



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

**PROBLEMATIKA KVALITY MKP MODELŮ LIDSKÝCH TKÁNÍ
AUTOMATICKY VYTVOŘENÝCH Z CT/MR DAT**

Přemysl Kršek*

Abstrakt:

Při automatické tvorbě MKP modelů lidských tkání z CT/MR dat je kvalita sítě jednou z nejdůležitějších charakteristik, které ovlivňují jejich praktické použití v biomechanice při výpočtovém modelování. V článku jsou rozebrány dva hlavní faktory, které negativně ovlivňují kvalitu modelů. Je také navržena metoda pro zlepšení jejich kvality a představeny výsledky.

Klíčová slova: CT, MR, mešování, biomechanika, tetrahedr, Delaunay, kvalita.

1. Úvod:

Od roku 1994 se na našem pracovišti věnujeme problematice automatické tvorby MKP modelů živých lidských tkání z dat získaných Počítačovou tomografií (CT) a Magnetickou resonancí (MR) [1]. Dosavadní zkušenosti ukazují, že kvalita sítě automaticky vytvořených tetrahedrálních MKP modelů je jednou z nejdůležitějších charakteristik, které ovlivňují jejich praktické použití v biomechanice, při výpočtovém modelování vlastností a chování tkání. Tento článek se věnuje právě problematice kvality automaticky generovaných MKP modelů z CT/MR dat.

2. Metoda tvorby MKP modelů:

Při tvorbě MKP modelů živých lidských tkání vycházíme ze segmentovaných CT/MR dat, které můžeme chápat také jako voxel modely [2] vybraných tkání. Pro tvorbu modelů máme vytvořen speciální počítačový programový systém. Tento systém je schopen generovat čistě tetrahedrální MKP modely libovolných tkání, zcela automaticky a nezávisle na složitosti jejich geometrie. Tvorba MKP modelů probíhá v následujících krocích [5]:

- a) Vektorizace voxel modelu tkáně metodou „Marching cubes“ [3]. Výsledkem je trojúhelníková síť, která popisuje vektorový povrch voxel modelu tkáně.
- b) Vyhlazení povrchové trojúhelníkové sítě „Laplaceovým operátorem“ [11].
- c) Redukce počtu trojúhelníků povrchové sítě metodou „Surface simplification using quadric error metrics“ [7].
- d) Vytvoření tetrahedrální sítě jako „Delaunayovy triangulace“ [6] na základě povrchové trojúhelníkové sítě. Získáme tetrahedrální síť vyplňující povrchovou síť při zachování hranic.
- e) Optimalizace tetrahedrální sítě z hlediska kvality prvků [9][10]. Dostáváme výsledný MKP model, který je pro použití importován do MKP systému.

* Ing. Přemysl Kršek, Ph.D., FIT VUT v Brně, Božetěchova 2, Brno, 612 66, krsek@fit.vutbr.cz

3. Kvalita MKP modelů:

Pro MKP modely je kvalita jejich prvků velmi důležitá, protože ovlivňuje přesnost numerického řešení. Při jejich tvorbě „klasickou metodou“ [4] je výsledná síť prvků vytvořena v MKP systému podle „základní geometrie“, která se skládá z: uzlů, křivek, ploch a objemů. Základní geometrii tvoří uživatel většinou ručně a může tak vhodně ovlivnit (vyladit) kvalitu výsledné sítě [4]. To však často není možné kvůli složitosti geometrie tkání.

Při automatické tvorbě MKP modelů nepracujeme se základní geometrií, ale dostáváme rovnou tetrahedrální síť. Kvalita prvků sítě je potom dána možnostmi použité metody a parametry nastavení při její tvorbě.

3.1. Kriteria kvality:

Pod pojmem „kvalita prvku“ (trojúhelníka nebo tetraedru) je myšlen většinou jeho tvar. Za „kvalitní“ (ideální) je považován ten prvek, který je pravidelný, rovnostranný. Prvek se „špatnou kvalitou“ (nekvalitní) je vzhledem k ideálnímu prvku deformovaný, protáhlý nebo rozplácly (viz. obr. 1). Pro posouzení kvality prvků existuje mnoho různých kritérií [8]. Nejčastěji používaná jsou tyto:

- a) Maximální úhel stěny prvku.
- b) Poměr nejdelší a nejkratší hrany prvku.
- c) Poměr poloměrů opsané a vepsané koule.
- d) Poměr nejdelší hrany prvku a poloměru vepsané koule.
- e) Poměr nejdelší hrany prvku a jeho objemu.

Pro naše aplikace používáme kritérium kvality, které je definováno jako poměr nejdelší hrany prvku a poloměru vepsané koule. Z praktických důvodů je toto kritérium upraveno do normalizovaného tvaru podle kvality ideálního (rovnostranného) prvku. Ten má hodnotu kritéria rovno 1. Ostatní tvary prvku mají pak hodnotu vždy větší.

Vyjádření normalizovaného kritéria pro trojúhelník (Q_{Tri}) a tetraedr (Q_{Tet}) [6]:

$$Q_{Tri} = \alpha_{Tri} \cdot \frac{h_{max}}{\rho_{Tri}} = \alpha_{Tri} \cdot \frac{h_{max} \cdot P_{Tri}}{2 \cdot S_{Tri}} = \frac{\sqrt{3} \cdot h_{max} \cdot P_{Tri}}{12 \cdot S_{Tri}}$$
$$Q_{Tet} = \alpha_{Tet} \cdot \frac{h_{max}}{\rho_{Tet}} = \alpha_{Tet} \cdot \frac{h_{max} \cdot S_{Tet}}{3 \cdot V_{Tet}} = \frac{\sqrt{6} \cdot h_{max} \cdot S_{Tet}}{36 \cdot V_{Tet}}$$

$$\rho_{Tri} = \frac{2 \cdot S_{Tri}}{P_{Tri}}, \quad \rho_{Tet} = \frac{3 \cdot V_{Tet}}{S_{Tet}} \quad - \text{poloměr vepsané kružnice, koule}$$

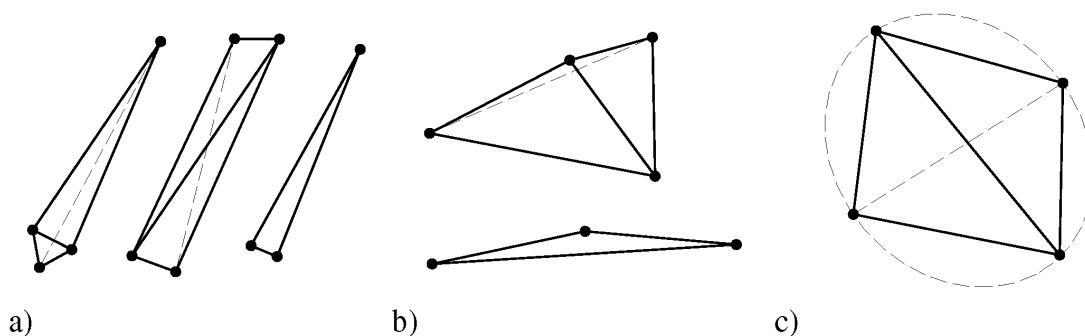
$$\alpha_{Tri} = \frac{\sqrt{3}}{6}, \quad \alpha_{Tet} = \frac{\sqrt{6}}{12} \quad - \text{normalizační faktory}$$

S_{Tri} , S_{Tet} - plocha prvku

P_{Tri} - obvod prvku

V_{Tet} - objem prvku

h_{max} - nejdelší hrana prvku



obr. 1: Schéma nekvalitních prvků: a) needle, b) cap, c) sliver.

3.2. Faktory ovlivňující kvalitu MKP modelů:

Z principu použité metody (viz. bod 2) vyplývá, že na kvalitu výsledné tetrahedrální sítě mají vliv následující dva faktory:

- a) Metoda tvorby tetrahedrální sítě na základě povrchové trojúhelníkové sítě:

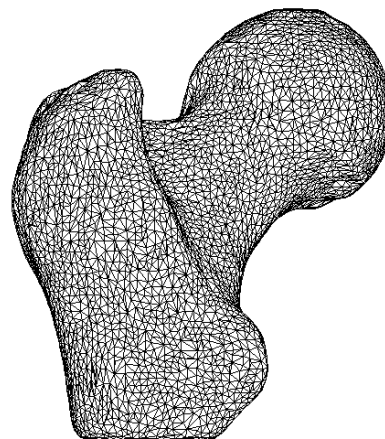
Jako metodu tvorby tetrahedrální sítě na základě povrchové trojúhelníkové sítě používáme Delaunayovu triangulaci (viz. bod 2). Tato metoda minimalizuje délky hran prvků propojujících dané uzly a zároveň maximalizuje minimální úhly stěn vzniklých prvků. Z hlediska propojení uzlů dává tedy ideální výsledky. Z hlediska kvality vzniklé sítě však není zcela optimální. Mohou totiž vznikat velmi zploštělé nebo protáhlé prvky (sliver, needle) (viz. obr. 1).

Delaunayova triangulace byla zvolena [5], protože dává pro danou množinu uzlů vždy jednoznačnou konformní síť a její použití je obecné pro libovolnou geometrii. Problémy s případnými nekvalitními prvky jsou řešeny při závěrečné optimalizaci kvality tetrahedrální sítě (viz. bod 2). Tento faktor ovlivňující kvalitu výsledné sítě je tedy v používané metodě již ošetřen.

- b) Kvalita povrchové trojúhelníkové sítě použité pro tvorbu tetrahedrální sítě:

Po vytvoření a vyhlazení je povrchová trojúhelníková síť složena z velkého počtu malých, většinou pravidelných trojúhelníků (viz. obr. 2). Po redukci počtu trojúhelníků vznikají, především na rovných místech, nekvalitní trojúhelníky. To je způsobeno vlastnostmi použité redukční metody [7], která se snaží minimalizovat odchylku redukované sítě proti původní povrchové síti. Nebere však při tom ohled na kvalitu trojúhelníků nové sítě.

Z redukované povrchové sítě, která obsahuje nekvalitní prvky, je následně vytvořena tetrahedrální síť, jako Delaunayova triangulace. Pro zajištění dodržení hranic a dosažení požadované kvality je provedena závěrečná optimalizace její kvality (viz. bod 2). Nekvalitní trojúhelníky povrchové sítě jsou při tom rozděleny na mnoho malých částí. Tím dochází k velkému lokálnímu zahušťování tetrahedrální sítě v místech, kde původně byly nekvalitní trojúhelníky. Proto má kvalita redukované povrchové sítě velký vliv na velikost, kvalitu a rovno-měrnost výsledné tetrahedrální sítě MKP modelu.



obr. 2: Vyhlazená povrchová síť femuru před redukcí.

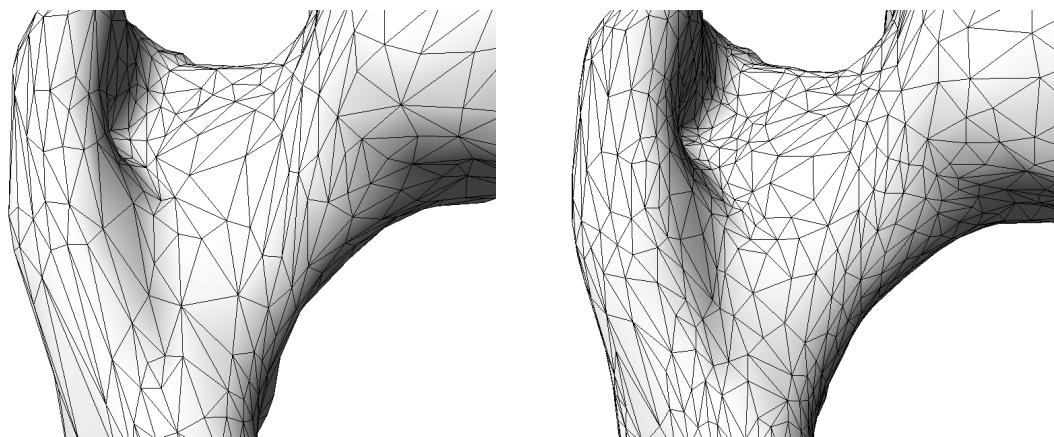
3.3. Ovlivnění kvality redukované povrchové trojúhelníkové sítě:

Aby při redukcí počtu trojúhelníků povrchové sítě nedocházelo ke zhoršování její kvality, byla do implementace redukčního algoritmu zavedena podmínka pro hlídání kvality nově vznikajících trojúhelníků. Podstatou této úpravy je testování kvality potencionálně vznikajících trojúhelníků při každé lokální redukční operaci na povrchové síti [7]. Jestliže jejich kvalita přesáhne nastavený limit, pak se daná redukční operace neprovede a pokračuje se na jiném místě.

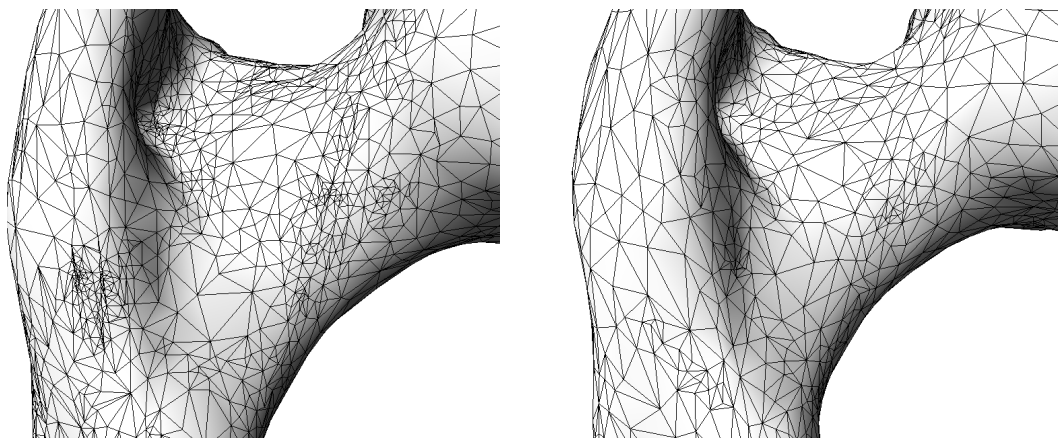
Výsledkem je redukováná trojúhelníková povrchová síť, která má sice vyšší výsledný počet trojúhelníků, ale její celková kvalita je lepší než nastavený limit. To se následně pozitivně projeví na kvalitě, velikosti a rovnoměrnosti tetrahedrál ní sítě vytvořené z takovéto povrchové sítě.

4. Dosažené výsledky:

Aplikací navrženého postupu jsme dosáhli výsledků, které jsou prezentovány v tabulce 1 a na obrázcích 3 a 4. Povrchová síť redukováná bez hlídání kvality prvků má při stejných parametrech redukce o malinko (~ 6%) menší počet trojúhelníků než povrchová síť redukováná s hlídáním kvality. Jestliže na základě těchto povrchových sítí sestrojíme tetrahedrál ní sítě a budeme je nakonec optimalizovat na stejnou kvalitu, pak bude tetrahedrál ní síť sestrojená z povrchu bez hlídání kvality o hodně větší (~ 70%) než tetrahedrál ní síť sestrojená z povrchu s hlídáním kvality.



obr. 3: Redukované povrchové trojúhelníkové sítě femuru: vlevo bez hlídání kvality během redukce, vpravo s hlídáním kvality během redukce.



obr. 4: Optimalizované výsledné tetrahedrál ní sítě femuru: vlevo sestrojená z povrchové sítě bez hlídání kvality, vpravo sestrojená z povrchové sítě s hlídáním kvality.

Tab. 1: Parametry modelů vytvořených popisovanými metodami.

Model	Počet Uzlů	Počet trojúhelníků	Počet tetrahedrů	Horní limit kriteria kvality
Redukovaná povrchová trojúhelníkové síť bez hlídání kvality během redukce (obr. 3a)	1309	2614	—	1000
Redukovaná povrchová trojúhelníkové síť s hlídáním kvality během redukce (obr. 3b)	1389	2774	—	4
Optimalizovaná výsledná tetrahedrální síť sestavená z povrchové sítě bez hlídání kvality (obr. 4a)	10404	—	51 552	10
Optimalizovaná výsledná tetrahedrální síť sestavená z povrchové sítě s hlídáním kvality (obr. 4b)	3617	—	15 037	10

5. Závěr:

Ve všech případech, nezávisle na kvalitě redukované povrchové sítě, je nakonec závěrečnou optimalizací dovedena výsledná tetrahedrální síť MKP modelu vždy ke stejné kvalitě.

Při hlídání kvality redukované povrchové sítě je však nárůst počtu prvků výsledné tetrahedrální sítě mnohem menší (viz. tab. 1) a rovnoměrnost sítě je mnohem větší (viz. obr. 3, 4). Je tedy jednoznačně výhodné zabezpečit maximální možnou kvalitu redukované povrchové sítě i za cenu snížení stupně redukce povrchu.

Do budoucna bychom se chtěli v oblasti kvality automaticky tvořených MKP modelů tkání věnovat především následujícím krokům:

- Implementovat jiný algoritmus redukce povrchové sítě, který by produkoval síť lepší kvality, při zachování vysokého stupně redukce (~ 90%).
- Zařadit optimalizaci kvality povrchové sítě ještě před tvorbu tetrahedrální sítě jako Delaunayovy triangulace na základě redukované povrchové sítě.
- Zlepšit funkci optimalizace kvality výsledné tetrahedrální sítě, především implementací nových optimalizačních strategií.

Literatura:

- [1] Drastich A.: Zobrazovací systémy v lékařství. 1. vyd. Brno, Rektorát VUT v Brně 1990, 512 s., ISBN 80-214-0220-2
- [2] Žara J., Beneš B., Felkel P.: Moderní počítačová grafika. 1. vyd. Praha, Computer press 1998, 448 s., ISBN 80-7226-049-9
- [3] Lorensen W., Cline H.: Marching cubes, A high resolution 3D surface construction algorithm. In: Proceedings, Siggraph 87, USA, 1987, s. 163-169
- [4] Kršek P.: Possibilities of creation of FEM models from CT/MR data. In: Sborník, Engineering mechanics 2000, Praha, AM AVCR, 2000, s. 27-32, ISBN 80-86246-03-5
- [5] Kršek P.: Přímá tvorba FEM modelů na základě CT/MR dat pro aplikace v biomechanice. Vědecké spisy VUT v Brně, Edice PhD Thesis, sv. 59, Brno, Vutium 2001, 30 s., ISBN 80-214-1796-X
- [6] George P. L., Borouchaki H.: Delaunay triangulation and meshing. 1. vyd. Paris, Hermes 1998, 413 s., ISBN 2-86601-692-0

- [7] Garland M., Heckbert, P.: Surface simplification using quadric error metrics. In: Proceedings, Siggraph 97, USA, 1997, s. 209-216
- [8] Berzins M.: Based Mesh Quality for Triangular and Tetrahedral Meshes. In: Proceedings, 6th International Meshing Roundtable, Sandia National Lab, USA, 1997, s. 427-436
- [9] Freitag L. A., Gooch C. O.: A Comparison of Tetrahedral Mesh Improvement Techniques. In: Proceedings, 5th International Meshing Roundtable, Sandia National Lab, USA, 1996, s. 87-106
- [10] Rivara M. C.: New Mathematical Tools and Techniques for the Refinement and Improvement of Unstructured Triangulations. In: Proceedings, 5th International Meshing Roundtable, Sandia National Lab, USA, 1996, s. 77-86
- [11] Balendran B.: A Direct Smoothing Method For Surface Meshes. In: Proceedings, 8th International Meshing Roundtable, South Lake Tahoe, USA, 1999, s. 189-193
- [12] Berzins M.: Based Mesh Quality for Triangular and Tetrahedral Meshes. In: Proceedings, 6th International Meshing Roundtable, Sandia National Lab, USA, 1997, s. 427-436

Grantová podpora:

Práce na popisované problematice je podporována těmito grantovými projekty:

- GP 201/01/D141
- GA 101/01/0974
- GA 106/98/K019

CT/MR data pro tvorbu MKP modelů tkání jsou získávána ve spolupráci s klinikou zobrazovacích metod ve Fakultní nemocnici u sv. Anny v Brně, jmenovitě s jejím přednostou Doc. MUDr. Petrem Krupou, CSc.