



národní
úložiště
šedé
literatury

Problematika přípravy 3D sítě pro metodu konečných prvků s využitím medicínských obrazových dat a následné možné způsoby vizualizace výsledků

Daněk, Josef
2006

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-36013>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 11.07.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .



Institute of Computer Science
Academy of Sciences of the Czech Republic

**Problematika přípravy 3D sítě
pro metodu konečných prvků
s využitím medicínských obrazových
dat a následné možné způsoby
vizualizace výsledků**

Josef Daněk

Technical report No. 982

December 2006



Problematika přípravy 3D sítě pro metodu konečných prvků s využitím medicínských obrazových dat a následné možné způsoby vizualizace výsledků

Josef Daněk

Technical report No. 982

December 2006

Abstrakt:

Předložená studie je výzkumnou zprávou Projektu MPO ČR č. FT-TA/087 „Komplexní výzkum biomechanických podmínek aplikace umělých skeletálních náhrad, interakce náhrad s organismem, vyhodnocení příčin selhání a návrh podmínek pro zvýšení jejich stability“ za rok 2006 a úkoly:

B. Mechanické a biomechanické hodnocení

B.3.3. Numerické řešení 2D a 3D matematických modelů metodou konečných prvků, včetně vývoje vhodných algoritmů, aplikace metod využívajících i víceprocesorových počítačů (tzv. domain decomposition methods).

a

C. Stanovení podmínek pro zvýšení stability umělých náhrad v lidském organismu

C.3.3 Aplikace algoritmů umožňujících numerickou analýzu umělých náhrad kloubů

- (i) ve vazbě na CT snímkování,
- (ii) ve vazbě na navigovanou operační techniku.

Ve studii je diskutován problém získávání 3D konečněprvkové sítě pro modely lidských kloubů a jejich náhrad. Při generování sítě se vychází obrazových dat získaných pomocí počítačové tomografie (CT) nebo magnetické rezonance (MRI). Ke zpracování snímků je nutné využít softwaru zaměřeného na vizualizaci a 3D rekonstrukci objektů. Podobně pro postprocessing je vhodné použít software, který umožňuje vizualizaci vypočtených dat na konečněprvkové síti.

Keywords:

Biomechanika, geometrie, metoda konečných prvků, počítačová tomografie (CT), magnetická rezonance (MRI)

1 Úvod

Výzkumná zpráva se věnuje problematice tvorby 3D konečněprvkových modelů lidských tkání na základě medicínských obrazových dat z CT nebo MRI. Předpokládáme, že potřebná data pro vytváření 3D modelů částí skeletu budou získána na základě spolupráce s Neurologickou klinikou 1. Lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Praze, jmenovitě s panem RNDr. Janem Krásenským. Jako zdroj medicínských dat lze využít snímky i např. z *The Visible Human Project*. Na www stránkách projektu [1] jsou možnosti získání dat popsány. Pokud budeme mít za cíl vytvořit model obsahující totální náhradu kloubu, můžeme samozřejmě postupovat dále popisovaným způsobem, tj. z CT snímků vygenerovat síť pomocí označení jednotlivých částí včetně náhrady v každém řezu. Výsledkem tohoto postupu bude méně přesně zadaná geometrie konkrétní náhrady a výsledný model bude do určité míry zkreslený. Za vhodnější způsob považuji využití zdrojových souborů s popisem geometrie (předpokládám ve formátu Computer Aided Design - CAD) uvažované náhrady a jejich import do geometrie pro model příslušné části lidského těla bez náhrady. Detaily vytváření modelu obsahující náhradu budou řešeny předpokládám ve spolupráci se společností MEDIN, a.s. (dříve ENDOIMPLANT spol. s r.o.) [3]. Ve výzkumné zprávě je tedy popsán postup získávání geometrie a konečněprvkové sítě pro vlastní části skeletu.

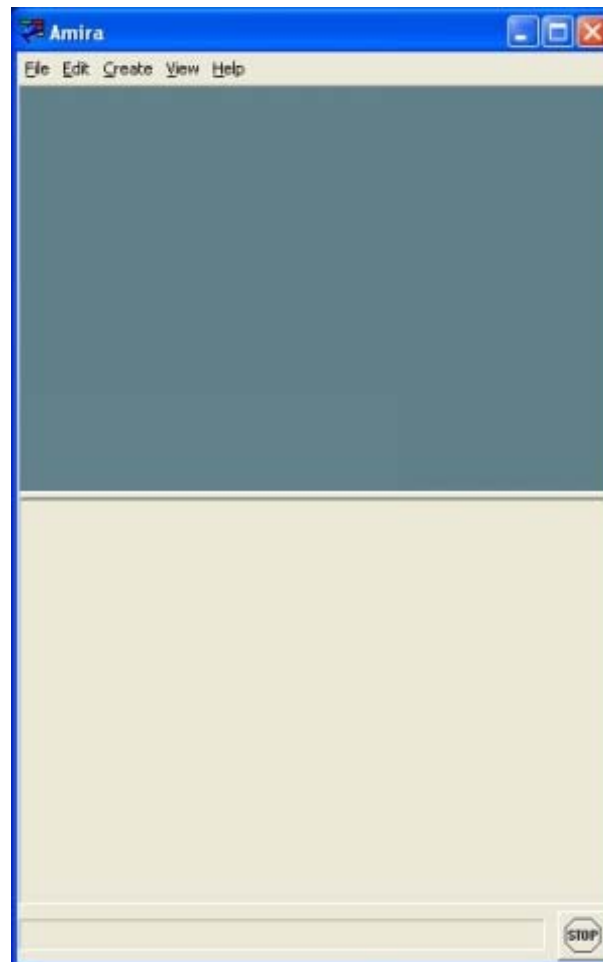
Proces získávání 3D sítě je netriviální a proto je nezbytné využít dostupných prostředků profesionálního software (jedná se o samostatný obor spadající do rámce počítačové grafiky). Po prozkoumání dostupnosti profesionálních sw pro vizualizaci a 3D rekonstrukci objektů jsem se rozhodl pro použití sw *Amira*. Tento software je po registraci volně ke stažení jako evaluační verze s omezenou platností na www.amiravis.com (viz [2]). Na této adrese je také uživatelský průvodce, manuál a další informace. Vizualizace zde znamená zobrazování různých setů dat, speciálně 3D obrázky, vektorová pole a konečněprvkové modely. 3D rekonstrukce umožňuje vytvoření povrchového modelu z polygonů a sítě tvořené tetrahedrony z 3D obrázkových dat.

Podporovanými operačními systémy jsou Microsoft Windows 98SE/ME/2000/XP, HP-UX 11.00, SGI Irix 6.5.x, Sun Solaris 8, Linux (RedHat 8.0). *Amira* silně závisí na hardwarovém vybavení počítače, převším na grafické kartě. OpenGL 3D grafice. Dalším důležitým parametrem je operační paměť. Je potřeba nejméně 128 MB, pokud možno 512 MB nebo více. *Amira* může fungovat i na 64 MB, ale pro načítání většího množství dat je paměti rozhodně potřeba více. Je doporučen alespoň 500 MHz PIII procesor.

V závěru zprávy jsou nastíněny možnosti pro postprocessing, tj. pro zobrazení výsledných hodnot veličin, které nás zajímají - posunutí, deformace, napětí. Jako prostředek pro vizualizaci může posloužit následující software: *Comsol* (dříve *Femlab*) [4], *The Visualization ToolKit* (VTK) [5] nebo *ParaView* [6].

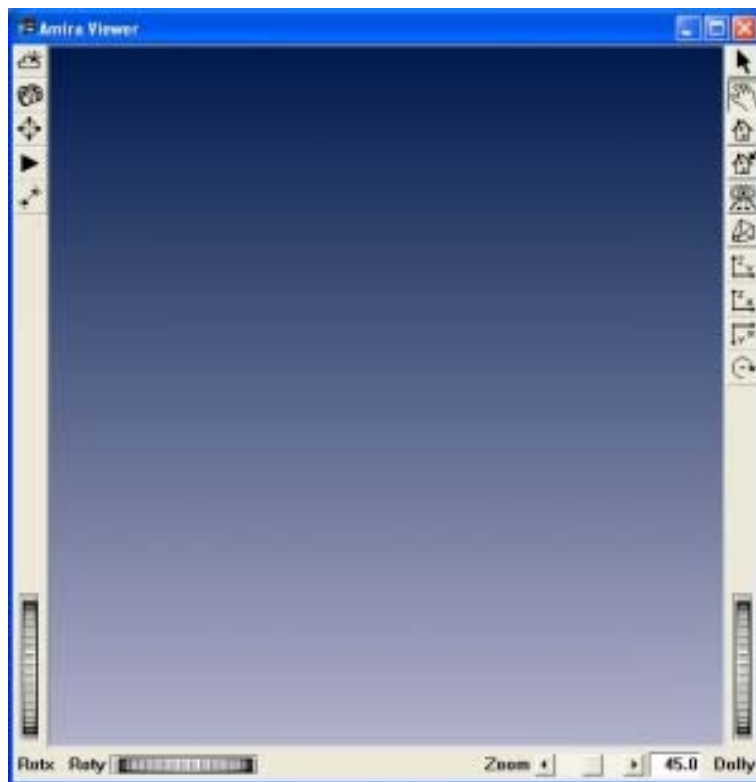
2 Uživatelské prostředí sw Amira

Uživatelské prostředí je rozdělené do tří oken - hlavního, prohlížečícího a konzole. Hlavní okno (Main Window) se skládá ze dvou částí - objektového pole v horní části a pracovního prostoru v dolní části.



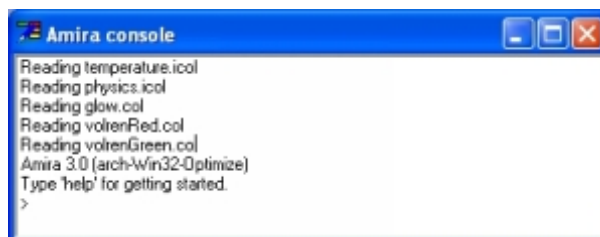
Obrázek 1: Amira - Hlavní okno

Objektové pole obsahuje ikony symbolizující datové objekty a moduly, které jsou používány, a čáry spojující ikony, které naznačují závislosti mezi objekty a moduly. V pracovním prostoru je zobrazeno uživatelské prostředí vybraných objektů, skládající se z tlačítek a posuvníků uspořádaných v portech. Prohlížeč okno (Viewer Window) zobrazuje výsledky vizualizace.



Obrázek 2: Amira - Prohlížeč okno

Konzole (Console Window) vypisuje systémové hlášení, informuje o probíhajících procesech a umožňuje zadávání příkazů.



Obrázek 3: Amira - Konzole

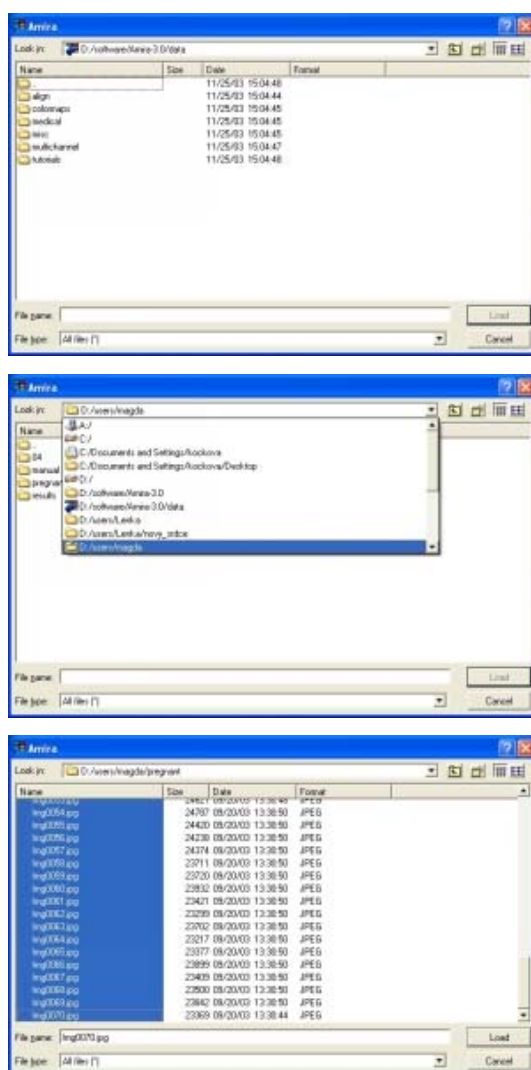
3 Postup vytváření 3D modelu

3.1 Načtení dat a jejich prohlížení

Obrázky stejných rozměrů načteme do programu Amira - v menu file vybereme nabídku load. Dialog standardně zobrazí obsah adresáře demo softwaru Amira. Do dalších pracovních adresářů je

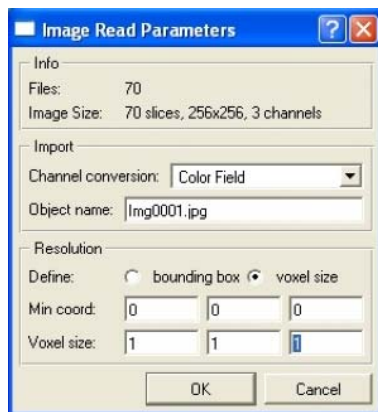
možné se snadno přepnout pomocí seznamu v horní části dialogového okna. Pomocí klávesy **Shift** označíme všechny obrázky, které chceme načíst. Stiskneme tlačítko **Load**.

Objem dat, který je Amira schopná načíst, závisí na operační paměti počítače. Nejvhodnější je načítat obrázky typu JPG, protože jsou nejmenší. Pokud trvá načítání příliš dlouho (řádově minuty až desítky minut), případně je v konzoli vypisováno hlášení typu `couldn't allocate`, bude potřeba objem načítaných dat nějakým způsobem zmenšit. Pokud jsou načítána například CT data nebo řezy z Visible Human Projectu (VHP), je dobré si rozmyslet, zda je skutečně nutné načítat každý obrázek, nebo jestli nestačí např. každý druhý. Vzdálenost mezi načítanými obrázky pak bude jiná, ale musí zůstat konstantní. Další možností je snížení kvality obrázků nebo jejich ořezání na oblast, která bude skutečně využita pro vytváření modelu. Všechny obrázky ale musí mít stejné rozměry. Poznamenejme, že pro vytvoření modelu kostí je vhodnější použít CT data. Barevné obrázky z VHP jsou v Segmentation Editoru převedeny na stupně šedi a kosti jsou pak od okolní tkáně obtížněji odlišitelné.



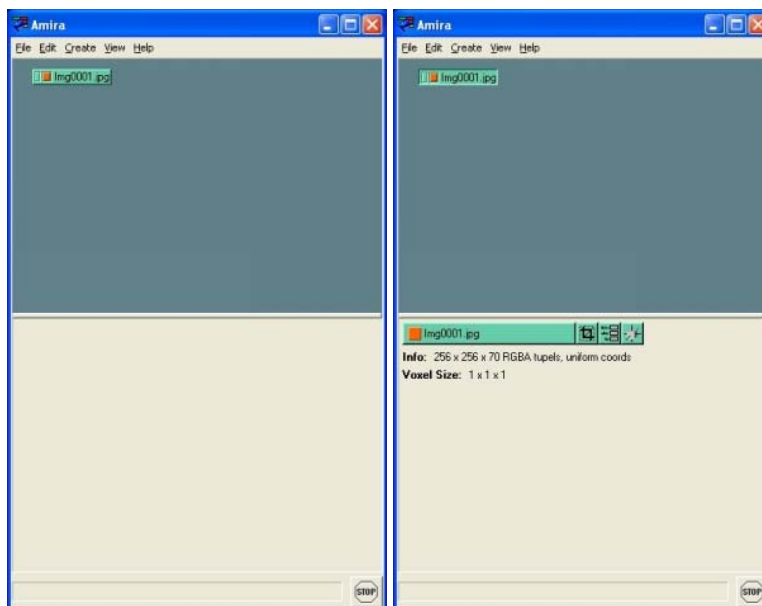
Obrázek 4: Amira - Načítání dat

Po úspěšném načtení obrázků se objeví menu, ve kterém lze v třetí políčku ve **Voxel size** nastavit vzdálenost obrázků mezi sebou v závislosti na velikosti pixelů ve směru x a y. Tuto vzdálenost je možné měnit i později v jiném menu. Pro řezy z VHP jsou tyto vzdálenosti pro Visible male 1, 1, 3 a Visible female 1, 1, 1.



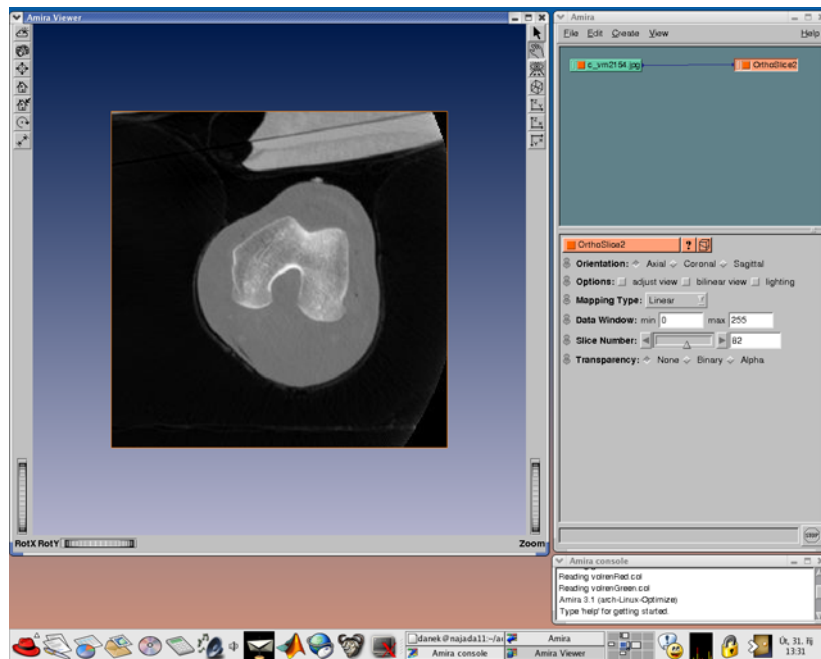
Obrázek 5: Amira - Nastavení vzdálenosti řezů

V objektovém poli se objeví zelená ikona reprezentující načtené obrázky. Od této chvíle nebudou původní obrázky pro další práci potřeba, protože jsou všechny načtené v tomto jednom souboru jako řada rovnoběžných obrázků napříč 3D objemem. Nyní je vhodné uložit je jako soubor typu **am**.



Obrázek 6: Amira - Načtení dat

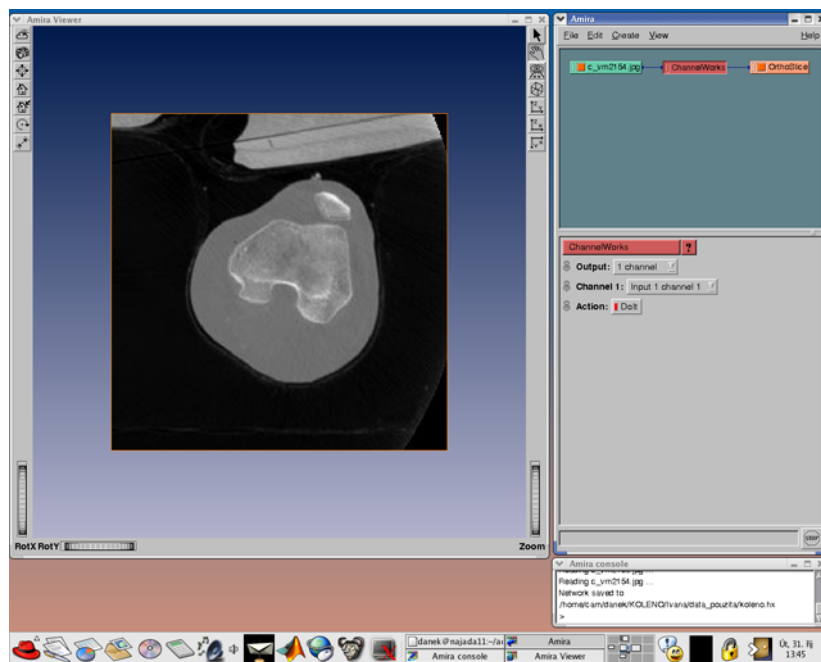
Pokud si chcete jednotlivé obrázky prohlédnout, klikněte pravým tlačítkem na ikonku symbolizující soubor a vyberte z menu nabídku **OrthoSlice**. V pracovním prostoru v dolní části hlavního okna můžete v menu **Slice Number** vybrat číslo obrázku, který se zobrazí v levém okně.



Obrázek 7: Amira - Prohlížení řezů

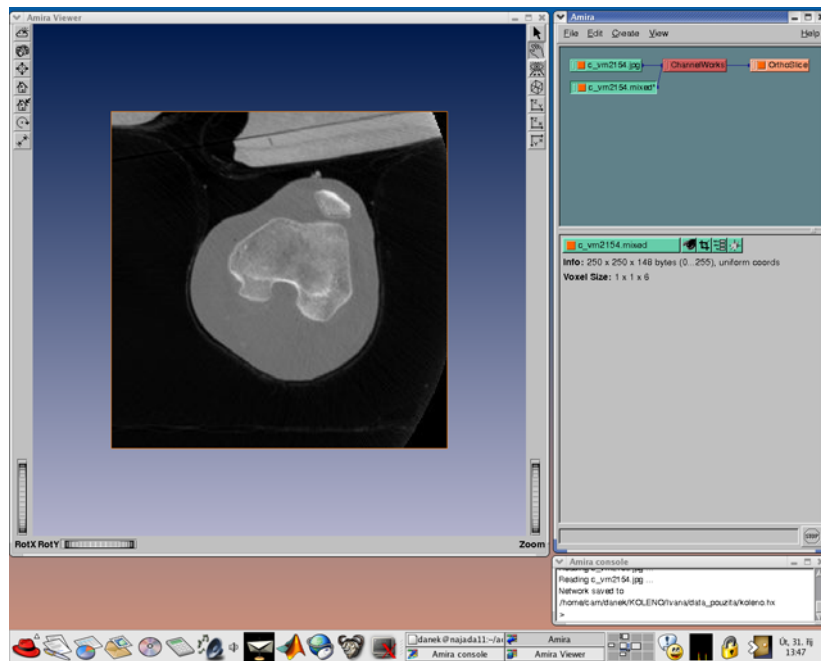
3.2 Označování oblastí

Pravým tlačítkem vybereme v nabídce Compute modul ChannelWorks, který spojí datové kanály (data channels) různých vstupů.



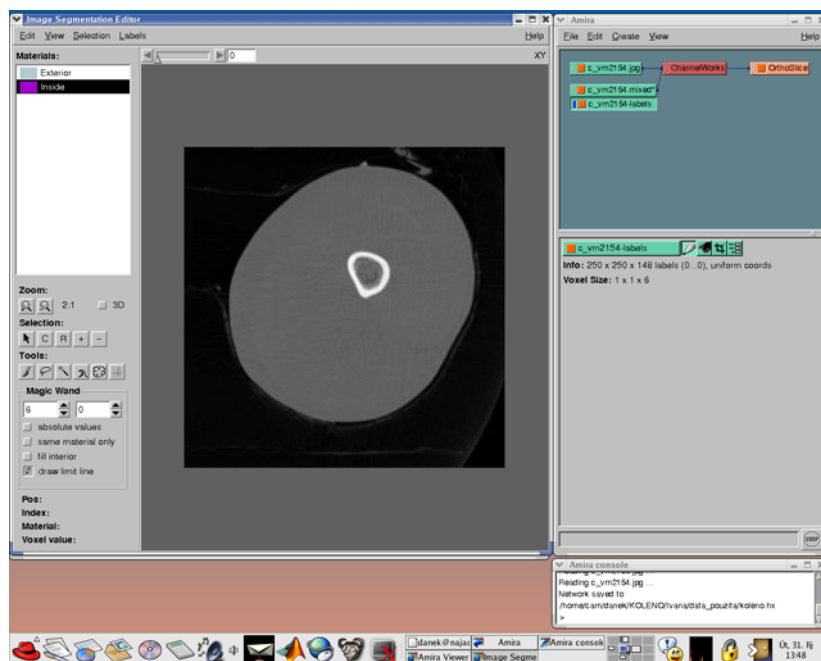
Obrázek 8: Amira - Spojení datových kanálů

Kliknutím na tlačítko DoIt se vytvoří se další soubor spojený s předchozím. Pravým tlačítkem



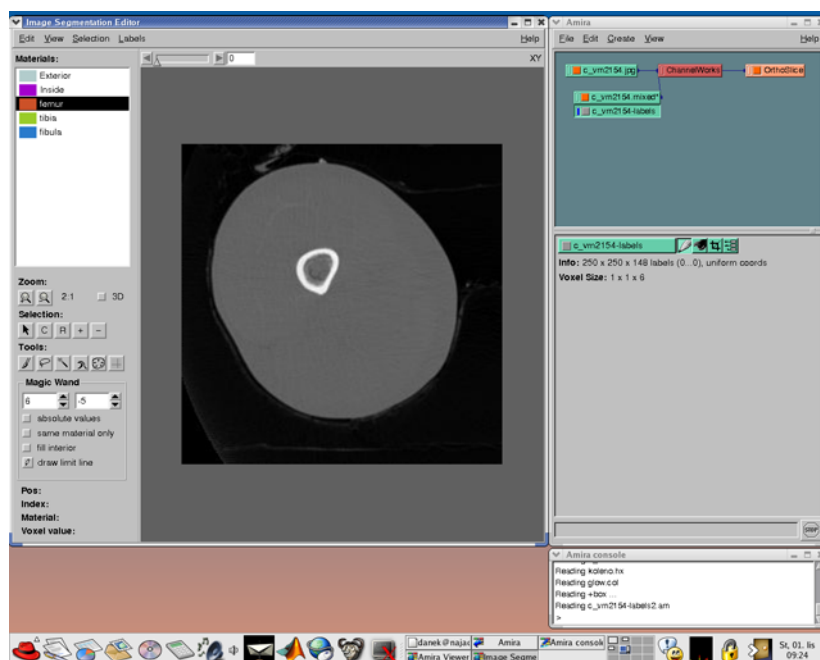
Obrázek 9: Amira - Spojení datových kanálů

vybereme z nabídky Labelling tohoto souboru modul LabelField.



Obrázek 10: Amira - Labelling

Stisknutím tlačítka se symbolem tužky v pracovním prostoru vytvořeného souboru se zobrazí nové okno (**Segmentation Editor**) umožňující práci s jednotlivými vrstvami. V tabulce je seznam



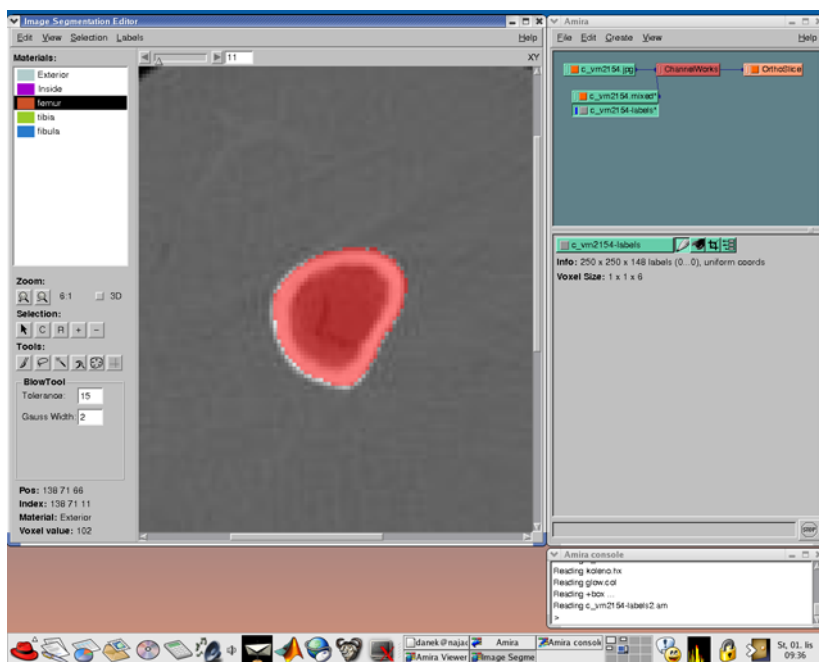
Obrázek 11: Amira - Segmentation Editor

vytvořených materiálů. Standardně jsou v této tabulce materiály **Interior** a **Exterior**. Tyto materiály je vhodné v tabulce ponechat. Pro každý objekt, který budeme na základě řezů vytvářet, vytvoříme nový materiál. Kliknutím pravým tlačítkem myši do materiálového pole se zobrazí menu, v němž vybereme možnost **NewMaterial**. Ve stejném menu je možné nastavit způsob zvýraznění aktivního materiálu (invisible, označení pouze okraje plochy, šrafování, větší nebo menší tečky), materiál smazat, přejmenovat, změnit barvu nebo jej zamknout. Ze zamknutého materiálu není možné odebírat pixely. V nabídce **Zoom** jsou dvě tlačítka umožňující funkce **zoom in** a **zoom out**. Vpravo se vám zobrazí současná úroveň zoomu.

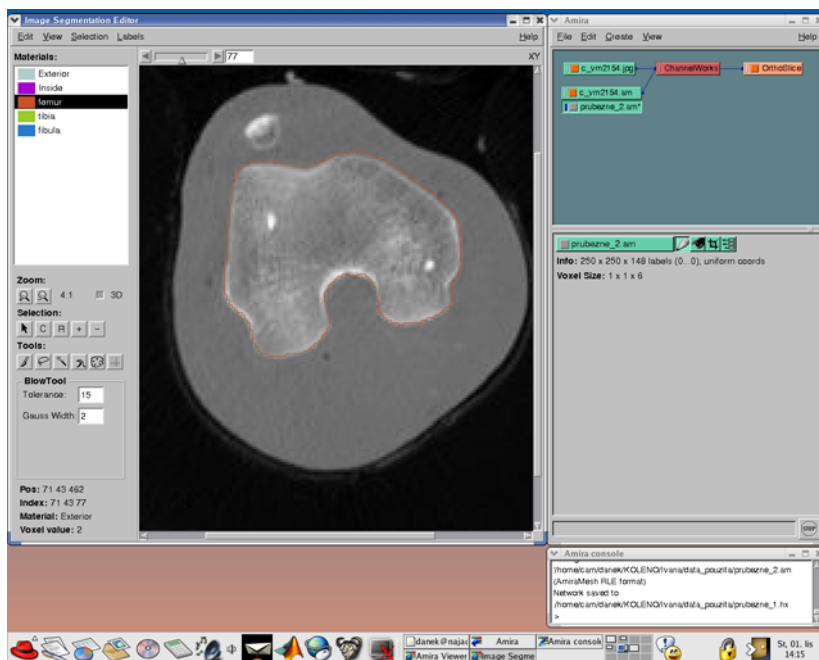
3.3 Segmentace

Pro vybrání oblasti v aktuálním řezu je možné použít několik nástrojů. Kliknutím levým tlačítkem myši na ikonu vybraný nástroj aktivujeme. Defaultně jsou označené oblasti nakresleny průsvitně červeně. Průsvitnost barvy je možné nastavit v dialogovém okně pod menu **Edit Data Window**.

Chování jednotlivých nástrojů může být modifikováno stisknutím tlačítka **Ctrl** nebo **Shift**. **Ctrl** obvykle zruší volbu voxelů místo jejich vybrání, **Shift** přidá voxely k vybraným, místo jejich nahrazení.



Obrázek 12: Amira - Výběr oblasti



Obrázek 13: Amira - Výběr oblasti

Následuje přehled dostupných nástrojů pro označování oblastí:

- **Pick & Move**

Tento nástroj umožňuje označení oblasti přiřazené jednomu materiálu pomocí kliknutí levého tlačítka myši na voxel. Při volbě `all toggle is active` budou vybrány všechny voxely, které jsou přiřazeny stejnému materiálu. Stisknutím `Ctrl` budou voxely odznačeny. U označené plochy umožňuje `Ctrl` její posunutí nebo při současném stisknutí `Shift` rotaci.

- **Štětec (Brush)**

Umožňuje označit oblast levým tlačítkem myši. Velikost štětce je možné nastavit posuvníkem nebo stisknutím přednastavených tlačítek v kontrolním panelu tohoto nástroje. Pixely se dají odznačit současným stisknutím `Ctrl` nebo použitím prostředního tlačítka myši. Pokud je hranice oblasti označena uzavřenou křivkou, vyplní se kliknutím pravým tlačítkem myši dovnitř této oblasti (stejnou funkcí má klávesa `F`).

- **Laso (Lasso)**

Umožňuje označit oblast vytvořením uzavřené hraniční křivky tažením levým tlačítkem myši nebo určením několika bodů, které se spojí úsečkami, za současného držení klávesy `Alt`. Po puštění klávesy `Alt` a posledním kliknutím se křivka uzavře a automaticky vyplní.

Pokud je vybrána možnost `auto trace`, účečky se automaticky přizpůsobí hranám v obrázku. Levým tlačítkem myši se určí výchozí bod a tažením myši se hraniční křivka přizpůsobí nejbližší hraně. Postupným klikáním myši do obrázku se určí pevné body na které se křivky napojují. Celá křivka se uzavře kliknutím prostředním tlačítkem myši.

- **Kouzelná hůlka (Magic Wand)**

Kliknutím levým tlačítkem myši na voxel se vybere největší oblast, která obsahuje tento voxel a všechny voxely s ostínem šedi v definovaném rozsahu. Tento rozsah se nastavuje v kontrolním panelu. Pokud je aktivní `absolute values`, hodnoty v tomto panelu jsou absolutní. Jinak jsou relativní vzhledem k vybranému pixelu.

Dolní mez je možné nastavit také stisknutím prostředního tlačítka myši (nebo `Shift` + pravé tlačítko) a posouváním myši ve vodorovném směru. Horní mez lze obdobně nastavit pomocí pravého tlačítka myši.

Možnost `same material` redukuje výběr voxelů pouze na ty, které jsou přiřazeny stejnému materiálu jako vybraný voxel.

Pokud je zvolena možnost `fill interior`, díry uvnitř vybrané oblasti jsou automaticky zaplněny (také pomocí klávesy `F`). Tato možnost je funkční pouze ve 2D.

Tlačítko `draw limit line` umožňuje omezit růst 2D oblasti nakreslením lomených čar. Toto tlačítko lze také nahradit stisknutím klávesy `Ctrl`. Vytvořené hraniční křivky mohou být smazány kliknutím na ně za současného držení `Ctrl`.

- **Blowtool**

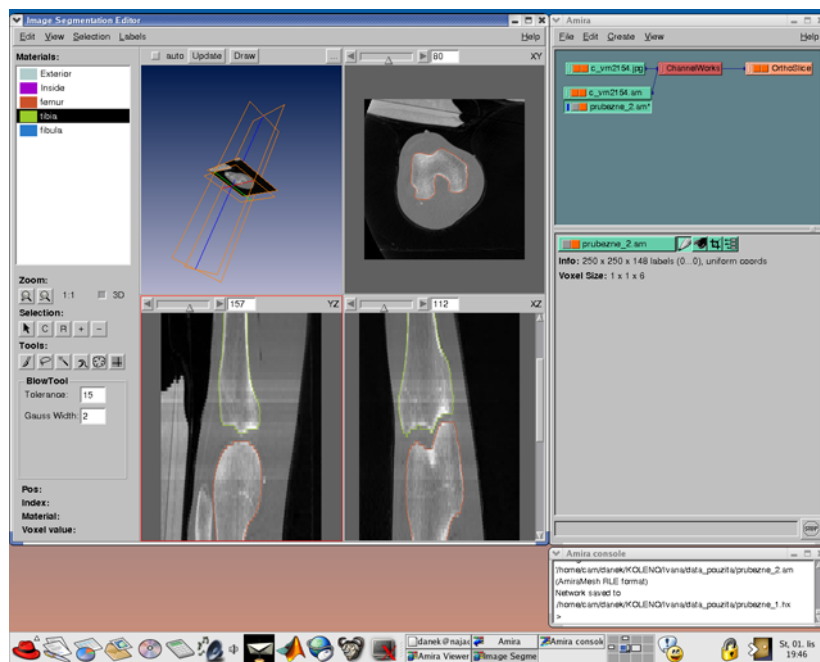
Kliknutím levým tlačítkem myši na voxel a tažením myši za stálého držení tlačítka se objeví kruhová oblast. Čím je větší vzdálenost od původní polohy, tím více se zvětšuje velikost oblasti. Oblast roste do oblastí s homogenní šedou barvou a končí tam, kde se tato barva prudce změní (hrana). Posuvník umožňuje nastavení míry velikosti této změny. Čím menší tolerance je nastavena, tím musí být hrana ostřejší. Po puštění levého tlačítka myši se zobrazená oblast označí.

- **Crosshair**

Nástroj `crosshair` je aktivní pouze ve 4 `viewer` módu. Zobrazuje souřadný kříž ve všech třech ortogonálních řezech. Barvy označují různé směry (červená - osa `x`, zelená - osa `y`, modrá - osa `z`). Kliknutím na libovolný řez lze s křížem pohybovat, přičemž na zbylých řezech se aktuální pozice zároveň aktualizuje.

- **Interpolace**

Amira umožňuje také interpolaci mezi řezy, kterou využijete pokud má objekt na více po sobě jdoucích řezech stejný tvar, nebo je ten tvar přibližně lineárně se měnící. Je možné označit objekt pouze na obou krajních řezech a použít z menu **Selection** funkci **Interpolate**, která označí tento tvar i na řezech mezi nimi. Pokud jsou krajní tvary jiné, interpoluje řezy mezi nimi lineárně. Pro větší objem postupně se měnících řezů je vhodné interpolovat po určitém vhodně zvoleném počtu řezů tak, aby nutnost oprav interpolovaných řezů byla co nejmenší.



Obrázek 14: Amira - 4 viewer mód

Nejvhodnější způsob je pro daný typ obrázku třeba vyzkoušet. Pro označení uzavřené plochy konstantní barvy je nejvhodnější Magic Wand. U kontrastních okrajů s nejednotnou barevností ve vnitřní části je vhodnější Lasso. Pokud není vhodný žádný z předchozích způsobů, je nejjistější ohraničit okraje plochy ručně štětcem (Brush), a pak vyplnit stisknutím klávesy F.

Možnosti editování jsou:

- **3D toggle**: pokud je aktivní, všechny operace jsou prováděny ve 3D, tzn. na všech obrázcích.
- **Picker**: označí pixely přiřazené materiálu. Pak je možné s nimi např. hýbat a otáčet.
- **Clear (C)**: vymaže označenou oblast.
- **Replace (R)**: nahradí v aktivním materiálu již přiřazenou oblast označenou oblastí. Případně přebývající pixely budou přiřazeny nejbližšímu materiálu.
- **Add (+)**: přiřadí označenou oblast aktivnímu materiálu. Voxely již přiřazené zamčenému materiálu zůstanou nezměněny. Označení voxelů bude smazáno, pokud nebudete při stisknutí tlačítka současně držet **Shift**.
- **Subtract (-)**: odbere označenou oblast z aktivního materiálu, pokud není zamčený.

Pro zrychlení práce lze používat následující klávesové zkratky:

Přechod mezi obrázky

- Space nebo šipka dolů - přechod na další obrázek
- Backspace nebo šipka nahoru - přechod na předchozí obrázek
- PageDown - skok o pět obrázků dopředu
- PageUp - skok o pět obrázků zpátky
- Home - skok na první obrázek
- End - skok na poslední obrázek

Při současném stisknutí klávesy **Shift** je označená oblast na obrázku zkopírována do cílového obrázku.

Označování oblasti

- A nebo + přiřadí označenou oblast aktivnímu materiálu
- S nebo - odbere označenou oblast z aktivního materiálu
- R nahradí aktivní materiál označenou oblastí
- C vymaže označenou oblast
- F vyplní označenou oblast
- I invertuje označenou oblast
- Ctrl-+ zvětší označenou oblast
- Ctrl- zmenší označenou oblast
- Ctrl-M vyhledá označenou oblast v aktuálním obrázku
- Ctrl-I použije interpolaci mezi řezy
- Ctrl-S uloží soubor

3.4 Vytvoření povrchové sítě

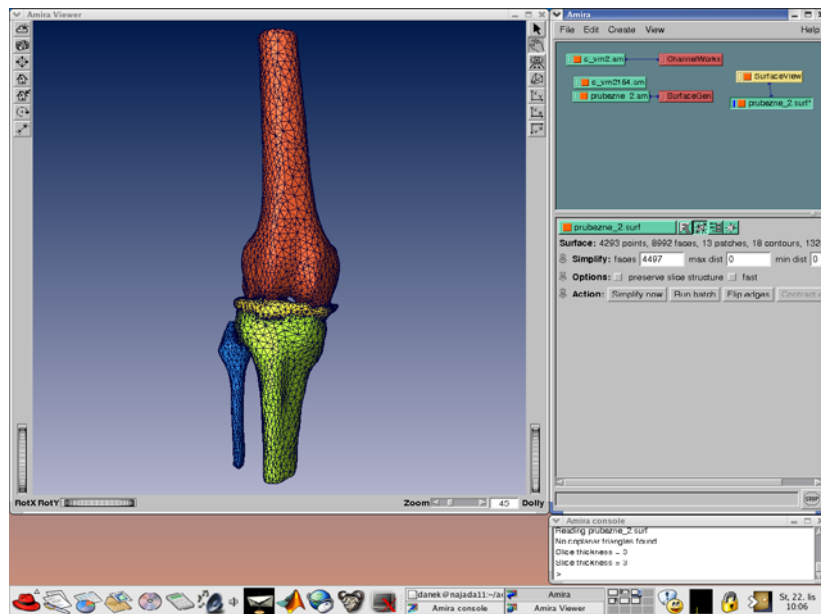
Po označení požadovaných ploch je možné vygenerovat povrchový 3D model tvořený trojúhelníky. Kliknutím pravým tlačítkem na ikonu vybereme modul **SurfaceGen** a stiskneme tlačítko **Triangulate**. Vytvoření povrchové sítě lze ovlivnit nastavením dalších parametrů, např. požadavkem na hladkost povrchu. Zaškrtnutá možnost **compactify** by měla zaručit vyšší kvalitu povrchové sítě.

Obvykle je počet povrchových trojúhelníků příliš velký a proto je žádoucí počet prvků tvořících povrchovou síť snížit. Ve druhém menu (pod symbolem trojúhelníků) modulu **SurfaceGen** je údaj o současném počtu prvků. V dalším řádku nastavíme počet elementů, na který chceme tuto síť zjednodušit. Dále je možné nastavit minimální a maximální rozměry generovaných prvků. Tlačítko **Simplify now** v dolní části menu spustí výpočet.

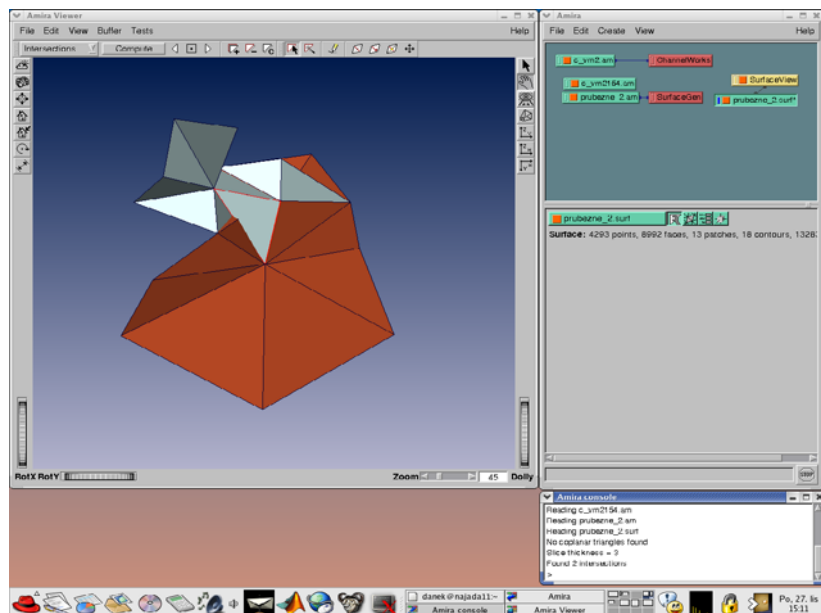
Pro budoucí konečněprvkovou síť je velmi důležitá správná příprava povrchové sítě. V této fázi přípravy povrchové sítě je třeba věnovat pozornost zejména částem, kde na sebe navazují různé materiály. Nyní využijeme **Surface Editor**, po kliknutí na tlačítko s klíčem se editor otevře a objeví se ve **Viewer Window** nová tlačítka pro editaci. V liště se objeví položka **Tests**, která obsahuje skupinu pěti testů, které jsou užitečné pro vygenerování dobré sítě.

- **Intersection test:** Celkový počet trojúhelníků, u kterých dochází k nekonformnímu protnutí s jiným trojúhelníkem se zobrazí v **Console Window**. V prohlížečím okně se zobrazí první trojúhelník včetně svého okolí, u kterého došlo k protnutí. Mezi jednotlivými případy lze listovat použitím příslušných tlačítek. Problémové trojúhelníky lze manuálně opravit pomocí 4 funkcí: *Edge Flip*, *Edge Collapse*, *Edge Bisection* a *Vertex Translation*.
- **Orientation test:** Po úspěšném opravení špatně se protínajících trojúhelníků, následuje test na orientaci. Při zjednodušování sítě může při překryvu materiálů nastat v malém počtu případů nekonzistence ve vnější orientaci trojúhelníků.

Následující 3 testy se používají již po vygenerování objemové sítě.



Obrázek 15: Amira - Vytvoření povrchové sítě



Obrázek 16: Amira - Intersection test

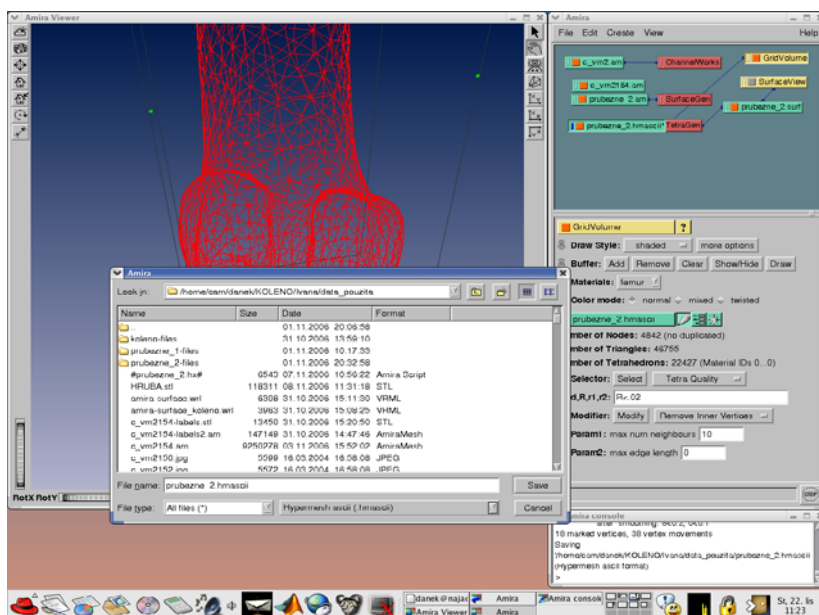
- **Aspect ratio:** Pro každý trojúhelník vypočte poměr stran a v **Console Window** se zobrazí seřazené od nejhoršího (největšího) k nejlepšímu. Pokud zvolíme možnost **operate on whole surface** a nastavíme limit pro maximální možný poměr, provede se úprava pro celý povrch automaticky.
- **Dihedral angle:** Pro každé dva sousedící povrchové trojúhelníky je vypočten úhel, který svírají. Pokud chceme úhel zvětšit, můžeme k tomu využít funkci **Vertex Translation** a příslušný třetí vrchol trojúhelníka posunout.
- **Tetra quality:** Pro každý povrchový trojúhelník se vypočte poměr poloměru sféry opsané a vepsané čtyřstěnu, který tento trojúhelník obsahuje.

V poslední fázi je třeba vygenerovat konečněprvkovou síť tetrahedronů.

3.5 Vytvoření objemové sítě

Pokud nám již vytvořená povrchová síť vyhovuje, vygenerujeme objemovou síť tvořenou tetrahedrony. Pravým tlačítkem na ikonu vybereme v nabídce **Compute** modul **TetraGen** a stiskneme tlačítko **Run now**. Objeví se dialog, který se zeptá, jestli skutečně chceme začít s generováním sítě. Klikneme na tlačítko **Continue**. Generování sítě je opět velmi závislé na operační paměti a může trvat i desítky minut. Pokud se v konzoli objeví error, generování sítě nebylo z nějakého důvodu úspěšné.

Po kliknutí na **Meshsize** se objeví okno, ve kterém je možné nastavit požadovanou velikost vnitřních hran pro každou oblast.



Obrázek 17: Amira - Vytvoření konečněprvkové sítě

4 Export dat

Pro uložení vytvořené konečněprvkové sítě můžeme použít několik formátů.

AVS Field	stores data defined on regular grid (rw)
AVS UCD Format	stores unstructured cell data (rw)
Fluent / UNS	contains FEM meshes, boundary ids, solution data (rw)
Hypermesh	used by Altair HyperWorks FEM software (rw)
IDEAS universal format	describes FEM grids and simulation data (rw)
Plot 3D Single Structured	stores curvilinear grids and associated data (rw)

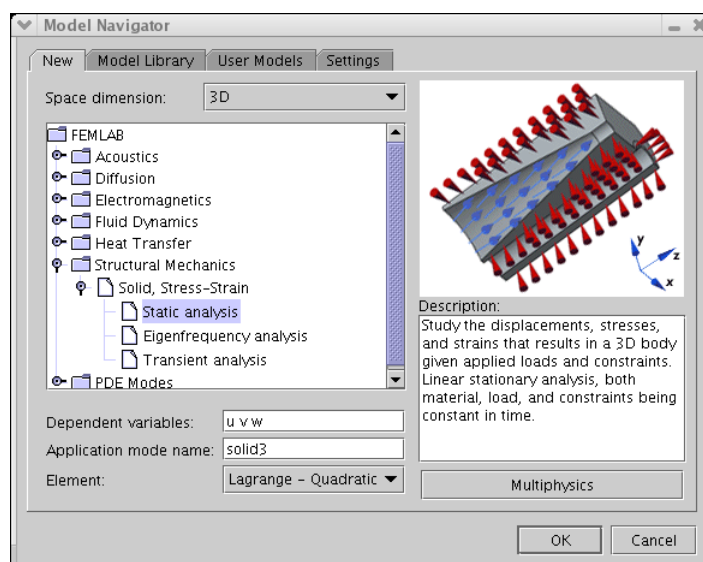
Pro naše potřeby je vhodné použít export ve formátu **Hypermesh** (.hmcscii) v textové podobě a jeho následné zpracování např. pomocí sw **MATLAB**, ve kterém převedeme data do formátu, který je používán jako vstupní formát do programu **FEC**.

Lze postupovat i tak, že použijeme pouze vygenerovanou povrchovou síť a konečněprvkovou objemovou síť vytvoříme za pomoci dalšího software, který umožňuje vygenerování sítě s lepšími vlastnostmi. Pro uložení povrchové sítě můžeme použít několik dalších formátů.

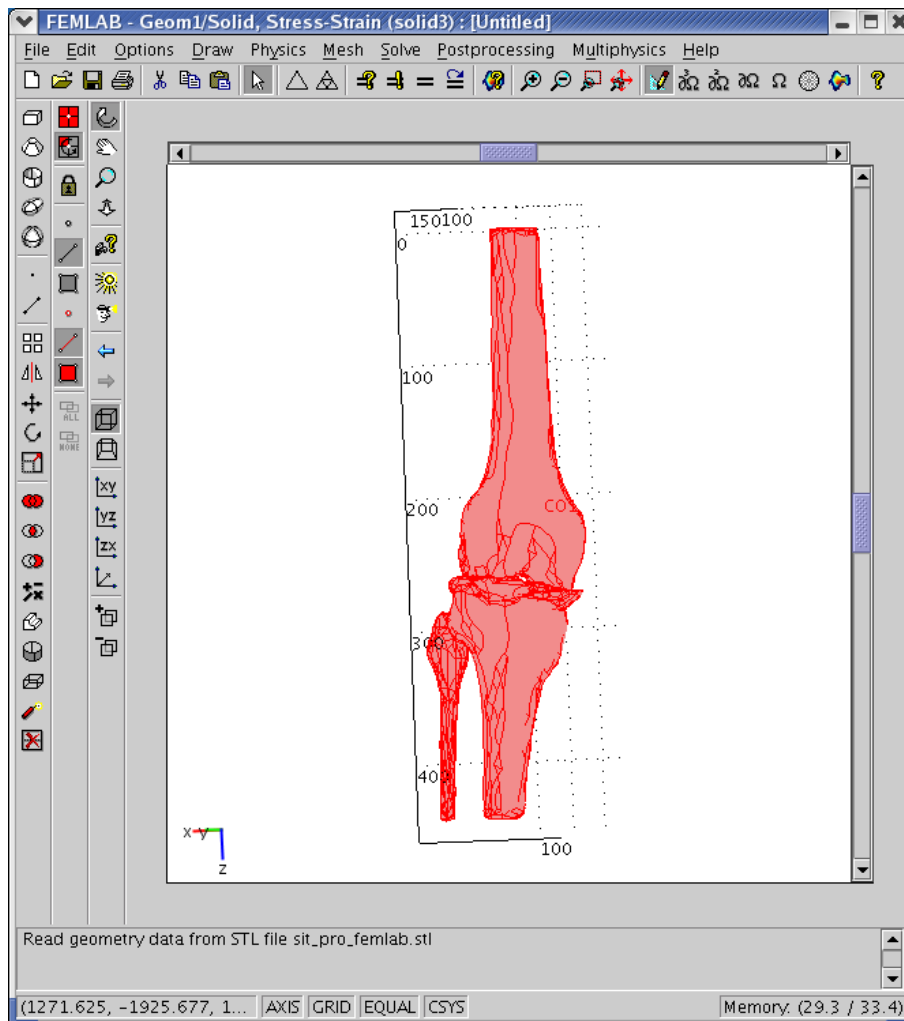
HxSurface	amira's native format for triangular surfaces (rw)
Open Inventor	standard file format for 3D models (rw)
STL	simple format for triangular surfaces, no connectivity (rw)
Ply Format	Stanford triangle format for points and surfaces (rw)
DXF	Drawing Interchange Format for AutoCAD 3D models (rw)

5 Možnosti vizualizace vypočítaných výsledků

Pro zobrazení vypočtených hodnot veličin, které nás zajímají (posunutí, deformace, napětí) je možné použít různý software. Pokud bychom pro vizualizaci chtěli použít sw **Comsol** (dříve **Femlab**), předpokládalo by to vygenerování konečněprvkové sítě přímo v sw **Comsol**, což je možné právě s využitím pouze povrchové sítě získané v sw **Amira**. Sw **Comsol** bohužel neumožňuje načtení již vygenerované (pomocí jiného sw) konečněprvkové sítě, je možné pouze načtení ve vlastním strukturovaném formátu.



Obrázek 18: Comsol (Femlab) - Model Navigator



Obrázek 19: Comsol (Femlab) - Načtení geometrie

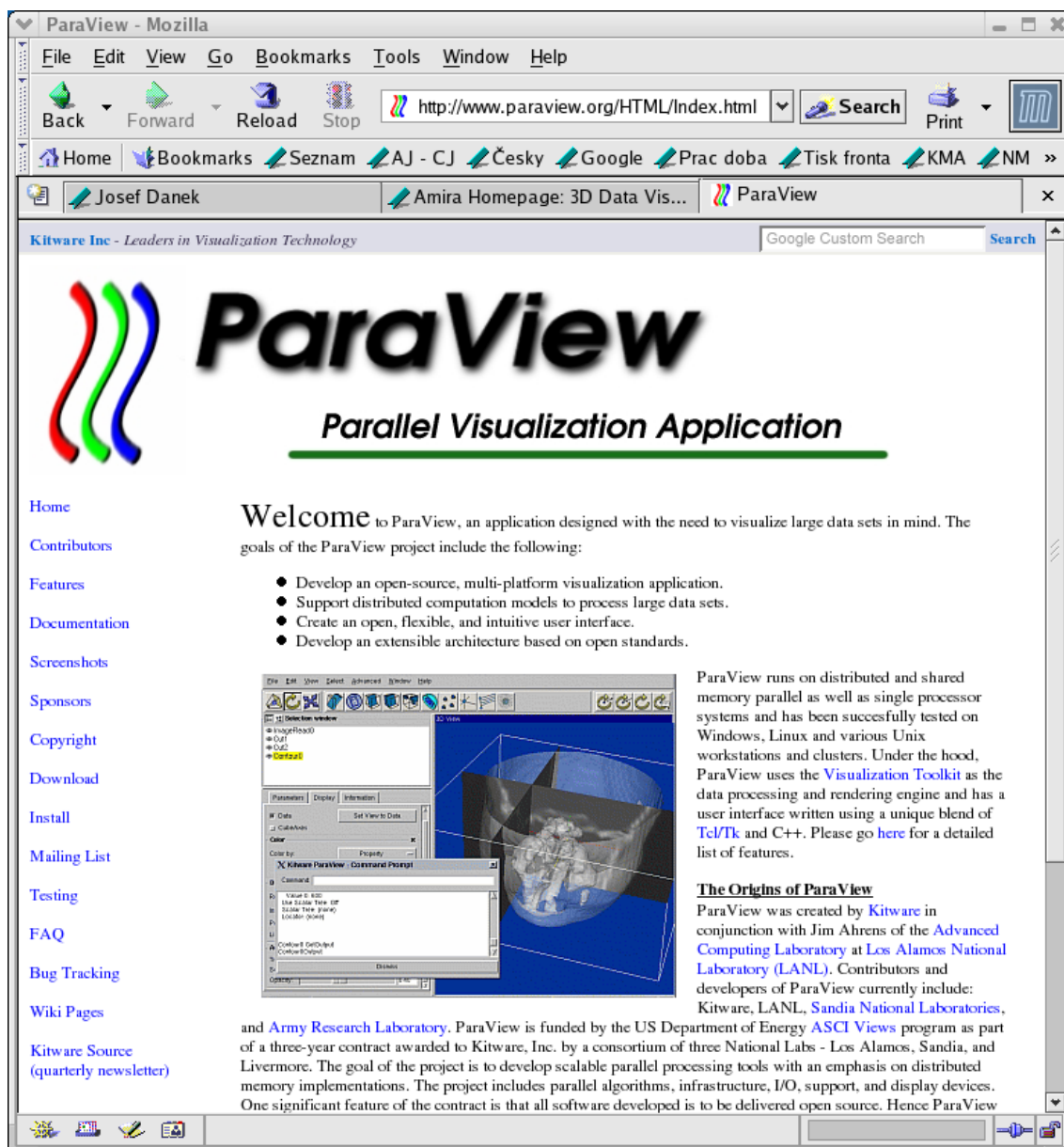
Další možností pro zobrazování výsledů je The Visualization ToolKit (VTK) [5] nebo ParaView [6]. V obou případech se jedná o open source, volně dostupný software. Bližší informace lze získat na uvedených www stránkách.

Reference

- [1] www stránky http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.
- [2] www stránky <http://www.amiravis.com>.
- [3] www stránky <http://www.medin.cz/>, <http://www.endoimplant.cz/>.
- [4] www stránky <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>.
- [5] www stránky <http://public.kitware.com/VTK>.
- [6] www stránky <http://www.paraview.org>.



Obrázek 20: The Visualization ToolKit (VTK)



Obrázek 21: ParaView