

Sítové kolaborativní prostředí pro 3D modelování v medicíně

Přemysl Kršek, Michal Španěl, Vít Štancl, Ondřej Šiler, Miroslav Švub, Vítězslav Sára
Fakulta Informačních technologií VUT v Brně

Abstrakt:

Tento článek se věnuje novému konceptu síťového virtuálního kolaborativního prostředí pro podporu klinických aplikací 3D modelů lidských tkání vytvořených na základě CT/MR dat. Jde o problematiku, která leží mezi 3D modelováním tkání a PACS systémy. Navržený systém umožňuje klinicky realizovat 3D aplikace jako službu specializované 3D laboratoře ostatním klinickým pracovištím, i na velké vzdálenosti. Problémem je však vzdálené provedení nezbytných konzultací, korekcí a schválení připravených 3D aplikací. Tento problém řeší náš navrhovaný systém formou síťového virtuálního kolaborativního prostředí. Tento systém je postaven na třívrstvé architektuře Klient-Server. Naše aplikace je zaměřena na 3D modelování tkání. Obecně ho však lze použít i pro další aplikace podobného charakteru.

Klíčová slova:

Medicína, 3D modelování, klinické aplikace, síťové kolaborativní prostředí

1 Úvod:

Trendem moderní humánní medicíny je individuální ošetření pacientů (Taylor surgery). Jednou z možných cest, jak toho dosáhnout, je 3D modelování lidských tkání pro klinické potřeby individuálního plánování, simulací a navigací prováděných operací.

Vstupní informací pro tvorbu 3D modelů tkání jsou obrazová data získaná vyšetřením na Počítačové tomografii (CT) nebo Magnetické rezonanci (MR). Data CT/MR vyšetření jsou dnes běžně dostupná v digitální formě ve standardním formátu DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Stále častěji jsou získaná obrazová data archivovaná v digitální podobě v systémech PACS (Picture Archiving and Communication System). Tyto systémy zajišťují dlouhodobou hromadnou archivaci uložených dat. V případě potřeby umožňují vzdálený přístup k uloženým datům nebo jejich přenos prostřednictvím počítačové sítě na jiné pracoviště.

V dnešní době existuje mnoho nejrůznějších počítačových systémů pro 3D modelování tkání a podporu jejich klinických aplikací. Všechny tyto systémy však pracují lokálně, na jednom pracovišti. Postup přípravy klinických aplikací za podpory 3D modelování tkání (3D aplikace) se skládá z následujících kroků:

- Získání CT/MR dat z PACS systému
- Segmentace tkání a tvorba jejich 3D modelů
- Příprava požadovaných klinických aplikací (plánování, simulace, navigace)
- Konzultace, korekce a schválení výsledků se zainteresovanými odborníky

Vše potřebné pro realizaci příslušné klinické aplikace je na jednom místě: CT/MR data v systému PACS, zainteresovaní odborníci (radiolog, chirurg, technik atd.), realizační klinické pracoviště, pacient atd. Není zde tedy žádný technický problém v komunikaci, přenosu dat atd.

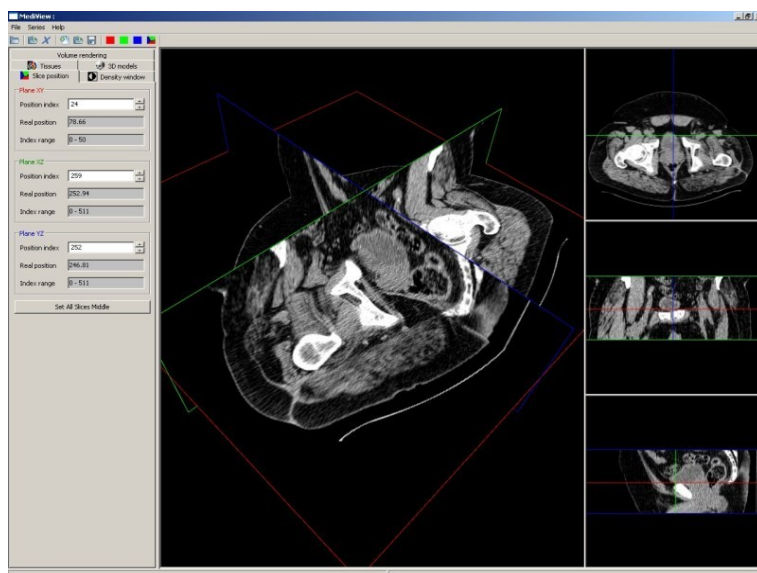
V praxi však většinou nejsou podmínky pro realizaci uvedených 3D aplikací na jednom místě. Pouze některé velké nemocnice si mohou dovolit provozovat vlastní pracoviště, které je technicky i personálně schopné zvládnout celý proces přípravy 3D aplikací. Na ostatních pracovištích nejsou individuální 3D aplikace používány, z důvodu přílišné náročnosti technické, finanční i personální.

Jedním z možných řešení tohoto problému je příprava 3D aplikací samostatným specializovaným pracovištěm (3D laboratoř). Tato 3D laboratoř by poskytovala služby ostatním klinickým pracovištím na základě dodaných CT/MR dat. Problém nastává v okamžiku, kdy je potřeba připravené 3D aplikace konzultovat, korigovat a schválit. Jsou-li 3D laboratoř, realizující klinické pracoviště, konzultanti atd. od sebe prostorově vzdáleni, je uvedená koncepce 3D laboratoře prakticky nepoužitelná.

Tento článek se věnuje problematice síťového virtuálního kolaborativního prostředí (VCE) zaměřeného na 3D modelování lidských tkání na základě CT/MR dat. Jde v podstatě o nástroj, který by umožňoval realizovat konzultace, korekce a schvalování 3D aplikací ve virtuálním 3D prostředí integrovaném prostřednictvím počítačové sítě. Jednotliví účastníci (radiolog, chirurg, technik atd.) by tak mohli zůstat na svých pracovištích, v různých budovách, městech nebo regionech. S využitím tohoto nástroje by bylo možné plně realizovat koncepci 3D laboratoře, která pro klinická pracoviště připravuje individuální 3D aplikace. Současné PACS systémy tuto požadovanou funkcionalitu neposkytují.

2 Současný stav:

Naše pracoviště se posledních pět let intenzivně podílí na výzkumu a vývoji v oblasti tvorby 3D modelů lidských tkání a jejich klinických aplikací. V současné době intenzivně spolupracujeme s několika různými klinickými pracovišti v celé České Republice (FN u sv. Anny Brno, FN Olomouc, FN Ostrava, FN Praha Motol, atd.). Narážíme při tom právě na problémy se vzdálenou komunikací při konzultacích a korekcích připravených 3D aplikací. Dokud jsme spolupracovali s blízkými klinickými pracovišti, nebyl problém se s lékaři sejít fyzicky u jednoho počítače. Při spolupráci na větší vzdálenosti a do jiných měst už to možné není. Tento komunikační problém jsme dosud řešili off-line. Data jsme si vzájemně předávali po síti přes SFTP servery nebo PACS systémy. Výsledkem byl neinteraktivní a zdlouhavý iterační proces konzultací, korekcí a schvalování 3D aplikací.

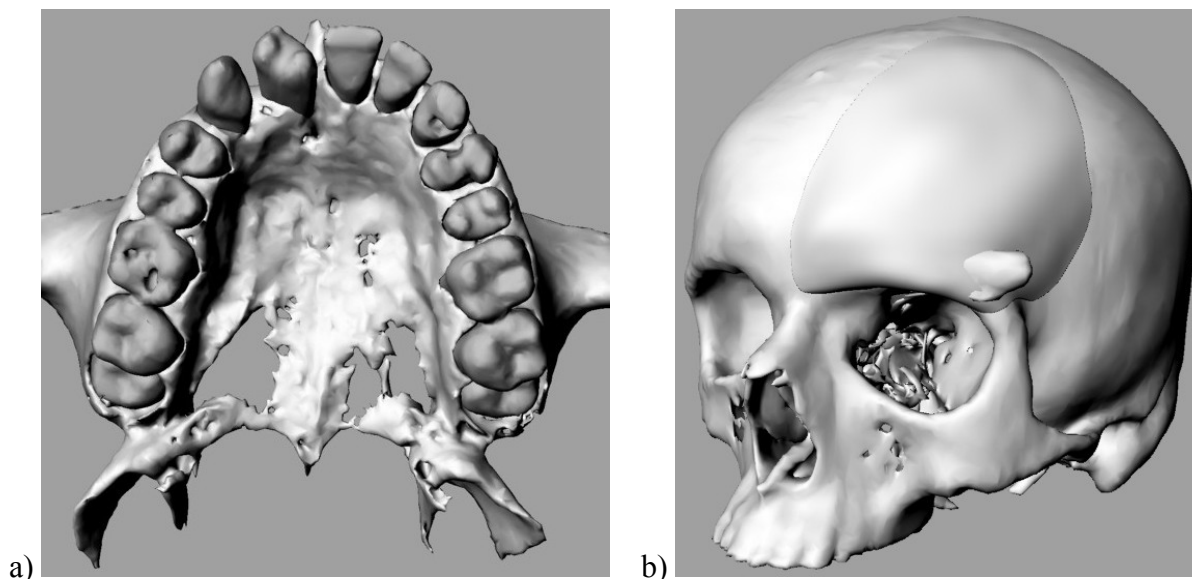


Obrázek 1: Grafické uživatelské rozhraní systému MediTools

Pro tvorbu 3D modelů tkání na základě CT/MR dat máme vyvinutý vlastní grafický uživatelský systém MediTools (viz. Obr. 1). Tento systém pracuje lokálně a zajišťuje plné 3D zobrazení CT/MR dat (volume rendering, multiplanar cross sections, atd.) a uživatelskou podporu tvorby 3D modelů tkání. 3D zobrazení je postaveno na C++ knihovně *OpenInventor*. Datové jádro a algoritmy pro zpracování objemových dat zajišťuje knihovna MDSTk [2]. Proces tvorby 3D modelů tkání se skládá z následujících kroků:

- Import CT/MR dat ve formátu DICOM
- Automatická segmentace tkání s manuální korekcí a kontrolou výsledků [1] [2]
- Automatická tvorba 3D modelů vybraných segmentovaných tkání (Flow Reduction Marching Cubes) [3] [4]
- Vyhlcení získaných 3D modelů tkání (Geometric signal processing on polygonal ...) [5] [6]
- Decimace vyhlazených 3D modelů tkání (Surface simplification using quadric ...) [7] [8]
- Příprava individuálních klinických aplikací na základě vytvořených 3D modelů [9] [10]
- Konzultace, korekce a schvalování výsledných 3D aplikací.

Naše klinické aplikace jsou většinou v oblastech: stomatologie, plastická chirurgie, traumatologie, ortopedie a neurochirurgie. Dosud jsme se celkově podíleli na ~40 realizovaných případech: 14 případů v oblasti autotransplantace zubů, 21 v ortodoncii, 11 v traumatologii a ortopedie, 3 v plastické chirurgii a 1 v neurochirurgii (viz. Obr. 2).



Obrázek 2: Příklady 3D aplikací: a) 3D model horní čelisti pro autotransplantaci zubů, b) 3D model lebky pro plánování plastické operace

3 Síťové kolaborativní prostředí:

Pro odstranění komunikačních problémů při konzultacích a korekcích připravovaných 3D aplikací mezi vzdálenými pracovišti, jsme se snažili rozšířit náš současný systém MediTools o možnosti práce ve virtuálním kolaborativním prostředí (VCE). K tomu máme k dispozici dvě možné architektury, Peer-to-Peer a Klient-Server.

3.1 Architektura Peer-to-Peer:

3D zobrazení v systému MediTools je založeno na knihovně C++ knihovně *OpenInventor*. Této skutečnosti jsme využili při použití knihovny *OpenVCE* [11]. Tato knihovna umožňuje automatickou synchronizaci stavu celé 3D scény postavené na knihovně *OpenInventor*. Knihovna *OpenVCE* realizuje síťovou Peer-to-Peer komunikaci na bázi TCP/IP přes SSL sokety. Rozšíření systému MediTools o možnosti komunikace v rámci VCE je v tomto případě tedy relativně snadné. Jde o navázání knihovny *OpenVCE* a zajištění synchronizace dodatečných dat, které nejsou součástí 3D scény postavené na knihovně *OpenInventor*.

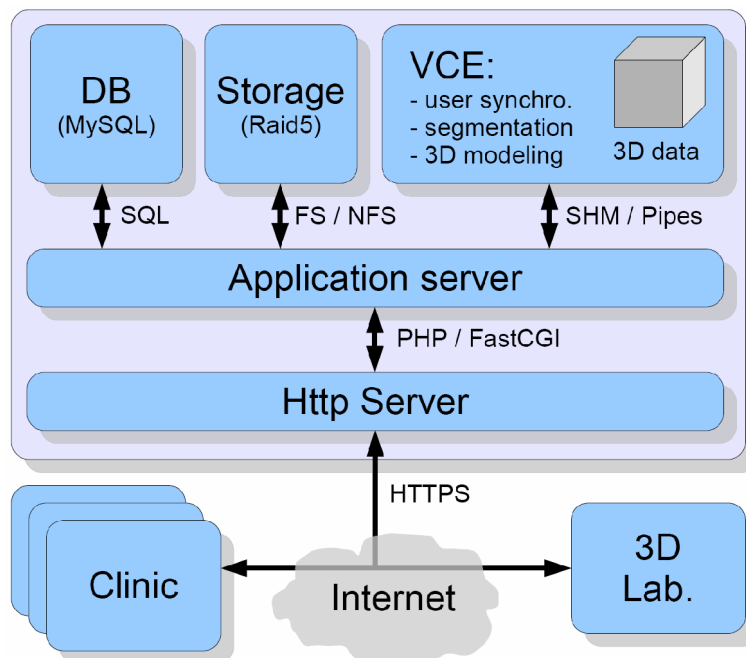
Fungování takto realizované VCE v rámci lokální sítě bylo bez větších problémů, do pěti současně připojených uživatelů. Pro více uživatelů nebo při komunikaci mimo lokální síť se však začalo výrazněji projevovat zpoždění sítě.

Vzhledem k charakteru komunikace byla problematická počáteční synchronizace stavu VCE. Systém totiž neřeší centrální ukládání dat a tím jejich dostupnost všem. Individuální změny (off-line) u jednotlivých uživatelů byly pouze lokální a musely se vždy na počátku distribuovat všem. Mohlo tak také snadno dojít ke vzniku konfliktů v různých verzích zpracovávaných dat.

Největší problém však byl při komunikaci mezi 3D laboratoří a klinickými pracovišti, která byla většinou součástí nemocnic. IT bezpečnostní politika těchto nemocnic je většinou "paranoidní", takže se snaží maximálně omezit veškerou nestandardní komunikaci mimo nemocnice. Naše snaha o Peer-to-Peer komunikaci vně nemocnice přes SSL sokety byla proto striktně odmítnuta. Prakticky jediným přijatelným způsobem byla standardní HTTPS komunikace na "bezpečný" ověřený server.

3.2 Architektura Klient-Server:

Z výše uvedených důvodů jsme při návrhu dalšího VCE systému přešli na třívrstvou architekturu Klient-Server (viz. Obr. 3). Klienti VCE budou komunikovat přes centrální server s využitím HTTPS protokolu na standardním portu 80. Tím bude odstraněn hlavní problém s IT bezpečnostní politikou nemocnic. Není při tom problém kdykoli oddělit VCE komunikaci přesměrováním spojení na vlastní vyhrazený port, přes vyhrazenou linku nebo VPN spojení.



Obrázek 3: Schéma navrhovaného virtuálního kolaborativního prostředí

3.2.1 Koncept centrálního serveru:

Centrální server je vybudován na třívrstvé architektuře. HTTPS komunikaci zajišťuje standardní WWW server. Aplikační vrstva se skládá ze skupiny malých specializovaných modulů, implementovaných podle požadavků na výkon v PHP (database, storage) nebo C++/FactCGI (VCE). Vývoj celého systému se tak může zaměřit na vlastní VCE řešení. Pro zbývající části řešení serveru (databáze, storage, síťová komunikace, HTTPS protokol atd.) jsou použity obecně používané, odladěné a bezpečné produkty (Apache, MySQL, PHP, Linux, HTTPS šifrování atd.). V případě požadavků na nasazení celého systému v podmínkách kritické bezpečnosti a spolehlivosti není problém přejít na certifiková řešení renomovaných firem (Sun, IBM, HP, Oracle atd.).

Díky integraci databáze pacientů a úložiště CT/MR dat na centrálním serveru je automaticky vyřešen také problém s jejich synchronizace, archivace a zprávy verzí. S centrálním serverem je možné pracovat i lokálně. Klient si může vzdáleně stáhnout data vybraného pacienta, provede off-line celý proces přípravy 3D aplikací a výsledky uloží opět na server.

3.2.2 VCE server:

Všechna zdrojová CT/MR data a připravené 3D aplikace jsou tedy uložena na serveru. V okamžiku, kdy je potřeba provést jejich konzultace a ověření, stačí na centrálním serveru vytvořit VCE a nahrát do něj data vybraného pacienta. Do připraveného VCE se potom mohou odkudkoli vzdáleně připojit zainteresovaní klienti a společně s daty pracovat: prohlížet je a modifikovat, ukazovat si vzájemně oblasti zájmu, označovat je atd.

VCE na centrálním serveru představuje několik běžících procesů, které obsluhují vlastní pracovní kopii aktuálně zpracovávaných CT/MR dat a fronty vstupních a výstupních požadavků. Všechny platné příchozí požadavky na změnu aktuálních dat VCE jsou ihned replikovány do jejich pracovní kopie na serveru, která tak představuje aktuální platný stav VCE. Všichni připojení klienti

jsou synchronizováni vůči tomuto aktuálnímu stavu VCE. Normálně si klienti synchronizují stav svých lokálních kopií dat podle požadavků na změny v pořadí, jak jsou uloženy na serveru ve frontách. Dojde-li ke zpoždění některého klienta, například kvůli výpadku spojení nebo k připojení nového klienta, načtou si tito klienti aktuální stav dat VCE z jejich pracovní kopie na serveru.

Díky multitaskingovému charakteru práce WWW serveru je VCE také multitaskingové. S jedním VCE může bezpečně komunikovat najednou několik klientů. Zároveň může být najednou aktivních několik různých VCE. Při rostoucích požadavcích na počet současně připojených klientů nebo počet současně běžících VCE, není problém výkon a kapacitu celého řešení rozšiřovat, díky jeho modulární architektuře.

Velký objem přenášených dat je pouze na počátku, kdy se do VCE připojují klienti a synchronizují si počáteční aktuální stav zpracovávaných dat. Největší objem z toho mají zdrojová CT/MR data, která pro naše aplikace můžeme pokládat za read-only. Datovou špičku na počátku práce s VCE lze tedy efektivně omezit cachováním jednou načtených dat na lokálním disku s identifikací pomocí jejich hash. V průběhu práce s VCE je objem přenášených dat relativně malý, řádově 1~10 kB/s.

Největší obecným problémem kolaborativních systémů je zpoždění počítačové sítě. Vzhledem k tomu, že chceme komunikovat přes obecnou síť internet, nejsou parametry sítě zaručeny, což může ovlivnit plynulost práce celého systému. Tento problém řešíme oslabením požadavků na VCE. Naše aplikace jsou svým způsobem specifické. Nejedná se o procházení virtuálního světa, který klienti sdílí. Nepotřebujeme tedy řešit konflikty v časové návaznosti generovaných změn, aby se klienti nemohli "přetahovat" o nějaký objekt ve 3D scéně (změna zobrazení scény, změna polohy objektů, změna v datech objektů, atd.). Zavedli jsme proto omezující pravidlo, které zajistí, že změny v datech scény a jejím zobrazení může u jednoho VCE generovat v daném okamžiku pouze jeden klient (master). Ostatním klientům se provedené změny projeví po nejbližší synchronizaci (slave). Roli hlavního klienta (master) si klienti mezi sebou podle potřeby vyměňují, systém tokenů na požádání.

3.2.3 VCE klient:

Jako grafické klienty pro práci s VCE použijeme náš současný systém MediTools. Jedná se o "tlustého" klienta, který má vlastní plnou kopii zpracovávaných dat. Klienti sami zajišťují zobrazení, interakci, změny dat. Server zajišťuje pouze synchronizaci dat a parametrů jejich zobrazení. Spojení se serverem vyvolává vždy klient, který předkládá své požadavky nebo změny a čeká na odpověď. Klienti se periodicky dotazují serveru, jestli nejsou nějaké nové změny ve stavu dat. Pokud ano, provedou jejich synchronizaci a replikaci do vlastní kopie dat. Podle požadavků mohou existovat různé verze klientů pro práci ve VCE. Jednodušší verze budou pouze zobrazovat aktuální stav dat, pokročilejší verze bude umožňovat také generování změn v datech.

Souběžně s prací ve VCE je vhodné používat další počítačové komunikační prostředky, jako je Skype, NetMeeting, VOIP atd. Přístupová práva do systému řeší prioritně WWW server. Přístup k uloženým pacientům a jejich CT/MR datům je řešen na úrovni SQL databáze.

3.2.4 Implementace:

Aktuální verze grafických klientů systému MediTools je vytvořena v C++ a pro zobrazení používá C++ knihovnu OpenSceneGraph. Komunikační server je postaven na WWW serveru Apache, data pacientů obsluhuje databáze MySQL. Aplikační server je vytvořen podle požadavků na výkon v PHP nebo C++/ FastCGI.

V současné době máme implementovanou základní infrastrukturu celého systému: komunikační HTTP/HTTPS knihovna s C++ rozhraním pro klienty a aplikační moduly VCE, včetně jednotného binárního a textového kódování dat; aplikační PHP moduly pro práci s databází klientů a jejich CT/MR daty; základní funkčnost VCE pro synchronizaci parametrů zobrazení 3D scény (pohyb s kamerou, pohyb multiplanárními řezy, densitní parametry zobrazení CT/MR dat atd.).

3.2.5 Testování:

Aktuální implementaci našeho VCE systému jsme testovali v simulovaných podmínkách. Současně bylo připojeno 4-6 klientů. Aktivní bylo pouze jedno VCE. Jednotliví klienti byli v různých městech ČR, Brně, Ostravě, Olomouci a Praze. Všichni testovací klienti byli propojeni přes obecnou internetovou síť na akademické půdě, což znamená relativně velmi kvalitní připojení.

Vlastní server běží na následující hardwarové konfiguraci: 2xIntel Xeon 2,1 GHz (dual core), celkově 4 GB RAM, Raid 5 diskové pole 4,3 TB. Server je připojen na páteřní síť 1 Gbit. Umístění serveru je na FIT VUT v Brně.

V uvedených podmínkách se nijak neprojevilo zpoždění sítě a ani náročnost systému na objem přenášených dat. Jde však zatím o částečnou implementaci, které provádí pouze synchronizaci 3D zobrazení dat. Detailnější měření a vyhodnocení zátěže sítě, objemu přenášených dat, zpoždění odpovědi serveru atd. chceme provádět až při větší míře implementace celého VCE, včetně nástrojů pro editaci dat VCE.

4 Závěr:

Na základě mnoha praktických zkušeností s klinickými aplikacemi 3D modelování v medicíně jsme navrhli nový počítačový systém pro Virtuální kolaborativní prostředí. Tento systém umožňuje provádět konzultace, korekce a schvalování připravovaných 3D klinických aplikací přes obecnou počítačovou síť. Jeho základní koncepcí je maximální využití stávajících technologií (HTTPS, PHP, FastCGI, MySQL, atd.) v podobě třívrstvé architektury Klient-Server.

Navržený systém je dostatečně obecný, aby byl použitelný v mnoha dalších oblastech, kde je potřeba pracovat ve VCE. My jsme zatím provedli implementaci zatím základních funkcí navrženého systému (archiv dat, synchronizace zobrazení).

Pro odstranění vlivu zpoždění počítačové sítě jsme omezili náš VCE systém na provádění změn v datech pouze jedním klientem v jednom okamžiku, což charakteru prováděných aplikací vyhovuje. I při komunikaci několika klientů přes celou ČR, nemělo zpoždění výraznější vliv na plynulost práce s VCE. Datové zatížení sítě je také na velmi nízké úrovni, kromě startu klientů, kdy si synchronizují zdrojová data.

Práce do budoucna:

- Implementace dalších požadovaných funkcí VCE
- Digitální podpis importovaných CT/MD dat
- Digitální podpis provedených změn
- Implementace workflow provedených změn
- Uchovávání provedených změn

Poděkování:

Práce na tento projekt je podporována grantovými projekty číslo: MSM6383917201 CZ a MSM0021630528 CZ

Literatura:

- [1] Bankman I. N.: Handbook of medical imaging: Processing and Analysis, Academic Press. Orlando, FL, USA Inc., 2000, ISBN 0-12-077790-8
- [2] Španěl M., Kršek P.: Vector-based Medical Image Segmentation using Adaptive Delaunay Triangulation, In: Proceedings of the Sixth IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing, Palma de Mallorca, ES, ACTA Press, 2006, p. 6, ISBN 0-88986-600-7
- [3] Lorensen W., Cline H. Marching cubes, A high resolution 3D surface construction algorithm. In Siggraph'87 Conference Proceedings, pages 163-169, 1987
- [4] Kršek P.: Flow Reduction Marching Cubes Algorithm, In: Proceedings of ICCVG 2004, Warsaw, Springer, 2005, p. 100-106, ISBN 1-4020-4178-0

- [5] Balendran B., A Direct Smoothing Method For Surface Meshes: Proceedings, 8th International Meshing Roundtable, South Lake Tahoe, USA, 1999, 189-193
- [6] Taubin G., Geometric signal processing on polygonal meshes: Eurographics 2000 State of The Art Report(STAR), September 2000.
- [7] Schroeder W. J., Zarge J. A., Lorensen W. E. Decimation of triangle meshes. In Siggraph'92 Conference Proceedings, pages 65-70, July 1992.
- [8] Garland M., Heckbert, P. Surface simplification using quadric error metrics. In Siggraph'97 Conference Proceedings, pages 209-216, 1997.
- [9] Černochová P., Kaňovská K., Kršek P., Krupa P.: Application of geometric biomodels for autotransplantation of impacted canines, In: World Journal of Orthodontics 2005, Paris, FR, 2005, p. 1, ISBN 1530-5678
- [10] Krupa P., Kršek P., Černochová P., Molitor M.: 3-D real modelling and CT biomodels application..., In: Neuroradiology, Berlin, DE, Springer, 2004, p. 1, ISBN 0028-3940
- [11] Pečiva Jan: Active Transaction Approach for Collaborative Virtual Environments, In: ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications (VRCIA), Chinese University of Hong Kong, HK, ACM, 2006, s. 171-178, ISBN 1-59593-324-7