

NEW POSSIBILITIES OF CREATING FEM MODELS FROM CT/MR DATA

Přemysl Kršek *

Summary:

This article is dealing with problems of creating FEM models of human tissues directly from CT/MR data. The work is connected to grant project GA 106/98/K019. Main area of application of described method and algorithms is in subject "biomechanics of man" and in medicine.

Main topic of the article are "new possibilities of direct creating of FEM models". Currently we are working on: better automatization of segmentation of tissues from CT/MR data; creating small FEM models with better quality and creating FEM model of group of tissues. Our future work is: boolean operations with FEM models on mesh level and reduction of number of elements and nodes of FEM models.

Key words: CT MR FEM biomechanics meshing tetrahedron

1 Úvod

Konec 20. století a začátek století 21. je ve znamení rozvoje interdisciplinárních oborů. Jedním z příkladů tohoto trendu je obor „Biomechanika člověka“. Tento obor se zabývá řešením problémů klinické medicíny aplikací technických metod a postupů z technického oboru „Mechanika kontinua“. V mnoha konkrétních projektech biomechaniky se velmi často objevuje výpočtové modelování chování a vlastností biologických objektů (lidských tkání) prostřednictvím Metody konečných prvků (FEM).

Základním předpokladem pro výpočtové modelování pomocí FEM je vytvoření diskretizovaného modelu (FEM modelu), který dostatečně přesně popisuje modelovaný objekt. Pro vytvoření takového modelu je potřeba mít informace o geometrii a struktuře modelovaného objektu. Nejvhodnějším zdrojem těchto informací pro živé biologické objekty jsou moderní lékařské diagnostické metody, jako je Počítačová tomografie (CT) a Magnetická rezonance (MR) [1]. Data získaná z CT/MR zařízení je následně potřeba vhodným způsobem převést na FEM model, který je základem pro vlastní výpočtové modelování.

Několik posledních let se na našem pracovišti aktivně zabýváme metodami automatické tvorby FEM modelů právě z CT/MR dat. V tomto příspěvku jsou stručně popsány aktuálně používané metody. Hlavní důraz je však na nových postupech a možnostech tvorby FEM modelů z CT/MR dat, na jejichž vývoji se pracuje v současné době.

Výsledky dosavadní práce jsou aktivně využívány v rámci biomechanických projektů na Ústavu mechanik těles FSI VUT v Brně, na FS ČVUT v Praze a na ÚT AV ČR v Praze. Práce na tomto projektu je finančně podporována prostřednictvím grantového úkolu GA ČR č. GA 39 K 019/2108.

*Ing. Přemysl Kršek Ph.D., Ústav konstruování FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno; tel. +420 5 4114 3227, e-mail: krsek@iris.fme.vutbr.cz

2 Současné možnosti tvorby FEM modelů z CT/MR dat

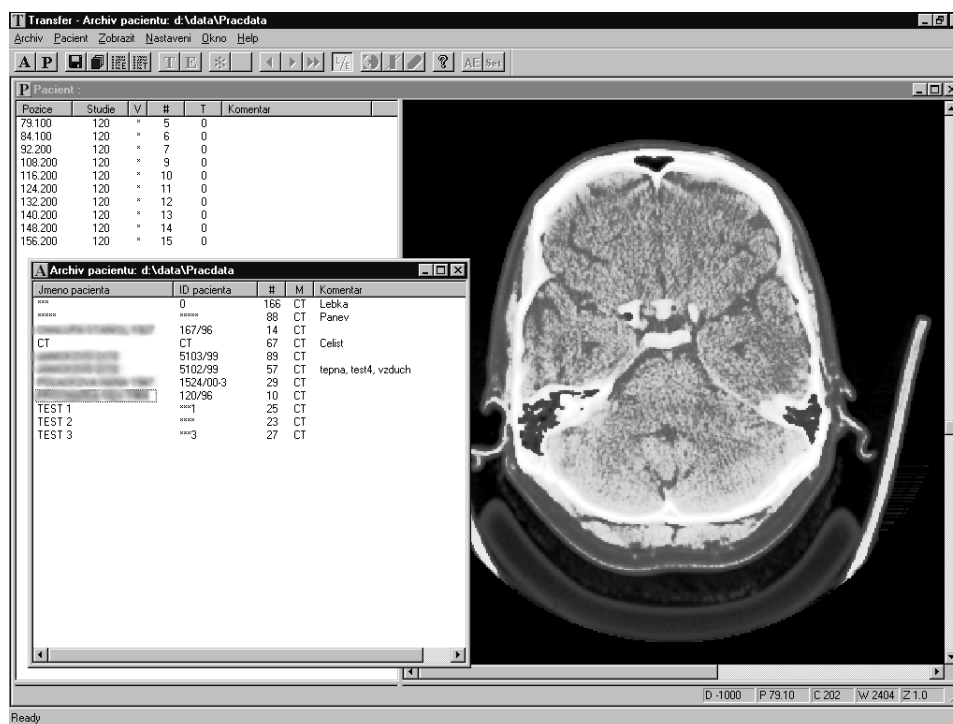
2.1 Získávání CT/MR dat

Základem našich aplikací jsou CT/MR data. Na začátku, před několika lety, byl velký problém získat vůbec nějaká CT/MR data. Dnes máme, díky Bohu, bezproblémový přístup k datům z reálných vyšetření nebo i z experimentálních snímků provedených podle našich požadavků (na suchých kostech). Tuto výjimečnou příležitost máme na Klinice zobrazovacích metod u sv. Anny v Brně, za podpory tamního přednosty Doc. MUDr. Petra Krupy.

Na této klinice jsou v provozu moderní zařízení. MR zařízení je od firmy Siemens, typ Symphony o výkonu 1,5 Tesla. CT zařízení je Marconi Mx8000, které je schopné provádět řezy tlusté pouze 0,5 mm. Obě tato zařízení podporují komunikaci ve standardu DICOM 3.0, jehož prostřednictvím data získáváme.

2.2 Příprava CT/MR dat

Prvním krokem tvorby FEM modelů z CT/MR dat je segmentace tkání. To prakticky představuje označení části CT/MR dat, které jsou obsazeny požadovanou tkání [2]. Segmentaci provádíme ve vlastním programovém systému Transfer 2.0 (viz. obr. 1), který umožňuje číst data ve formátu DICOM 3.0, variabilně je zobrazovat a segmentovat. V současné době se segmentace provádí jednoduše pomocí prahování v kombinaci s ruční editací oblastí. Výsledkem segmentace jsou voxel modely požadovaných tkání [3].



Obrázek 1: Obrazovka programu Transfer 2.0

2.3 Tvorba FEM modelů

CT/MR data můžeme po segmentaci tkání považovat za voxel modely, což je prostorová (3D) objemová forma rastrových dat. 3D FEM modely jsou tvořeny sítí objemových prvků, hexahedrů nebo tetrahedrů, což je typ objemové vektorové reprezentace. Při tvorbě FEM modelů z CT/MR dat tedy narážíme na principiální problém, kdy musíme převést data z jedné reprezentace (rastrové) do druhé (vektorové).

Lidské tkáně, jejichž FEM modely chceme vytvářet, mají převážně velmi složitý 3D tvar. Z tohoto důvodu je velmi náročné a někdy až nemožné vytvářet požadované FEM modely ručně ve FEM systému. Proto jsme se snažili najít takové metody, které by tvorbu FEM modelů zajistili zcela automaticky.

Na základě uvedených skutečností jsme navrhli metodu automatické tvorby FEM modelů složených výhradně z tetrahedrů [4]. Vstupem jsou voxel modely tkání, které získáme segmentací CT/MR dat. Výstupem je síť tetrahedrů. Postup práce při tvorbě FEM modelů je následující:

1. Vytvoření povrchové trojúhelníkové sítě z voxel modelu metodou „Marching cubes“ [5].
2. Vyhlazení povrchu, který je kvůli počátečnímu voxelovému popisu zubatý a vrstevnatý.
3. Redukce počtu prvků trojúhelníkové sítě povrchu [6].
4. Vytvoření sítě tetrahedrů jako Delaunayovy triangulace uzlů povrchu [7].
5. Zajištění regulérnosti Delaunayovy sítě tetrahedrů vůči povrchu.
6. Optimalizace kvality sítě tetrahedrů a tím získání konečného FEM modelu.

Obrázek 3 ukazuje aktuální příklad FEM model lebky vytvořeného uvedenou metodou přímo a zcela automaticky ze segmentovaných CT dat.

3 Současný vývoj

3.1 Automatizace procesu přípravy CT/MR dat

Tvorba FEM modelů reálných tkání ruční metodou (spojováním křivek, ploch a objemů), která byla dříve jako jediná k dispozici, trvá podle zkušeností řádově týdny až měsíce. Díky automatické metodě, kterou používáme, se čas vlastní tvorby FEM modelu zkrátil řádově na minuty až hodiny [8]. Časově nejnáročnější etapou se tak stala příprava CT/MR dat, konkrétně segmentace tkání. Ta se vyznačuje, v současné době, velkým podílem ruční práce, což je velmi náročné zvláště při vyšších počtech řezů CT/MR dat. Při přibližně 100 řezech může segmentace členité tkáně našimi současnými prostředky trvat okolo 10 hodin.

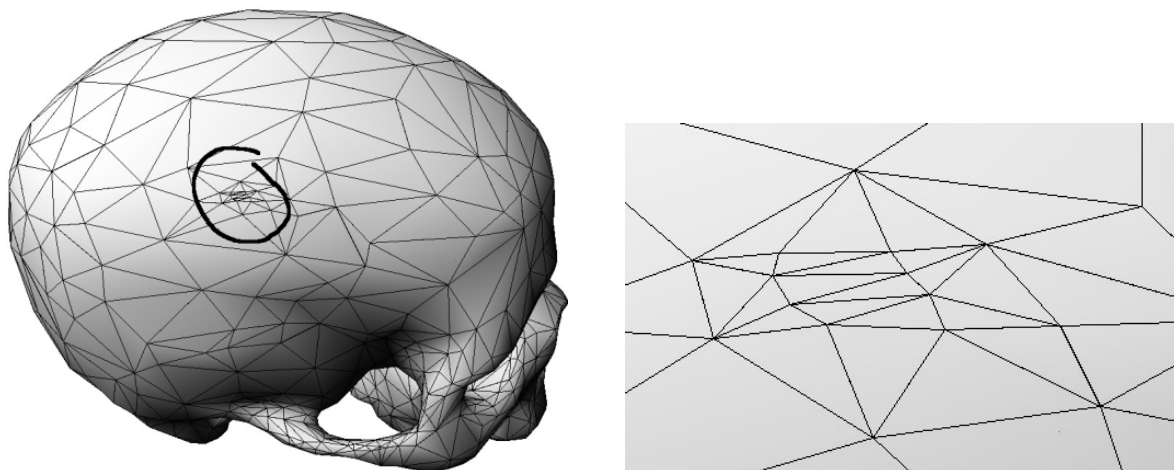
Z těchto důvodů se aktivně věnujeme posílení automatizace procesu segmentace tkání v CT/MR datech [2]. Asi nebude možné dosáhnout automatizace na 100%. Naším cílem proto je snížit podíl ruční práce a časovou náročnost segmentace tkání. Využití automatizace segmentace tkání bude mnohem širší, než jen pro naše aplikace, ale také např. pro medicínskou praxi v radiodiagnostice, radioterapii atd.

3.2 Zajištění lepší kvality získaného FEM modelu

Při testování použité metody byla zjištěna těsná spojitost mezi kvalitou povrchu tkáně po redukci počtu prvků trojúhelníkové sítě povrchu, kvalitou výsledného FEM modelu a počtem jeho tetrahedrů a uzlů.

Jestliže trojúhelníková povrchová síť obsahuje příliš malé nebo příliš deformované trojúhelníky, pak to způsobí poruchy kvality FEM modelu, který z ní vytvoříme. Při optimalizaci kvality tohoto FEM modelu dojde v místech nekvalitních trojúhelníků k zhuštění sítě tetrahedrů a tím k nárůstu počtu uzlů a tetrahedrů FEM modelu (viz. obr. 2).

Pro výpočtové modelování pomocí FEM systémů je samozřejmě nejlepší mít co nejkvalitnější model při co nejmenším počtu jeho tetrahedrů a uzlů. Proto se při dalším vývoji metody tvorby FEM modelů zaměřujeme kromě jiného na zajištění kvality ve všech fázích jeho vzniku. To se týká i fáze tvorby, vyhlazování a redukce povrchu tkáně.



Obrázek 2: Porucha kvality na povrchu FEM modelu lebky, vpravo detail zahuštění prvků.

3.3 Tvorba FEM modelů pro více navazujících tkání

Naše metoda v současné fázi implementace umí tvořit FEM modely vždy pouze pro jednu tkáň, jeden objekt. V rámci biomechaniky se však většinou řeší skupiny tkání, které na sebe navazují a mají mezi sebou vazby. Cílem FEM řešení je často vzájemná interakce těchto tkání.

Proto je hlavním důrazem aktuální vývojové práce právě implementace podpory pro tvorbu FEM modelů několika navazujících tkání. Cílem je vytvořit plně automatický programový systém, který by byl schopen na základě segmentovaných CT/MR dat vygenerovat FEM model pro komplexní skupinu tkání, včetně jejich vzájemných vazeb.

4 Záměry budoucího vývoje

4.1 Booleovské operace s FEM modely

Tvorba FEM modelů z voxel modelů (segmentovaná CT/MR data) je vhodná pro oblé, plynulé a nepravidelné tvary. Pro přesné (válcové, kulové, rovinné nebo hranaté) objekty není tato metoda vhodná, protože by zkreslovala jejich geometrii. V mnoha biomechanických úlohách však potřebujeme pracovat právě s pravidelnými geometrickými objekty (např. šrouby, implantáty, protézy atd.). Tvorba FEM modelů pravidelných geometrických objektů je neefektivnější v samotných FEM systémech, které byly vyvinuty právě pro tyto účely.

FEM model tkáně můžeme efektivně vytvořit přímo z CT/MR dat. FEM model např. náhrady kloubu vytvoříme nejlépe modelovacími prostředky FEM systému. Pak ovšem stojíme před problémem spojit tyto dva rozdílné modely dohromady, do jednoho navazujícího a regulárního FEM modelu. Právě tímto úkolem, který plyne z praktických potřeb řešených úloh, se chceme zabývat v blízké budoucnosti.

Základní myšlenkou kombinace dvou rozdílných objektů jsou Booleovské operace (součet, rozdíl a průnik) [3]. V rámci FEM systémů lze provádět tyto operace na úrovni vektorové geometrie (ploch a objemů), tedy ne na úrovni sítě prvků (tetrahedrů, hexahedrů). Teprve na základě takto získané geometrie je vytvořena síť prvků. Při tvorbě FEM modelů tkání přímo z CT/MR dat však vycházíme z rastrového voxel modelu. Nemáme tedy k dispozici vektorovou geometrii (ploch a objemů) ve smyslu chápání FEM systému. Proto nemůžeme ve FEM systému provést booleovské operace s modely vzniklými ve FEM systému a mimo něj.

Naším cílem při řešení tohoto úkolu je nalézt metodu, která by umožňovala provádět booleovské operace FEM modelů na úrovni sítě prvků. Obejdeme se tedy bez vektorové geometrie, jak ji chápe FEM systém. Tak budeme moci libovolně kombinovat FEM modely tkání vzniklé přímou generací z CT/MR dat s pravidelnými geometrickými modely vytvořenými ve FEM systému.

4.2 Redukce počtu prvků a uzlů FEM modelu

Přes snahy snížit nárůst počtu tetrahedrů a uzlů FEM modelu během optimalizace (viz. 3.2) je jejich rozsah, zvláště pro velmi členité a rozsáhlé objekty, stále velmi velký. To má vliv na řešitelnost příslušných úloh a zvyšuje to nároky na dostupnou výpočetní techniku.

Proto se chceme v budoucím vývoji věnovat také metodám pro redukci počtu prvků a uzlů FEM modelu, při zachování jeho kvality a úrovně zachycení detailů objektů.

Jednou z možných cest, jak toho dosáhnout je redukce příliš malých prvků, v jejichž okolí dochází ke zhušťování sítě. To samozřejmě souvisí s optimalizací kvality povrchových prvků FEM modelu (viz. 3.2). Další možností je sdružování sousedních tetrahedrů, aby vznikly opět tetrahedry. Efektivní možností je sdružování několika čtyřuzlových tetrahedrů na desetiuzlové.

5 Závěr

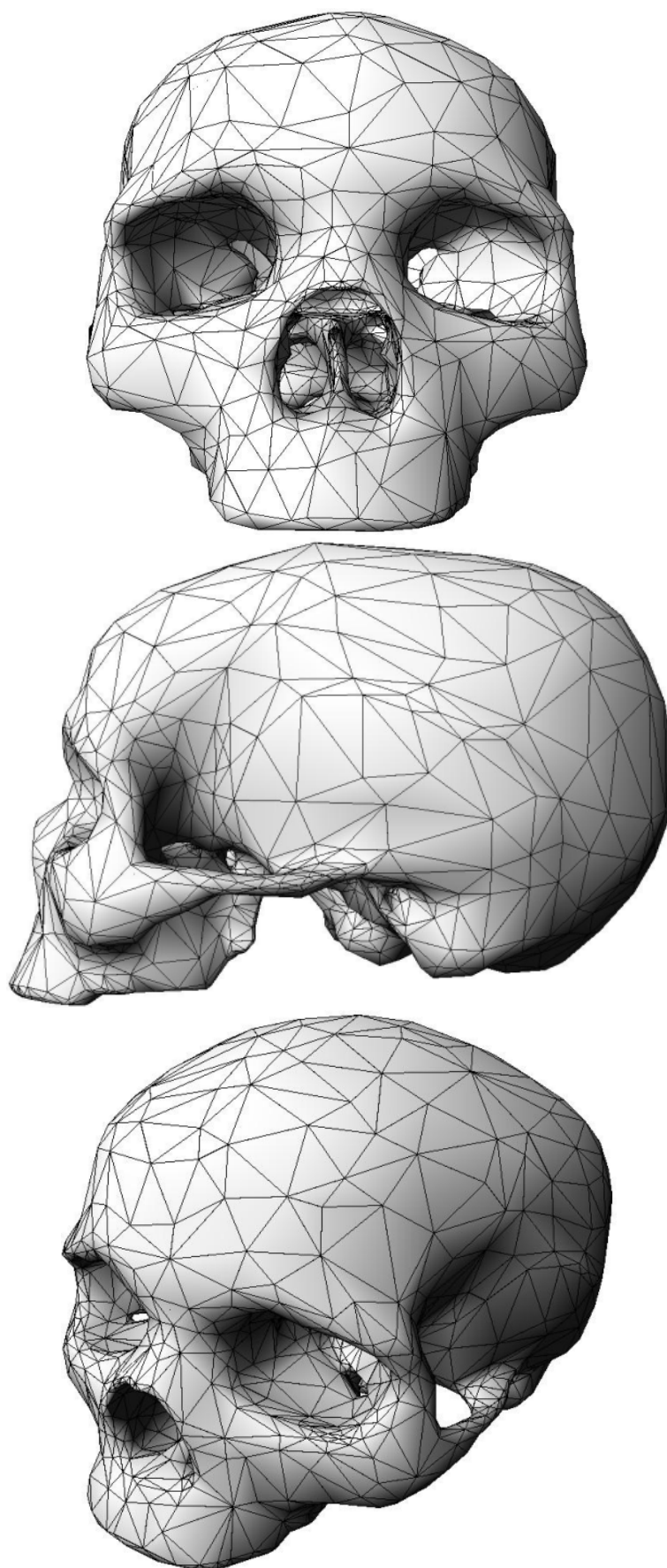
Efektivní, rychlá a bezproblémová tvorba (relativně vůči jiným metodám) věrohodných FEM modelů lidských tkání je v současné době jedním z limitů dalšího rozvoje výpočtového modelování chování a vlastností lidských tkání v rámci biomechaniky člověka. Proto je přímá tvorba těchto modelů na základě segmentovaných CT/MR dat velkou nadějí pro řešení tohoto problému.

Podarí-li se úspěšně vyřešit úkoly, aktuální i budoucí, popisované v tomto příspěvku, pak to významně posune možnosti automatické tvorby FEM modelů. Tím bude umožněno řešení mnoha dosud velmi náročných nebo neřešitelných úkolů v biomechanice.

Vzhledem ke skutečnosti, že v programových systémech řešících popisovanou problematiku probíhá v současnosti mnoho radikálních změn, budou příslušné výsledky k dispozici až v době konání vlastní konference, což bude 14.-17. května 2001.

References

- [1] Drastich A.: Zobrazovací systémy v lékařství. 1. vyd. Brno, Rektorát VUT v Brně 1990, 512 s., ISBN 80-214-0220-2
- [2] Nagy. I. Kršek P. Husták. J.: Voxel Model Creation of Human Tissues from CT and MRI Data for Biomechanical Applications. In: Proceedings, Euroconference Biosignal 2000, Brno, FE VUT Brno, 2000, s. 278-280, ISBN 80-214-1610-6
- [3] Žara J., Beneš B., Felkel P.: Moderní počítačová grafika. 1. vyd. Praha, Computer press 1998, 448 s., ISBN 80-7226-049-9
- [4] Kršek P.: Přímá tvorba FEM modelů na základě CT/MR dat pro aplikace v biomechanice. PhD Thesis, svazek 59, VUT v Brně 2001, 30 s., ISBN 80-214-1796-X
- [5] Lorensen W., Cline H.: Marching cubes, A high resolution 3D surface construction algorithm. In: Proceedings, Siggraph 87, USA, 1987, s. 163-169
- [6] Garland M., Heckbert, P.: Surface simplification using quadric error metrics. In: Proceedings, Siggraph 97, USA, 1997, s. 209-216
- [7] George P. L., Borouchaki H.: Delaunay triangulation and meshing. 1. vyd. Paris, Hermes 1998, 413 s., ISBN 2-86601-692-0
- [8] Kršek P.: Possibilities of creation of FEM models from CT/MR data. In: Sborník, Engineering mechanics 2000, Praha, ITAM AVCR, 2000, s. 27-32, ISBN 80-86246-03-5



Obrázek 3: Příklad aktuálních výsledků: FEM model lidské lebky vytvořený přímo z CT dat