

Modelovanie v biomechanike s využitím programov ANSYS a ANYBODY

Učebný text

S podporou projektu KEGA 060STU-4/2016

2018

doc.Ing. Branislav Hučko, CSc., Ing. Filip Uherčík, PhD.

Modelovanie

Definícia modelu:

- Model predstavuje čo najvierohodnejší virtuálny alebo fyzický obraz reality.

Ciele modelovania:

- Zlepšiť vedomosti a prehľad o realite.
- Aby bolo možné odhadnúť alebo predvídať premennú záujmu.

Modelovanie vs. Simulácia

- Počítačové modelovanie sa týka zriadenia matematických rovníc, ktoré popisujú systém o ktorý máme záujem, zhromažďovania vhodných vstupných dát a začlenenie týchto rovníc a dát do počítačového programu.
- Počítačová simulácia je obmedzená na využitie overeného počítačového modelu na ktorom sa budú vykonávať pokusy za starostlivo kontrolovaných podmienok a prostredia vytvoreného na základe modelu z reálneho sveta.

Cieľom modelovania ľudského tela sú presné simulácie pohybov v rozhraní od každodenných rutinných pohybov (chodenie, sedenie, státie, práca na strojoch, pitie, riadenie vozidla), cez výpočty pre optimálne výkony (športové aktivity, hranie na hudobných nástrojoch), až po kinematické analýzy nehôd (dopravných, pádov, smrtonosných zranení..). Predmetom simulácii je získanie presných, plnohodnotných analýz, ale aj zisťovanie následkov pri zmenách parametrov.

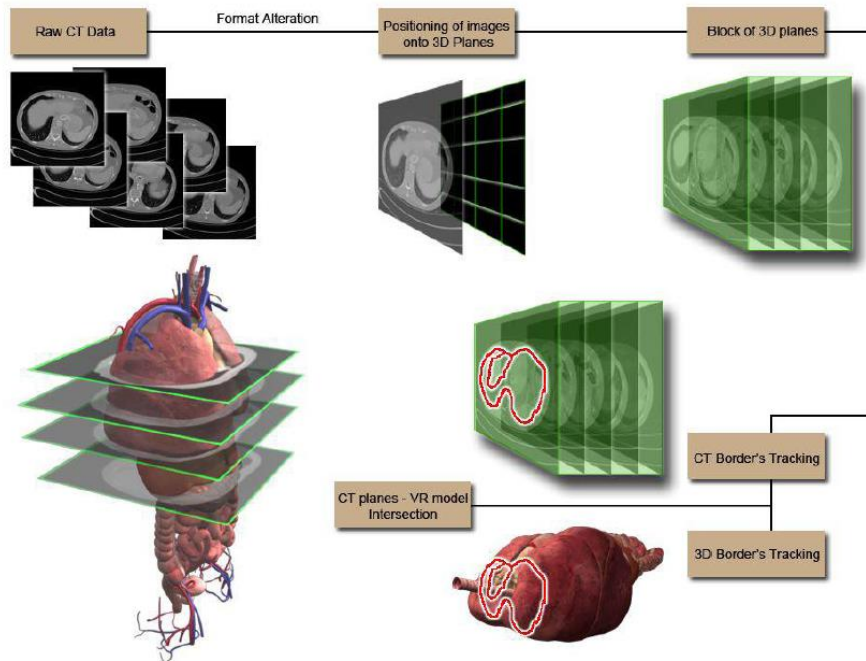
Pre zjednodušenie získavania poznatkov z oblasti anatómie a biomechaniky sa často využíva BioDigital Human Platform™ vyvinutý spoločnosťou Google (www.biodigitalhuman.com).

K presnému modelovaniu ľudského tela, alebo jednotlivých častí, k určovaniu síl pôsobiacich v rôznych anatomických štruktúrach sa využíva metóda tvorby modelu za pomoci

CT snímok . Táto metóda sa využíva napríklad pre určovanie síl, ktoré pôsobia v kĺboch, a určenie, ako sú tieto sily rozložené medzi svaly a väzy prislúchajúceho kĺbu.

Postup, na základe ktorého je možné určiť geometriu kostí a svalov priamo z CT snímkov pacienta:

- Spracovanie CT (computer tomography) snímkov, skladá sa z filtrácie snímkov, vyrovnania histogramu, zníženia šumu, atď.
- Vizualizácia 3D geometrie. Vstupom do tejto fázy sú upravené CT snímky. V jednotlivých rovinách 3D bloku, sa vytvoria obrisy rezu daného elementu.
- Definícia svalového modelu. Jednotlivé obrisy sa neskôr pospájajú do celkového plášťa daného elementu.



Obr. 1. Spracovanie CT snímkov

Tento systém je presnejší a možno s ním vytvoriť aj zložitejšie segmenty ľudského tela, avšak je veľmi prácny. Množstvo výskumných prác sa zaoberá zautomatizovaním tejto procedúry medzi rozhraním CT - VR (virtuálna realita, model). Práve kvôli náročnosti spracovania sa často vo výskumných prácach, ale aj v komerčných oblastiach čoraz častejšie využívajú softwarové balíky obsahujúce vytvorené modely kostí, svalov a kĺbov. Tieto programy sa využívajú pre doprednú či inverznú kinematiku a dynamiku.

Po spracovaní CT snímkov do 3D virtuálnej reprezentácie, t.j. vytvorení priestorového virtuálneho modelu, je možné túto vyexportovať do požadovaného softvéru za účelom danej simulácie. Pre simulácie v biomechanike je možné použiť niekoľko komerčných softvérov, ktoré si postupne popíšeme.

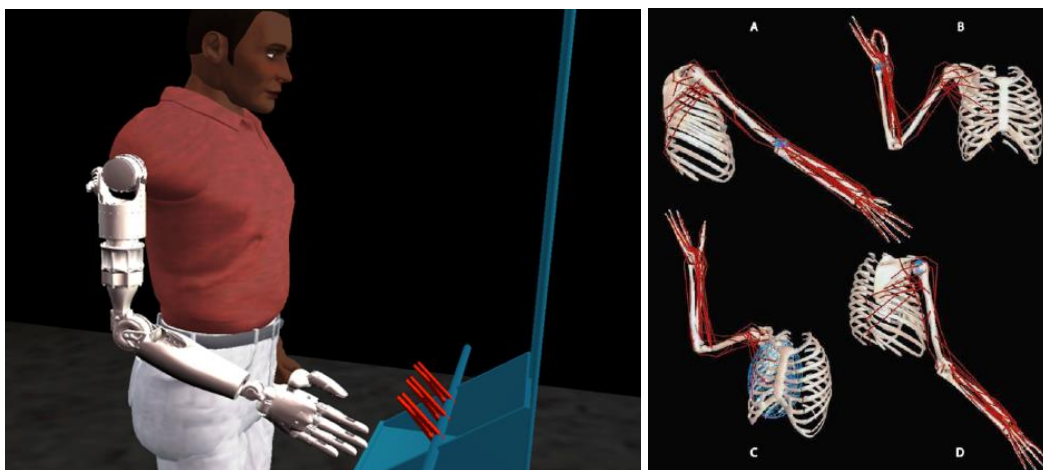
MSMS

Tento voľne dostupný software sa využíva v rôznych oblastiach skúmania pohybu, od štúdie svalovej sústavy až po skúmanie porúch v dôsledku cievnej mozgovej príhody, ochrnutia, amputácie, atď.

MSMS dovoľuje vytvárať geometriu, ale aj importovanie zo SolidWorks-u. Importovanie sa využíva pri modeloch protetických končatín, kde je následne možné optimalizovať geometriu a stupne voľnosti.

Po amputácii sa pacienti musia naučiť vytvárať EMG signály potrebné pre ovládanie protézy. To je pomerne obtiažna úloha, pretože pacienti sú nútení naučiť produkovať nervové príkazy, ktoré riadia stupne voľnosti protézy. MSMS môže uľahčiť rôzne fázy technického vývoja a montáž protetických končatín.

Pre výpočet Off-line a Real-time dynamických simulácií MSMS automaticky vytvorí simulačný model, ktorý môže byť spustený zo Simulinku (MathWorks, Inc.), kde môže byť model doplnený o nástroje z Matlabu.



Obr. 2. ukážka z MSMS a OpenSim

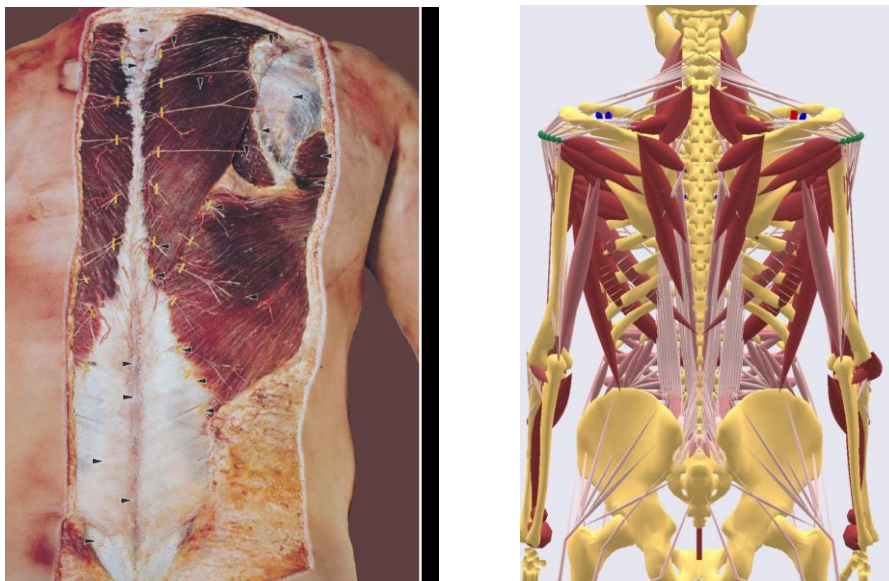
OpenSim

Umožňuje vytvárať modely, prispôbovať zmeny a analyzovať svalový systém človeka, či robiť dynamické analýzy pohybu.

Pre zložitejšie simulácie človeka v jeho prirodzenom prostredí, ktoré je definované vonkajšími silami, limitami obmedzujúcimi pohyb sa využívajú softwarové balíky ako **MSC ADAMS/View**, alebo **AnyBody Modeling system**.

AnyBody Modeling System

Využíva sa v automobilovom priemysle (BMW Group, Daimler AG, Ford Werke), ortopedike, výskumných prácach, ale aj astronautike (NASA) a pri vytváraní pracovných podmienok. S týmto systémom má výskumník k dispozícii viac ako 1000 svalov celého tela, geometriu kostí, možnosť riešiť inverznú a doprednú kinematiku a dynamiku, optimalizovať a meniť modely, ale spolupracuje aj s video systémami zachycujúcimi pohyb.



Obr. 3. realita vs. Model vytvorený v AnyBody

AnyGait

Čo môžeme robiť s aplikáciou AnyGait?

AnyGait je výkonná aplikácia ktorá slúži pre analýzu štúdií biomechaniky chôdze v laboratórnych podmienkach. Je založený na systéme AnyBody Modeling System, ktorý obsahuje veľmi rozsiahli a komplexný balík svalov, kĺbov a kostry človeka.

Ako vstup využíva súbory vo formáte C3D, ktoré sú vlastne zhromaždením štandardného merania pohybovej aktivity z MOCAP (Motion Capture- záznam pohybu) a zo silových reakcií od zeme (ground reaction force). Je potrebný statický aj dynamický proces tak, ako býva zachytený s rôznymi systémami ako je MOCAP Vicon, Qualysis a im podobným. Ďalej sú potrebné antropometrické dáta, ako sú hmotnosti a výšky skúmaného subjektu.

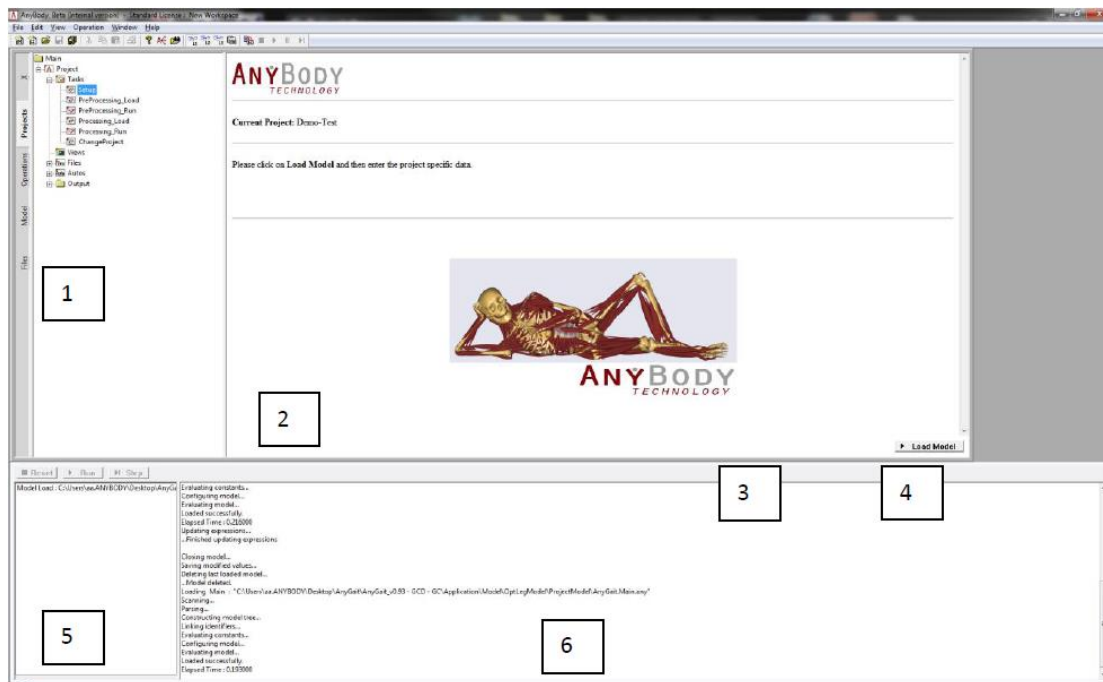
Okrem natočenia jednotlivých kĺbov a reakčných síl a momentov, ktoré je možné vypočítať priamo z meraní, AnyGait predpovedá svalovú činnosť a prislúchajúce reakcie v kĺboch. Základný model vytvorený v AnyBody obsahuje všetky hlavné kosti a viac ako 1000 svalov. Každý z týchto svalov, alebo ich silu môžeme zobrazit' a skúmať separátne, alebo aj ako skupinu svalov a skúmať ich súvisiace vlastnosti.

AnyGait má prednastavený výstup tých najdôležitejších výsledkov v zhustenej a ľahko čitateľnej podobe. Toto obsahuje valovú aktivitu, výstupné uhly a spoločné reakčné sily kĺbov členka, kolena a bedrového kĺbu. Je možné ich upraviť tak, aby vyhovovali potrebám a požiadavkám daného laboratória, projektu, alebo pacientovi.

Pracovne prostredie AnyGait je rozdelené do 6 pracovných polí:

1. Zoznam úloh (v záložke Projekty)
2. Vysvetľovacie pole
3. Funkčné tlačidlá
4. Priestor pre pohľad na model
5. Zobrazovanie priebehu štúdie
6. Aktuálne akcie

Keď prejdete všetkými pokynmi v „Zozname úloh“ (1) spustíte postupne celú analýzu. Vo „vysvetľovacom poli“ (2) dostávate vysvetlenia ku súčasným krokom na základe ktorých sa Vám zobrazia rôzne funkčné tlačidlá (3), ktoré budú vykonávať jednotlivé kroky úloh. Na Obr. Č. je priestor (4) prázdny. Pri simuláciách bude model v tomto pracovnom priestore načítaný. Pole (5) a (6) ukazujú správy indikujúce súčasný stav a akcie analýzy.

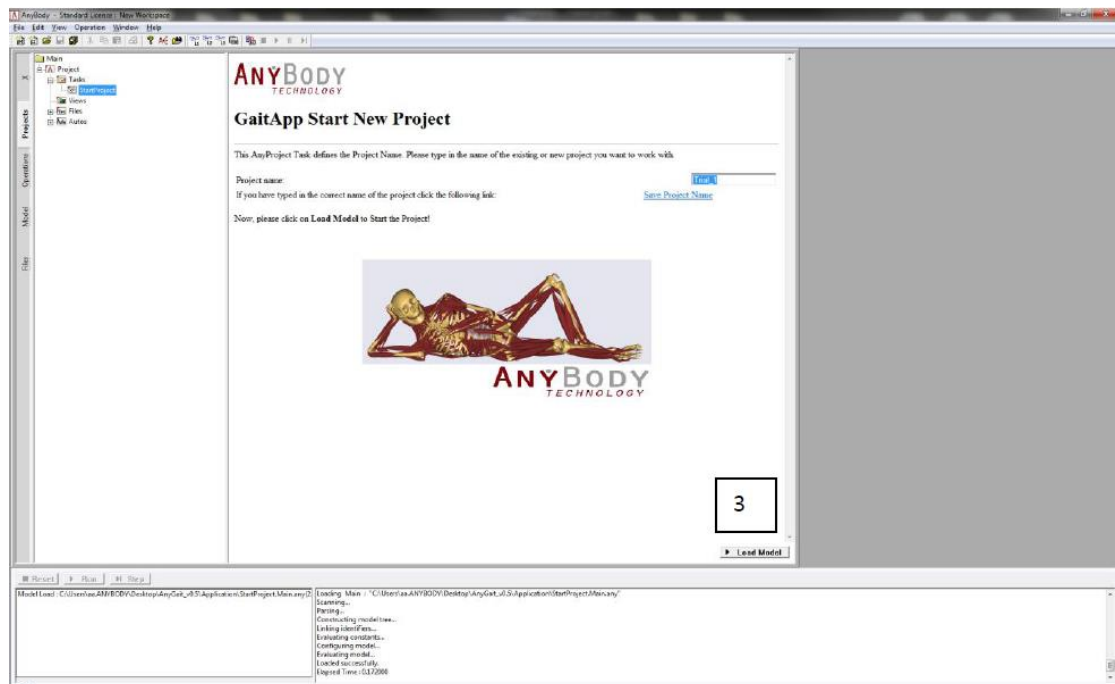


Obr. 4. Rozdelenie prostredia AnyGait

(1) Štart nového alebo existujúceho projektu:

Pre začatie nového projektu budete vyzvaný definovať názov projektu – *Project Name*. Tu zadáte meno existujúceho alebo nového projektu pod ktorým chcete pracovať. So zadaním názvu projektu sa automaticky vytvorí nový priečinok v AnyGait priečinku:

Napr.: C:\Users\abc\Desktop\AnyGait\Application\Projects\Trial_1

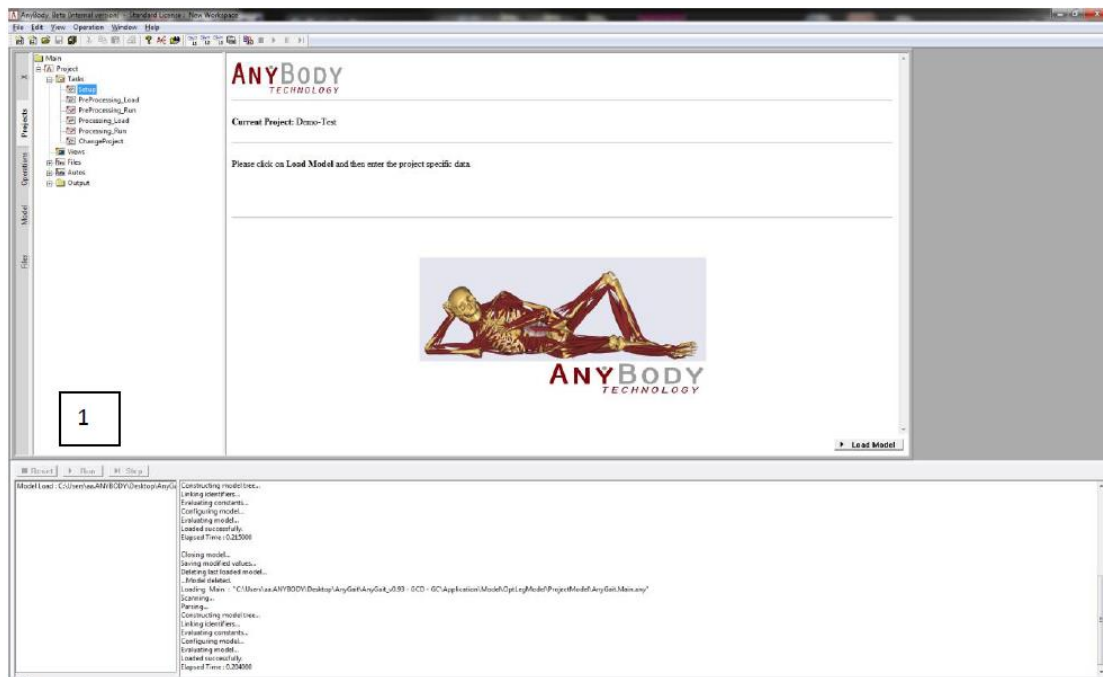


Obr. 5. Začiatok projektu

Pri zadávaní názvu nepoužívajte medzery prosím. Po úspešnom zadaní názvu kliknite na link *Save Project Name* pre vytvorenie priečinku a začatie projektu.

Po kliknutí na *Load Model* v poli (3) sa dostaneme do hlavného okna, kde môžeme spustiť analýzu a zobrazia sa nám 4 nové možnosti v zozname úloh (1).

V prvej úlohe je potrebné špecifikovať a zadať hodnoty pre váhu subjektu, výšku a názov C3D file-u. V Preprocessingu je potom možné generovať kinematiku (prenáša MoCap do jednotlivých kĺbov). V processingu môžeme zbehnúť finálnu analýzu a výpočet reakčných síl v kĺboch a svalovú aktivitu.



Obr. 6. Hlavné okno s úlohami: SetupData, PreProcessing, Processing a ChangeProject

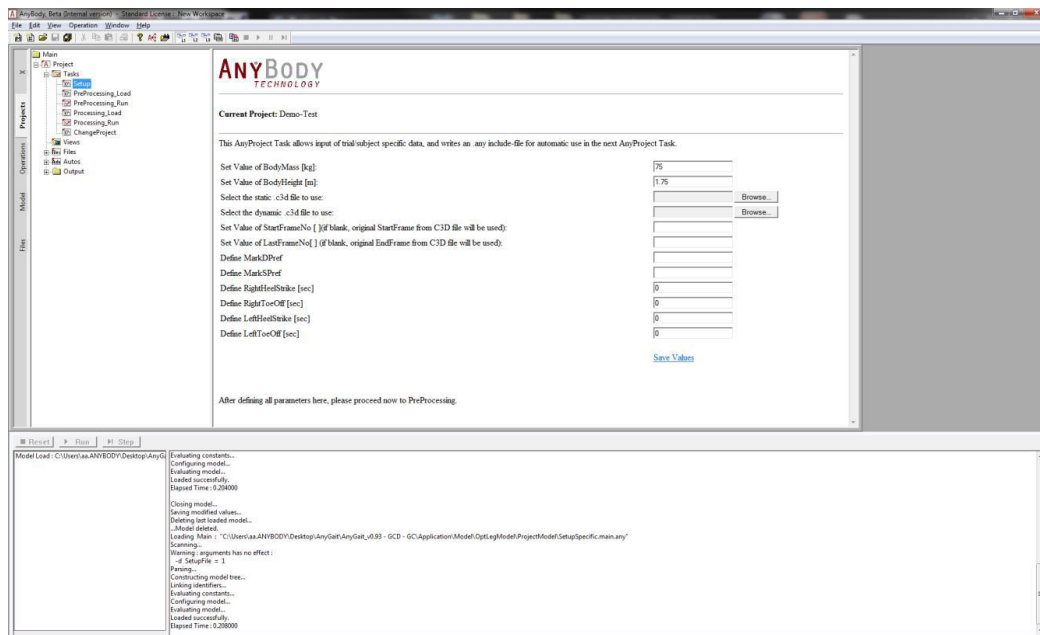
(2) SetupData

V nastaveniach je potrebné zadať informácie špecifické pre daný projekt.

Pre zbehnutie analýzy je potrebné zadať:

- Výšku a váhu subjektu
- C3D file (statický a dynamický)
- Vložiť začiatkovú a koncovú snímku (Ak sa nič nevloží, za začiatkovú a koncovú snímku sa budú považovať snímky z C3D file-u).
- Očíslovanie označovačov ako boli použité v C3d file.
- Definovať ľavý a pravý HeelStrike a ToeOff hodnoty v sek.

Po doplnení hodnôt kliknite na „Save Values“ .



Obr. 7. Okno SetUp

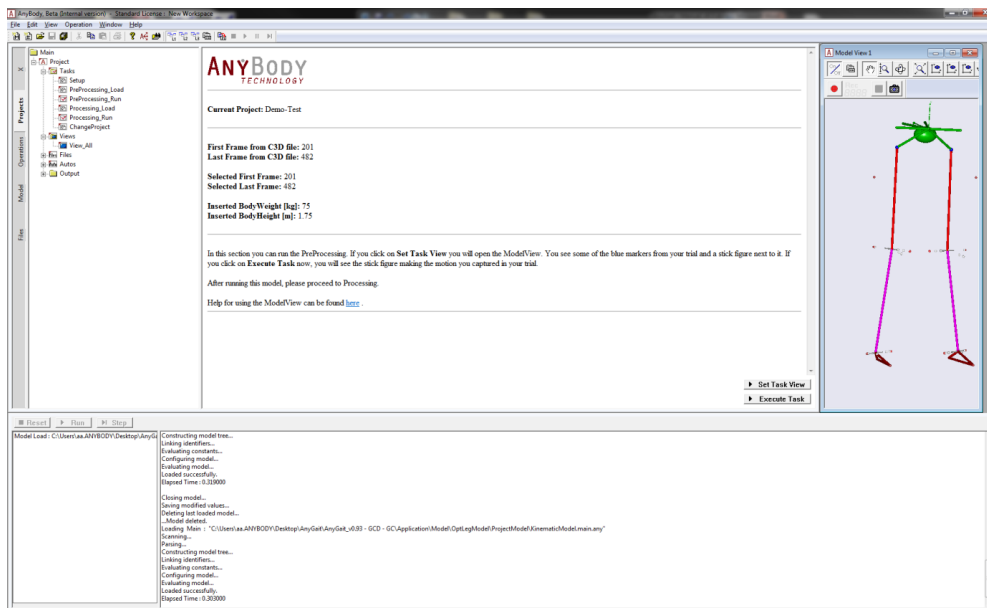
(3) Preprocessing

PreProcessing využíva súbory C3D na výpočet natočenia kĺbov. Pripravuje kinematické dáta pre následné dynamické analýzy.

Začnite prosím s *PreProcessing_Load*, stlačte tlačidlo *Load* a následne pokračujte *PreProcessing_Run*.

Po kliknutí na *Set Task View* sa Vám otvorí Model View, na ktorom sú viditeľné modré označovače z trialu a model dolných končatín. Po kliknutí na „*Execute Task*“ bude model vykonávať pohyb zachytený videografickou metódou.

Po vykonanom PreProcessingu pokračujte na Processing.



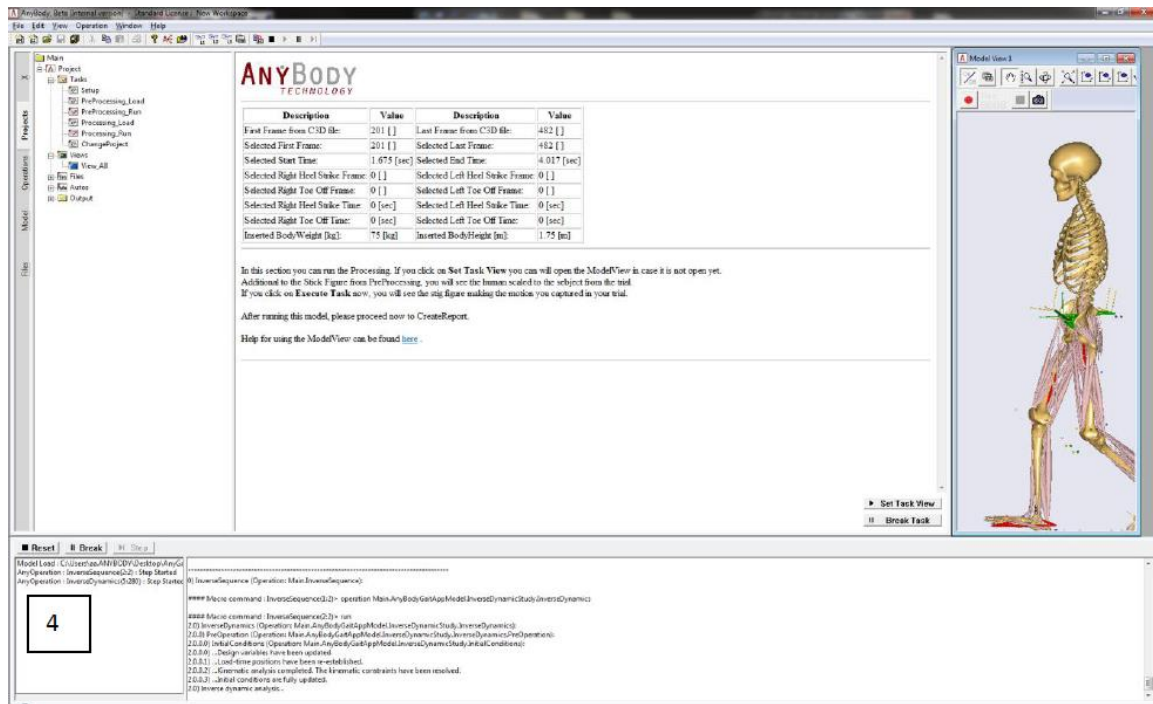
Obr. 8. Prostredie PreProcessingu so zobrazeným modelom a C3D označovačmi

(4) Processing

V tejto sekcii môžeme spustiť muskulo-skeletálnu analýzu v ktorej dostávame svalovú aktivitu a reakčné sily v kĺboch. Štandardný AnyBody model je skonvertovaný na analyzovaný objekt pomocou použitých značiek. Tento model bude potom reprodukovat pohyb z C3D súboru pomocou osí a natočenia kĺbov vypočítané v kroku PreProcessing. Svalová aktivita a reakčné sily sa vypočítajú pomocou pohybu a dát z plošiny na meranie síl. Tieto dáta sa využívajú ako vstup pre inverzné a dynamické simulácie.

Pred začatím s PreProcessing_Load je potrebné kliknúť na tlačidlo „Load“ a pokračovať na Processing_Run. Kliknite na „Execute Task“ na spustenie Processingu. V časti „Model View“ vykonáva model požadovaný pohyb, Obr. 9.

V poli (4) je možné vidieť aktuálne kroky počas analýzy.



Obr. 9 Prostredie Procesingu počas simulácie chôdze

Úloha

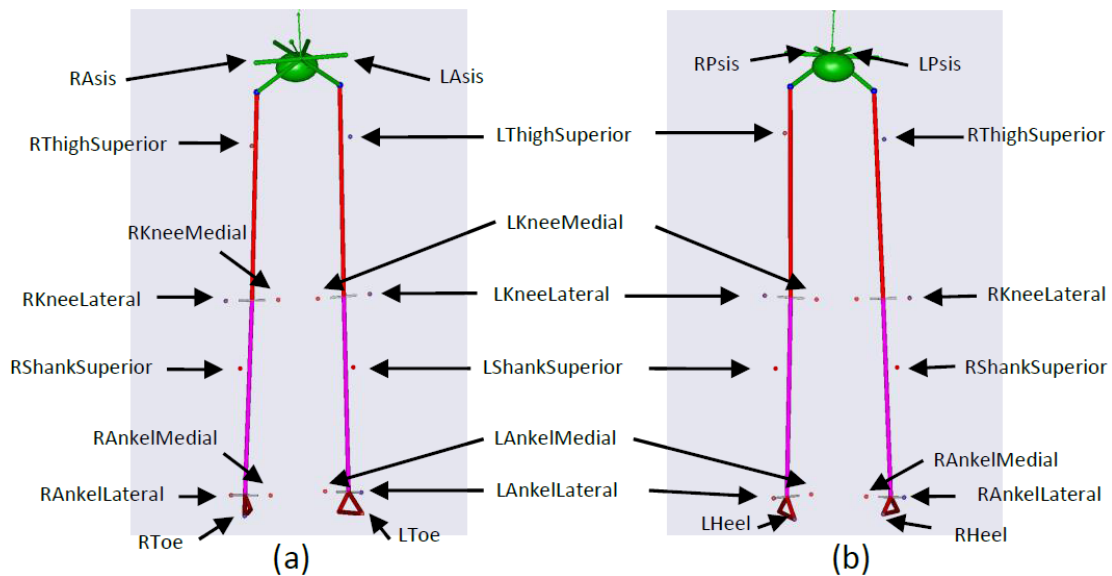
1. Vykonanie pohybovej analýzy založenej na údajoch z laboratórií pomocou softwaru AnyGait od AnyBody Modelling System.
2. Overenie výstupov simulačného modelu s hodnotami nameraných reakčných síl a EMG.
3. získať základné vedomosti o tom, ako môžu byť výstupy z modelu použité na analýzu mechanických rozdielov v každodenných aktivitách

Cieľom tejto úlohy je naučiť sa spustiť model a analyzovať výsledky a nie stavba modelu samotného. Všetky údaje a samotný model obsiahnuté v tomto zadaní boli zaznamenané a vytvorené špeciálne pre túto úlohu.

Experimentálne dáta

Experiment bol vykonaný na mužovi s hmotnosťou 70kg, výškou 186 cm v laboratóriách pre záznam pohybu. Súčasne boli zaznamenávané reakčné sily na podlahu

a EMG sigál. Označovače boli pripevnené na spodných končatinách a ich umiestnenie je znázornené na Obr.10.



Obr. 10 Pozícia označovačov (a) spredu, (b) zo zadu

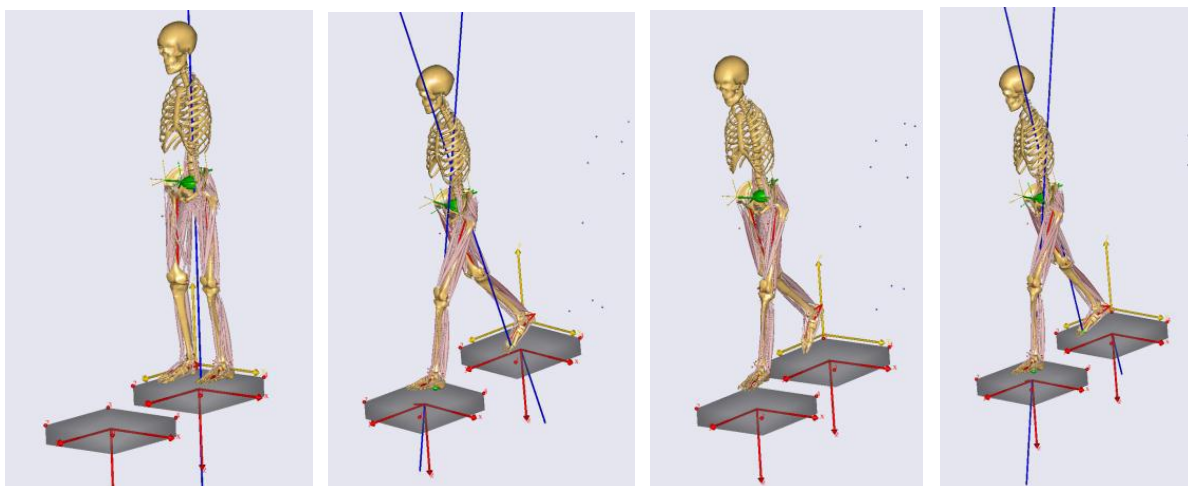
Označovače boli zaznamenávané systémom Qualisys s ôsmimi kamerami a frekvenciou 100 Hz. Reakčné sily zo zeme boli zaznamenávané systémom AMTI typu 4 s frekvenciou 2000 Hz, zodpovedajúce štandardom c3d (www.c3d.org). EMG signál pre soleus medialis a tibialis anterior boli zaznamenávané na pravej nohe pomocou wireless systému Noraxon s frekvenciou 2000 Hz.

Aktivity zaznamenané v laboratóriu:

- Referenčný experiment (statický), kde testovaný subjekt stál rovno Obr. 11 (a).
- Experiment chôdze rýchlosťou prirodzenou pre testovaný subjekt Obr. 11 (b).
- Experiment pomalého behu Obr.11 (c).
- Experiment chôdze s tuhým kolenom, kde subjekt simuloval zranené koleno počas chôdze jemu zvolenou rýchlosťou Obr. 11 (d).
- Dynamické skúšky maximálnych dobrovoľných kontraktíí (MVC – maximum voluntary contraction)

- Dynamický experiment MCV pre Soleus Medialis :protipohyb – skok
- Dynamický experiment MCV pre Tibialis Anterior: hojdanie pravej nohy.

MCV štúdie už boli analyzované a príslušné kalibračné faktory pre EMG sú obsiahnuté v AnyGait modely.



Obr. 11. svalovo kostrový model

Kostrovo-Svalová analýza

Táto analýza je vykonaná využitím AnyGait v.0,92 nastaveným pre tento experiment. Pred vykonaním inverznej dynamickej analýzy je potrebné prejsť v AnyGait tromi stupňami procedúry:

1. Model Stick Figure sa generuje na základe statického experimentu.
2. Kinematická analýza sa vykonáva na základe dynamických experimentov a uhly pootočenia a ostatné informácie sa ukladajú pre ďalšie využitie.
3. Stick Figure Model a TLEM – Twente Lower Extremity Model sú súčasne načítané a zmenené tak, aby zodpovedali veľkosti a morfológii kĺbov modelu Stick-Figure. Následne môže byť vykonaná inverzná dynamická analýza riadená zmenami uhlov jednotlivých kĺbov na základe údajov získaných v kroku 2 a kinetických okrajových podmienok.

AnyGait je nastavený tak, aby vytváral výstup využívajúci svalový polynóm 3 stupňa.

Zaznamenaný EMG signál je filtrovaný pri 10 Hz a 400 Hz, rektifikovaný spodno priepustným filtrom pri 6 Hz.

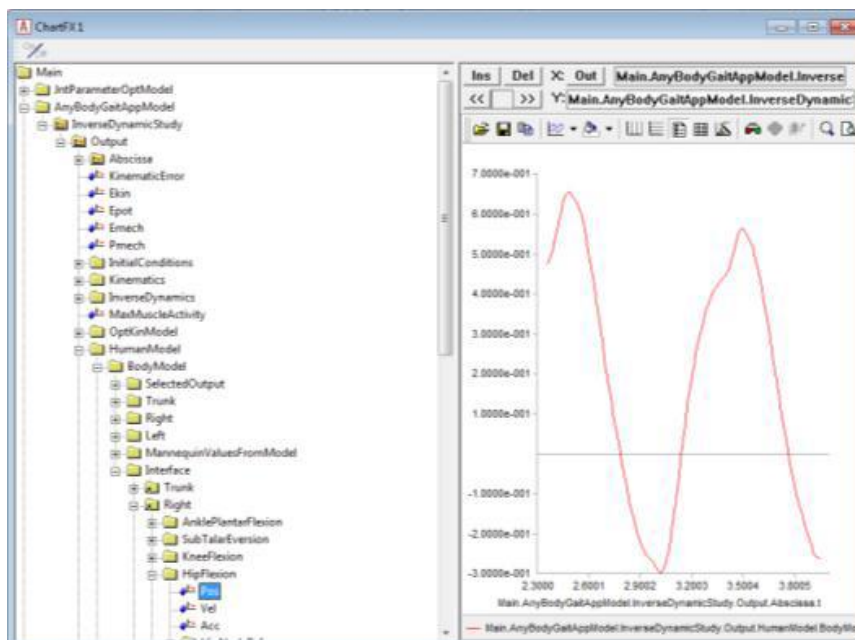
Výsledky

Vypočítané uhly natočenia, GRF-ground reaction forces, silové reakcie v kĺboch, svalová aktivita, a spracované EMG sú k dispozícii pre porovnanie rôznych dynamických experimentov.

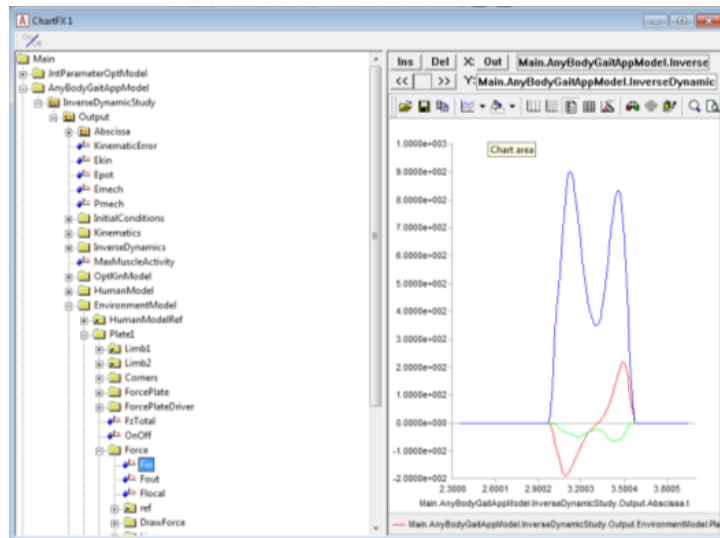
V nasledujúcich odsekoch si ukážeme kde nájdeme výsledky z analýzy inverznej dynamiky modelu.

Uhly pootočenia

Jednotlivé uhly pootočenia pre všetky kĺby sú k dispozícii v priečinku *interface* v priečinku *body model*. Príklad, ako nájdeme flexiu bedrového kĺbu je znázornený na Obr. 12.



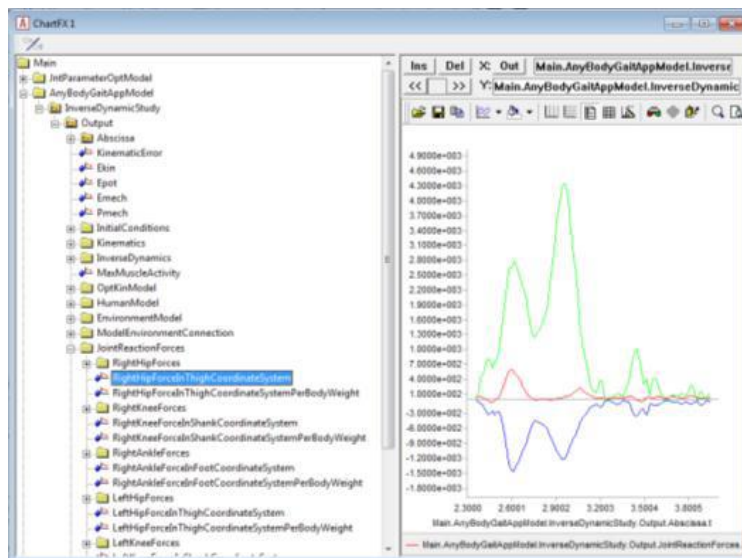
Obr. 12. Umiestnenie natočenia kĺbov



Obr. 14. Reakčné sily od podlahy

Reakčné sily v kĺboch

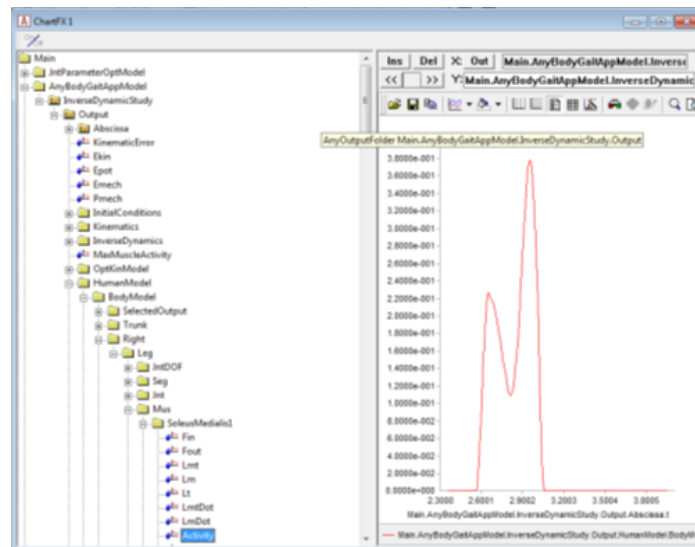
Reakčné sily a trenie v bedrových, kolenných a členkových kĺboch môžeme nájsť v priečniku *JointReactionForces*.



Obr. 15. Sily vzniknuté v kĺboch

Svalová aktivita

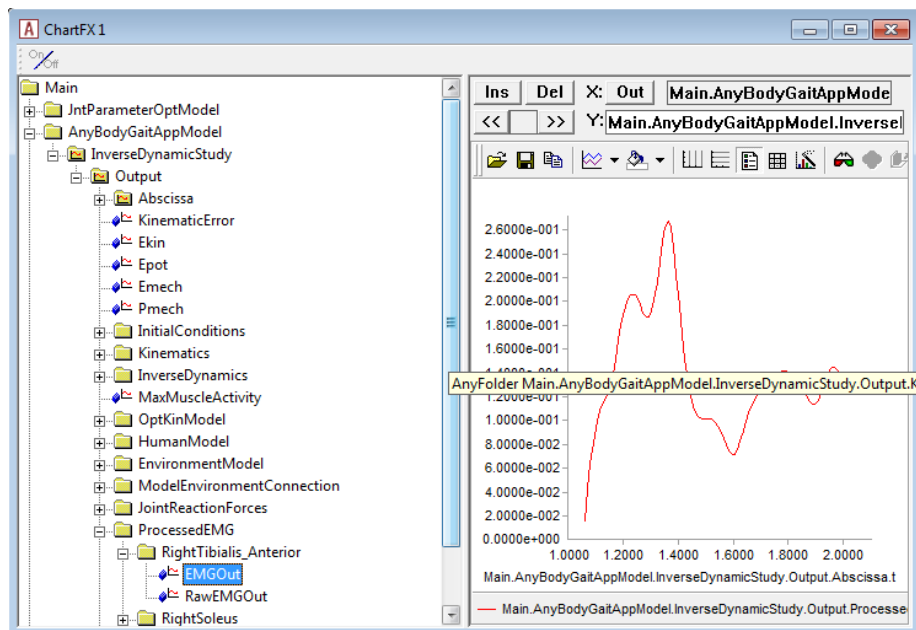
Priebehy vypočítanej svalovej aktivity sú umiestnené v priečinku *Mus* pod jednotlivými časťami tela. Na príklade je znázornená svalová aktivita svalu *soleus medialis*.



Obr. 16. Umiestnenie výsledkov svalovej aktivity

EMG

EMG získané z experimentu je dostupné v priečinku *Processed EMG*, ako je znázornené na Obr. 17.



Obr.17. Umiestnenie EMG signálov z experimentu

EMG bolo upravené vzhľadom k dynamickému experimentu MVC. Napr. hodnota 0,26 vo výstupnom EMG znamená, že EMG dosiahlo hodnotu 26% z hodnoty dynamického experimentu MCV.

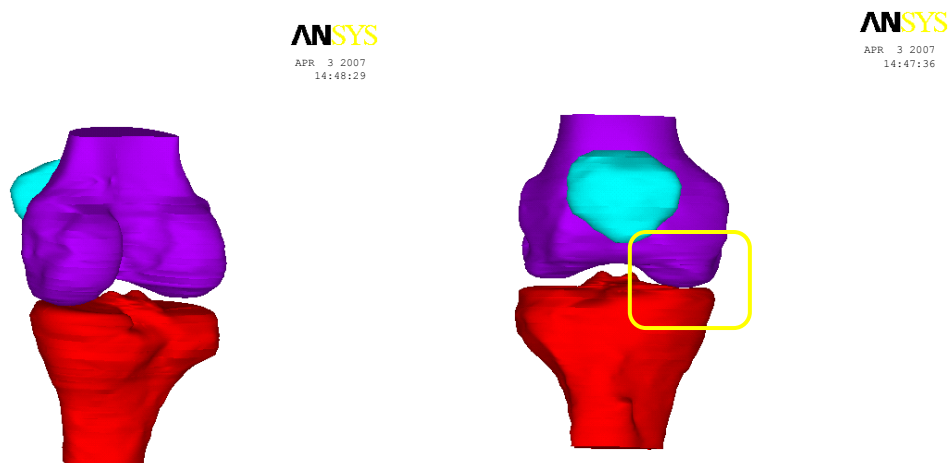
Úloha:

1. Získanie výsledkov pomocou AnyGait pre každý dynamický experiment.
2. Analýza výstupov:
 - a. Porovnanie reakčných síl v bedrovom a kolennom kĺbe získaných simuláciou a z online orthoload databázy (<http://www.orthoload.com/main.php?act=database>). Dáta sú dostupné pre oba kĺby počas choôdze a pre bedrový kĺb pri chodzi rýchlosťou 8km/h na bežiacom páse, ktorý môže byť porovnávaný s pomalým behom (testovaný subjekt mal rýchlosť chôdze pomerne vysokú). Nie sú dostupné dáta pre behanie alebo s poraneným (tuhým) kolenom.
 - b. Porovnanie odhadovanej svalovej činnosti s nameraným EMG signálom.

- c. Porovnanie výsledkov chôdze, pomalého behu a tühého kolena z hľadiska biomechaniky a odôvodniť rozdiely.

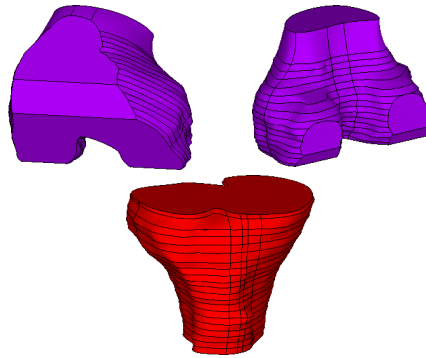
ANSYS

Výpočtový program ANSYS je založený na metóde konečných prvkov (MKP). MKP bola detailne prebraná a precvičená v rámci predmetu Základy metódy konečných prvkov. Jej aplikácie sa precvičili na cvičeniach, preto tu nie sú popísané podrobné návody na pre biomechaniku. Ako sme už spomínali, z CT snímok vytvoríme napr. model kolenného kĺbu obsahujúci femur, tibiú a patelu, pozri Obr. 18.



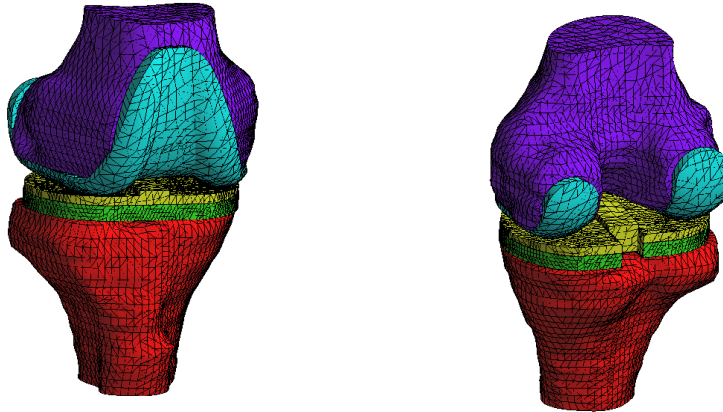
Obr. 18. 3D model kolenného kĺbu

Na tomto obrázku vpravo je evidentný kontakt femuru a tibie, t. j. došlo k poškodeniu kĺbovej chrupavky (žltý obdĺžnik). Tento model môže použiť výpočtár na napät'ovú analýzu ako aj chirurg na stanovenie napr. veľkosti protézy, vzhľadom na poškodenie samotného kĺbu alebo návrhu úpravy tibie a femuru pre samotnú protézu , pozri Obr. 19.



Obr. 19. Upravený povrch femuru a tibie

Potom boli primodelované femurálny a tibiálny implantát a polyetylénová vložka. Konečný model takto upraveného kolenného kĺbu je na Obr. 20. Na samotnú analýzu sme použili metódu konečných prvkov využívajúc program ANSYS[3.24].



Obr. 3.20. Model kolenného kĺbu s protézou a sieťou MKP

Mechanické vlastnosti kostí sú uvedené v Tabuľke 3.1, pričom pre kosti sa použilo jednoduché zmiešavacie pravidlo

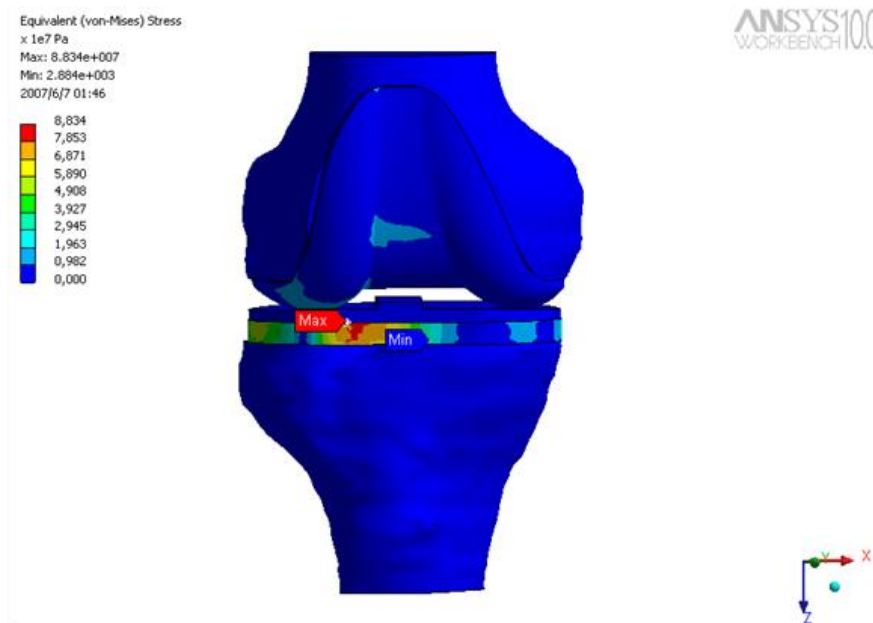
$$E = \alpha * E_k + \beta * E_s = 3,5 \% * 17000 \text{ MPa} + 96,5 \% * 500 \text{ MPa} = 1077,5 \text{ MPa}$$

kde α je pomerný objem kompaktnnej kosti, β je pomerný objem spongióznejs kosti, E_k je Youngov modul pružnosti kompaktnnej kosti, E_s je Youngov modul pružnosti spongióznejs kosti.

Tabuľka 1. Materiálové vlastnosti kosti a protézy kolenného kĺbu

	Modul pružnosti v ťahu E [MPa]	Poissonovo číslo μ [-]
Kostné tkanivo – spongiózna kosť	500	0,3
Kostné tkanivo – kompaktná kosť	17 000	0,3
Zmiešaný modul pružnosti kosti	1077,5	0,3
Femurálny implantát – Ti-6Al-2,5Fe	115 000	0,36
Tibiálny implantát – Ti-6Al-2,5Fe	115 000	0,36
Polyetylénová vložka – UHMWPE	1378	0,42

Samotný model takto upraveného kolenného kĺbu bol zaťažený silou tiaže ľudskeho jedinca s hmotnosťou 80 kg. Táto sila bola zvýšená na 2,5-násobok tiaže, čo približne zodpovedá dynamickým účinkom bežnej chôdze po rovine. Úloha bola riešená ako kontaktná v prostredí ANSYS. Výsledky sú uvedené na Obr. 3.20.



Obr. 3.20. Rozloženie equivalentného Misesovho napätia

Úloha:

1. Z CT snímok vytvorte v prostredí voľne dostupného CAD programu, napr. Rhinoceros priestorový model kolena.
2. Vykonajte potrebné úpravy pre aplikáciu keramickej náhrady femurálnej chrupavky.
3. Vykonajte napäťovú analýzu rekonštruovaného kolenného kĺbu.