

Digitální rekonstrukce povrchů z mračna bodů

Petra Surynková, Šárka Voráčová

*Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague
Sokolovská 83, 186 75 Praha 8, Czech Republic
email: petra.surynkova@mff.cuni.cz, voracsar@fd.cvut.cz*

Abstrakt. Problém rekonstrukce ploch z množiny bodů se objevuje v mnoha vědeckých a technických aplikacích. V našem případě se speciálně zaměříme na rekonstrukci ploch s cílem vizualizovat reálná data. Specifická úloha, kterou řešíme, je zadaná pomocí neorganizované konečné množiny bodů v prostoru na vstupu, přičemž úkolem je vytvořit rekonstruovaný povrch plochy takový, že body vstupní množiny leží na nebo blízko povrchu. Předpokládáme, že vstupní množina bodů odpovídá v prostoru reálné ploše, avšak žádné další informace o jejich struktuře k dispozici nemáme. Reálná data pro vstup lze získat 3D skenováním. Výslednou rekonstruovanou plochu chceme obdržet v co nejkompaktnějším tvaru, tj. vyjádřenou pokud možno parametricky nebo implicitně. V konečné fázi bude rekonstruovaná plocha vizualizovaná jako 3D model v modelovacím programu. Určení procesu, který povede k získání rekonstruované plochy, a představení jednotlivých fází rekonstrukce povrchů je hlavním předmětem našeho příspěvku.

Klíčová slova: rekonstrukce povrchů, mračno bodů, 3D skener

1 Úvod

Rekonstrukce povrchů z mračna bodů představuje velmi moderní a široce používanou metodu v digitalizaci reálných povrchů. Tato zajímavá problematika z oblasti počítačové grafiky má své uplatnění v mnoha odvětvích a její aplikovatelnost se neustále rozrůstá. Jde o velmi moderní oblast zkoumání, která je využívána v různých disciplínách výpočetní geometrie, počítačové grafiky nebo v CAD (computer-aided design) systémech. Počítačový popis reálných objektů je důležitý ve stavebních oborech, při restaurování historických objektů, zaměřování skutečného stavu budov nebo při zachování současného kulturního dědictví.

Hledání výsledného zrekonstruovaného povrchu představuje netriviální problém, neexistuje všeobecný řešící postup, který by byl použitelný pro libovolné zadání této úlohy a libovolné mračno bodů. Díky své obtížnosti, rekonstrukce povrchů z mračna bodů stále vyžaduje hledání nových způsobů řešení a další inovace. Důležitou motivací pro hledání a rozvíjení nových řešících technik je právě široké praktické využití této metody. Nejedná se tedy v žádném případě pouze o teoretický problém. Náročnost obecného problému rekonstrukce povrchů z mračna bodů tedy představuje velkou výzvu v hledání nových univerzálnějších postupů.

Hlavním cílem rekonstrukce je digitální dokumentace reálných povrchů. Jde tedy o proces, který převádí fyzický model nějakého objektu, reálnou stavbu, mechanickou součástku nebo jiný reálný objekt do podoby počítačového

modelu, viz [1, 5]. Tímto způsobem lze získat matematický popis daného objektu a je možné s ním dále manipulovat v matematických a modelovacích počítačových programech. S rekonstruovanými plochami lze dále pracovat například při statických výpočtech.

V našem případě se speciálně zaměřujeme na rekonstrukci ploch s cílem vizualizovat reálná data a dokumentovat reálné objekty. Tedy úloha, kterou řešíme, je zadaná pomocí vstupní neorganizované konečné množiny bodů v prostoru, přičemž cílem je vytvořit takovou aproximující plochu, že body vstupní množiny leží na nebo blízko jejího povrchu. Body vstupní množiny jsou zadány pouze svými prostorovými souřadnicemi, v obecné úloze žádné další informace k dispozici nemáme. Předpokládáme, že vstupní množina bodů odpovídá v prostoru reálné ploše, jinak by úloha neměla řešení. Pokud je to možné, výslednou rekonstruovanou plochu chceme popsat parametricky či implicitně. Nutným mezikrokem je nalezení vhodné aproximující sítě, nejčastěji trojúhelníkové. Součástí procesu rekonstrukce je též tvorba 3D modelu rekonstruovaného objektu.

V našem výzkumu se především zabýváme geometrickými objekty a plochami využívaných v architektuře, přičemž se soustředíme na speciální příklady. Nejedná se tedy o rekonstrukce rozsáhlých staveb nebo stavebních komplexů, ale většinou o některé jejich zajímavé části. Při rekonstrukci reálných povrchů se zaměřujeme na architektonické stavby, objekty nebo jejich části zajímavé z geometrického hlediska. Konkrétně se věnujeme geometrii kleneb, různým formám zastřešení a dalším speciálním plochám stavebně-inženýrské praxe.

V našem příspěvku popíšeme stručně jednotlivé kroky rekonstrukce povrchů, tedy proces, který je potřebný k získání rekonstruované plochy v kompaktním popisu.

2 Rekonstrukce povrchů z mračna bodů

Cílem metody rekonstrukce ploch, kterou lze využívat k digitalizaci vybraných objektů, je ze vstupní konečné množiny bodů v prostoru tzv. **mračna bodů** (*point clouds*) zrekonstruovat povrch. Podmínkou je, aby výsledný povrch co nejlépe popisoval a vyjadřoval dané mračno bodů, viz [1, 2, 4, 5], které reprezentuje povrch nějaké reálné plochy. Cílem řešících metod je zrekonstruovaný povrch popsat parametrickými nebo implicitními rovnicemi a pro další práci je vyžadován i CAD model, viz [1]. V obecné úloze známe pro body vstupní množiny pouze jejich prostorové souřadnice.

2.1 Bodová fáze

V prvním kroku rekonstrukce povrchů je nutné obdržet vstupní konečnou množinu bodů v prostoru, tedy mračno bodů. Mračna bodů jsou většinou získávána 3D skenováním reálných objektů, k čemuž slouží speciální 3D laserové či optické skenery, viz [1, 5]. Výsledkem takového skenování je

množina více či méně pravidelně nasnímaných bodů fyzického modelu nebo reálné stavby.

V našem výzkumu se zabýváme pouze takovými 3D skenery, které zachycují body na povrchu objektu. Zařízení, která přinášejí informace také o vnitřní stavbě objektu a využívají se například v lékařství či archeologii, nejsou předmětem našeho zájmu. Ukazuje se totiž, že v architektuře, kde cílem je zachytit geometrii povrchu daného objektu, nenacházejí takové uplatnění.

Před samotným skenováním povrchu je nutné znát alespoň některé vlastnosti objektu, abychom mohli rozhodnout, která data jsou pro zachycení významná. Jedná se o povrchovou strukturu, vzhled, komplikovanost povrchu nebo naopak jednoduchost či jiné geometrické vlastnosti, viz [5]. U některých objektů je žádoucí, aby body mračna, které objekt reprezentují, byly v některých částech povrchu hustší nebo řidší, u jiných je naopak výhodou, aby byly rozmístěny pravidelně. Toto rozhodování je nezbytné, neboť vždy pracujeme s konečnou množinou bodů.

Naměřená data obsahují velké množství bodů (u reálných povrchů až miliony), přičemž v ideálním případě tyto body leží přímo na povrchu plochy a jsou to tedy přesně polohy bodů na povrchu objektu. V reálných aplikacích však může velmi často docházet k chybám a nepřesnostem v měření, viz [1, 2, 4]. Každé skenovací zařízení pracuje s různě velkou odchylkou měření, je tedy nutné s těmito aspekty počítat. Kromě toho povrch reálného objektu většinou nelze zachytit pouze jedním skenováním z jednoho výchozího bodu. Z jedné polohy skeneru může být totiž přímo viditelná pouze část objektu. Tento problém se řeší tzv. **registrací** (viz [5]). Skenování se provádí vícekrát z různých stanovišť a získaná mračna bodů se následně slučují. Počet těchto dílčích snímků se odvíjí od členitosti objektu, například obsahuje-li díry nebo je jinak komplikovaný, je nutné ho provádět vícekrát. Každé takto získané mračno bodů je reprezentováno v různých kartézských soustavách souřadnic. Sloučením bodů do jedné kartézské soustavy souřadnic získáváme mračno bodů reprezentující povrch daného objektu.

Výsledné mračno bodů může obsahovat redundantní data, viz [1, 2, 4], tedy body, které nepřináší žádnou novou informaci nebo leží navzájem příliš blízko sebe. Kromě toho se díky nepřesnostem v měření mohou ve výsledné množině objevovat tzv. šumy. K odstranění nadbytečných bodů a k filtrování nežádoucích šumů slouží celá řada tzv. **ztenčujících algoritmů** (*thinning algorithms*), viz [4]. Tyto popsané postupy tvoří tzv. **bodovou fázi** (*point phase*) procesu rekonstrukce povrchu, viz [5].

2.2 Polygonální fáze

Nyní máme připravenou vstupní množinu bodů (mračno) pro další zpracování. Odstraněny jsou nadbytečné body a chyby v měření. Následuje tzv. **polygonální fáze** (*polygon phase*), tedy postup (viz [5]), kterým dané mračno bodů aproximujeme pomocí polygonální sítě (viz [2]), nejčastěji sítě

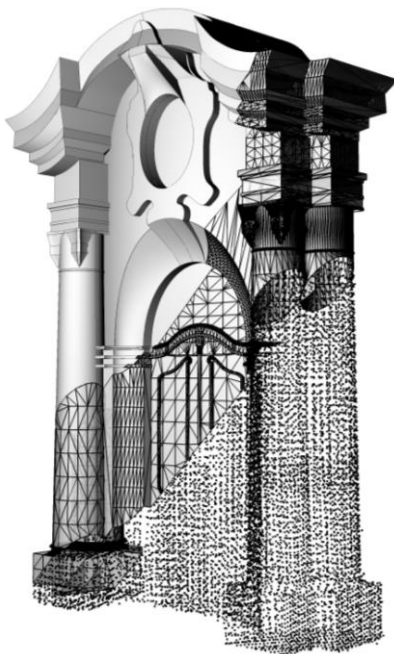
trojúhelníků. Výsledná síť je skutečně pouze aproximací tvaru původního povrchu, neboť pro přesný popis rekonstruovaného objektu bychom potřebovali, aby vstupní mračno bodů obsahovalo nekonečně mnoho vzorků, což samozřejmě není možné. Je tedy opravdu nezbytné dodržet předchozí požadavky při skenování, aby výsledná aproximující síť byla korektní a původní povrch aproximovala co nejlépe. Hledání této sítě představuje velice komplikovaný problém. Dosud neexistují uspokojivé univerzální řešící postupy. Lze říci, že pro každou vstupní množinu je nutné použít pro počítání aproximující sítě speciální algoritmus. Je zřejmé, že jiný algoritmus bude vyžadovaný pro objekt s komplikovaným povrchem s otvory a jiný pro jednoduchý povrch popisující objekt málo členitý. Díky vytvoření aproximující sítě, dostáváme prvotní reprezentaci objektu, se kterou lze dále pracovat. Tento krok je nevyhnutelný, neboť pro mnoho aplikací je pouhá bodová reprezentace povrchu nedostačující.

2.3 Tvarová fáze

V tomto okamžiku bychom mohli rekonstrukci povrchu ukončit. Pokud totiž bude aproximující síť reprezentující povrch dostatečně jemná, v mnoha oblastech počítačové grafiky a výpočetní geometrie nebo v různých grafických aplikacích, je tento popis postačující. My se však v další práci budeme věnovat převážně povrchům stavebních ploch objevujících se v architektuře, je pro nás další zpracování povrchů důležité.

Pro účely stavitelství, architektury a digitální dokumentace památek je proto do rekonstrukce povrchu přidána ještě tzv. **tvarová fáze** (*shape phase*), viz [1]. Tento proces převádí síť aproximující povrch do CAD reprezentace (3D počítačový model objektu), která je vhodná pro další zpracování, vizualizaci nebo různé simulace. Jde tedy o nahrazení sítě hladkým povrchem, který aproximuje zadané mračno bodů. Součástí této fáze je též tzv. **segmentace** (*segmentation*), tedy detekce a rozdělení povrchu objektu na oblasti s rozdílnou geometrií, viz [1, 5]. Jinými slovy jde o nalezení základních geometrických prvků (*geometric primitives*), tj. rovinných částí objektu, částí válcových, kuželových, kulových ploch, jiných speciálních ploch nebo částí obecných ploch (*freeform patches*). Při segmentaci tedy rozdělíme vstupní data naskenovaného objektu na části, které následně aproximujeme daným typem plochy. Nepopisujeme tedy povrch pomocí jedné plochy, což v praxi většinou není ani možné, ale soustavou různých ploch, které na sebe napojujeme. Je tedy nutné rozpoznat také hrany objektu, ve kterých budeme jednotlivé části napojovat ostře. Segmentace není plně automatická, obzvláště ne při rekonstrukci objektů z oblastí jako je architektura. Segmentace může být u daného objektu po aplikaci různých postupů rozdílná. Velkou výhodou je samozřejmě znalost geometrických vlastností daného objektu. Tvarovou fázi uzavírá **proces prokládání povrchem** (*surface fitting*) daným typem plochy určeného při segmentaci, viz [1, 5]. Při prokládání povrchu získáme také

implicitní nebo parametrické vyjádření částí ploch, kterými naskenovaný povrch reprezentujeme. Celý proces rekonstrukce povrchu z mračna bodů ilustruje obrázek 1.



Obr. 1: Příklad rekonstrukce povrchu z mračna bodů. Znárodněna je vstupní množina bodů, trojúhelníková síť reprezentující povrch a výsledný CAD model.

2.4 Shrnutí

Rekonstrukce povrchů z mračna bodů se tedy skládá z několika dílčích kroků. Shrňme si tyto kroky v následujícím přehledu.

Rekonstrukce povrchů je tvořena

- **bodovou fází**
 - získávání mračna bodů 3D skenováním reálných povrchů
 - registrace
 - odstranění nadbytečných bodů a šumů
- **polygonální fází**
 - aproximace mračna bodů pomocí polygonální sítě (nejčastěji trojúhelníkové)

- **tvárovou fází**
 - segmentace
 - prokládání povrchu daným typem plochy určené při segmentaci

V našem výzkumu se zabýváme hledáním nových přístupů a metod hodicích se právě pro rekonstrukce speciálních typů povrchů. Převážně se věnujeme hledání prvotní polygonální reprezentace, při kterém využíváme moderní počítačový software, rekonstrukci povrchů pomocí postupné evoluce, využití a příkladům rekonstrukce ploch stavební praxe a tvorbě 3D modelů rekonstruovaných ploch. Využití postupné evoluce v rekonstrukci povrchů jsme již popisovali, viz [5, 6]. Implementace této metody je tedy již hotová. Některé další nové přístupy jsou založené kromě jiného též na vizuálním posouzení rekonstruované množiny bodů v jisté fázi rekonstrukce povrchu. Některé přístupy tedy dovolují interaktivní zásah uživatele, což představuje v řešení rekonstrukce povrchu nové možnosti. Veškeré navržené algoritmy implementujeme v moderním programovacím jazyku a interaktivním prostředí MATLAB uzpůsobeném technickým výpočtům. Při testování správnosti postupů jsou využívána počítačově generovaná data nebo data reprezentující pouze menší modely reálných objektů. Tento přístup je zřejmý, neboť u rozměrných dat je obtížnější správnost řešení ověřit, kromě toho se jedná o časově velmi náročnou práci. Ověřování teoretických návrhů pomocí experimentálních implementací je navíc standardní postup. Výběr metod, které jsou nejvhodnější pro danou množinu bodů, je prováděn jejich porovnáním, přičemž se zohledňuje rychlost, spolehlivost a efektivita algoritmu.

V některých fázích hledání řešení rekonstrukce povrchu je v hojné míře užíváno též 3D modelování v programu Rhinoceros 4.0 (NURBS modeling for Windows). Tento moderní software je využíván například k předzpracování zadaného mračna bodů reprezentující rekonstruovaný povrch a k tvorbě prvotní polygonální reprezentace. Hledání kvalitní polygonální reprezentace povrchu je samo o sobě velmi náročnou optimalizační úlohou, které je v současnosti věnována v různých praktických aplikacích velká pozornost. V našem výzkumu je polygonální reprezentace většinou řešena pomocí existujících metod a funkcí v programu MATLAB nebo s využitím nástrojů v modelovacím softwaru Rhinoceros 4.0. Program Rhinoceros 4.0 je také používán v závěrečné fázi rekonstrukce k vymodelování zrekonstruovaného povrchu. Tento krok rekonstrukce povrchu bývá většinou opomenut a rekonstrukce končí ve fázi nalezení analytického popisu povrchu. Vizualizace tedy představuje další obohacení výstupů.

3 Závěr

V článku jsme stručně popsali jednotlivé fáze rekonstrukce povrchů z mračna bodů. V dalším výzkumu se budeme zabývat hledáním nových řešících technik

a nových přístupů v digitalizaci reálných povrchů. Nově navržené metody a algoritmy též hodláme implementovat ve výpočetním prostředí MATLAB.

Literatura

- [1] S. J. Ahn: *Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2004
- [2] T. K. Dey: *Curve and Surface Reconstruction*. Cambridge University Press, USA, 2007
- [3] A. Iske: *Multiresolution Methods in Scattered Data Modelling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2004.
- [4] H. Pottmann, A. Asperl, M. Hofer, A. Kilian: *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press, USA, 2007
- [5] P. Surynková: *Curve and surface reconstruction based on the method of evolution*. Proceedings of the 19th Annual Conference of Doctoral Students (WDS 2010), Prague, Czech Republic, pp. 139–144, MATFYZPRESS, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, 2010
- [6] P. Surynková, Z. Šír: *Shape fitting and non convex data analysis*. Sborník příspěvků 30. konference o geometrii a grafice, Zlenice, Česká republika, str. 219–229, Matfyzpress, vydavatelství Matematicko-fyzikální fakulty, Univerzita Karlova v Praze, 2010