

NEUROCRANIAL SHAPE RECONSTRUCTION USING STATISTICAL SHAPE MODELS

Ondřej Klíma

Master Degree Programme (2), FIT BUT

E-mail: xklima13@stud.fit.vutbr.cz

Supervised by: Michal Španěl

E-mail: spanel@fit.vutbr.cz

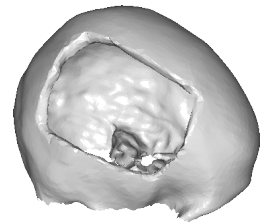
Abstract: This thesis focuses on an injured skull shape reconstruction. The reconstruction is made by creating statistical shape model from the data set of incomplete skulls. The thesis contains issues concerning the skull models registration, removing vertices misregistered due to missing skull parts and the estimation of their correct position by using probabilistic PCA. Results are shown on the skull with an artificially created injury, the reconstructed skull is compared with the original complete one by using Hausdorff distance.

Keywords: skull, neurocranium, reconstruction, statistical shape models, point distribution models, thin-plate spline, PPCA, outliers identification, DBSCAN, morphometry, Hausdorff distance

1 ÚVOD

Cílem práce bylo nalézt metodu, která by usnadnila modelování neurokraniálních implantátů, určených pro léčbu zranění laterálních částí lebky. Příklad zranění je na obrázku 1. V současné době se implantáty modelují ručně pomocí CAD/CAM systémů, což vyžaduje značnou dávku modelářova úsilí.

Pomoc při modelování spočívá ve vygenerování nepoškozené lebky, která se tvarem co nejvíce podobá lebce léčeného pacienta. Po sesouhlasení vygenerované a léčené lebky si modelář usnadní práci vymodelováním implantátu podle tvaru zrekonstruované lebky.



Obrázek 1: Lebka s uměle vytvořeným zraněním.

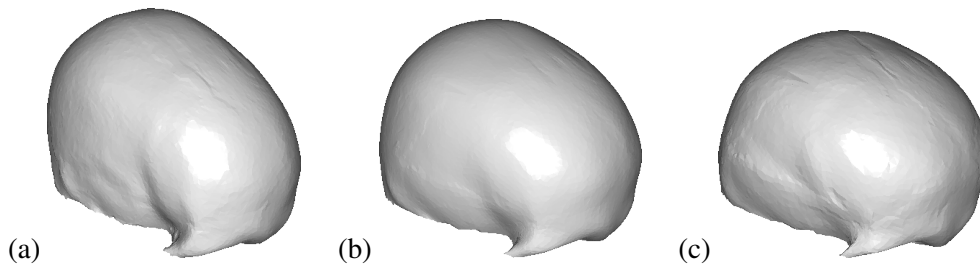
2 NÁVRH METODY REKONSTRUKCE PORANĚNÉ LEBKY

Vytvoření nejpodobnější lebky probíhá s využitím souboru zraněných lebek dalších pacientů. Generování předlohy pro implantát je založeno na statistické analýze tvaru tohoto souboru. Statistický model tvaru [2], synonymně nazýván jako Point Distribution Model (PDM), je parametrický model, který pomocí analýzy hlavních komponent (PCA) umožňuje modelovat variabilitu tvarů v dané sadě, zároveň umožňuje generovat nové tvary, které se v trénovací sadě nenacházejí. Statistický model popisuje jednotlivé tvary rovnicí:

$$Y = \bar{X} + \phi b \quad (1)$$

kde Y je vektor souřadnic jednotlivých bodů modelovaného tvaru, \bar{X} značí průměrný tvar, ϕ je transformační matice a b vektor hodnot hlavních komponent. Modelování variability tvarů je ilustrováno obrázkem 2.

Ze souboru nekompletních, poškozených lebek je nutné sestavit model generující celistvé nezraněné lebky. Klasický PDM může být tvořen pouze z kompletních dat, proto je nutné klasickou konstrukci



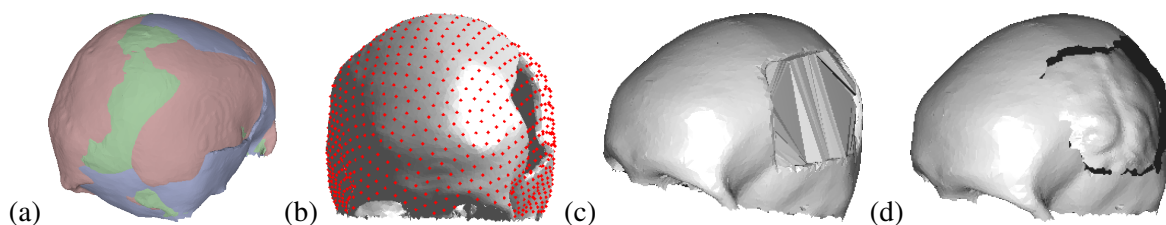
Obrázek 2: Lebky modelované změnou hodnoty první hlavní komponenty PDM, (a) $b_1 = -3\sqrt{\lambda}$, (b) průměrný tvar $b_1 = 0$, (c) $b_1 = 3\sqrt{\lambda}$. λ značí rozptyl hodnot první hlavní komponenty.

modelu rozšířit. Řešení podle [1] spočívá v modelování tvaru pomocí pravděpodobnostní PCA, která oproti klasické PCA navíc umožňuje odhadnutí polohy chybějících bodů.

2.1 VYTVOŘENÍ STATISTICKÉHO MODELU LEBKY

Lebka určená k rekonstrukci je rekonstruována zároveň s celou trénovací sadou. Postup vytvoření statistického modelu je možné shrnout do čtyř hlavních kroků:

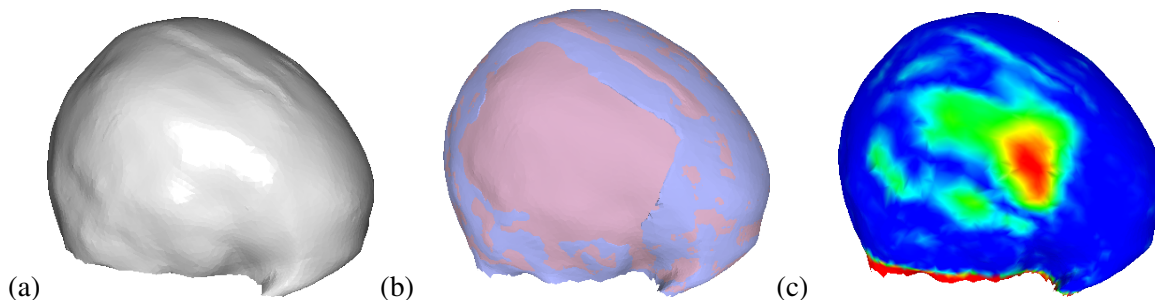
1. Nejprve jsou lebky anotovány sadou 12 landmarků. Následně je počet vzorků v trénovací sadě zdvojnásoben zrcadlením původních lebek. Díky tomu je v trénovací sadě stejný počet lebek zraněných na pravé a na levé straně. Lebky jsou zarovnány pomocí zobecněné prokrústovské analýzy (GPA [2]), viz. obr. 3a.
2. Dalším krokem je registrace kompletní, referenční lebky na všechny zraněné vzorky v trénovací sadě. Registrace probíhá s využitím TPS warpingu [3]. Na každé lebce je vygenerováno 2012 pseudolandmarků (obr. 3b), podle kterých je referenční lebka deformována na lebky zbývající. Po deformaci jsou k vrcholům polygonálního modelu referenční lebky dohledány nejbližší body na zkoumaných lebkách (obr. 3c). Výsledkem registrace je, že všechny lebky jsou reprezentovány stejným počtem vrcholů, které navíc mezi jednotlivými lebkami korespondují.
3. Následuje identifikace a odstranění bodů, které byly vlivem zranění registrovány do špatných míst. Správně registrované body tvoří mezi lebkami výrazné shluky, které obsahují minimálně tolik bodů, kolik bylo lebek v trénovací sadě před zrcadlením (krok 1). Nalezení odlehlých vrcholů je řešeno pomocí metody DBSCAN. Registrovaná lebka zbavená chybných vrcholů je na obr. 3d.
4. Posledním krokem je doplnění chybějících bodů a vytvoření statistického modelu pomocí PPCA. Výsledek rekonstrukce je na obr. 4a.



Obrázek 3: (a) Lebky zarovnané pomocí GPA, (b) lebka pokrytá 2012 pseudolandmarky, (c) referenční lebka registrovaná na zraněnou lebku, (d) odstranění chybně registrovaných bodů.

3 VÝSLEDKY

Výsledky jsou ilustrovány rekonstrukcí lebky s uměle vytvořeným traumatem (obr. 1, lebka byla získána z Visible Human Project). Rekonstruovaná lebka je na obrázku 4a. Pro názornost, jak si zraněná a rekonstruovaná lebka odpovídají v místě zranění, byly na sebe obě lebky zarovnané (obr. 1b, vygenerovaná lebka je vykreslena okrovou a zraněná lebka šedou barvou). Rozdíl mezi výsledkem rekonstrukce a původní nepoškozenou lebkou je popsán pomocí Hausdorffovské vzdálenosti, obrázek 4c. Místa s minimálním rozdílem jsou značena modrou barvou, nejvíce se liší červeně obarvené oblasti.



Obrázek 4: (a) Rekonstrukce zraněné lebky (b) superpozice zraněné a rekonstruované lebky, (c) rozdíl mezi původní a rekonstruovanou lebkou.

Na superpozici lebek lze pozorovat drobné rozdíly v místech, kde rekonstruovaná lebka přední částí navazuje na hranu zranění. V přední části lze zároveň pozorovat největší rozdíl oproti původní lebce. Oba nedostatky spolu souvisejí, způsobeny jsou výraznější asymetrií v přední části původní lebky. Problémy může způsobovat i velká odlišnost rekonstruované lebky od zbytku trénovací sady.

4 ZÁVĚR

V tomto příspěvku byla prezentována metoda pro rekonstrukci chybějící části zraněné lebky, založená na statistické analýze tvaru. Výsledky ukazují, že rekonstrukce lebky nemusí být zcela přesná v místech, kde byla původně lebka zatížena výraznější asymetrií. Na výslednou podobu rekonstruované lebky má vliv také podoba lebek v trénovací sadě. Metoda má potenciál reálného využití při modelování neurokraniálních implantátů.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory grantu FIT-S-11-2 a výzkumného záměru MSM 0021630528. Poděkování náleží Ing. Michalu Španělovi, Ph.D. a společnosti 3Dim Laboratory s.r.o. za konzultace a poskytnutí datové sady pro experimenty.

REFERENCE

- [1] LÜTHI, M., ALBRECHT, T. a VETTER, T. Building Shape Models from Lousy Data. In: *International Conference on MICCAI*. London, 2009.
- [2] STEGMANN, M. B. a D. D. GOMEZ. A Brief Introduction to Statistical Shape Analysis. 6.3.2002.
- [3] BOOKSTEIN, F. L.: Principal warp: Thin-plate Splines and the Decomposition of Deformations. *IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE*, ročník 12, č. 6, 1989.