.6 Výběr typu 3D skeneru	19
2 MATEMATICKÝ POPIS VYBRANÝCH APLIKACÍ A POSTUPŮ MODELOVÁNÍ	20
2.1. Hustota bodového mraku	20
2.1.1 Skenovací roviny	20
2.1.2 Zaostřený mrak bodů	20
2.2 Zpracování bodového mraku	23
2.2.1 Laplaceovo vyhlazení	23
2.2.2 Zpracování pro ostré tvary a hrany	23
2.3 Metody modelování	28
2.3.1 Lineární interpolace	28
2.3.2 Bézierovy křivky.....	30
2.4 Generování sítí pro 3D modely	33
2.4.1 Pokročilá frontální metoda.....	33
2.4.2 B-Rep model a CAD model.....	35
3 APLIKACE DIGITALIZACE A MODELOVÁNÍ NA REÁLNÉM OBRÁBĚNÉM POVRCHU	37
3.1 Digitalizace objektu	37
3.2 Zpracování bodového mraku	37
3.3 Modelování profilu	39
3.4 Reálný obráběný profil	41
ZÁVĚR	43

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	47
SEZNAM PŘÍLOH.....	48

ÚVOD

S rozvojem nových technologických možností dochází k přesunu z oblasti klasického inženýrství do oblasti reverzního inženýrství. Klasické postupy vycházejí z požadavků udaných v dokumentaci a při snaze dosáhnout všech vlastností výrobku pomocí vytvoření počítačového modelu, simulaci nebo praktických zkoušek. Volba materiálu, obráběcích postupů nebo dalšího zpracování závisí pouze na předem dané znalosti požadavků zadavatele projektu.

Základem jsou informace, které jsou zpracovány a ze kterých je vytvořen reálný model. Reverzní inženýrství pracuje na opačném principu. Reverzní inženýrství pracuje s reálnými informacemi získanými metodami vizualizace. Principem této oblasti je získání bodu reálného předmětu, který chceme duplikovat. Reverzní inženýrství pracuje tedy již s předem definovaným předmětem. Cílem je získání 3D modelu, který není nutno složitými metodami znovu tvořit tak jako u klasického inženýrství, a který odpovídá více a požadovaným a skutečným parametrům. Trendem současnosti je vyvíjet stále přesnější a variabilnější výrobky, které budou vyhovovat hlavně rozměrovým a geometrickým požadavkům.

V biomedicinské sféře je tento trend považován za úspěch, neboť požadavky každého pacienta jsou individuální. Při výrobě kloubních náhrad hraje velkou roli velikost nebo tvar kloubu. Standardizované výrobky nemusí vždy přesně padnout, a proto personální náhrady mohou vyřešit tento problém. Proto se s rozvojem 3D technologií posouvá i hranice možností obrábění či zpracování výrobků a zvyšuje se poptávka po těchto druzích technických postupů.

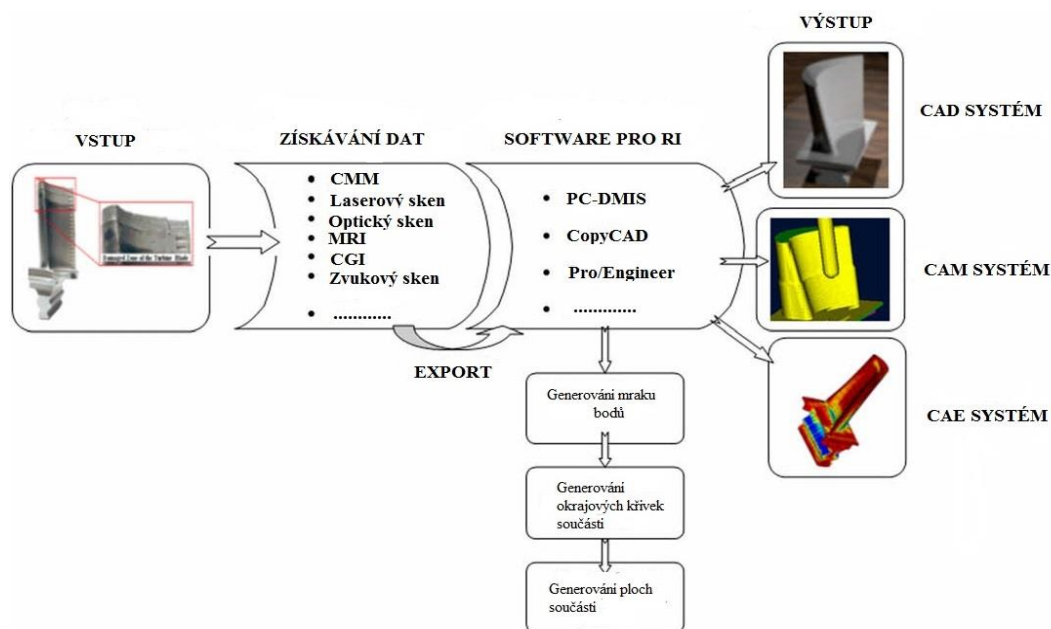
1 SOUDOBÉ TECHNOLOGIE DIGITALIZACE REÁLNÝCH POVRCHŮ

Reverzní inženýrství (z angl. *Reverse Engineering* dále jen jako RI) je důležitým odvětvím v oblasti strojního designu a výrobních technologií. S rozvojem moderních technologií je tato metoda považována za významný krok ve výrobním cyklu. Na rozdíl od klasického inženýrství, kde výrobní cyklus začíná výrobou počítačového modelu za pomoci CAD (*Computer-Aided Design*) systémů a končí generací trajektorií pro obrábění pro dosažení finální formy obrobku, tato metoda představuje novou formu designu, která postrádá existující CAD model. Pro získání 3D počítačového modelu je tedy zapotřebí projít sérií procesů, jejichž výsledkem je kopie již existujícího předmětu [1,4]. Výhody této metody jsou zkrácení času výroby a její zlevnění [2].

1.1 Popis metody

Tato metoda se sestává z pěti hlavních etap – viz obr 1 :

- 1) digitalizace předmětu,
- 2) snímání dat,
- 3) zpracování dat,
- 4) modelování povrchů,
- 5) generování CNC trajektorií.



Obr. 1 Schéma postupu při RI – podle [2].

V první a druhé etapě se jedná především o získání tzv. mraku bodů (z angl. Point cloud) skenováním předmětu. Pro tento krok je důležitý proces digitalizace. Takto

obdržený mrak bodů, jehož souřadnice jsou zobrazeny v souřadném systému přístroje, je převeden do standardizovaného formátu .stl a dále zpracováván, jehož cílem je eliminace špatně naměřených bodů. Těto etapě se také říká preprocessing. Po tomto zpracování přecházíme k modelování povrchů, k čemuž je využíváno různých metod. Volba metody závisí na konkrétním předmětu, jeho složitosti a přesnosti. Pro dosažení požadovaných křivek/povrchů jsou používány softwarové systémy jako PC-DMIS, Pro/Engineer apod. Po dosažení požadovaných povrchů dochází ke konverzi dat do CAD/CAM/CAE systémů. Výsledný souvislý model předmětu bez chyb po konverzi slouží ke generování trajektorií pro CNC stroje [1,2,3].

1.2 Aspekty použití metody reverzního inženýrství

Aplikace metody RI v průmyslovém odvětví je možná pro následující případy:

- 1) vytvoření nové součásti – nová součást vychází z již existujícího předmětu,
- 2) reprodukce již existující součásti – pro součásti, pro které neexistuje výrobní nebo výkresová dokumentace a které lze vyrobit metodou RI,
- 3) obnova poškozených součástí – součást takto rekonstruována, jež byla poškozena nebo opotřebována může obsahovat nepřesnosti v porovnání s povrchem skutečné a plně funkční součásti,
- 4) zlepšení přesnosti modelu - součást může být dokončena na základě konceptu požadavků na funkci nebo estetiku s možností využití některých lehčích materiálů (dřevo, sádra, apod.),
- 5) porovnávání dat – porovnání modelu s reálnou součástí po 3D rekonstrukci metodou RI [2].

1.3 Aplikace reverzního inženýrství

Metoda RI nachází využití v mnoha různých odvětvích, například zábavní průmysl, chemický průmysl, elektrotechnický průmysl a zejména v biomedicinských technologiích. V biomedicinské sféře je metoda považována za úspěch a krok ke zlepšení a zrychlení léčby. Největšího využití je dosaženo u kloubních implantátů. Tyto implantáty jsou často standardizované a nevyhovují všem pacientům jak rozměrovými tak i geometrickými parametry. Metoda RI vnáší možnosti individuálního řešení problému. Při využití této technologie odpovídá implantát lépe tvarovým a rozměrovým požadavkům pacienta, čímž se snižuje nutnost zásahu do kosti [2,4].

S rozvojem technologií, s rostoucími požadavky na přesnost a se všemi výhodami týkajícími se zrychlení a zlevnění výroby se aplikace metody RI začíná rozšiřovat do všech průmyslových odvětví [2].

1.4 Digitalizace

Proces digitalizace je prvním krokem RI, jehož výsledkem je obraz nebo kopie reálného předmětu ve formě počítačového modelu. Nejedná se však o klasický CAM model, ale o síť bodů odebraných z povrchu předmětu [1,2].

Digitalizace, také nazývaná trojrozměrná digitalizace, je používána v mnoha oblastech, často v případě fyzických předmětů, zejména při výrobních kontrolách. Nejedná se o běžný a klasický proces výroby modelu pro obrábění, proto tato technologie spadá do kategorie nekonvenčních procesů jako je RI [14].

Princip této metody je založen na snímání souřadnic bodů z povrchu skenovaného předmětu. Tyto body jsou snímány prostřednictvím různých snímacích systémů, které jsou často nazývány jako skenery a které jsou připojeny k počítači vybaveného systémem. Tento systém tyto body zaznamenává a poté zobrazuje v souřadném systému. Výsledkem těchto měření je shluk bodů, který je nazýván „mrak bodů“ nebo „bodový mrak“. Tento mrak lze zobrazit jako plošný model předmětu podle vybrané perspektivy nebo jako objemový 3D model, s nímž je možné dále pracovat.

Skenery se dělí do více skupin, zejména podle způsobu, jakým dochází k získávání bodů. Dělí se tedy do dvou hlavních skupin podle toho, zda zůstane skenovaný objekt zachován nepoškozený nebo bude zničen. Jsou to metody:

- destruktivní,
- nedestruktivní.

Preferovanou metodou zůstávají stále metody nedestruktivní, které umožňují opětovnou digitalizaci předmětu.

V současnosti jsou používány hlavně metody dotykové numerizace pro jejich relativní jednoduchost a cenovou nenáročnost. S rozvojem technologií a systémů dochází k rozšíření optických metod díky jejich rychlosti a nenáročné obsluze [11].

1.5 3D skenery

3D skenery slouží k digitalizaci předmětů. Tyto skenery, lišící se od sebe řadou technik a možností, se dělí do dvou kategorií:

- destruktivní,
- nedestruktivní.

Kategorie nedestruktivních technik se dále dělí do dvou podkategorií:

- dotykové,
- bezdotykové [13].

1.5.1 Základní rozdělení 3D skenerů

- 1) Nedestruktivní 3D skenery
 - A) Dotykové 3D skenery
 - a) CMM
 - b) Robotická ruka
 - B) Bezdotykové 3D skenery
 - a) Laserové 3D skenery
 - b) Optické 3D skenery
 - c) Rentgenové 3D skenery
 - d) Ultrazvukové 3D skenery
 - e) CT a MR
- 2) Destruktivní 3D skenery

1) Nedestruktivní 3D skenery

Při této technice nedochází k poškození skenovaného předmětu, což umožňuje opakování měření a skenování.

A) Dotykové 3D skenery

Tento druh 3D skenerů pracuje na principu kontaktu mezi měřícím nástrojem nazývaným sonda a měřeným objektem. Počet naměřených bodů je přímo úměrný velikosti skenovaného objektu a tím i času nutného pro všechna měření. Největším omezením je tedy velikost předmětu [13].

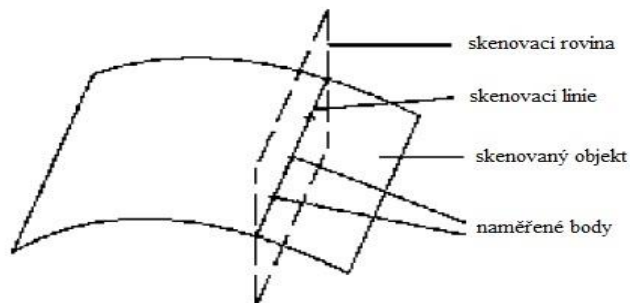
a) CMM (viz obr. 2.1)

CMM (z angl. *Coordinate-Measuring Machine*) je přístroj řízený počítačovým systémem, který ve většině případů slouží pro kontrolu výrobků, ale dá se použít i jako prostředek pro digitalizaci objektů. Přístroj je vybaven kontaktním hrotem, tzv. dotykovou sondou, a sérií senzorů. Tyto senzory tvoří referenční systém, který dokáže identifikovat polohu sondy a tím i souřadnice bodu na povrchu součásti [1]. Přístroje tohoto typu jsou schopné dosáhnout přesnosti v tisícinách milimetru [11].



Obr. 2.1 CMM Mitutoyo [20].

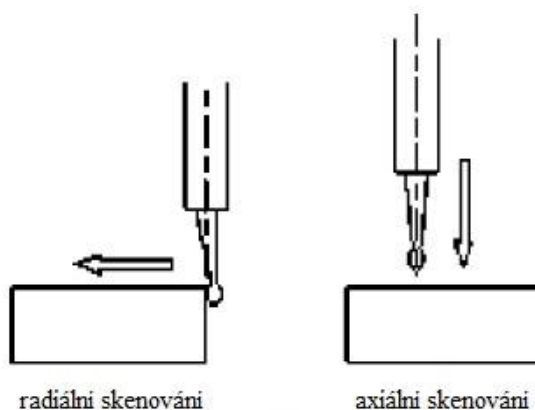
CMM přístroje skenují povrch předmětu a odebírají souřadnice bod po bodu nacházejících se na „skenovací linii“. Skenovací linie je průsečík skenovací roviny a skenovaného objektu (obr. 2.2).



Obr. 2.2 Skenovací linie – podle [4].

Rozlišují se dva hlavní typy skenování – obr. 2.3 :

- radiální,
- axiální.



Obr. 2.3 Radiální a axiální skenování – podle [4].

Pro naplánování měřících trajektorií je nutno zohlednit pozici bodů na povrchu součásti, směrové vektory sondy (pozice, ve kterých sonda zaznamená kontakt) a určit bezkolizní trajektorii měřícího nástroje pro dosažení mraku bodů požadované kvality. Výběr orientace sondy hraje důležitou roli při plánování, jelikož špatný výběr orientace sondy může znamenat, že se předpokládané body pro měření stanou nepřístupnými a tudíž pro přístroj neměřitelnými. U CMM je možné nastavit pozici sondy pod různé úhly, například 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$, $\pm 180^\circ$, apod. [4].

Výstupní data (mrak bodů) získaná měřením jsou souřadnice v kartézském souřadném systému přístroje, což znamená, že každý bod je reprezentován normálovými vektory ve směrech X, Y, Z. Avšak tato výstupní data se neshodují s nutnými požadavky

k vytvoření CAD modelu, a proto musí být použit software pro konverzi na vhodný formát, se kterým lze dále pracovat [2].

b) Robotická ruka

Robotická ruka (z angl. *Robotic arm*) je přístroj fungující na podobném principu jako CMM. Skládá se tří kloubového ramene a sondy. Souřadnice odebraných bodů se vypočítávají z natočení jednotlivých kloubů ramene. Oproti CMM je toto zařízení mobilnější a můžeme tudíž skenovat složitější struktury, neboť tří kloubový mechanismus umožňuje natočení a pohyb sondy ve všech směrech souřadného systému přístroje. Nevýhodou je nutná manuální obsluha, což může vést k nerovnoměrné hustotě rozložení bodů v mraku bodů. Přesnost této metody se pohybuje v desetinách milimetru. Výhodou je příznivější cena a zvýšená mobilita – viz obr. 2.4 [11].



Obr. 2.4 Robotická ruka Microscribe.

B) Bezdotykové 3D skenery

U těchto druhů skenerů nenacházíme kontaktní prvek, sondu, jako u předchozích skenerů. Tato metoda je rychlejší oproti kontaktním metodám a mnohdy se jedná o mobilní přístroje, tudíž jsou často využívány v terénu ke kontrolám a digitalizaci součástí, které jsou například těžce demontovatelné (potrubí) [1].

a) Laserové 3D skenery (obr. 2.5)

Tento druh skeneru pracuje na principu laserové technologie. Základem přístroje je emitor laserového paprsku a snímač. Vyslaný paprsek dopadá na povrch měřeného předmětu a odráží se do snímače. Podle směru odraženého paprsku a doby jeho letu se dopočítává poloha a vzdálenost od skeneru [13].



Obr. 2.5 Laserový skener NextEngine 3D Scanner HD [19].

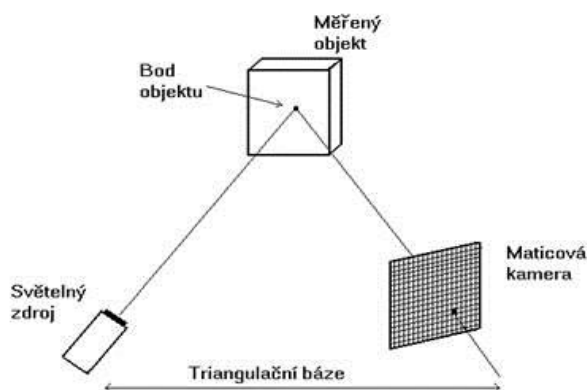
Triangulační metoda [12]

Nejpoužívanější technikou pro výpočet souřadnic je tzv. triangulační metoda. Dělíme ji na:

- aktivní,
- pasivní.

Aktivní triangulace

V případě aktivní triangulace je základem jeden světelný zdroj, měřený předmět a jeden snímač, toto uspořádání je nazýváno triangulační trojúhelník – obr. 2.6. Vzdálenost mezi světelným zdrojem a snímačem je nazýváno triangulační báze. Úhel svíraný mezi triangulační bází a světelným paprskem je neměnný, kdežto úhel svíraný bází a dopadajícím paprskem na snímač závisí na místě odrazu paprsku od předmětu. Díky těmto informacím je možné dopočítat souřadnici z. Podle druhu použitého laserové světelného zdroje jsou rozlišovány tři druhy aktivní triangulace. Pokud se jedná o paprsek, jehož výsledkem je světelný bod na předmětu, jedná se o 1D triangulaci. Je-li použit zdroj, jenž se zobrazí jako světelný pruh na předmětu, jedná se o 2D triangulaci. Třetím druhem je strukturovaná síť, která pokryje celý předmět najednou, kterou označujeme jako 3D triangulaci. 3D triangulace skýtá velkou výhodu oproti 1D a 2D metodě, neboť povrch není snímán po etapách, což je zdlouhavé a může vést k nepřesnostem.



Obr. 2.6 Triangulační trojúhelník.

Pasivní triangulace

V případě pasivní triangulace předem není známo přesné geometrické uspořádání mezi světelným zdrojem a snímačem/snímači. Jsou rozlišovány tři základní druhy pasivní triangulace. Je rozlišováno použití, buď více snímačů se známou vzájemnou orientací, více kamer se samokalibrací nebo jednu kameru se samokalibrací v různých polohách. U techniky samokalibrace nemusí být poloha kamer/kamery dopředu známa, ale její relativní pozice se odvozuje a určuje přímo z pořízených měření. Často je také užíván tzv. kalibrační předmět, jehož rozměry jsou známy. Tento předmět je skenován společně s vybraným objektem a poté jsou z jednotlivých měření a měřítka předmětu odvozeny výsledné parametry skenovaného objektu.

Nevýhodou jsou vlivy okolního prostředí, například osvětlení měřicího místa. Modernější přístroje jsou vybavovány modulátory intenzity paprsku, což vede k větší škále použití mnohdy i za složitějších podmínek. Tyto přístroje se také vyznačují vysokou cenou a při vybavení modulátory intenzity paprsku jejich cena roste.

b) Optické 3D skenery (obr. 2.7)

Tato metoda je založená na vytváření snímků pomocí kamer nebo fotoaparátů. Principem je snímání 2D snímků z různých poloh a úhlů, které jsou poté zpracovány a složeny aproximační metodou do podoby 3D modelu. K usnadnění identifikace jednotlivých částí předmětu ze snímků jsou použity orientační body vyznačené na povrchu objektu. Těchto značek se může na předmětu vyskytovat libovolné množství. Slabým místem této metody oproti laserovým skenům jsou neprůchozí díry a příliš členité povrchy, kdy dochází k promítání geometrických tvarů do 2D, čímž dochází ke zkreslení [12,13].



Obr. 2.7 Optický skener Atos II [11].

c) Rentgenové 3D skenery

Základním principem tohoto skenování jsou RTG paprsky, které prosvítí objekt, tudíž pracují na stejném principu jako klasické zdravotnické rentgeny. Na rozdíl od skenerů používaných ve zdravotnictví se používají RTG paprsky o vyšší intenzitě. Vyšší intenzita dovoluje získávat informace i o vnitřních strukturách, proto jsou často využívány u objektů s komplexními dutinami [16].

d) Ultrazvukové 3D skenery

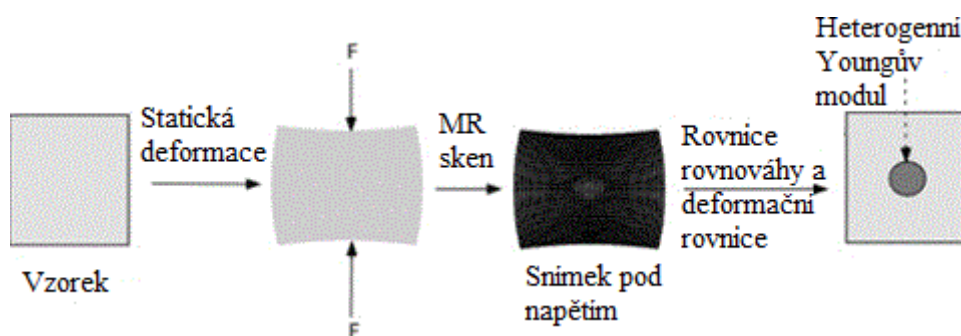
Skenery založené na metodě ultrazvukové technologie se skládají z ultrazvukové sondy, která vysílá ultrazvukový signál, a systému čidel. Signál je vyslán ze sondy do objektu, kde se šíří až k čidlům, které jej zachycují. Jelikož se jedná o zvukové vlny, může mezi nimi docházet k interferencím a tím zkreslení nebo znehodnocení výsledků, proto jsou čidla rozmístěna na speciální konstrukci. K získání prostorových souřadnic musí být signál dekodován. Nevýhodou této metody je její přesnost pohybující se zhruba od 0,3 do 0,5 mm [13].

e) CT a MR skenery

CT (z angl. *Computed Tomography*) a MR (z angl. *Magnetic Resonance*) jsou metody zejména používané, podobně jako rentgenová metoda, pro skenování dutin a komplexních vnitřních struktur.

Při použití CT jsou zdroj a detektor imobilní, zatímco skenovaná součást rotuje kolem určených os, čímž jsou získány projekce. Z těchto projekcí jsou poté rekonstruovány obrazy, sloužící k digitalizaci předmětu. S rozvojem technologií a zlepšením výkonů počítačových systémů se tato metoda stává výkonným nástrojem digitalizace. Její přesnost umožňuje pracovat s přesností několika micrometrů [17].

MR technologie umožňuje skenování předmětů a jejich mechanických vlastností. Požadavky na vybavení jsou vysoké, neboť je zapotřebí použití silných magnetů tvořících homogenní magnetické pole. Pro zvýšení výkonu těchto magnetů je zapotřebí chlazení tekutým dusíkem nebo héliem, pro udržení optimálních vlastností a výkonu. Tímto je však omezeno použití těchto skenerů. Výhodou je možnost zjištění některých deformačních charakteristik materiálu, například modulu pružnosti v tahu (Youngův modul) – viz obr. 2.8 [18].



Obr. 2.8 Určení Youngova modulu – podle [18].

2) Destruktivní 3D skenery

Při této technice digitalizace dochází ke zničení skenovaného objektu. Proces začíná přípravou objektu, který je pokrytý materiálem poskytujícím lepší kontrast při zpracování 2D snímků. Poté je z něj vyčerpán vzduch a vakuum způsobí, že kontrastní materiál pronikne do všech dutin. Takto upravený objekt je přemístěn do frézovacího stroje vybaveného optickým systémem, kamerou nebo fotoaparátem. Poté jsou odfrézovány velmi tenké vrstvy materiálu v řádech setin až desetin milimetru, při kterých se zaznamenávají 2D snímky. Takto získaná data s přesností několika setin milimetru (záleží na rozlišení snímáčího zařízení) jsou odesílána do počítače, kde jsou zpracována a exportována do nejběžněji používaných formátů (IGES, STL, DXF, ASCII, Stratasys, ISO G-Code). Tento postup dovoluje skenovat i vnitřní struktury objektu. Podmínkou je dobrá obrobitelnost materiálu skenovaného předmětu. Tato technika umožňuje skenování více objektů najednou, nicméně skenované předměty musí být ze stejného materiálu. Omezujícím faktorem je velikost objektu, s velikostí roste i doba nutná ke skenování [15].

1.5.2 Další rozdělení 3D skenerů

Skenery lze dále rozdělit podle mobility na [13]:

- stacionární,
- mobilní.

Stacionární skenery

Stacionární skenery jsou nemobilní systémy, které vyžadují, aby k nim byl skenovaný objekt přepraven. Jedná se například o CMM, CT, MR skenery. Možnosti těchto přístrojů jsou omezeny velikostí a složitostí digitalizovaných předmětů.

Mobilní skenery

Tyto skenery se vyznačují svou mobilitou a jejich možným transportem, což dovoluje digitalizaci větších objektů. Jedná se například o robotickou ruku a některé typy RTG skenerů.

1.6 Výběr typu 3D skeneru

V závislosti na vlastnostech měřeného povrchu a druhu materiálu je nutné užití technologií, při kterých je obdržen nejlepší výsledek. Při výběru kontaktní nebo bezkontaktní metody hrají tyto vlastnosti důležitou roli. Laserové technologie jsou nevhodné pro lesklé nebo tmavé povrchy, pokud nejsou použity techniky nasvícení nebo použití speciálních povlaků a nátěrů. Z těchto důvodů jsou v RI používány kontaktní skenery pro přesnou digitalizaci vyžadující delší dobu měření. V důsledku jsou kontaktní metody často přesnější, avšak pomalejší než metody bezkontaktní a naopak [2,4].

2 MATEMATICKÝ POPIS VYBRANÝCH APLIKACÍ A POSTUPŮ MODELOVÁNÍ

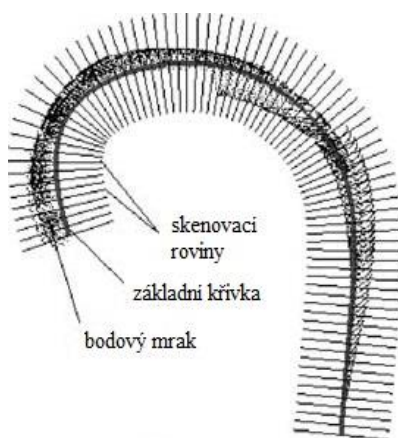
Druhým krokem RI je zpracování obdrženého bodového mraku. Tento mrak bodů není nikdy přesnou kopií skenovaného předmětu, ať už je zvolena jakákoliv metoda digitalizace, kontaktní či bez kontaktní, vždy se vyskytnou chybně naměřené body nesouhlasící s předpokládaným originálem. Tyto chybné body jsou vázány na limity skenovacího nástroje a způsobu/metody, která je použita pro digitalizaci. Tyto body také negativně ovlivňují proces rekonstrukce 3D modelu. Proto je zpracování dat, kdy jsou chybné body identifikovány a odstraněny, důležitým krokem pro zlepšení přesnosti a věrnosti modelu [4].

2.1. Hustota bodového mraku

Hustota bodového mraku ovlivňuje kvalitu rekonstruované součásti. Čím větší počet bodů, tím lepší přesnost a věrnost bodového mraku vůči skenovanému objektu.

2.1.1 Skenovací roviny

S ohledem na složité struktury skenovaných objektů nemohou být modely aproximovány jediným matematicky definovaným povrchem pro jednu sérii bodů, proto jsou objekty často rozděleny na více lineárních bodových mraků [4]. Tyto lineární bodové mraky se nacházejí ve skenovacích rovinách. Skenovací roviny jsou naskládány za sebou na předem určené základní křivce (obr. 3.1). Čím je větší hustota rovin na této křivce, tím více lineárních bodových mraků je získáno. Získ většího počtu bodů v jednotlivých rovinách lze provést pomocí zkrácení kroku (vzdálenosti) mezi jednotlivými měřeními body.



Obr. 3.1 Lineární bodové mraky – podle [4].

2.1.2 Zaostřený mrak bodů

S rozvojem hardwarových technologií se vyvíjí i optické systémy, které by měly v ideálním případě zachycovat 3D data a tím umožnit získávat i informace nejen o délce a šířce objektů, ale i o jejich hloubce. V současnosti tyto systémy stále pracují na snímání 2D

obrazů, přičemž získávání 3D obrazů nabízí lepší informace o geometrických a tvarových vlastnostech skenovaného objektu [9].

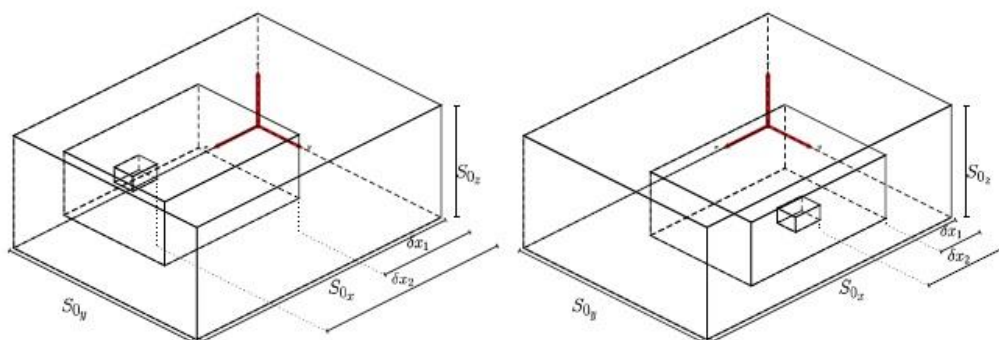
Přestože množství těchto dat poskytovaných 3D bodovými mraky je výhodné, jsou kladeny vysoké požadavky na výpočetní algoritmy, které by tyto informace dokázaly zpracovat, což z hlediska na časovou náročnost není možné. V zájmu zrychlení získávání informací pomocí 3D optických skenů je použita technologie pohybující se fovey (fovea - část lidského oka, kde je vidění nejostřejší) pro zjednodušení 3D dat a zrychlení procesu. Experimentální výsledky dokazují, že tento postup umožňuje zrychlení výpočetních procesů při zachování stejných výsledků.

Tato technika pracuje na stejném principu jako lidské oko. Hustota bodů je větší tím, čím jsou tyto body blíže fovey, a dále klesá se zvětšující se vzdáleností od fovey. Nastavováním vzdálenosti bodů objektu od fovey je možné snížit délku výpočetních procesů a zároveň snížit dostatečně hustotu bodů v okolí fovey.

2.1.2.1 Gomezův model

Tento 2D model je založen na transformaci jednoho obrazu na sérii menších obrazů se stejnými rozměry, ale rozdílným rozlišením. To znamená, že menší obrazy jsou poskládány do série úrovní. Výsledkem je sada obrazů, které dávají dohromady zaostřený obraz.

V případě 3D modelu se nepoužívají soustředné 2D obrazy, zaostřený mrak bodů je obdržen z původního mraku bodů za pomoci soustředných schránek, kde každá schránka odpovídá jedné úrovni. Jeden z rohů vnější schránky leží na specifických souřadnicích, které nám definují 3D souřadný systém (viz – obr. 3.2).



Obr. 3.2. Zaostřený tří úroňový model pro různé polohy zaostření.

Nejmenší schránka ležící uvnitř ostatních schránek se nazývá fovea, jedná se tedy o místo, kde je hustota bodů největší. S každou větší schránkou hustota bodů klesá, až po vnější schránku, která má nejmenší hustotu bodů. Všechny body ležící mimo vnější schránku jsou považovány za chybné a jsou odstraněny.

2.1.2.2 Nárůstový faktor zaostření

Pro určení nárůstového faktoru zaostření je nutné nejdříve definovat schránky. Je dáno $m + 1$ schránek o velikosti $S_k \in R^3$, kde $k = 0, 1, \dots, m$, o bodových hustotách $d_0, \dots, d_m$. Hustota bodů každé vnitřní schránky je dána lineární interpolací mezi d_0 a d_m . Dalším krokem je určení polohy fovey F . Podle konvencí se počátek souřadného systému fovey nachází ve středu největší schránky. Tímto způsobem lze dopočítat $F = F' - \frac{S_0}{2}$, kde F' je fovea v souřadném systému modelu.

Posunutí každé schránky $\sigma_k \in R^3$ je dáno lineární interpolací podle vzorce (1) pro $m > 0$:

$$\sigma_k = \frac{k(S_0 - S_m + 2F)}{2m} \quad (1)$$

Velikost každé schránky k -té je dáno lineární interpolací podle vzorce (2):

$$S_k = \frac{kS_m - kS_0 + mS_0}{m} \quad (2)$$

Nárůstový faktor zaostření $G = (S_x, S_y, S_z) \in R^3$, kde S_x, S_y, S_z jsou stupnicové faktory v jednotlivých osách x, y, z . Díky tomuto faktoru můžeme určit omezení jednotlivých úrovní. Každá úroveň je omezena maximem mezi $\sigma_k - G$ a počátkem souřadného systému $(0,0,0)$ pro minimální velikost a minimem mezi $\sigma_k + S_k + G$ a S_0 pro maximální velikost.

Nárůstový faktor fovey zvyšuje hustotu bodů zvětšováním objemů úrovní.

2.1.2.3 Vzorkování mraku bodů

Dalším krokem po výpočtech jednotlivých bodových mraků je tzv. vzorkování.

Vzorkování slouží ke změně hustoty bodových mraků. Nabízí se dvě možnosti:

- vytvoření jednoho mraku spojením všech bodových mraků,
- vzorkování každého mraku na každé úrovni zvlášť.

První možnost však vede ke geometrickému zkreslení objektu, jelikož vzorkovací algoritmus mění souřadnice některých bodů. Proto je řešením druhá možnost, a to spojení všech bodů na určité úrovni. Tento proces zajistí, že se body na nižších úrovních nespíchají s úrovní vyšší. Pro výpočet se používá jednoduchý algoritmus (obr. 3.3):

```

Input: point cloud  $\{P\}_{in}$ 
Input: minimum density parameter  $d_0$ 
Input: maximum density parameter  $d_m$ 
Output: point cloud  $\{P\}_{out}$ 
Output: point cloud vector  $\{L\}$  of size  $m+1$ 
// Foveated Point Cloud
foreach level  $k$  do
     $d_k = d_0 + k(d_m - d_0)/m$ ;
    downsample  $\{P\}_{in}$  into  $\{L\}_k$  using  $d_k$  as parameter;
    foreach point  $p$  of  $\{L\}_k$  do
        if  $p$  is inside box  $k$  and is not inside box  $k+1$  then
            add  $p$  to point cloud  $\{P\}_{out}$ ;
        end
    end
end

```

Obr. 3.3 Algoritmus pro oddělení jednotlivých bodových mraků.

Vstupním parametrem je bodový mrak určité úrovně, maximální a minimální hustota bodů, výstupními parametry jsou spojený bodový mrak a vektory určený bodový mrak. Algoritmus poté zajistí, že všechny vyhovující body pro danou úroveň jsou zařazeny do výstupního bodového mraku.

Takto vzniklý zaostřený bodový mrakem je určen pro další zpracování.

2.2 Zpracování bodového mraku

Zpracování bodového mraku je základním problémem pro proces modelování povrchů. I přes znatelný pokrok v skenovacích technologiích, jsou stále bodové mraky ovlivněny chybami skenování. Tyto chyby je proto důležité eliminovat. Ne všechny metody jsou použitelné, neboť některé nezaručují tangenciální spojitost pro přechodové plochy. Je proto nutné vždy vybrat vhodnou metodu pro konkrétní případ [10].

2.2.1 Laplaceovo vyhlazení

Jednou z prvních metod zpracování bodového mraku je Laplaceovo vyhlazení. Pro každý bod lze dopočítat novou pozici v závislosti na poloze sousedních bodů. Pozici nově vytvořeného bodu lze vypočítat podle vzorce (3):

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad (3)$$

V tomto vzorci je N počet okolních bodů pro bod x_i , x_j jsou pozice okolních bodů a $\bar{x}_i$ je pozice nového bodu [21].

Tuto metodu lze ještě vylepšit za pomoci váhových průměrů sousedních bodů, tzn. některé sousední body ovlivňují více polohu nového bodu [10].

2.2.2 Zpracování pro ostré tvary a hrany

Zatímco metoda Laplaceova vyhlazení je vhodná pro rovné plochy a povrchy, u přechodových ploch je neaplikovatelná. Při použití u dvou na sebe vzájemně kolmých ploch by se nově vzniklý bod nacházel někde v prostoru mezi těmito dvěma plochami. Tento bod by tedy byl nepoužitelný a mohl by působit jako rušivý element při tvorbě ploch a povrchů. Proto bylo vyvinuto několik metod sloužících k vytvoření takových bodů u přechodových ploch, které jednak nenarušují geometrickou strukturu objektu a navíc jejich poloha zaručuje relativní ostrost hran, díky čemuž nedochází ke zkreslení a zaoblování ostrých hran objektu.

2.2.2.1 Robustní a regresivní normálový odhad [5]

Normálový odhad neupraveného bodového mraku byl poprvé prozkoumán H. Hoppem jako první krok jejich algoritmu pro rekonstrukci povrchů. Tato metoda předpokládá, že základní povrch je na všech místech hladký a blízké okolí každého daného bodu může být aproximováno rovinou, která se dá dopočítat pomocí metody PCA (*Principle Component Analysis*), která je založena na výpočetní metodě nejmenších čtverců. Vzhledem k rušení, jehož příčinou jsou chybné body, nelze používat blízká okolí

bodů, ale je nutné pracovat s širším okolím bodu. Toto může vést k přílišnému vyhlazení a zkreslení výsledku.

Tato metoda však vyžaduje ruční nastavování parametrů. V praxi je proto nutné postupovat procesem pokus-omyl, dokud není dosaženo uspokojivých výsledků. Zvláště v případech, kdy není známa hladina rušivých bodů nebo vzorkovací bodová hustota. Pokud vyhlazení přesáhne určitou úroveň během prvotního odhadu, tato metoda neumožňuje spolehlivě pokrýt nespojitosti modelu.

Regresivní normálový odhad

Jedná se o jednu z prvních metod normálového odhadu. Pro $\forall p \in P$, kde P je množina všech bodů bodového mraku, lze metodou PCA lze vytvořit lokální rovinu pro n jeho blízkých sousedních bodů. Normála v tomto bodě p je vlastní vektor odpovídající nejmenší vlastní hodnotě kovarianční matice.

Kovarianční matice je čtvercová symetrická matice značená $\Sigma_x(n, n)$. Její hodnota se vypočítá podle vzorce (4):

$$\Sigma_x = E[(x - E(x)) \cdot (x - E(x))^T] \quad (4)$$

kde $E(x)$ je vektor středních hodnot jednotlivých prvků vektoru x , podle definice $E(x) = (E(x_1), \dots, E(x_n))^T$ [22].

Existuje tzv. „vážená“ verze tohoto odhadu, kdy jsou všem sousedním bodům bodu p přiřazeny váhové hodnoty.

Robustní normálový odhad

Nový robustní model slouží k přímému určení normálového odhadu. Pojem robustní v tomto případě znamená, že touto metodou lze eliminovat rušení a chybné body, které vznikly při získávání těchto dat.

2.2.2.2 Robustní lokální tečná rovina [5]

Skupiny sousedních bodů (sousedství) mohou být aproximovány jedinou rovinou za pomoci různých metod. Tyto roviny, určené těmito sousedstvími, mohou tvořit nebo být součástí ostrých hran a tvarů. Rozsáhlé použití sousedství slouží k odhadování lokálních vlastností a k nalezení lokálních tečných rovin.

Určení těchto lokálních tečných rovin pro každý bod se děje ve dvou krocích. První krok spočívá v odhadu rozsahu rušení v lokální oblasti bodu p , druhý krok spočívá v užití robustního odhadu pro dosažení nejlepší tečné roviny pro bod p v závislosti na lokálním rozsahu rušení určeného v předchozím kroku. Tyto dva kroky jsou kombinací procesu odhadu rozsahu rušení pro MSSE (*Modified Selective Statistical Estimator*) a procesu výběru nejlepší struktury pro ASKC (*Adaptive Scale Kernel Consensus*). Jedná se tedy spíše o statistickou metodu, kdy je podmínkou pro aplikaci tohoto odhadu normální (Gaussovo) rozdělení rušení a chybných bodů v modelu.

2.2.2.3 Metoda adaptivního pod-sousedství [10]

Zpracování neupraveného bodového obsahujícího charakteristické ostré tvary a hrany může způsobit zkreslení těchto tvarů v přítomnosti velkého rušení, což může vést k tangenciálním nespojitostem modelu. Tyto chyby závisí na lokální plošné aproximaci, na normálovém průměru sousedních bodů při špatném výběru sousedství nebo na nepředvídaných chybných výsledcích předchozího zpracování pro některé druhy procesů.

Základním pilířem této metody je robustní normálový odhad. Pracuje se zde se sousedstvím nazývaným též adaptivní pod-sousedství ASN (*Adaptive Sub-Neighborhood*), které obsahuje pouze body patřící do stejné struktury, které je poté aproximováno lokální tečnou rovinou užitím tohoto pod-sousedství. Díky tomuto postupu je zabráněno vyhlazování a zaoblování ostrých tvarů a hran.

Prvním krokem je tedy určené robustního normálového odhadu. Klíčovou myšlenkou je obdržení většího počtu normál pro body ležící v nespojitých oblastech, než obdržení jedno zprůměrovaného normálového vektoru pro všechny body. Druhým krokem je výpočet normálových vektorů pro jednotlivé body zvlášť za pomoci sad ASN.

Normálový tensor T

Lokální tečnou rovinu lze aproximovat pomocí vektorového součinu jednotkového vektoru $\hat{v} = \frac{(q-p)}{\|q-p\|}$ spojujícího dva body p a q . Normálový prostor mezi těmito body a jejich sousedstvím se spočítá jako rozdíl tangenciálního prostorového tensoru $\hat{v}\hat{v}^T$ a celoplošného tensoru τ . Normálový tensor $T(p)$ pro jakýkoliv bod lze tedy obdržet jako sumu všech normálových prostorů spojených vybraným sousedstvím podle vzorce (5):

$$T(p) = \sum_{q \in N(p)} \frac{1}{\rho_q(p)} \mu_q(p) (\tau_{3 \times 3} - \hat{v}\hat{v}^T) \quad (5)$$

kde $\tau_{3 \times 3}$ je jednotková matice 3×3 and $N(p)$ je k -té nejbližší sada sousedství pro bod p v dosahu 4δ , kde δ je průměrná vzdálenost mezi jakýmkoli bodem a jeho nejbližším sousedním bodem. $\rho_q(p)$ je poměr lokální hustoty bodů v okolí bodu q a maximální hustoty $N(p)$ a lze jej vyjádřit podle vzorce (6):

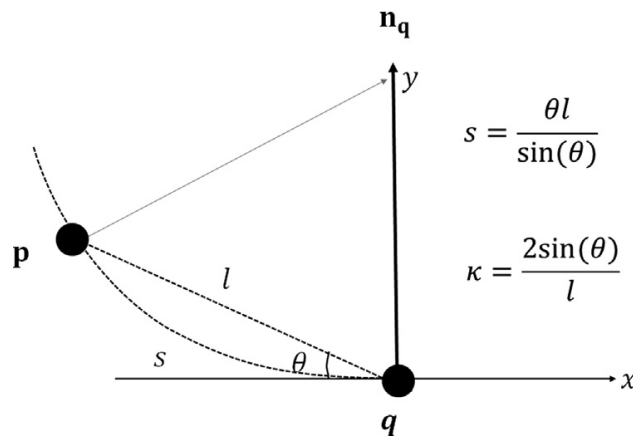
$$\rho_q(p) = \frac{\hat{f}(q)}{\max_{q_i \in N(p)} \hat{f}(q_i)} \quad (6)$$

kde $\hat{f}$ je jádrový odhad lokální hustoty KDE (*Kernel Density Estimation*), definován podle vzorce (7):

$$\hat{f}_n(x) = \frac{1}{nh_n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-X_i}{h_n}\right) \quad (7)$$

kde $K(x)$ je jádro, $X = (X_1, \dots, X_n)$ s hustotou pravděpodobnosti $f(x)$, n počet hodnot X a h_n vyhlazovací parametr. h_n jako volitelný parametr ovlivňuje výsledek a proto je nutné jej dobře zvolit. Pro výběr hustoty rozložení pravděpodobnosti existuje řada možností, například Gaussovo, Laplaceovo, Cauchyovo apod. [23].

μ_q je chybová funkce, která definuje váhu vlivu podobnosti struktury za pomoci části kruhového oblouku o délce s a zakřivení κ - viz obr. 3.4.



Obr. 3.4 Část kruhového oblouku.

μ_q lze vypočítat podle vzorce (8):

$$\mu_q = \exp\left(-\frac{s^2 + c^2}{\sigma^2}\right) \quad (8)$$

kde c vyjadřuje vliv zakřivení a vypočte se $c = (-16\log(0.1) \times \sigma) / \pi^2$, σ je experimentální hodnota pro rozsah sousedství. Normálový vektor n_q lze jednoduše získat metodou PCA.

Prediktory

Prediktory jsou body sloužící k odhadu pozice nového bodu. K jejich výpočtu je nutno projít sérií výpočetních procesů.

Předpokladem pro výpočet je pohyb po lokální hladké křivce. Lokální zakřivení je definováno jako velikost změny poměru tečen při pohybu po této křivce (9):

$$\kappa = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\varphi}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\varphi}{\varphi r} = \frac{1}{r} \quad (9)$$

kde φ je úhlová změna tečny mezi dvěma body, s je délka kruhového oblouku a r je poloměr zakřivení této křivky.

Jestliže je κ zakřivení mezi dvěma body, poté tedy oba body leží na hladké křivce γ o zakřivení κ .

Pokud je předchozí hypotéza potvrzena, další krok spočívá v promítnutí bodu p na hladký povrch γ , který je definovaný lokálním zakřivením mezi body p a q . Poté promítnutí $\Pi_\gamma(p)$ bodu p do této roviny γ lze získat posunem p po jeho normálovém vektoru n_p podle definice (10):

$$\Pi_\gamma(p) = p + d n_p \quad (10)$$

kde d podle definice (11):

$$d = \frac{(q-p) \cdot n}{\cos \theta} \quad \text{kde } \theta = \frac{\varphi}{2} \quad (11)$$

Pro nalezení ideálního bodu p' je využito kolmosti mezi normálou n a tečnou $(q - p')$ a podle definice (12):

$$\begin{cases} n_1 \cdot (q_1 - p') = 0 \\ \dots \\ n_k \cdot (q_k - p') = 0 \end{cases} \text{ pro } q_k \in N_a(p) \quad (12)$$

kde N_a je ASN a $n_i = \frac{n_p + n_{q_i}}{\|n_p + n_{q_i}\|}$.

Pro zjednodušení výpočtu (12) je použita metoda minimalizace energie systému pro bod p . Tuto metodu lze definovat podle vzorce (13):

$$E(p) = \int_{q \in N_a(p)} W_c(\|p - q\|) \psi(\|I_\gamma(p) - p\|) dq \quad (13)$$

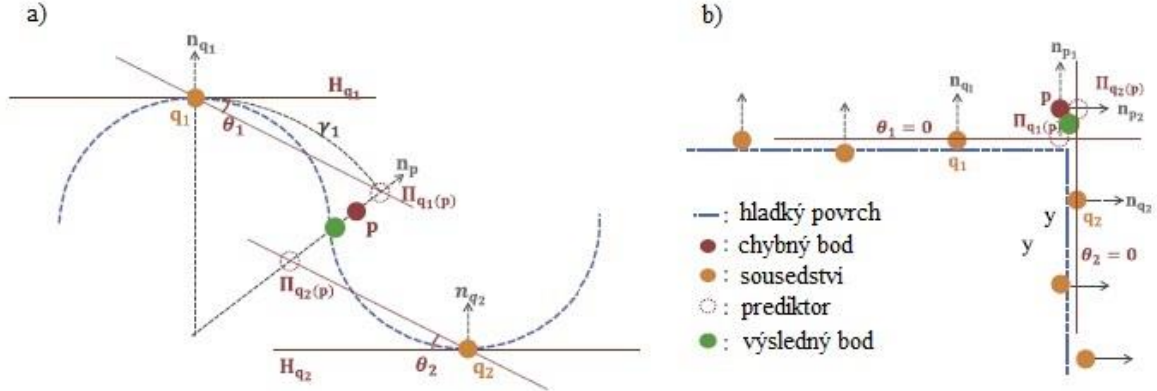
kde ψ je vážená vzdálenost mezi bodem a jeho prediktorem založená na Gaussově robustní chybové funkci $\psi_\sigma(x) = \sigma^2 - \exp(-x^2/2\sigma^2)$.

Odhad bodu p' pro minimalizaci $E(p')$ lze obdržet podle definice (14):

$$p' = \frac{1}{K(p)} \sum_{q \in N_a(p)} \frac{1}{\rho_q(p)} W_c(\|p - q\|) W_s(\|I_\gamma(p) - p\|) I_\gamma(p) \quad (14)$$

kde $W_c(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_c^2}\right)$ a $W_s(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma_s^2}\right)$ jsou monotónně klesající váhové funkce, které počítají s vlivem prostorové a rozsahové vzdálenosti, a kde $K(p)$ je součet vah pro normalizaci.

Takto vypočítané body jsou prediktory pro žádaný bod, ten se nachází v polovině jejich spojnice (obr. 3.6).



Obr. 3.6 Výsledné body pro a) zakřivenou plochu, b) hranu – podle [10].

Tato metoda pracující s předpokladem robustního normálového odhadu a s metodou ASN představuje dobrý výkon pro zpracování bodového mraku, zachování ostrých tvarů a hran a dobrou přípravu pro modelování povrchů, neboť eliminuje tangenciální nespojitosti. I přes výhody, které tato metoda přináší, mohou nastat problémy, pokud jsou normálové odhady narušeny byť i menší odchylkou, což vede k špatné lokalizaci prediktorů a tím i špatné lokalizaci výsledného bodu.

2.3 Metody modelování

Třetím a posledním krokem RI je proces modelování křivek a povrchů. V současnosti jsou objekty navrhovány za pomoci CAD modelů. Tyto objekty jsou tvořeny kombinací primitivních tvarů jako například roviny, koule, válce, kužely nebo parametrických tvarů (Bézierovy křivky, B-Spline, NURBS) a jejich průniky (průsečíky mezi těmito primitivními tvary). Takto tvořené modely objektů jsou nutné předpoklady pro navrhování nebo získávání parametrů objektů. Nicméně, většina CAD softwarových programů není schopná zpracovat a zobrazit formáty typu STEP nebo IGES, proto je pro jejich vizualizaci nebo výrobní proces nutné převést do 3D síťových modelů složených z konečného počtu vrcholů nebo trojúhelníků [6].

V geometrickém modelování jsou povrchy definovány mnohostěny (síťové modely) nebo aproximačními zakřivenými povrchy [1]. Aproximační zakřivené povrchy dělíme na:

- algebraické,
- parametrické,
- duální.

Algebraické povrchy

Jedná se o povrchy aproximované pomocí polynomiální rovnice ve formě $f(x, y, z) = 0$. Použití této metody není omezeno oproti parametricky definovaným povrchům. Tuto skupinu dělíme pomocí použitých metod na:

- interpolační,
- aproximační.

Interpolační metoda využívá všech daných bodů, tzn., že všechna naměřená data jsou proložena křivkou nebo rovinou. Tato metoda se používá za předpokladu, že data byla naměřena s vysokou přesností.

Pro aproximační metodu je nejvíce využívána metoda nejmenších čtverců LMS (*Least Square Method*).

Parametrické povrchy

Jedná se o metodu využívající metody Bézierových křivek, B-Spline nebo NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) křivek.

Duální povrchy

Metody zahrnující použití jak algebraických, tak parametrických povrchů.

2.3.1 Lineární interpolace

Lineární interpolace je metoda, kdy jsou body prokládány lineárními křivkami [7]. Pro aplikaci této metody je nutné splnění podmínek diskrétní Laplaceovy rovnice.

Diskrétní Laplaceova rovnice

Diskrétní Laplacián L pro bodový mrak $S = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \in R^3$ je lineární operátor, který ze vstupní množiny S , vytvoří jinou množinu S na výstupu. Pokud je velikost množiny $S(n)$, poté je S n -rozměrný vektor. V důsledku, L je lineární množina mezi dvěma n -rozměrný vektorový prostor, který lze vyjádřit maticí $n \times n$. Jsou rozlišovány dvě kategorie pro konstrukci těchto matic:

- grafická metoda,
- metoda konečných prvků.

Laplacián je definován jako (15):

$$l_{ij} = \begin{cases} \deg(p_i) & i = j \\ -1 & i \neq j \text{ a pro } p_j \text{ sousední bod } p_i \\ 0 & \end{cases} \quad (15)$$

kde $\deg(p_i)$ udává stupeň bodu (p_i) .

Pro grafickou metodu je definován podle vzorce (16):

$$(Lf)(i) = \sum_{p_j \in N(p_i)} [f(p_i) - f(p_j)] \quad (16)$$

kde $N(p_i)$ je sada sousedních bodů bodu p_i metodou k nejblížešších sousedů KNN (*K nearest neighborhood*).

Pro metodu konečných prvků je definován podle vzorce (17):

$$(Lf)(i) = \sum_{p_j \in N(p_i)} \omega_{ij} [f(p_i) - f(p_j)] \quad (17)$$

kde ω_{ij} udává váhové hodnoty bodů. Tyto váhové hodnoty lze vypočítat podle vzorce (18):

$$\omega_{ij} = e^{-\frac{\|p_i - p_j\|}{t}} \text{ pro } t \in R^+ \text{ a } p_j \in N(p_i) \quad (18)$$

kde t je konstantní parametr pro celý bodový mrak. Nicméně není stále znám ideální proces pro určení hodnoty parametru t , v důsledku čehož existuje výpočetní model optimálních vah minimalizující kvadratickou chybu podle vzorce (19):

$$\varepsilon = \|p_i - \sum \omega_{ij} p'_j\|^2 \text{ pro } p_j \in N(p_i) \quad (19)$$

kde $\sum \omega_{ij} = 1$ a kde p'_j je promítnutí bodu p_j do tečné roviny k bodu p_i . Tento vzorec lze také zapsat jako (20):

$$\varepsilon = \left\| \sum \omega_{ij} (p_i - p'_j) \right\|^2. \quad (20)$$

Poté se minimalizace chyby řeší pomocí metody nejmenších čtverců. Následně jsou sousedním bodům rozděleny indexy $\{1 \dots m\}$, kde m je velikost sousedství. Pro získání výsledku je nutné vyřešit lineární systém pro $CW = 1$, kde 1 je vektor o velikosti jedna, pro vzorec (21):

$$c_{jk} = (p_i - p'_j)^T (p_i - p'_k) \quad (21)$$

a následně rozdělit bodové váhy tak, aby $\sum \omega_{jk} = 1$.

Jakmile je obdržen disktrétní Laplacian pro bodový mrak, je Laplaceova rovnice $Lf = 0$. Za předpokladu, že $\partial S = \{p_{r+1}, \dots, p_n\}$, $\partial D = \{q_{r+1}, \dots, q_n\}$ a okrajové množině $f: p_i \mapsto q_i$, $r < i \leq n$, poté lze obdržet řešení vyřešením lineárního systému podle vzorce (22):

$$Lf = 0 \Rightarrow AU^I = -BU^B \quad (22)$$

kde $[A_{n \times r} \ B_{n \times (n-r)}] = L$, $U_{r \times 2}^I = [q_1 \dots q_r]^T$ a $U_{(n-r) \times 2}^B = [q_{r+1} \dots q_n]^T$. Pro spojitě případy nelze určit okrajové, v důsledku je proto nutné odstranit okrajové body, takže lze vzorec (22) přepsat jako vzorec (23):

$$\begin{bmatrix} A_{r \times r} & B_{r \times (n-r)} \\ C_{(n-r) \times n} \end{bmatrix} = L \quad (23)$$

Vzorec (23) lze dále vyjádřit v podobě vzorce (24):

$$q_i - \sum_{p_j \in N(p_i) \setminus \partial S} \omega_{ij} q_j = \sum_{p_j \in N(p_i) \cap \partial S} \omega_{ij} q_j \text{ pro } i = 1, 2, \dots, r. \quad (24)$$

Lineární interpolace

Po splnění podmínek disktrétní Laplaceovy rovnice, můžeme přejít k interpolaci. Bodu q_o ležícímu v rovině a jeho KNN $\{q_i \dots q_n\}$ odpovídá prostorový bod p_o tak, že (25):

$$p_o = \sum_{i=1}^n \omega_i p_i \quad (25)$$

kde $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ a kde p_i je odpovídající prostorový bod roviny KNN. Řešení tohoto systému je velké množství pro různé váhové rozložení, proto je nutné vybrat nejvhodnější a odpovídající výsledek.

2.3.2 Bézierovy křivky

Bézierovy křivky jsou jednou z aproximačních metod rekonstrukce povrchu. Tyto křivky jsou určeny řídicím polygonem určeným body $P_0, \dots, P_n$. Obecný tvar křivky je dán rovnicí (26):

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) P_i \quad (26)$$

kde parametr $t \in \langle 0, 1 \rangle$ a n je počet bodů, pomocí kterých chceme křivku vytvořit. Tento vztah lze také přepsat jako (27):

$$P(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i \quad (27)$$

kde $\binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i$ je Bernsteinův polynom pro n bodů. Bernsteinovy polynomy lze vytvořit pomocí rekursivní funkce (28):

$$B_i^n(t) = (1-t)B_{i-1}^{n-1}(t) + tB_{i-1}^{n-1}(t) \quad (28)$$

kde $B_i^n(t) \geq 0$ pro $t \in \langle 0, 1 \rangle$ a $i = 0, \dots, n$. Pro tyto polynomy platí rovnice (29):

$$\sum_{i=0}^n B_i^n(t) = 1 \text{ pro } \forall t. \quad (29)$$

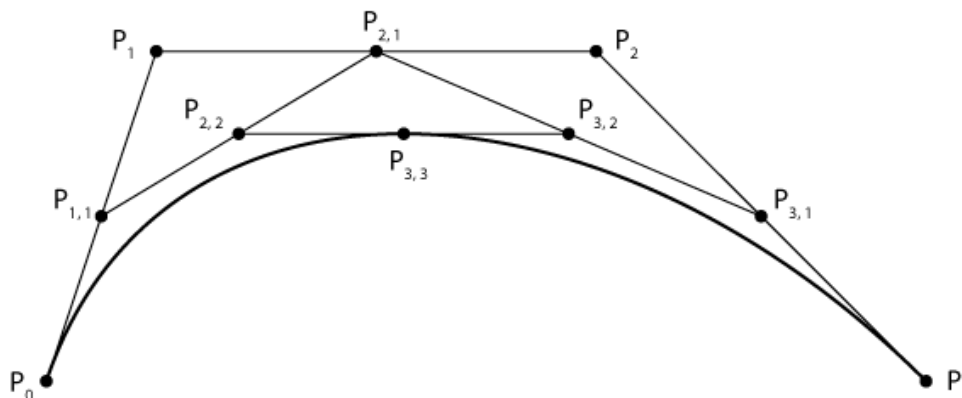
Proto lze obecně zapsat obecnou Bézierovu křivku jako (30):

$$P(t) = \omega_0 P_0 + \dots + \omega_n P_n \quad (30)$$

kde ω_n je Bernsteinův polynom pro každý bod z množiny n .

Jednou z nejpoužívanějších variant je tzv. kubická Bézierova křivka (křivka třetího stupně) – viz obr 4.1, lze ji tudíž definovat pomocí výše uvedených vzorců a rovnic jako rovnicí (31):

$$P(t) = \sum_{i=0}^3 \binom{3}{i} (1-t)^{3-i} t^i P_i = (1-t)^3 P_0 + 3(1-t)^2 t P_1 + 3(1-t) t^2 P_2 + t^3 P_3. \quad (31)$$



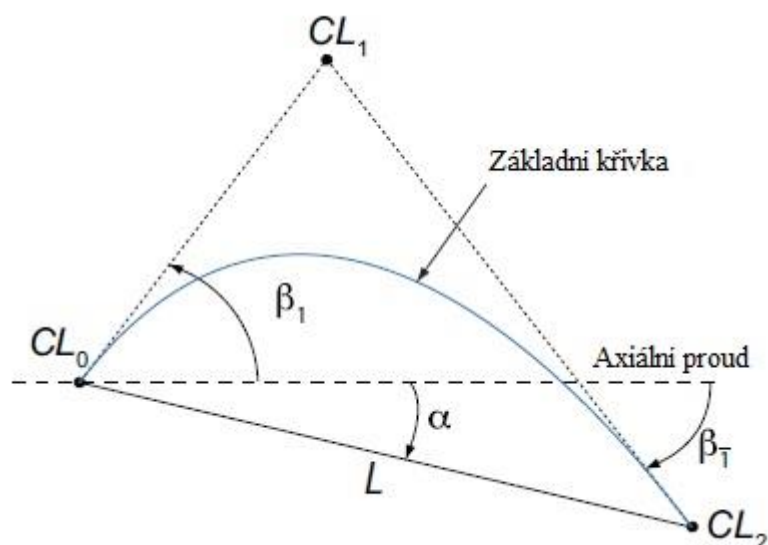
Obr. 4.1 Bézierova křivka třetího stupně a postup její konstrukce [25].

Pro křivku n -tého stupně je tedy zapotřebí $n + 1$ bodů. Jak je patrné v obrázku výše, Bézierovy křivky neprocházejí všemi danými body. Jedinými body, kterými prochází je první a poslední bod. Proto se také tyto křivky nazývají křivky volných forem [24].

Spojivosti křivky

Při generování křivek popisujících tvary různých součástí je důležitou a výhodnou vlastností spojitost křivek. Je nutné dosáhnout alespoň spojitosti G_0 , což znamená, že funkce je spojitá v daném bodě. Spojitosti G_1 (první derivace funkce) a G_2 (druhá derivace funkce) jsou výhodným parametrem pro obrábění.

Výpočet spojitostí je demonstrován na příkladu 2D rekonstrukce lopatky turbíny. Nejdříve je definována základní střední křivka lopatky pomocí Bézierovy křivky druhého řádu (obr. 4.2).

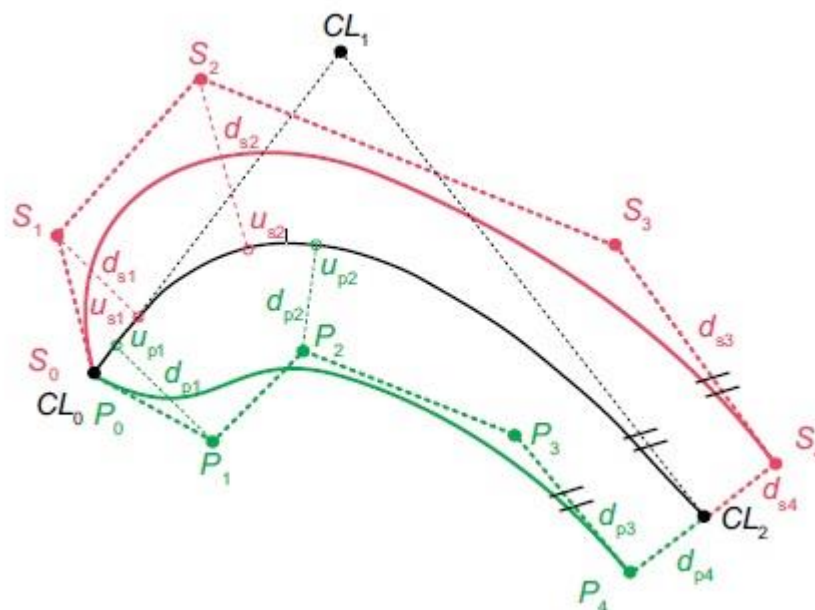


Obr. 4.2 Základní střední křivka lopatky – podle [3].

Body CL_0 a CL_2 jsou naměřené body na vrcholu a zadní hraně lopatky. Bod CL_1 leží na průsečíku přímek definovaných vstupním a výstupním úhlem lopatky β_1 a $\beta_{\bar{1}}$. Modře vykreslená křivka je Bézierova kvadratická křivka (druháho stupně) daná rovnicí (32):

$$C_L(u) = \sum_{i=0}^m B_{im}(u) CL_i \quad \text{pro } u \in [0, 1] \quad (32)$$

Pro body $S_0, \dots, S_4$ představující stranu lopatky blíže k sání a body $P_0, \dots, P_4$ představující stranu lopatky dále od sání jsou vytvořeny Bézierovy křivky čtvrtého stupně. Ortogonální promítnutí těchto bodů na základní střední křivku jsou poté značeny u_{pi} nebo u_{si} a jejich vzdálenosti d_{pi} a d_{si} (viz obr. 4.3).



Obr. 4.3 Bézierovy křivky čtvrtého stupně.

Za podmínky, že body počáteční body S_0 a P_0 a koncové body S_4 a P_4 mají stejné souřadnice na začátku a na konci tak, že platí podmínky (33):

$$u_{S_0} = u_{P_0} \quad a \quad d_{S_0} = d_{P_0} \quad a \quad u_{S_4} = u_{P_4} = 1 \quad (33)$$

Lze tedy říct, že v bodě CL_0 a v bodě CL_2 jsou spojitě na úrovni G_0 .

Spojitosť G_1 je zaručena za podmínky, že existuje konstanta $k_1 > 0$ tak, že $\dot{P}(0) = k_1 \dot{S}(0)$. Poté pro $u = 0$ platí rovnice (34):

$$\frac{dQ(0)}{du} = m \cdot (Q_1 - Q_0) \quad (34)$$

kde Q je Bézierova křivka čtvrtého stupně pro body S a P . Následně je definován bod P_1 rovnicí (35):

$$P_1 = S_0 + k_1 \cdot (S_0 - S_1) \quad (35)$$

kde $k_1 = \frac{d_{p1}}{d_{s1}}$. Pokud $k_1 = 1$, poté je zaručena spojitost na úrovni G_1 .

Spojitosť G_2 je zaručena za podmínky, že existuje konstanta $k_2 > 0$, pro rovnici (36):

$$\frac{d^2 Q(0)}{du^2} = m(m-1) \cdot (Q_0 - 2Q_1 + Q_2) \quad (36)$$

Tento vzorec vede k definici bodu P_2 jako (37):

$$P_2 = (1 + 2k_1 + 2k_2) \cdot S_0 - (2k_1 + k_2) \cdot S_1 + k_2 \cdot S_2 \quad (37)$$

Pokud $k_1 = 1$ a $k_2 = 1$, poté je zaručena spojitost G_2 [3].

2.4 Generování sítí pro 3D modely

Pokrok při zlepšení spojení mezi analýzou konečných prvků FEA (*Finite Element Analysis*) a CAD značně zkrátil průměrný nutný k přípravě FEA modelů. Klíčovým krokem je automatické síťování povrchů pro objemové prvky, které mají vliv na spolehlivost řešení FEA. Nicméně, automatické generování sítí stále čelí problémům, zvláště když se na CAD modelu nachází velké množství ostrých detailů nebo když hraniční zobrazení B-Rep (*Boundary Representation*) obsahuje velké množství ploch, které jsou menší než ty, které metoda konečných prvků FE (*Finite Element*) vyžaduje. Toto uspořádání může být důvodem buď slabě zesíťovaných prvků, nebo příliš hustě zesíťovaných prvků, což nejen prodlužuje výpočetní časy, ale také vytváří simulace nedostatečné kvality nebo vytváří sítě nekompatibilní s požadavky pro vyřešení problému. Aplikace zjednodušení geometrické struktury a techniky virtuální topologie se ukázalo jako dobrá možnost [8].

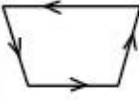
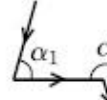
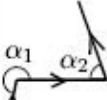
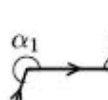
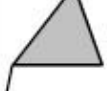
2.4.1 Pokročilá frontální metoda

Pokročilá frontální metoda AFM (*Advancing Front Method*) je jednou z metod generování sítí pro FE. Síťování každého B-Rep modelu za pomoci metody AFM se děje ve čtyřech krocích:

- generování uzlů ve vrcholech B-Rep struktury,
- diskretizace B-Rep okrajů,
- diskretizace okrajových smyček,
- generování čtyřstěnů.

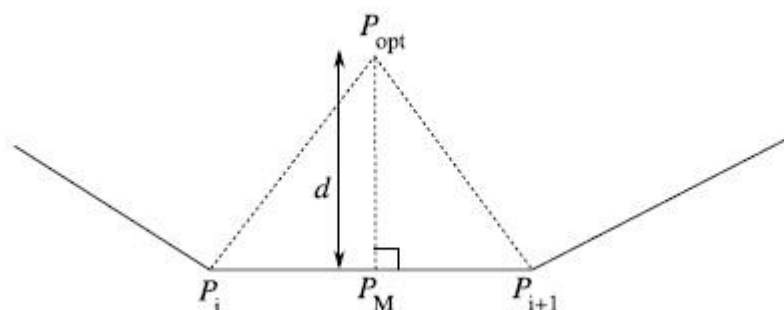
Tato aplikace AFM vede k vytvoření trojúhelníkových ploch B-Rep modelu. Čtyřstěny jsou poté generovány z těchto ploch.

Toto vytváření B-Rep trojúhelníku se děje nezávisle pro každou danou plochu a tento proces končí v momentě, kdy je plocha kompletně pokryta sítí trojúhelníků. Celý proces spočívá ve tvoření úseček pro dva uzly $P_i P_{i+1}$, nejčastěji pro dva sobě nejbližší body. Pro každou úsečku $P_i P_{i+1}$ existuje šest možností pro vytvoření trojúhelníku (obr. 4.4).

	1	2	3	4	5	6
Možnosti pro generování trojúhelníku	3-cycle	4-cycle	$\alpha_1 < 80^\circ$ $\alpha_2 < 80^\circ$	$\alpha_1 < 80^\circ$ $\alpha_2 > 80^\circ$	$\alpha_1 > 80^\circ$ $\alpha_2 < 80^\circ$	$\alpha_1 > 80^\circ$ $\alpha_2 > 80^\circ$
Generovaný trojúhelník						
Generovaný trojúhelník						

Obr. 4.4 Generování B-Rep trojúhelníků - podle [8].

První pět typů uvedených na obrázku výše využívá pouze reálně existující uzly, kdežto pro šestý typ musí být vytvořen uzel nový. Tento nový uzel musí být vytvořen pro určitou úsečku $P_i P_{i+1}$. Optimální pozice P_{opt} pro tento nový uzel je dána bodem P_M , jež je střed úsečky $P_i P_{i+1}$, P_{opt} se nachází na úsečce $P_M P_{opt}$ kolmé na úsečku $P_i P_{i+1}$ ve vzdálenosti d od bodu P_M (obr. 4.5).



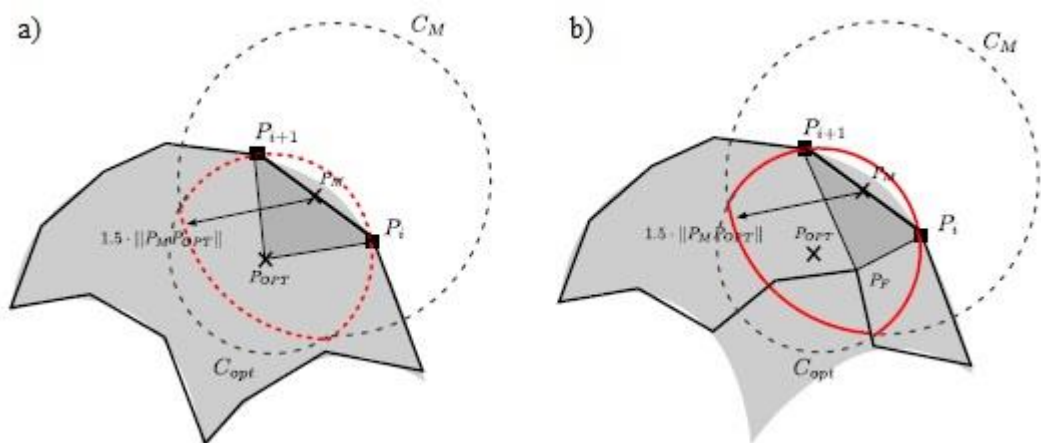
Obr. 4.5 Optimální pozice bodu P_M .

Vzdálenost d se vypočítá podle vzorce (38):

$$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (\omega_T \cdot H(P_M) + \omega_S \cdot \|P_i P_{i+1}\|) \quad (38)$$

kde ω_T a ω_S jsou váhy, pro které platí $\omega_T + \omega_S = 1$, a $H(P_M)$ je určená velikost FE v okolí bodu P_M .

V případě, že se uzel P_{opt} nachází dostatečně blízko reálně existujícímu uzlu P_F , poté je vytvořen trojúhelník $P_i P_{i+1} P_F$ namísto trojúhelníku $P_i P_{i+1} P_{opt}$. Pokud leží v okolí uzlu P_{opt} větší množství uzlů, poté nejblíže z těchto bodů je vybrán jako uzel P_F (obr. 4.6).



Obr. 4.6 Trojúhelník pro a) P_{opt} , b) P_F .

Pro tuto metodu je doporučeno testování jednotlivých trojúhelníků, aby nedocházelo ke vzájemnému překrývání [8].

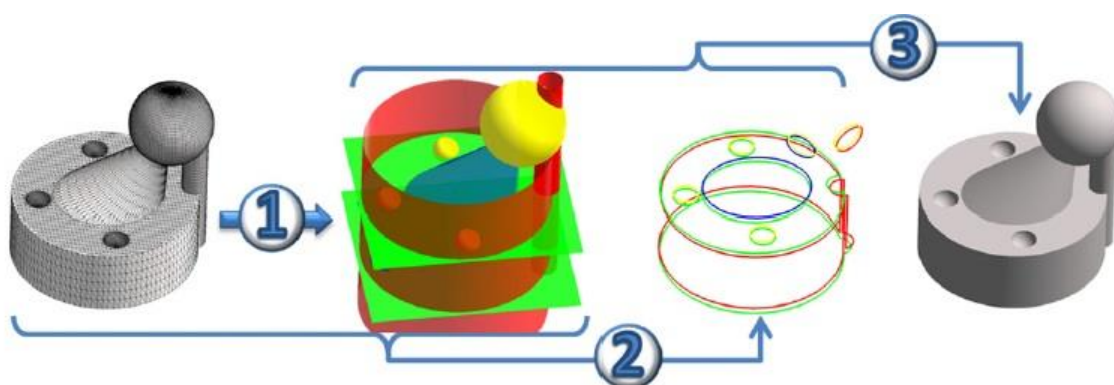
2.4.2 B-Rep model a CAD model

CAD modely jsou omezeny hranicemi definovanými parametrickými 3D křivkami. Aby bylo možné rekonstrukčním procesem tyto modely vytvořit, je nutné identifikovat základní tvary jako roviny, koule nebo válce a poté vypočítat jejich hranice a vztahy mezi nimi. Pro získání těchto informací se používá B-Rep metoda [6].

V B-Rep modelu je každý objekt definován sadou povrchů. Každý povrch odpovídá některému ze základních geometrických útvarů definovaných jejich parametry (např. poloměr a střed koule) a jejich ohraničením tzv. vodiči. Každý vodič je definován parametrickou rovnicí a dvěma limitními body. Vrcholy odpovídají průsečíkům mezi dvěma plochami. Pokud spolu dvě strany sousedí, jejich vodiče budou mít společné vrcholy. Konstrukce B-Rep modelu vyžaduje nejen identifikaci základních geometrických sad, ale i vzájemné vztahy mezi plochami, pro vytvoření těchto vodičů.

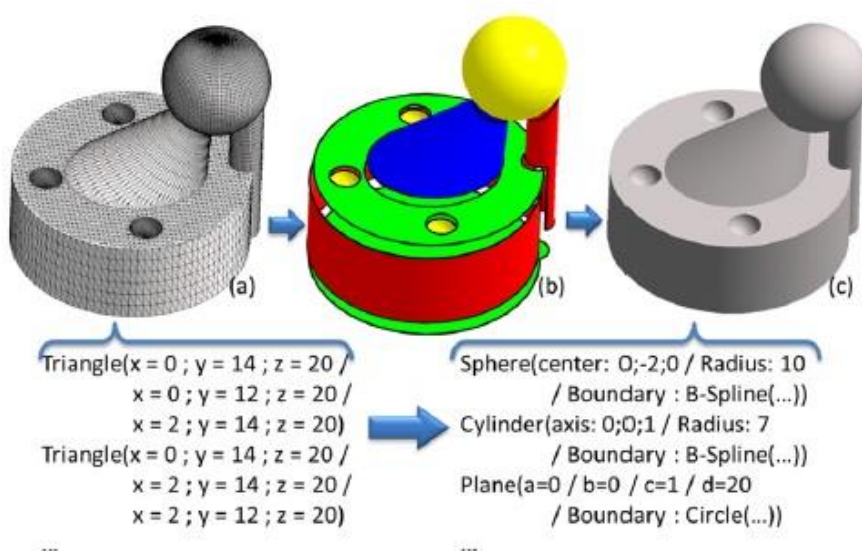
Rekonstrukce B-Rep modelu se skládá ze tří kroků (obr. 4.7):

- identifikace základních tvarů,
- výpočet vodičů,
- konstrukce B-Rep modelu.



Obr. 4.7 Rekonstrukce B-Rep modelu.

Vychází se tedy ze 3D síťového modelu objektu (nejlépe trojúhelníkové síťování). Tyto trojúhelníky jsou poté výpočetními procesy předefinovány do základních geometrických tvarů o vypočtených parametrech (obr. 4.8).



Obr. 4.8 Převod 3D sítě na B-Rep model.

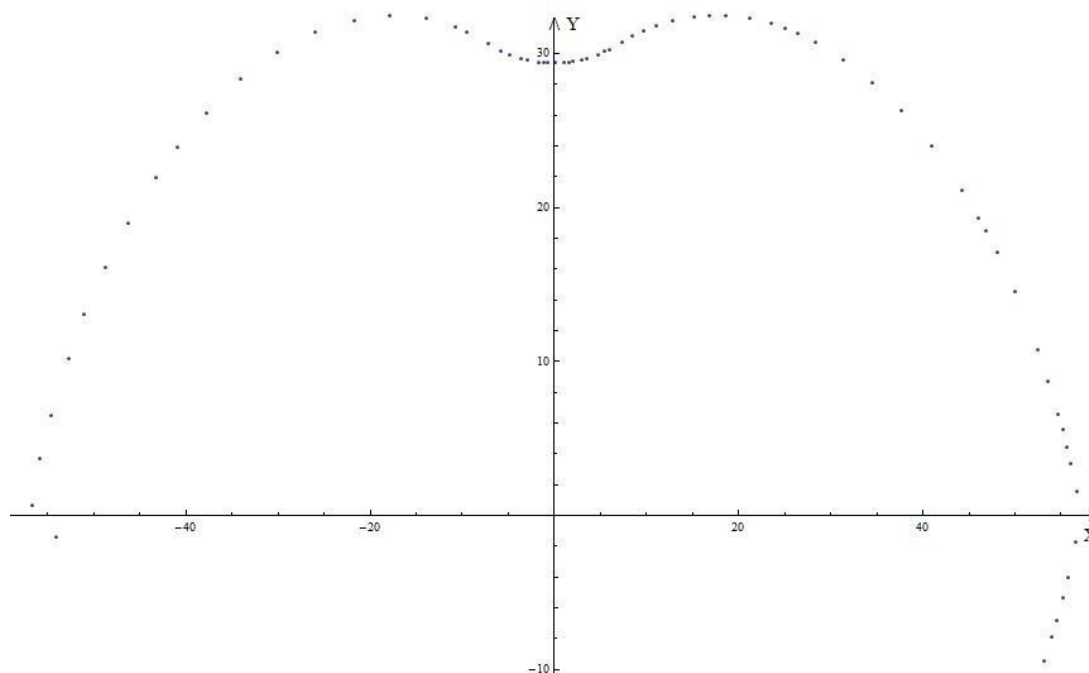
Tato metoda vykazuje dobré výsledky pro CAD síťové modely, přičemž nezávisí na struktuře sítě, ať už je jakkoliv hustá, pravidelná či nepravidelná, nebo pokud obsahuje velké množství základních geometrických tvarů.

3 APLIKACE DIGITALIZACE A MODELOVÁNÍ NA REÁLNÉM OBRÁBĚNÉM POVRCHU

Pro aplikaci postupů RI byl vybrán jeden zub „paradoxního“ převodu. U obyčejných převodů se dvě ozubená kola točí opačným směrem, kdežto u tohoto speciálního převodu se obě ozubená kola točí stejným směrem. Konstrukce těchto převodů způsobuje velké tření mezi jednotlivými zuby, které přichází do kontaktu, a pokud není použito mazání, dochází k rychlému opotřebení styčných ploch. Pokud toto opotřebení překoná kritickou mez, kdy zub již neplní svou funkci, a pokud není k dispozici technická dokumentace, lze pomocí metody RI tuto součástku vyrobit.

3.1 Digitalizace objektu

Prvním krokem byla tedy digitalizace objektu. Pro digitalizaci byl použit přístroj CMM a pro měření byla použita sonda o délce 50 mm a průměru 5 mm. Bylo použito radiální skenování. Bylo provedeno kalibrační měření, které odhalilo nutnost korekce průměru sondy o $1,7 \mu\text{m}$. Bylo provedeno 71 měření, díky kterým byl obdržen bodový mrak o velikosti 71 bodů (viz Tab. 1). Tyto body byly poté importovány do počítačového softwaru Mathematica (obr. 5.1), ve kterém probíhalo veškeré zpracování dat za pomoci, pro tento případ, vytvořeného programu.



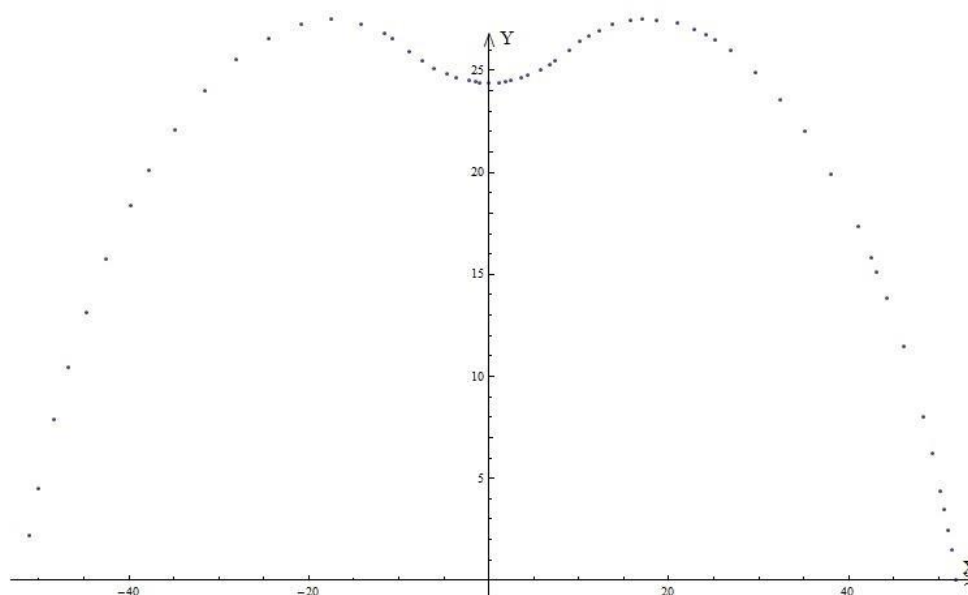
Obr 5.1 Bodový mrak.

3.2 Zpracování bodového mraku

Po obdržení bodového mraku bylo dalším procesem jeho zpracování. Prvním krokem byla korekce naměřených souřadnic. Souřadnice byly měřeny vzhledem ke středu sondy a přístroj automaticky tuto hodnotu odečetl od bodu kontaktu. Vzhledem ke špatnému nastavení přístroje byly tyto hodnoty naopak přičteny. Tímto došlo ke zkreslení informací a následná korekce byla nevyhnutelným krokem pro další postup.

Přístroj taktéž dopočítal promítnutí průměru sondy do os X ($nX0$) a Y ($nY0$), viz tab. 1. Souřadnice všech bodů bodového mraku bylo proto nutné přepočítat podle těchto uvedených hledisek. Výsledným produktem byl upravený bodový mrak.

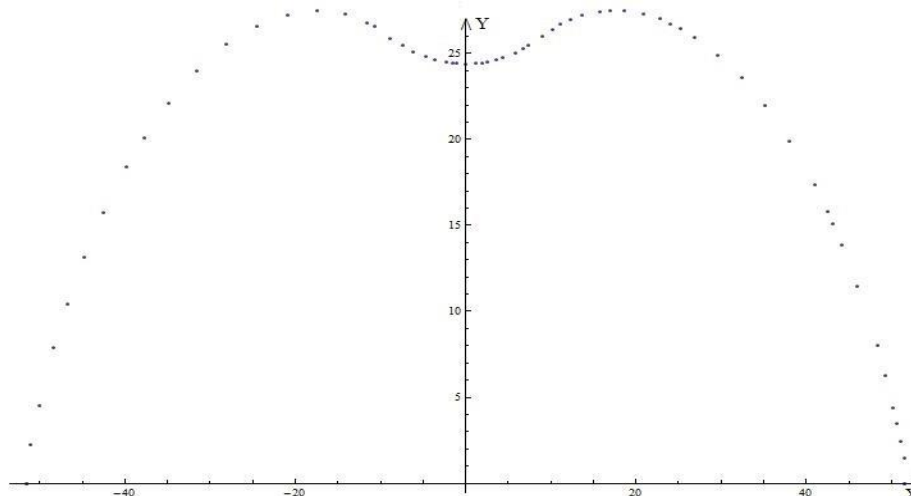
Dalším krokem bylo odstranění chybných bodů. Vzhledem k osově symetrii objektu podle osy X byly odstraněny všechny body ležící pod touto osou (viz obr. 5.2).



Obr. 5.2 Odstranění bodů z upraveného bodového mraku.

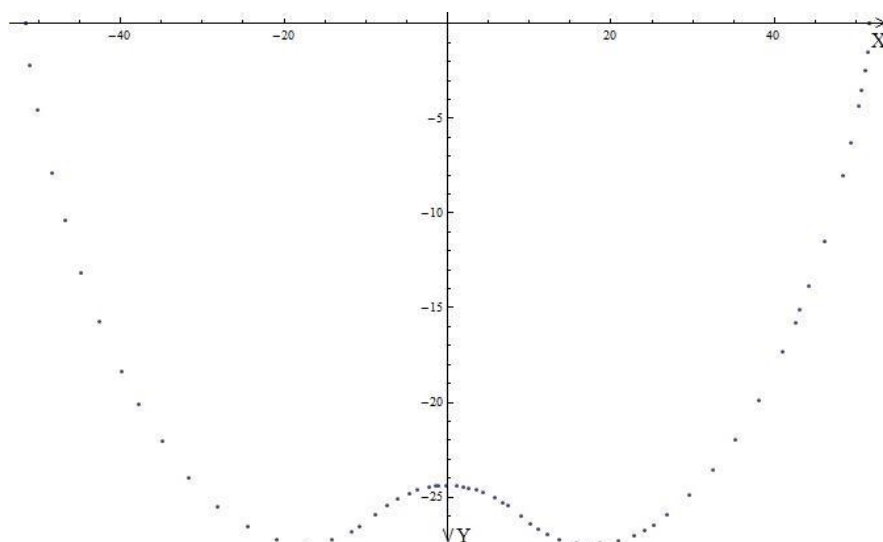
Následující krok spočíval v opravě/odstranění bodů, které by narušovaly při procesu modelování profil objektu. Žádné takové body však nebyly nalezeny, a proto nebylo nutné aplikovat žádnou vyhlazovací metodu.

Aby bylo možné aplikovat osovou symetrii, byl vytvořen první bod na ose X o souřadnicích rovnajících se polovině součtu souřadnic krajních bodů v záporném a kladném směru osy X. Jednalo se tedy o průměr naměřených hodnot krajních bodů objektu. Druhý bod byl vytvořen osovou symetrií tohoto bodu podle osy Y (obr. 5.3).



Obr. 5.3 Body na ose X.

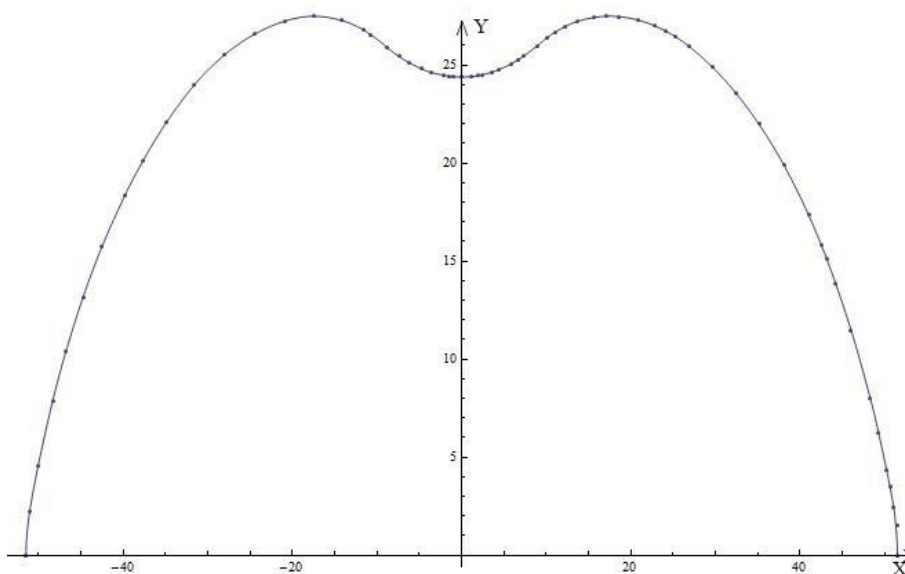
Druhá polovina objektu byla vytvořena změnou Y-ových souřadnic z kladných na záporné (obr. 5.4). Díky těmto bodům bylo poté možné vytvořit kompletní bodový mrak objektu.



Obr. 5.4 Spodní část bodového mraku objektu.

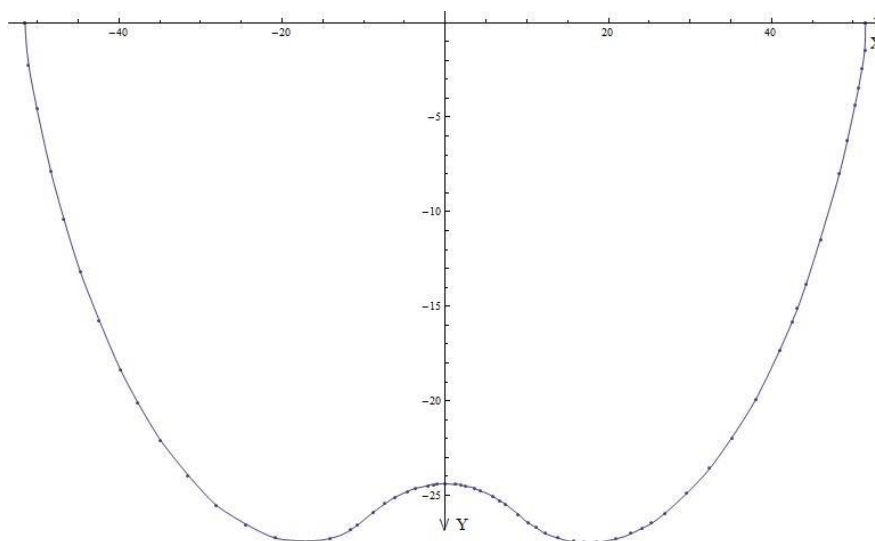
3.3 Modelování profilu

Po vytvoření kompletního bodového mraku bylo další etapou modelování profilu. Byla použita metoda Bézierových křivek, tudíž metoda pro volné formy povrchu. Jelikož nebylo možné proložit všemi body jedinou křivku, musel být profil rozdělen do úseků po třech bodech. Za pomoci definovaných Bernsteinových polynomů program dopočítal a vytvořil Bézierovy křivky třetího stupně (kubiky) odpovídající jednotlivým úsekům profilu. Program dopočítal křivky tak, aby byla zaručena tangenciální spojitost jednotlivých úseků v jejich krajních bodech. Nejdříve byl vytvořen profil horní části objektu (obr. 5.5).



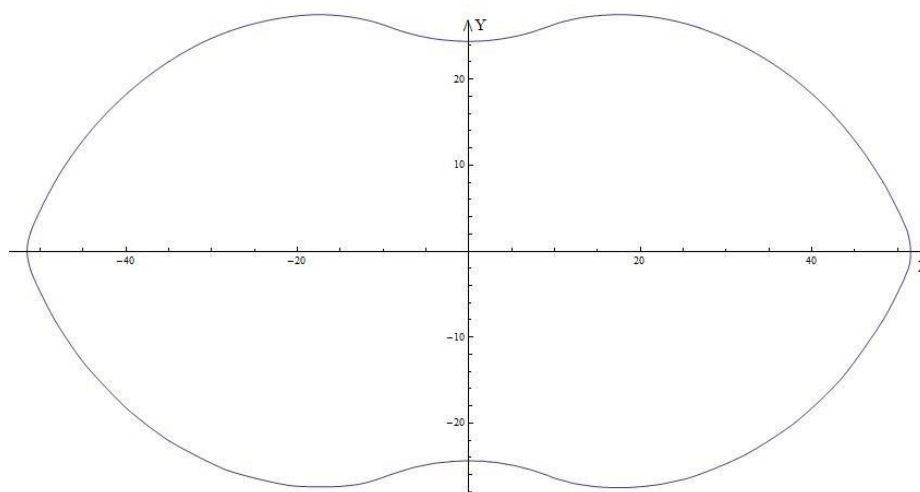
Obr. 5.5 Profil horní části objektu.

Později, stejným způsobem, byl vytvořen i profil spodní části (obr. 5.6).



Obr. 5.6 Profil dolní části objektu.

Složením těchto úseků byl obdržén uzavřený profil objektu (obr. 5.7).



Obr. 5.7 Celkový profil objektu

Posledním krokem byla korekce natočení profilu tak, aby bylo dosaženo přesné symetrie podle os X a Y. Tato korekce byla provedena s ohledem na podmínku osové symetrie podle osy Y tak, že se Y-ová souřadnice nejvýše položeného bodu nalevo a napravo od této osy musí shodovat. Tato maxima byla nalezena vzhledem k vytvořeným křivkám, neboť jejich tvar měl vliv na polohu bodů patřících těmto křivkám.

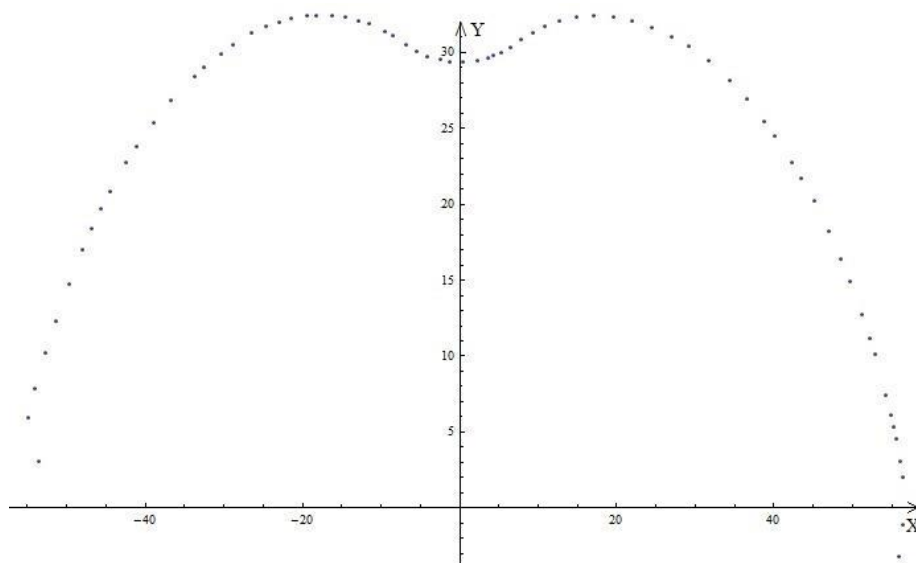
Program odhalil rozdíl v řádu několika mikrometrů. Následným výpočtem byla nalezena velikost úhlu odpovídající tomuto rozdílu, čímž bylo možno opravit natočení celého profilu. Oprava pozice těchto bodů zapříčinila opětovné modelování křivek. Následná kontrola výpočtu odhalila zanedbatelnou odchylku v řádech nanometrů. Tato odchylka je prakticky vizuálně nezaznamatelná.

Výsledný profil byl tedy připraven pro další zpracování vedoucí k jeho vytvoření.

3.4 Reálný obráběný profil

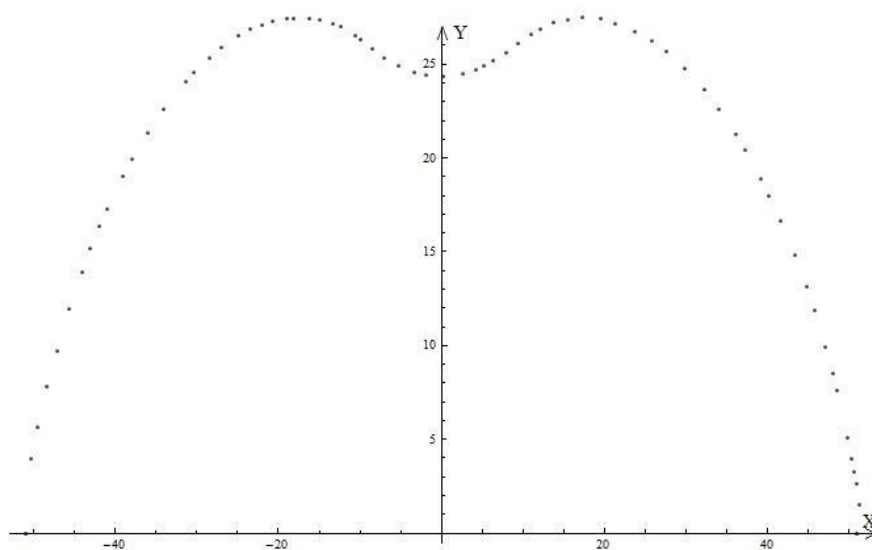
Po ukončení fáze modelování byl vytvořen program sloužící k obrobení a vytvoření tohoto profilu.

Prvním krokem byla opět digitalizace objektu. Pro digitalizaci byl použit přístroj CMM a pro měření byla použita sonda o délce 50 mm a průměru 5 mm. Bylo použito radiální skenování. Bylo provedeno kalibrační měření, které odhalilo nutnost korekce průměru sondy o $2,9 \mu\text{m}$. Bylo provedeno 75 měření, díky kterým byl obdržen bodový mrak o velikosti 75 bodů (viz Tab. 2). Výsledkem byl bodový mrak reálného profilu (obr. 5.8).



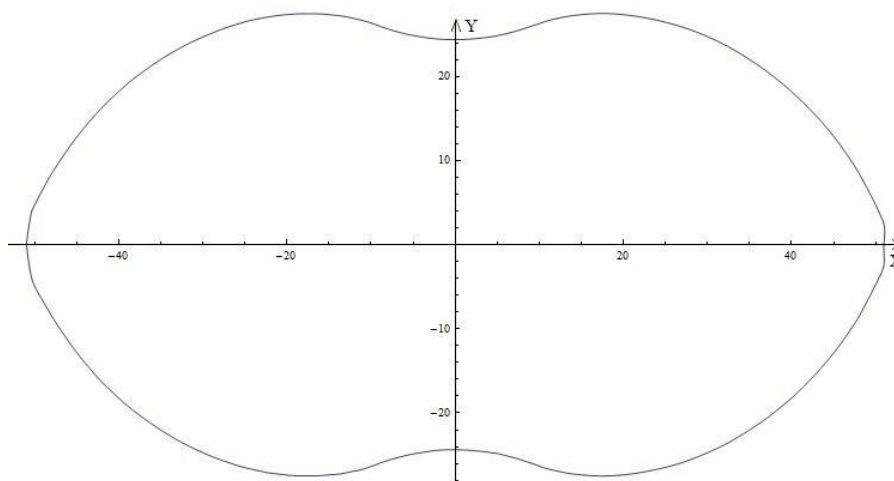
Obr. 5.8 Bodový mrak reálného profilu.

Tak jako v předchozí části bylo provedeno zpracování bodů, jehož výsledkem byl upravený bodový mrak (obr. 5.9).



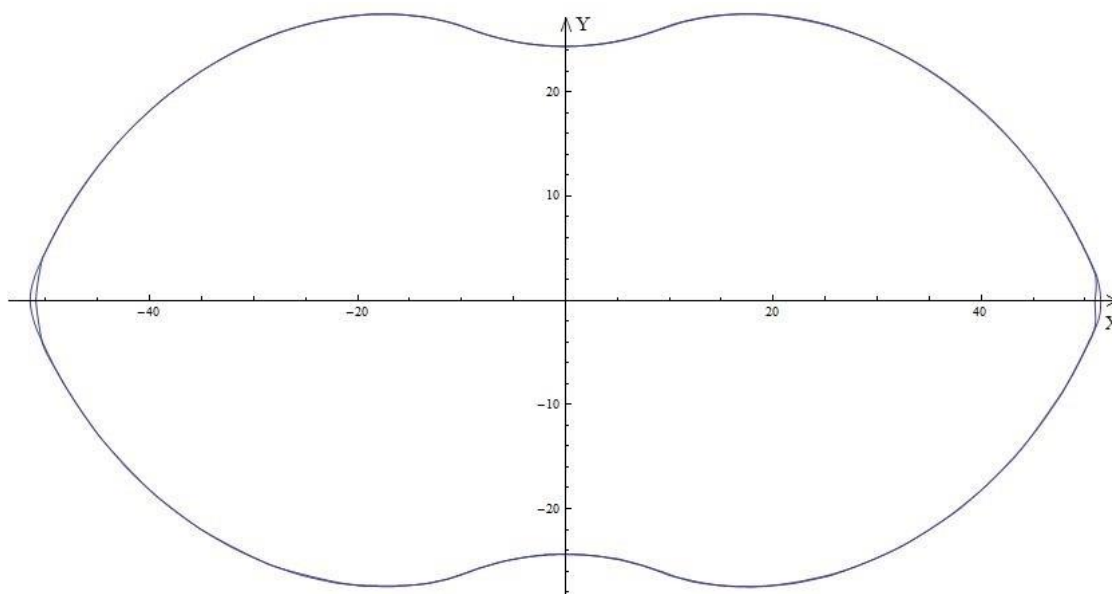
Obr. 5.9 Upravený bodový mrak reálného profilu

Pro modelování profilu byla opět použita metoda Bézierových křivek, jejímž výsledkem byl uzavřený reálný profil (obr. 5.10).



Obr. 5.10 Uzavřený reálný profil.

Oba dva profily byly poté umístěny do jednoho grafu pro porovnání výsledků (obr. 5.11).



Obr. 5.11 Porovnání profilů.

ZÁVĚR

Cílem této práce byla aplikace postupů RI při digitalizaci a modelování reálného povrchu. Tímto reálným povrchem byl jeden zub paradoxního převodu podléhající opotřebení. Tento objekt byl vybrán pro reprodukci za pomoci metod RI.

V první části šlo o digitalizaci objektu do datové podoby. Tímto procesem byl vytvořen bodový mrak reprezentující tento objekt. Dále bylo nutné tento bodový mrak zpracovat, tzn. zbavit rušení a chybných bodů. Po této operaci bylo dalším krokem modelování profilu tohoto objektu za pomoci metody Bézierových křivek třetího stupně sloužících k vytvoření uzavřeného profilu odpovídajícímu skenovanému předmětu. Po ukončení fáze modelování byl z údajů tohoto výsledného profilu vytvořen CNC program sloužící k realizaci této součástky.

Po vyrobení součástky bylo nutné proces digitalizace opakovat pro obdržení bodového mraku reálné vyrobené součástky. Po jeho obdržení byl tento mrak dále zpracován stejně jako v předchozím případě a s takto upraveným bodovým mrakem byly vytvořeny Bézierovy křivky třetího stupně. Výsledkem byl tedy uzavřený profil reálného vyrobeného předmětu.

Tyto profily byly následně umístěny do jednoho grafu pro porovnání. Největší rozdíl mezi oběma profily se nachází v oblasti vrcholů předmětu. Tento rozdíl je zapříčiněn nedostatečnou hustotou naměřených bodů v okolí vrcholů u nově vyrobeného profilu, což vedlo ke zkreslení a nepřesnostem při tvorbě nových bodů a Bézierových křivek. Vrcholy však nejsou funkčními plochami předmětu, proto lze považovat tyto nepřesnosti za nepodstatné z hlediska funkčnosti součástky. Ostatní části profilu se od sebe prakticky neliší, proto lze konstatovat, že profil a CNC program pro výrobu byly vytvořeny správně.

Nová součást byla také vyzkoušena v praktické funkci jako náhrada původního skenovaného předmětu. Součást fungovala bez jakýchkoliv problémů, a proto lze konstatovat, že původní zub byl úspěšně duplikován a za pomoci metod RI vytvořen nový, plně funkční zub.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] MOTAVALLI, S. Review of Reverse Engineering Approaches. Computers industrial Engineering, 1998, vol. 35, no. 1-2, pp. 25-28.

[2] EYUP BAGCI. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies, Advances in Engineering Software, June 2009, vol. 40, Issue 6.

[3] VESSAZ, CH., TOURNIER, CH., MUNCH, C., AVELLAN, F., Design optimization of a 2D blade by means of milling tool path, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2013, vol. 6, Issue 3, pp. 157-166, ISSN 1755-5817.

[4] YAN-PING, L., CHENG-TAO, W., KE-RONG, D., Reverse engineering in CAD model reconstruction of customized artificial joint, Medical Engineering & Physics, 2005, vol. 27, pp. 189-193.

[5] LI, B., SCHNABEL, R., KLEIN, R., CHENG, Z., DANG, G., JIN, S., Robust normal estimation for point clouds with sharp features, Computers & Graphics, vol. 34, Issue 2, April 2010, pp. 94- 106, ISSN 0097-8493.

[6] BÉNIÈRE, R., SUBSOL, G., GESQUIÈRE, G., LE BRETON, F., PUECH, W., A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models, Computer-Aided Design, vol. 45, Issue 11, November 2013, pp. 1382-1393, ISSN 0010-4485.

[7] ZOU, Q., ZHAO, J., Iso-parametric tool-path planning for point clouds, Computer-Aided Design, vol. 45, Issue 11, November 2013, pp. 1459-1468, ISSN 0010-4485.

[8] FOUCAULT, G., CUILLIÈRE, J.-C., FRANÇOIS, V., LÉON, J.-C., MARANZANA, R., Generalizing the advancing front method to composite surfaces in the context of meshing constraints topology, Computer-Aided Design, vol. 45, Issue 11, November 2013, pp. 1408- 1425, ISSN 0010-4485.

[9] GOMEZ, R.B., FERREIRA DA SILVA, B.M., ROCHA, L.K.M., AROCA, R.V., VELHO, L.C.P.R., GONÇALVES, L.M.G., Efficient 3D object recognition using foveated point clouds, Computers & Graphics, vol. 37, Issue 5, August 2013, pp. 496-508, ISSN 0097-8493.

[10] PARK, M.K., LEE, S.J., JANG, I.Y., LEE, Y.Y., LEE, K.H., Feature-aware filtering for point-set surface denoising, *Computers & Graphics*, vol. 37, Issue 6, October 2013, pp. 589-595, ISSN 0097-8493.

[11] 3D digitalizace. In: *Http://robo.hyperlink.cz* [online]. 2000 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main07.html>

[12] KALOVÁ, Ilona a Karel HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue*. 2005, roč. 2005, č. 23. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap4>

[13] ŠIMONÍK, Martin. Digitalizace - její princip a rozdělení. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, roč. 2004, č. 6, s. 28 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni.html>

[14] JANEČKA, K. Digitalizace výfukového potrubí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek, Ph.D.

[15] Destruktivní 3D skenery. In: *Http://robo.hyperlink.cz* [online]. 2000 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/main07.html>

[16] URBÁNEK, Aleš. Kontrola součástí pomocí metod reverzního inženýrství: Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 47 s, 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar.

[17] 3D Scanning Technologies. ZOOFAN, Bahman. TOMOS TECHNOLOGIES. *3D Scanning Technologies: 3D Micro-Tomography - A Powerful Engineering Tool* [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: http://www.3dscanningtechnologies.com/ComputedTomographyPage.php?3D_Micro-Tomography_-_A_Powerful_Engineering_Tool-4/

[18] REIMER, Jeffrey. Magnetic Resonance Sensors. In: *Industrial Innovations* [online]. [cit. 20.5.2014]. Dostupné z: http://sensors.lbl.gov/sp_magnetic.html

[19] Vybavení laboratoře. In: *Ústav antropologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity* [online]. 2004-2007 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://anthrop.sci.muni.cz/page.yhtml?id=559>

[20] STANDARD JIG BORING SERVICE. *Pin Point Accuracy with a Coordinate Measuring Machine (CMM)* [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: http://www.standardjig.com/feature_cmm.asp

[21] HANSEN, Glen A, Rod W DOUGLAS a Andrew ZARDECKI. *Mesh Enhancement: Selected Elliptic Methods, Foundations And Applications*. London: Imperial College Press, 2005. ISBN 1860944876.

[22] FORMANOVÁ, Pavla. Porovnání přesnosti náhodných veličin [online]. 2000 [cit. 21.5.2014]. Dostupné z: http://slon.fsv.cvut.cz/~pavla/por_presn/html/node1.html

[23] ORAVA, Jan. Jádrové odhady a binární data. Brno, 2006. 31 s. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce RNDr. Marie Forbelská, Ph.D.

[24] BASTL, Bohumír. Bézierovy křivky. In: *Katedra matematiky, Západočeská univerzita v Plzni, Oddělení geometrie* [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://geometrie.kma.zcu.cz/index.php/www/content/view/full/1023/>

[25] KVASNIČKA, Ondřej. Křivky v počítačové grafice. Západočeská univerzita v Plzni, 2013. Dostupné z: <http://herakles.zcu.cz/education/zpg/cviceni.php?no=11>. Cvičení. Západočeská univerzita v Plzni.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
1D	[-]	1-dimensional
2D	[-]	2-dimensional
3D	[-]	3-dimensional
AFM	[-]	Advancing Front Method
ASKC	[-]	Adaptive Scale Kernel Consensus
ASN	[-]	Adaptive Sub-Neighborhood
B-Rep	[-]	Boundary Representation
CAE	[-]	Computer Aided Engineering
CAD	[-]	Computer-Aided Design
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
CMM	[-]	Coordinate-Measuring Machine
CNC	[-]	Computer Numeric Control
CT	[-]	Computed Tomography
FE	[-]	Finite Element
FEA	[-]	Finite Element Analysis
KDE	[-]	Kernel Density Estimation
KNN	[-]	K Nearest Neighborhood
LMS	[-]	Least Square Method
MSSE	[-]	Modified Selective Statistical Estimator
MR	[-]	Magnetic Resonance
NURBS	[-]	Non-Uniform Rational B-Spline
PCA	[-]	Principle Component Analysis
RI	[-]	Reverse Engineering
RTG	[-]	Rentgen

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tabulky souřadnic naměřených bodů
Příloha 2	Program pro software Mathematica
Příloha 3	CNC program pro výrobu studovaného objektu

