

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Diplomová práce

Biomechanika ramenního kloubu - obtáčení svalů

Biomechanics of shoulder joint - muscle wrapping

Bc. Jan Votava

Praha 2015

Anotační list

- Jméno autora: Bc. Jan VOTAVA
- Název DP: Biomechanika ramenního kloubu – obtáčení svalů
- Anglický název: Biomechanics of shoulder joint – muscle wrapping
- Rok: 2015
- Obor studia: Biomechanika a lékařské přístroje
- Ústav/odbor: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky / Laboratoř biomechaniky člověka
- Vedoucí: doc. RNDr. Matej Daniel, Ph.D.
- Bibliografické údaje:
- | | |
|---------------|----|
| počet stran | 55 |
| počet obrázků | 56 |
| počet tabulek | 5 |
| počet příloh | 1 |
- Klíčová slova: obtáčení svalů, dráha svalu, rameno svalu, délka svalu
- Keywords: muscle wrapping, muscle path, muscular arm, muscle length
- Anotace: Tato práce se zabývá vytvořením efektivní metody pro výpočet dráhy svalů na anatomicky reálné 3D geometrii kostí konkrétního pacienta. Zjistili jsme, že naše metoda vykazuje méně artefaktů v určení dráhy svalu než doposud používané metody.
- Abstract: This dissertation deals with creating an efficient method for calculating the muscles path based on an anatomically 3D geometry bones of individual patients. We found out that our method exhibits fewer artifacts in determining the muscle path than other methods used previously.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedených zdrojů v bibliografii.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Mateji Danielovi, Ph.D., že mě uvedl do problematiky, poskytl vhodné materiály pro vypracování práce a pomohl při řešení experimentální části.

Obsah:

1 Úvod	1
2 Stav problematiky	2
2.1 Lineární model	2
2.2 Model s pevnými body obtáčení.....	3
2.3 Model s definovanými plochami obtáčení.....	4
2.4 3D model založený na reálné geometrii kostí.....	4
3 Anatomie ramenního kloubu	6
3.1 Pletenec horní končetiny	6
3.2 Ramenní kloub	7
3.3 Kosterní soustava	10
3.4 Svalová soustava	13
4 Cíle práce.....	16
5 Metody	17
5.1 Vývoj nového algoritmu	17
5.1.1 Vytvoření 3D modelu geometrie kostí ramenního kloubu	18
5.1.2 Vytvoření 3D povrchové sítě	22
5.1.3 Určení dráhy svalu na hrubé povrchové síti pomocí algoritmu MMP	25
5.1.4 Úprava dráhy svalu na skutečnou geometrii kostí	27
5.2 Popis stávajících algoritmů.....	32
5.2.1 Určení dráhy svalu pomocí lineárního modelu	32
5.2.2 Určení dráhy svalu pomocí obtáčení sférické plochy.....	33
5.2.3 Určení dráhy svalu pomocí Dijkstrova algoritmu	34
5.3 Určení středu rotace kloubu	36
5.4 Výpočet ramene síly svalového vlákna	37
5.5 Výpočet délky dráhy svalového vlákna	38
6 Výsledky.....	39
6.1 Verifikace metody	39
6.2 Výsledné dráhy segmentů svalu	41
6.3 Ramena sil segmentů svalu	46
6.4 Délky segmentů svalu	48
7 Diskuse	50
8 Závěr	52
9 Bibliografie	53

1 Úvod

Rameno je kulový kloub, který je nejpohyblivější v těle, jeho stabilitu zajišťují výhradně svaly. Proto je důležité určit, jak jednotlivé svaly ovlivňují pohyb a zatížení kloubu. Přímé měření svalových a kloubních sil in-vivo je technicky komplikované a z etického hlediska nepřípustné. Proto se pro určení zatížení svalů a kloubů využívají metody matematického modelování kloubů jako mechanických systémů.

Modelování svalově-kosterního systému může poskytnout pohled na to, jak nervový systém a svaly vzájemně produkují koordinovaný pohyb částí těla. Matematické modely lidského pohybu jsou většinou dynamické modely soustav těles, kde se segmenty těla pohybují vůči sobě jako důsledek působení vnějších sil, aktivních sil, které jsou vytvářeny působením svalů a pasivních odporů způsobené vazy nebo interakcí vnitřních segmentů (Obr. 1).

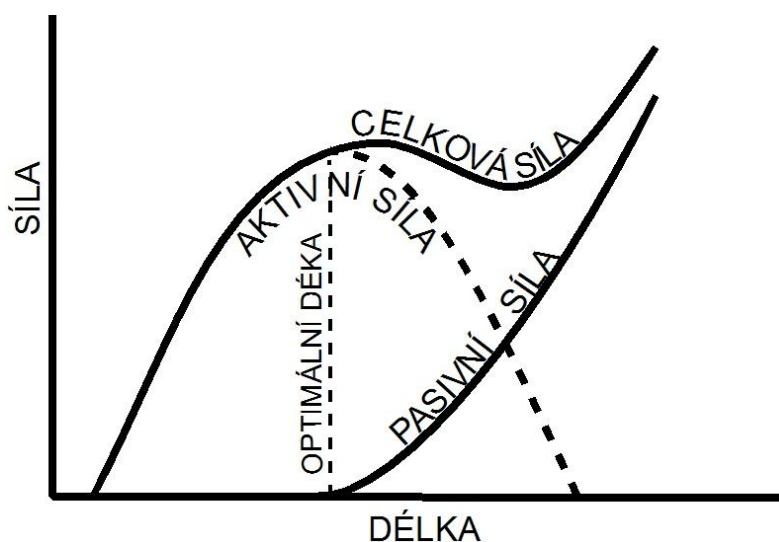
Důležitým úkolem svalově-kosterních modelů je určit přesnou dráhu svalů, neboť její určení velice ovlivňuje ramena momentu svalu, délku svalu včetně šlachy, směr působení síly svalu, to znamená, že má vliv na schopnost svalu generovat moment v kloubu. Obtáčení svalu kolem kloubu může být prezentováno pomocí matematických modelů.

V předkládané práci se proto zabýváme problematikou vytvoření metody pro přesnější určení dráhy svalu na reálné 3D geometrii kostí.

2 Stav problematiky

V dosavadních modelech se pro obtáčení svalů používají následující předpoklady:

- Sval jako elastické vlákno: lineární modely [2].
- Interakce svalů s kostí v definovaných bodech: modely s pevnými body obtáčení [5].
- Interakce svalů s geometricky jednoduchou plochou: modely s definovanými plochami obtáčení [6].
- 3D modely založené na reálné geometrii kostí [11].



Obr. 1 – Závislost pasivní a aktivní síly svalů na jeho prodloužení [1]

2.1 Lineární model

V lineárním modelu [2] je dráha svalů reprezentována přímkou spojující odstup a úpon svalů (Obr. 2). Jedná se o nejstarší model pro určování dráhy svalů.

Známe-li polohový vektor odstupu svalů v globálním souřadnicovém systému $[x, y, z]$ a polohový vektor úponu svalů v globálním souřadnicovém systému $[x, y, z]$, můžeme směr síly svalů určit jako:

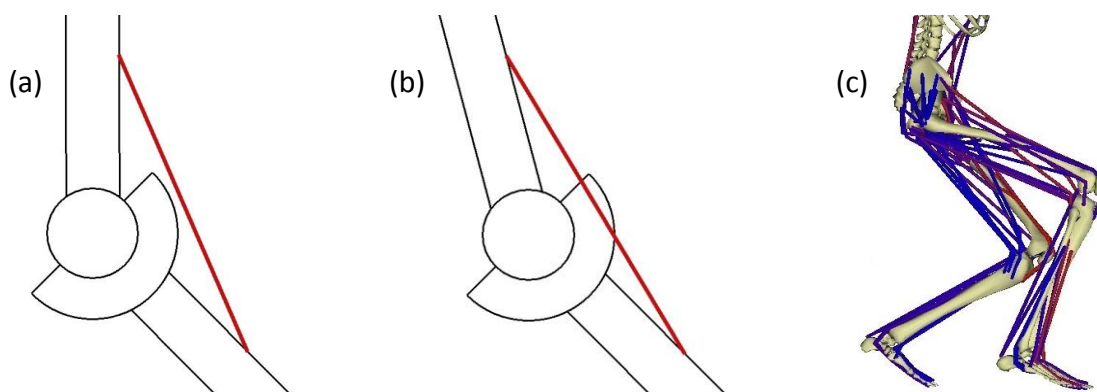
$$\vec{e} = \frac{\vec{u} - \vec{o}}{|\vec{u} - \vec{o}|} \quad (1)$$

\vec{e} ... jednotkový vektor ve směru svalového vlákna

\vec{u} ... vektor úponu svalů v globálním souřadnicovém systému

\vec{o} ... vektor odstupu svalů v globálním souřadnicovém systému

Výhoda tohoto modelu je jeho jednoduchost. Na jeho určení potřebuji znát pouze odstup a úpon svalu v lokálním souřadnicovém systému kostí a daná poloha úponu a odstupu se v průběhu pohybu nemění. Pro určení změny stačí znát transformaci z lokálního do globálního souřadnicového systému, která je ovlivněna rotací v kloubech. Jednotlivé rotace můžeme určit pomocí metod pohybové analýzy. Obecně se jedná o lineární transformace, které zle snadno numericky implementovat. Nevýhody spočívají v tom, že tento způsob nemusí být vhodný pro celý rozsah pohybu, kde může dojít ke kolizi svalu s kostí [Obr. 2b].

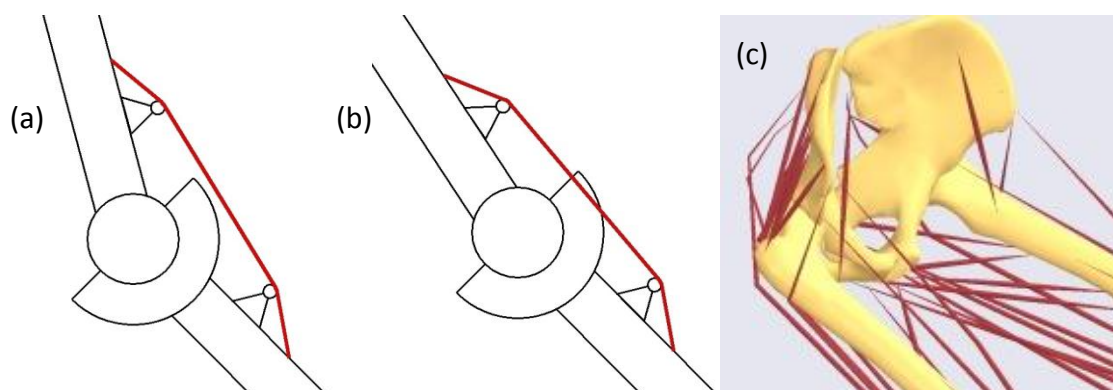


Obr. 2 – Dráha svalu při použití lineárního modelu výpočtu, (a) stav kdy model vyhovuje, (b) stav kdy model nevyhovuje, (c) dráha svalu určená na geometrii kostí [12]

2.2 Model s pevnými body obtáčení

Nevýhody předchozího modelu odstraňuje zavedení dodatečných bodů (bodů obtáčení), které slouží pro zamezení tomu, aby trajektorie svalu procházela kostí [3, 4, 5].

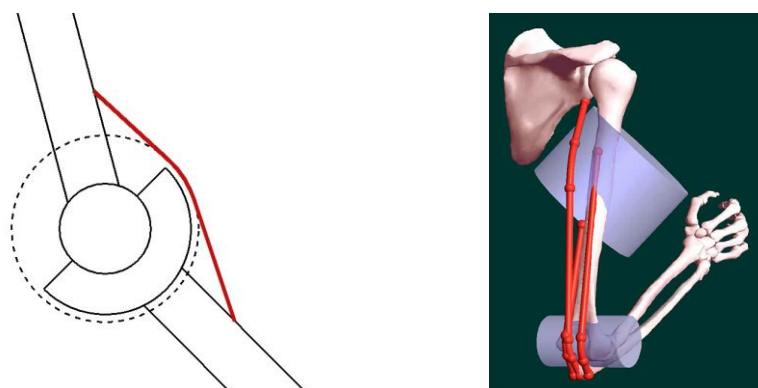
V tomto modelu je nutno definovat pevné body na kostech, přes které se pak sval obtáčí (Obr. 3). Tento model nám také prodlužuje dráhu svalu tím, že běží přes definované pevné body a ne přímo po geometrii kosti. Dochází-li k obtáčení svalu kolem konvexní plochy je nutno definovat velké množství bodů obtáčení. V algoritmu modelu může být také zahrnuta podmínka konvexní dráhy svalu, tj. pokud úhel dráhy svalu mezi 3 body je menší než 180° , prostřední bod se vynechá. Modely s pevnými body obtáčení se většinou používají u dolních končetin a páteře. Pro paže a ramena tento model není zcela vyhovující, proto se u nich využívá dalších uvedených modelů.



Obr. 3 – Dráha svalu při použití modelu s pevnými body obtáčení, (a) stav kdy model vyhovuje, (b) stav kdy model nevyhovuje, (c) dráha svalu určená na geometrii kostí [5]

2.3 Model s definovanými plochami obtáčení

Model s definovanými plochami obtáčení [6, 7, 8, 9] je důležitý krok vpřed v modelování svalových drah. Umožňuje modelování dráhy svalu přes základní geometrické objekty, jako jsou koule, válce a elipsoidy, pomocí kterých se aproximuje reálná geometrie kostí (Obr. 4). Dráha svalu je tvořena několika segmenty přímek a křivek, které jsou spojeny pomocí bodů. Tento model umožňuje aproximovat střední dráhy svalů zvětšením velikosti základních geometrických objektů. I když tato možnost obtáčení svalů o mnoho zpřesnila výsledky, stále některé části skeletu nelze s dostatečnou přesností nahradit základním geometrickým tvarem. Proto se přechází na modely, které počítají s reálnou 3D geometrií kostí.

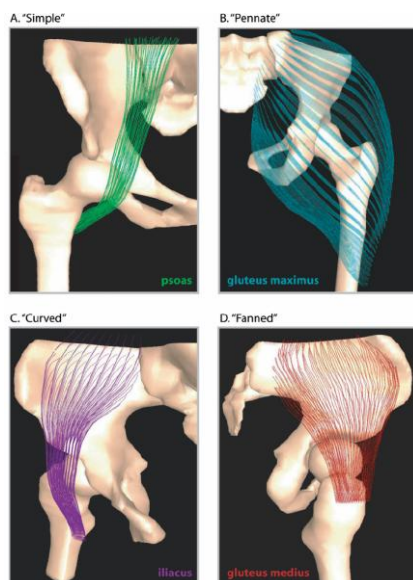


Obr. 4 – Dráha svalu při použití modelu s definovanými plochami obtáčení, (a) schematické znázornění dráhy svalu, (b) dráha svalu určená na geometrii kostí [7]

2.4 3D model založený na reálné geometrii kostí

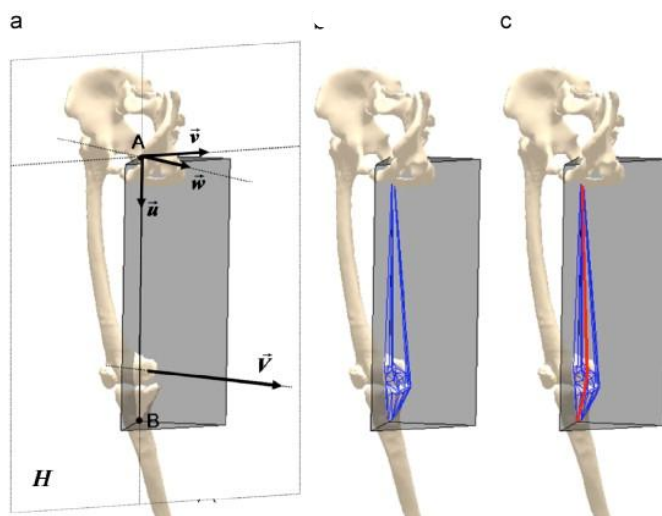
Tyto modely používají data z počítačové tomografie, případně magnetické rezonance určitého pacienta. Jedna z možností jak určit dráhu svalu u těchto modelů je

použití softwaru, který pracuje na základě metody konečných prvků (Obr. 5) [10, 11]. Při využití MKP modelu je sval modelován jako jeden objekt a kost jako objekt druhý, a následně se pomocí MKP softwaru řeší kontaktní problém mezi nimi. Nevýhodou MKP modelů jsou značné výpočetní časy.



Obr. 5 – Obtáčení svalů MKP softwarem [11]

Další možnost jak určit dráhu svalu u 3D modelu kostí, je použití algoritmu konvexní obálky, jako to provedl Desailly a kol., 2010. Kde si nejdříve na kostní geometrii vytvořili několik rovin, kterými by mohla být dráha svalu vedena. Dále v každé z nich vytvořili konvexní obálku kostí a nakonec vybrali tu obálku v dané rovině, která mezi odstupem a úponem svalu tvořila nejkratší dráhu (Obr. 6). Tento postup ovšem opět funguje spíše na dolní končetině, kde není problém konvexní obálku vytvořit, bez toho aniž by zakrývala jiné důležité útvary na kostech.



Obr. 6 – Postup vytvoření dráhy svalu podle Desailly a kol., 2010

3 Anatomie ramenního kloubu

Cílem této části práce je vysvětlit základní anatomické pojmy týkající se ramenního kloubu, které se budou dále používat při definici obtáčení svalů kolem kostních struktur. Anatomie ramenního kloubu byla zpracována dle Čihák, 2001.

3.1 Pletenec horní končetiny

Cingulum membri superiorit - pletenec horní končetiny (Obr. 7) je k osově kostře připojen klouby:

- **kloub sternoklavikulární** - je hlavním spojením pletence s osovou kostrou, připojuje klíční kost k manubrium sterni. Je to složený kloub, v němž se stýkají dvě kosti, mezi které je vložen discus articularis z vazivové chrupavky.
- **kloub akromioklavikulární** - spojuje zevní konec klavikuly s akromionem.

Lopatka sama je fixována hlavně svaly, které se na ni z okolí upínají. Mimo to je klíční kost spojena s lopatkou vazy a je svalem a vazem pohyblivě přidržována k 1. žeburu. K hrudníku je pletenec horní končetiny přiložen tak, že spolu se stěnou hrudníku uzavírá trojboký prostor (podobný jehlanu), nazývaný fossa axillaris - jáma podpažní. Jejím vrcholem je ramenní kloub, přední a zadní stranu představuje klíční kost a lopatka spolu se svaly na ně připojenými a mediální (vyklenutou) stranou je boční stěna hrudníku.

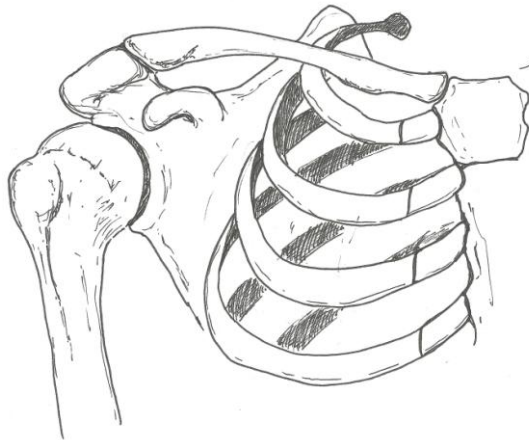
Pohyby pletence horní končetiny

Lopatka v klidu a při volně visící končetině stojí při hrudníku pootočená z frontální roviny asi o 30° dopředu, takže jamka ramenního kloubu hledí zevně a dopředu. Ve svém svalovém závěsu se lopatka může pohybovat. Spolu s jejími pohyby probíhají též pohyby akromioklavikulárního a sternoklavikulárního kloubu. Pohyby lopatky závisí též na pohybech kloubu ramenního.

K vlastním pohybům lopatky patří:

- **retrakce lopatky** - pohyb mediálně směrem k páteři
- **protrakce lopatky** - opačný pohyb, lateroventrálně, tj. ramenním kloubem zevně a dopředu

- **elevace a deprese lopatky** - pohyb kraniálně a kaudálně
- **rotace lopatky** - dolním úhlem laterálně a zpět



Obr. 7 – Pletenec horní končetiny

3.2 Ramenní kloub

Articulatio humeri - ramenní kloub (obr. 8), je svým geometrickým typem kloub kulovitý volný. Kloubní plochy:

- **caput humeri** - tvoří hlavici kloubu
- **cavitas glenoidalis (fossa articularis) scapulae** - tvoří jamku

Labrum glenoidale (labrum articulare) - chrupavčitý kloubní lem, rozšiřuje rozsah jamky. Ta je nicméně mnohem menší než hlavice (rozsah jamky odpovídá třetině až čtvrtině plochy hlavice).

Kloubní pouzdro začíná po obvodu jamky a upíná se na collum anatomicum humeri, na vnitřní straně kloubu o něco dále distálně. Na ventrální straně se z pouzdra vychlipuje synoviální membrána do sulcus intertubercularis, podél šlachy dlouhé hlavy dvojhlavého svalu pažního, a tvoří její synoviální obal. Zesílení pouzdra vytvářejí jednak šlachy kolemjdoucích svalů, které k pouzdru přiléhají, jednak kloubní vazy.

Šlachy zesilující pouzdro patří těmto svalům:

vzadu - m. supraspinatus, m. infraspinatus a m. teres minor

vpředu - m. subscapularis

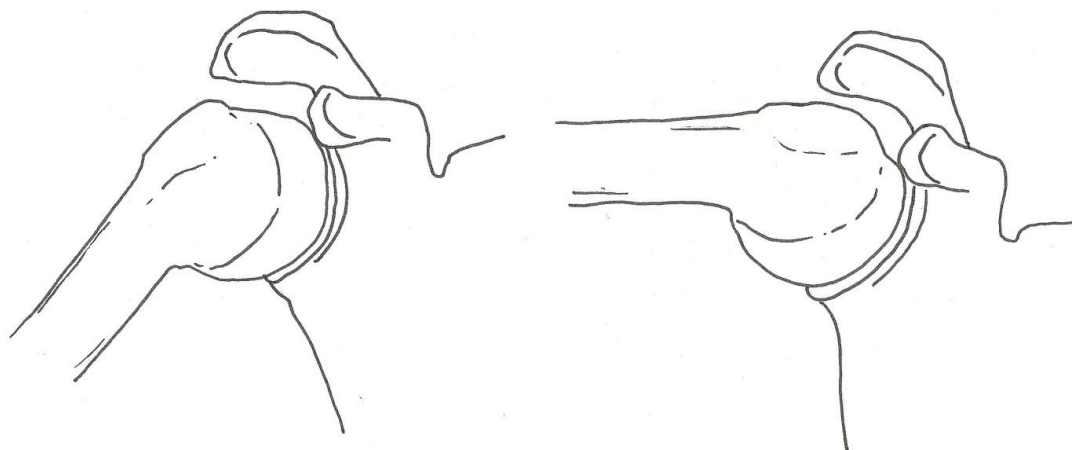
Soubor svalů a šlach zesilujících pouzdro se klinicky označuje jako rotátorová manžeta.

Vazy ramenního kloubu:

ligamentum coracohumerale - na přední straně

ligamenta glenohumeralia - od okrajů jamky

Uvnitř kloubu probíhá od tuberculum supraglenoidale scapulae do sulcus intertubercularis začáteční hlava dlouhé hlavy m. biceps brachii. Ligamentum coracoacromiale je horizontálně rozepjato nad kloubem.



Obr. 8 – Ramenní kloub

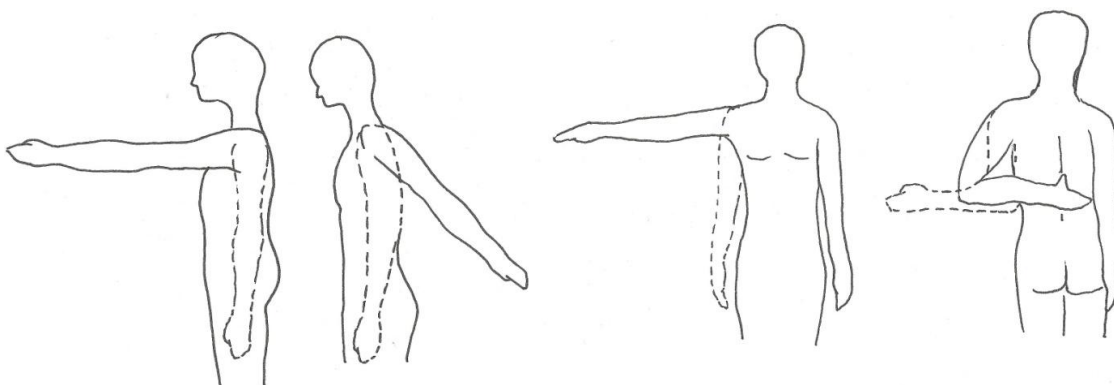
Pohyby ramenního kloubu

Ramenní kloub je ze všech kloubů nejpohyblivější. Ze základní polohy jsou možné tyto pohyby (Obr. 9):

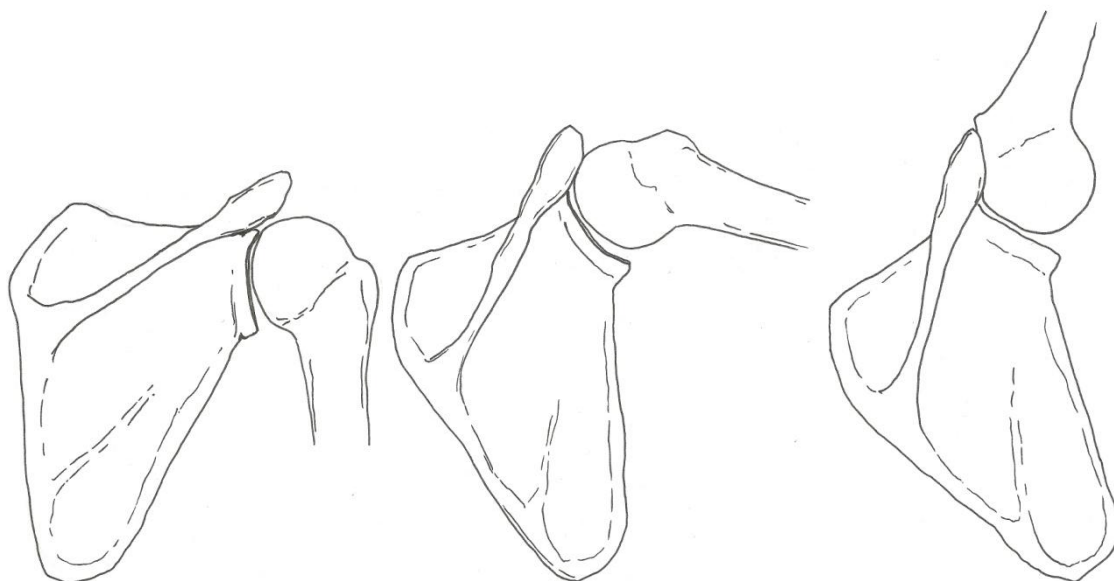
- **ventrální flexe** - předpažení, do 80°
- **dorsální flexe (extense)** - zapažení (dorsální flexe je menšího rozsahu)
- **abdukce** – upažení, abdukce je možná jen do horizontály, kdy humerus narazí na lig. coracoacromiale, takže další pohyb do vzpažení je možný jen za současného vytočení lopatky dolním úhlem zevně (Obr. 10)
- **addukce** – připažení, za současné flexe nebo extense je možná i hyperaddukce (dále než do základní polohy)
- **rotace** - probíhá kolem podélné osy spojující caput humeri a capitulum humeri a má rozsah asi 90°

Všechny další pohyby v kloubu jsou kombinace uvedených základních pohybů a směrů pohybů. Lopatka je v součinnosti se všemi pohyby ventrální a dorsální flexe, abdukce a addukce ramenního kloubu. Na počátku pohybu se lopatka účastní v malé

míře. Její účast na pohybu stoupá, když se poloha kloubu blíží krajní poloze (a po jejím dosažení) (Obr. 10). Pohyby lopatky vykonávají svaly na lopatku upnuté. Střední polohu zaujímá ramenní kloub v částečné abdukci a v mírné ventrální flexi. Z praktického hlediska je důležité, že kloubní pouzdro je zeslabeno kaudálně, směrem do podpažní jámy. Na své kaudální ploše je složeno v řasy, které zajišťují volnost abdukce. Je též zeslabeno ventrálně, v místě bursa subtendinea musculi subscapularis. Těmito směry se také nejčastěji vykloubí hlavice humeru.



Obr. 9 – Pohyby v ramenním kloubu, zleva: ventrální flexe, dorzální flexe, abdukce, rotace



Obr. 10 – Abdukce v ramenním kloubu s pohybem lopatky

3.3 Kosterní soustava

3.3.1 Scapula – lopatka

Lopatka je plochá kost tvaru trojúhelníku (obr. 11 a 12). Má tři okraje: margo superior, medialis, lateralis. Okraje se stýkají v úhlech: angulus superior, inferior, lateralis. Facies posterior - hřbetní (zadní) plocha je lehce konvexní. Facies costalis (anterior) - přední, k žebřům přivrácená plocha je mírně konkávní. Lopatka je umístěna ve svalstvu zad, ve výši 2. - 7. žebra, a skloubena s kostí klíční.

Facies posterior

Facies posterior (Obr. 11) je rozdělena šikmo napříč vyvýšeným hřebenem spina scapulae, začíná na mediálním okraji trojhranným políčkem a táhne se nad laterální úhel. Přitom se zvyšuje, odděluje se od zadní plochy a vyčnívá nad zevním úhlem laterálně a dopředu jako plochý výběžek acromion - nadpažek, na kterém je vpředu mediálně oválná ploška pro přikloubení klíční kosti - facies articularis acromii.

Hřeben rozděluje dorsální plochu lopatky ve dvě jámy. Fossa supraspinata - nadhřebenová jáma a fossa infraspinata - podhřebenová jáma. V obou jámách začínají svaly.

Asi ve třetině vzdálenosti od vnitřního okraje je hřeben lopatky trojúhelníkovitě rozšířen směrem dolů - tuberculum deltoideum. Končí u něho zadní okraj deltového svalu a upíná se tam vzestupná část trapezového svalu.

Processus coracoideus - výběžek zobcovitý (hákovitý), vyčnívá z horního okraje lopatky dopředu (pod zevní část klíční kosti). Je místem připojení svalů a vazů a je hmatný pod zevní třetinou klíční kosti. Incisura scapulae je zářez na horním okraji, těsně vedle odstupu proc. coracoideus.

Mediální okraj lopatky je individuálně různě tvarovaný. Upínají se na něj svaly. Horní úhel lopatky zpravidla mírně vyčnívá. Laterální okraj lopatky je ztlustělý, začínají tam svaly.

Facies costalis

Facies costalis (anterior) (Obr. 12) je mírně vyhloubená. Po povrchu tohoto vyhloubení, zvaného fossa subscapularis, se od mediálního okraje táhnou tři až čtyři lineae musculares - mírně zvýšené drsné čáry pro připojení svalu.

Cavitas glenoidalis

Na laterálním úhlu lopatky je cavitas glenoidalis (fossa articularis) – kloubní jamka ramenního kloubu. Je mělká, vejčitá, kraniálně užší než kaudálně. Vůči rovině celé lopatky je jamka mírně odkloněna dorsálně. Tato retroverse jamky činí asi 9°. Nad jamkou i pod ní jsou drsné vyvýšeniny pro začátky svalů: tuberculum supraglenoidale (supraarticulare) nad kraniálním okrajem kloubní jamky (místo začátku dlouhé hlavy m. biceps brachii) a tuberculum infraglenoidale (infraarticulare) pod kaudálním okrajem jamky (místo začátku dlouhé hlavy m. triceps brachii). Collum scapulae je nepatrně zúžené místo mezi kloubní jamkou a ostatní lopatkou.



Obr. 11 – Scapula, facies posterior



Obr. 12 – Scapula, facies costalis

3.3.2 Clavicula - kost klíční

Kost klíční, je štíhlá kost, dlouhá 12-16 cm. Transversálně spojuje hrudní kost s akromiem lopatky. Extremitas sternalis - vnitřní, silnější konec – je kloubně spojen s manubrium sterni. Extremitas acromialis - zevní, plochý konec – je sklouben s akromiem. Pro obě skloubení má klavikula kloubní plochy: facies articularis sternalis a facies articularis acromialis.

Clavicula je esovitě prohnutá, vnitřní dvě třetiny se klenou dopředu, laterální třetina dozadu. Celá kost se od acromia ke sternu mírně svažuje. Horní strana kosti je hladká. Spodní strana nese typické útvary: tuberositas coracoidea, v laterální části, kde se upíná lig. coracoclaviculare; impressio ligamenti costoclavicularis, při extremitas sternalis, drsné místo s vklesninami pro úpon costoclavikulárního vazy; sulkus muscui subclavii, mělká podélná rýha uprostřed délky kosti, kde začíná m. subclavius.

Klíční kost přenáší na sternum tlaky a nárazy na horní končetinu. Často se proto při nárazech na horní končetinu láme vlivem nepřímého násilí. Praská obvykle na hranici zevní a střední třetiny, tj. na přechodu dvojího zakřivení.

3.3.3 Humerus - kost pažní

Kost pažní (obr. 13), je typická dlouhá kost, na které se rozlišuje:

- **caput humeri** - hlavice, na kraniálním konci kosti
- **corpus humeri** - tělo kosti pažní
- **condylus humeri** - distální kloubní konec

Caput humeri

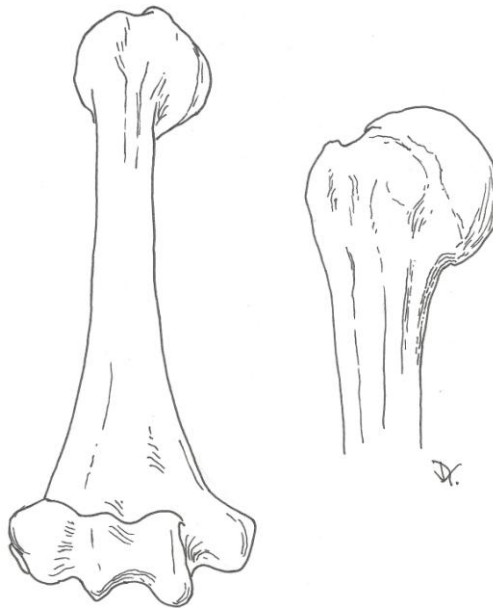
Caput humeri nese kulovitou styčnou plochu, která je hlavicí ramenního kloubu. Osa hlavice je nakloněna tak, že s osou těla kosti svírá úhel 130°. Hlavice odpovídá jedné třetině povrchu koule. Při obvodu hlavice se upíná kloubní pouzdro. Collum anatomicum - krček (anatomický), je místo úponu kloubního pouzdra po obvodu hlavice. Pod hlavicí jsou na přední straně kosti dva hrboly: tuberculum majus, větší hrbol – laterálně a tuberculum minus, menší hrbol – ventrálně. Oba hrboly jsou místa svalových úponů.

Hrboly distálně pokračují ve vyvýšené lišty: crista tuberculi majoris a crista tuberculi minoris. Na obě hrany se také upínají svaly. Sulcus intertubercularis je prohloubení mezi tuberculum majus a tuberculum minus. Je to místo, kudy probíhá šlacha dlouhé hlavy m. biceps brachii. Collum chirurgicum je zeštíhlení humeru pod oběma hrboly, má svůj název proto, že je místem častých zlomenin.

Corpus humeri

Corpus humeri je zaobleně trojhranné. Jeho tři plochy jsou: facies anteromedialis - přední vnitřní plocha, facies anterolateralis - přední zevní plocha, facies posteriori - zadní plocha.

Na corpus humeri je laterálně a mírně vpředu drsnatina tuberositas deltoidea - pro úpon deltového svalu. Po zadní straně těla humeru šikmo shora z vnitřní strany distálně a zevně se táhne sulcus nervi radialis, kudy prochází n. radialis.



Obr. 13 – Humerus

3.4 Svalová soustava

3.4.1 Musculus deltoideus

Musculus deltoideus, sval deltový (obr. 14), má jméno podle tvaru, jímž připomíná řecké velké písmeno delta. Má tvar části pláště kužele se základnou na spina scapulae, acromiu a na clavicle a s dolů obráceným vrcholem kužele, upnutým na humerus zevně, nad polovinou délky humeru. Od vnějšího okraje m. pectoralis major je deltový sval oddělen štěrbinou - trigonum deltoideopectorale.

Začátek svalu: spina scapulae (zevní 2/3)

acromion

clavicula (zevní konec)

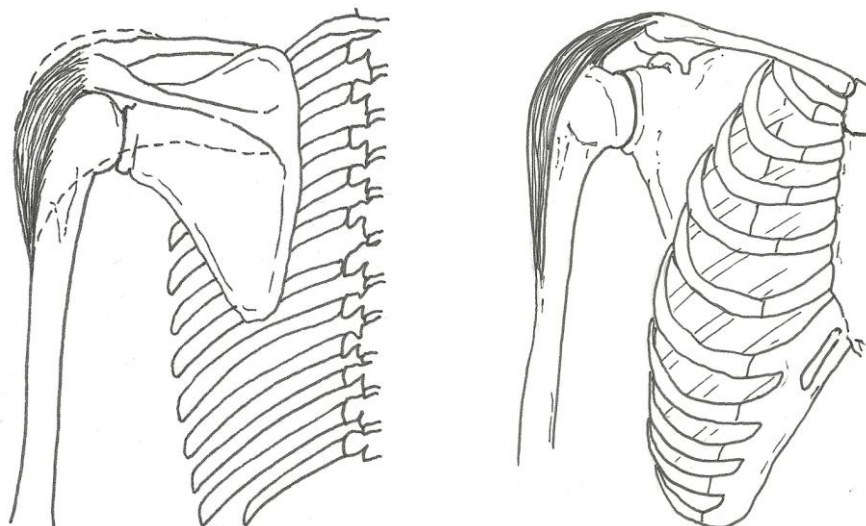
Úpou svalu: tuberositas deltoidea humeri

Funkce: dorsální flexe paže (spinální část)

ventrální flexe paže (claviculární část)

abdukce paže (akromiální část)

celý sval klidovým napětím udržuje hlavicí ramenního kloubu v jamce [15]



Obr. 14 – M. deltoideus, pohled z dorsální a anteriorní strany

Ostatní svaly, které se podílejí na pohybu v ramenním kloubu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Název svalu	Začátek svalu	Úpon svalu	Funkce svalu
m. supraspinatus	fossa supraspinata	tuberculum majus humeri (horní faseta)	abdukce paže
m. infraspinatus	fossa infraspinata	tuberculum majus humeri (střední faseta)	zevní rotace paže abdukce paže
m. teres minor	scapula (střed laterálního okraje)	tuberculum majus humeri (dolní faseta)	zevní rotace paže dorsální flexe paže abdukce paže
m. teres major	angulus inferior scapulae (dorsální plocha)	crista tuberculi minoris humeri	abdukce paže vnitřní rotace paže
m. subscapularis	scapula (facies costalis)	tuberculum minus humeri	vnitřní rotace paže dorsální flexe paže abdukce paže
m. biceps brachii	processus coracoideus scapulae (caput breve) tuberculum supraglenoidale (caput longum)	tuberositas radii	ventrální flexe paže (caput breve) abdukce paže (caput longum) abdukce paže (caput breve)
m. coracobrachialis	processus coracoideus scapulae (caput breve)	humerus v 1/2	ventrální flexe paže abdukce paže
m. triceps brachii	tuberculum infraglenoidale (caput longum) zadní plocha humeru (caput laterale) zadní plocha humeru (caput mediale)	olecranon	vnitřní rotace paže dorsální flexe paže (caput longum) abdukce paže (caput longum)
m. pectoralis major	sternum clavicula (mediální část) costa 1 - 6	crista tuberculi majoris humeri	abdukce paže ventrální flexe paže abdukce paže vnitřní rotace paže
m. latissimus dorsi	processus spinosus Th7 - L5 crista iliaca os sacrum costa 10 - 12	crista tuberculi minoris humeri	dorsální flexe paže abdukce paže vnitřní rotace paže

Tab. 1 – Svaly ramenního kloubu [15]

4 Cíle práce

Cílem práce je vyvinout automatizovanou, rychlou a přesnou metodu pro výpočet nejkratší cesty svalů přes anatomicky reálné 3D modely geometrie kostí s využitím dat z počítačové tomografie. Algoritmus by měl minimalizovat uživatelské vstupy a měl by být snadno upraven pro konkrétního pacienta.

Hlavní body pro vypracování jsou:

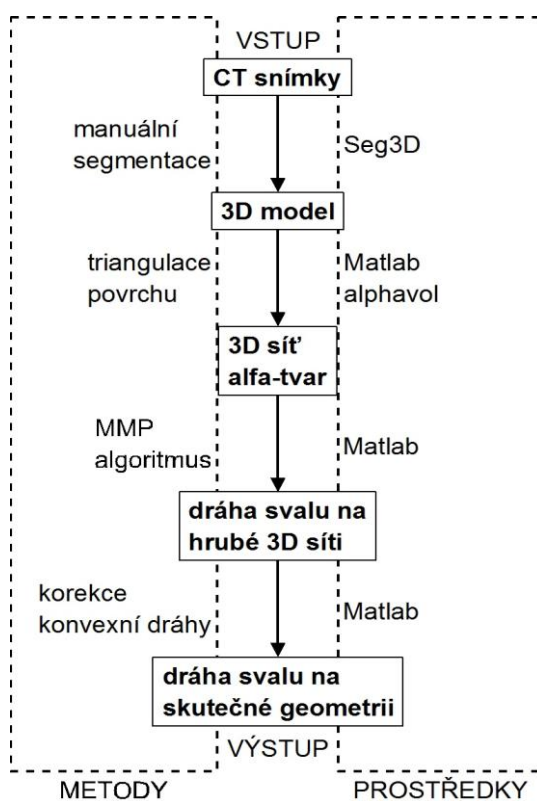
1. Vytvoření 3D modelu geometrie kostí ramenního kloubu
2. Vytvoření metody pro výpočet trajektorie svalů s obtáčením kostí
3. Implementace metody pro ramenní kloub
4. Porovnání nové metody s dosavadními metodami obtáčení svalů

5 Metody

5.1 Vývoj nového algoritmu

Jako vstup do algoritmu jsme použili snímky z počítačové tomografie. Použili jsme je proto, že mají vyšší rozlišení než snímky z magnetické rezonance a jsou běžně dostupné v klinické praxi. Pro následné vytvoření 3D modelu kostí, jsme zvolili program Seg3D. Seg3D distribuovaný zdarma a vyvinutý v NIH Center for Integrative Biomedical Computing at the University of Utah Scientific Computing and Imaging (SCI) Institute. Ačkoliv vytvoření 3D modelu pomocí programu Seg3D je pracné a náročné na čas, my jsme si ho zvolili z toho důvodu, že umožňuje nejjednodušší převod do programu Matlab (MATLAB 8.0, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.), který jsme použili pro implementaci dále uváděných metod.

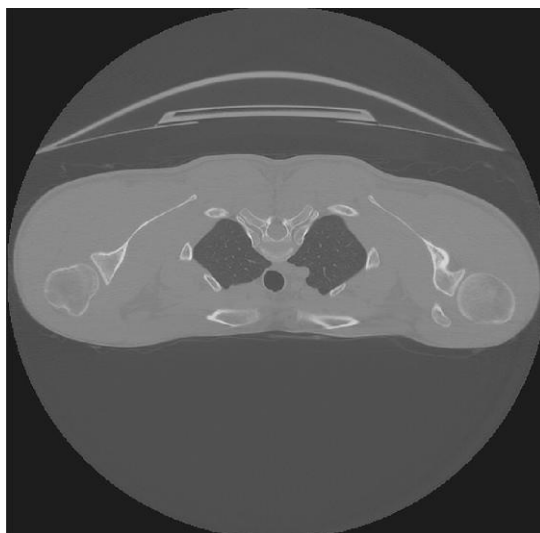
Nový algoritmus je založen na geodetické metodě, což je nejpřesnější metoda pro určení dráhy na mnohostěnném povrchu [13]. Jeden z možných algoritmů je algoritmus MMP, který určí nejkratší dráhu, jdoucí po mnohostěnném povrchu, mezi počátečním a koncovým bodem. Celkové schéma používaných metod je v následujícím obrázku.



Obr. 15 – Schéma používaných metod pro určení dráhy svalů nově vytvořeným algoritmem

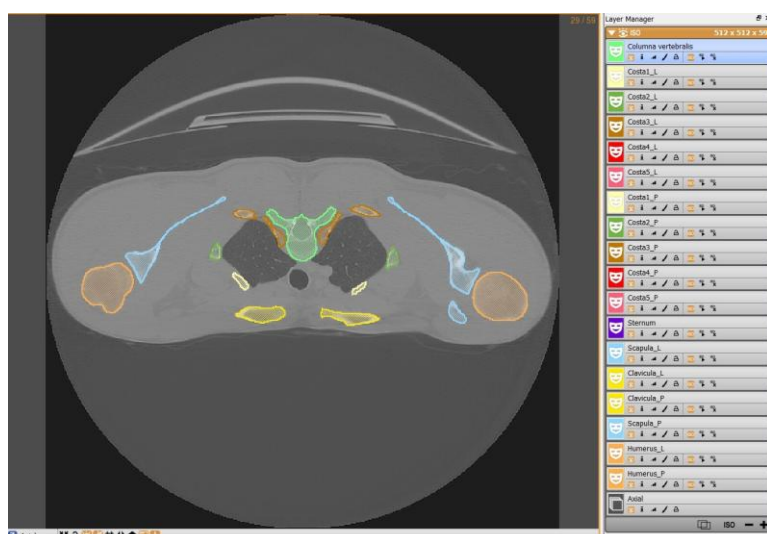
5.1.1 Vytvoření 3D modelu geometrie kostí ramenního kloubu

Při vytváření 3D modelu kostí jsme vycházeli z CT snímků (obr. 16) určitého pacienta, jehož údaje byly anonymizovány. CT data pacienta nám byly poskytnuty z archivu oddělení ortopedie první lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Praze a Fakultní nemocnice Motol. Pacient byl naskenován ve třech rovinách, frontální, sagitální a transverzální.



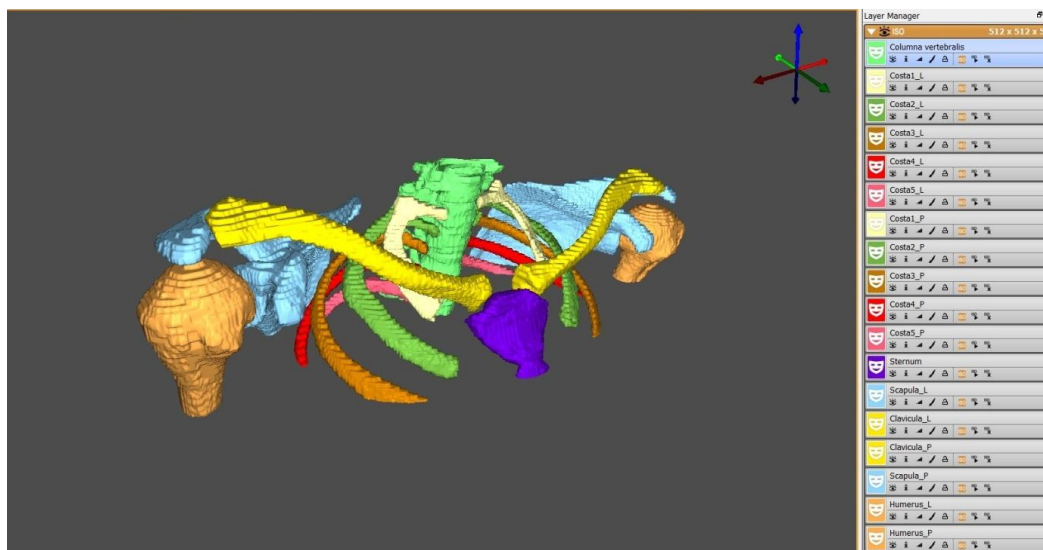
Obr. 16 – Snímek z počítačové tomografie

CT snímky jsme zpracovali pomocí programu Seg3D. Ve vybrané rovině, v našem případě rovině transverzální, musely být jednotlivé snímky upraveny, což jsme prováděli ručně, abychom měli jistotu dostatečné přesnosti. Úprava snímků spočívala v tom, že na každém snímku musely být jednotlivé kosti manuálně segmentovány a každá kost se ukládala do jiné vrstvy (obr. 17).



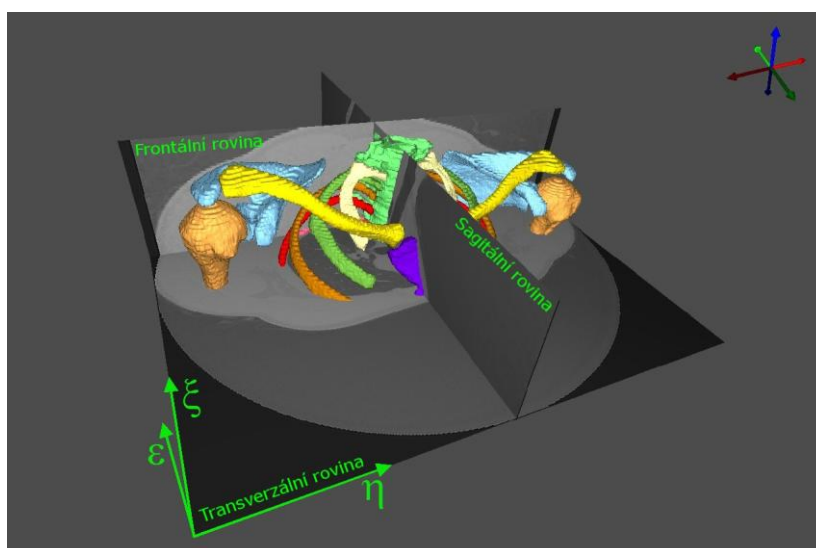
Obr. 17 – Separace kostí v CT snímků a uložení do vrstev v programu Seg3D

Po takovéto úpravě všech snímků ve vybrané rovině se mohl vytvořit 3D model kostí spojením obrysů kostí v jednotlivých snímcích (obr. 18).



Obr. 18 – 3D model kostí vytvořený v programu Seg3D

Dále bylo nutné určit body odstupů a úponů svalů v souřadnicovém systému $[\eta, \xi, \varepsilon]$ (Obr. 19). Jelikož jsme se v této práci zabývali pouze svaem deltovým, určovali jsme souřadnice bodů odstupů a úponů 22 segmentů, na které jsme si deltový sval rozdělili. Jednotlivé odstupy a úpony segmentů svalů jsme určili na základě identifikace anatomických bodů na pletenci horní končetiny a humeru. Jako referenční geometrii odstupů a úponů segmentů svalů jsme zvolili popis uvedený v Čihák, 2001. Souřadnice jednotlivých odstupů a úponů segmentů svalů v souřadnicovém systému CT snímku jsou uvedeny v tabulce 2. V tabulce 2 je také vidět, že deltový sval je charakteristický širokým odstupem a anatomicky přesně definovaným úponem na humeru.



Obr. 19 – Souřadnicový systém CT snímku

vlákno svalu	souřadnice odstupů [px]			souřadnice úponů [px]		
	η	ξ	ε	η	ξ	ε
1	126	225	49	45	257	1
2	117	230	51	45	257	1
3	107	232	52	45	257	1
4	97	232	53	45	257	1
5	87	230	54	45	257	1
6	76	230	54	45	257	1
7	57	229	50	45	257	1
8	53	233	50	45	257	1
9	51	240	50	45	257	1
10	50	248	50	45	257	1
11	50	255	50	45	257	1
12	50	262	49	45	257	1
13	51	270	48	45	257	1
14	56	277	47	45	257	1
15	71	286	47	45	257	1
16	82	290	50	45	257	1
17	92	295	51	45	257	1
18	103	299	49	45	257	1
19	109	302	48	45	257	1
20	116	307	46	45	257	1
21	126	314	45	45	257	1
22	134	320	43	45	257	1

Tab. 2 – Souřadnice odstupů a úponů segmentů svalu v souřadnicovém systému CT snímku

3D model geometrie kostí z programu Seg3D jsme následně převedli do programu Matlab, v podobě matic. Každá matice P_{ij} odpovídá jednomu řezu. Místa, ve kterých se nachází kost, mají v matici hodnotu 1, prázdná místa mají hodnotu 0. Tj. jedná se o binární obraz. Indexy i, j odpovídají souřadnicím v souřadnicovém systému CT snímku.

Jelikož matice bodů kostí P_{ij} byly příliš velké, z důvodu velkého množství bodů, museli jsme je upravit tak, že jsme odstranili vnitřní body, aby nám zůstaly pouze body, které tvoří povrch kostí. Identifikace hrany kosti jsme provedli v každém řezu, využitím metody dilatace obrazu [16].

Pro každý řez jsme provedli následující výpočet:

$$V_{ij} = \sum_{i=2}^{511} (2P_{i,j} - P_{i-1,j} - P_{i+1,j}) + \sum_{j=2}^{511} (2P_{i,j} - P_{i,j-1} - P_{i,j+1}) \quad (2)$$

$$P_{ij} = \operatorname{sgn}\left(\frac{V_{ij} + 1}{2}\right) \quad (3)$$

Následným složením jednotlivých matic řezů jsme získali 3D množinu bodů popisujících povrch kostí.

$$P_{ijk} = [\eta_i, \xi_j, \varepsilon_k] \quad \begin{array}{l} i = 1 \dots 512 \\ j = 1 \dots 512 \\ k = 1 \dots 59 \end{array} \quad (4)$$

Kde k odpovídá jednotlivému řezu. Souřadnicový systém obrazový $[\eta, \xi, \varepsilon]$ z programu Seg3D jsme museli převést na souřadnicový systém fyzikální $[x, y, z]$, to znamená převést pixely na milimetry.

$$P_l = [C_1 \cdot \eta_i, C_2 \cdot \xi_j, C_3 \cdot \varepsilon_k] = [x, y, z] \quad (5)$$

P_{ijk} - matice bodů v obrazovém souřadnicovém systému

P_l - vektor bodů ve fyzikálním souřadnicovém systému

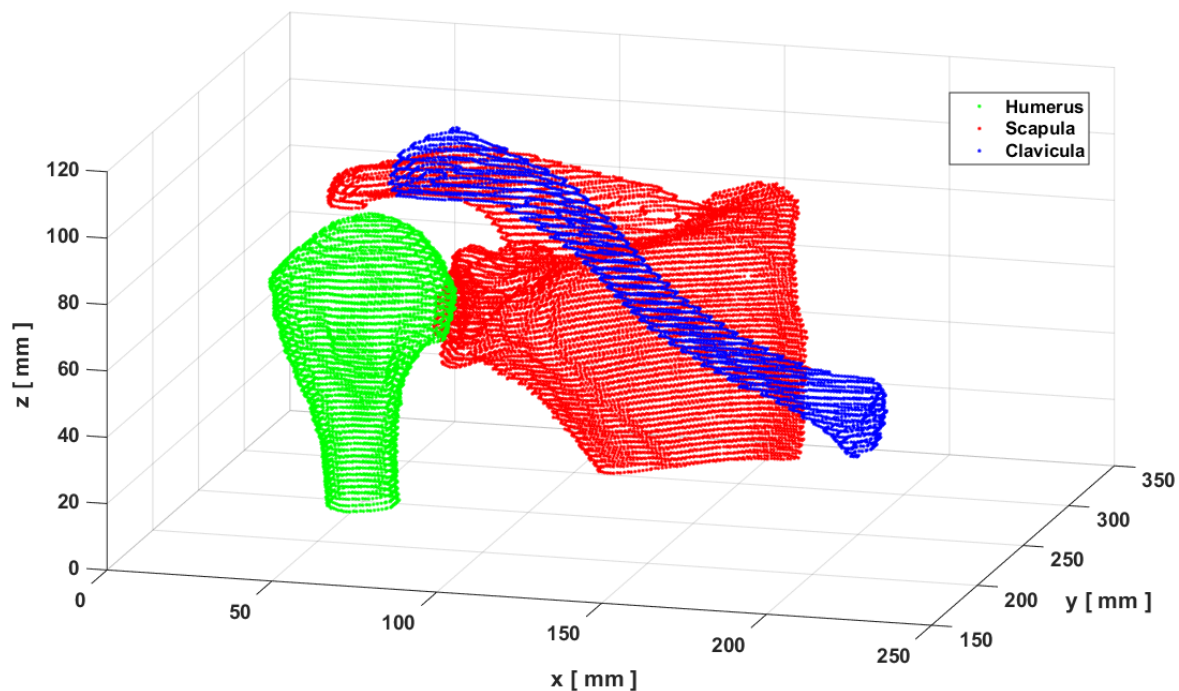
C_1, C_2, C_3 – konstanty korekce, jsou uvedeny v tabulce 3

Jelikož se CT snímky ukládají ve formátu DICOM, který obsahuje veškerá data o provedení skenování, velikost pixelů jsme mohli zjistit pomocí programu MicroDicom. Ten je volně stažitelný na internetu a dokáže informace, které jsou uloženy ve formátu DICOM, zobrazit (Tab. 3).

C_1	velikost pixelu (ve směru x)	0,923 mm
C_2	velikost pixelu (ve směru y)	0,923 mm
C_3	vzdálenost řezů (ve směru z)	2 mm

Tab. 3 – konstanty korekce pro převod souř. systémů

Protože jsme se v této práci zabývali ramenním kloubem, použili jsme pouze kost pažní, lopatku a kost klíční (obr. 20).

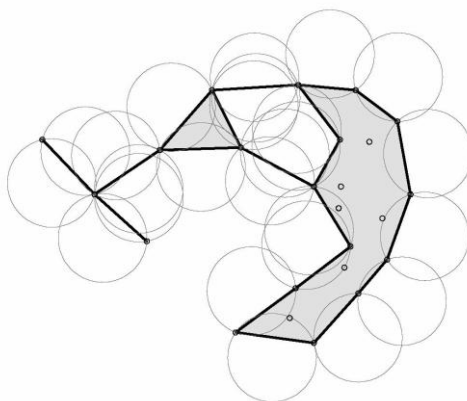


Obr. 20 – Povrchové body kostí zobrazené v programu Matlab

5.1.2 Vytvoření 3D povrchové sítě

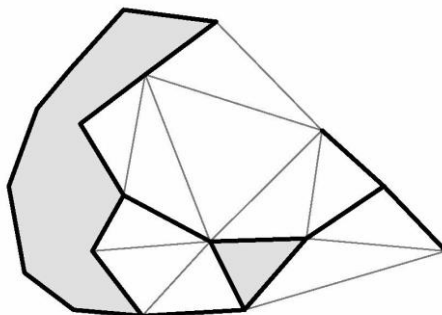
Z povrchových bodů pažní kosti, lopatky a klíční kosti jsme vytvořili 3D povrchovou trojúhelníkovou síť pomocí α -tvarů. Jedná se o dekompoziční metodu pro rekonstrukci povrchů, která je založena na Delaunayově triangulaci pro dvojrozměrný případ [17]. Později byla rozšířena pro trojrozměrný případ [18].

Samotní autoři v článku Edelsbrunner a spol., 1994, uvádějí následující intuitivní popis toho, jak si můžeme představit α -tvar (α -shape): Představte si velký kus zmrzliny, který vyplňuje prostor R^n a obsahuje body S jako pevné kousky čokolády. Použitím zmrzlinové lžice ve tvaru koule můžeme odstranit všechny části zmrzliny, kam se dostaneme, ale nesmíme se dotknout čokolády, dokonce můžeme vytvářet díry uvnitř (tj. části nedosažitelné lžící z vnějšku). Až odstraníme vše, co odstranit lze, tak skončíme s (ne nutně konvexním ani spojitým) objektem ohraničeným kulovými výsečemi, oblouky a body. Jestliže nyní transformujeme všechny výseče kulových ploch na trojúhelníky a oblouky na úsečky, tak dostáváme intuitivní popis toho, co se nazývá α -tvar množiny S (Obr. 21).



Obr. 21 - Intuitivní představa pojmu α -tvar [20]

Veškeré následující definice uvedené v této kapitole vycházejí z [17, 18, 19]. Nechť S je bodová množina v n -rozměrném prostoru R^n , kde n je celé kladné číslo. Pak α -obal příslušející S lze považovat za zobecnění konvexního obalu, který závisí pouze na vstupní bodové množině S a na parametru α . Hodnota parametru α ovlivňuje míru detailů výsledného α -tvaru. Ukázka α -tvaru S_α množiny bodů S je na obrázku 22.



Obr. 22 - Příklad α -tvaru bodové množiny ve dvojrozměrném prostoru [20]

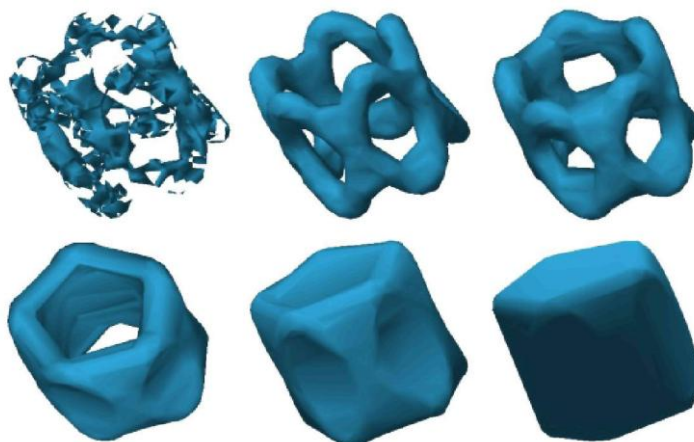
Míru detailů výsledného α -tvaru S_α bodové množiny S určuje hodnota parametru α , který je nezáporné reálné číslo. Se zmenšujícím se parametrem α se postupně objevují další a další detaily. Při dostatečně malé hodnotě přestává být výsledek souvislý a pro hodnotu $\alpha = 0$ tvoří výsledný α -tvar pouze izolované body množiny S .

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} S_\alpha = S \quad (6)$$

Naopak s rostoucí hodnotou parametru α se detaily ztrácejí. Je-li $\alpha = \infty$ α -tvar není nic jiného, než konvexní obal bodové množiny S .

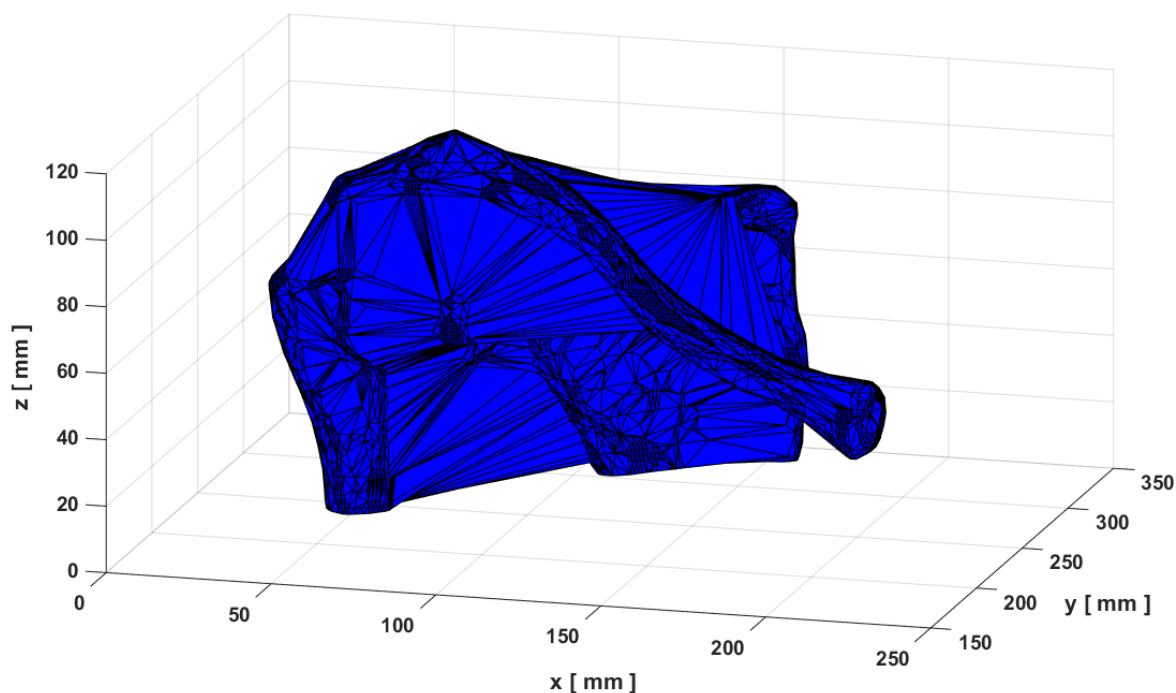
$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} S_\alpha = \text{conv}(S) \quad (7)$$

Obrázek 23 demonstruje, jaký má vliv změna hodnoty parametru α na výsledný tvar pro bodovou množinu v trojrozměrném prostoru [20].

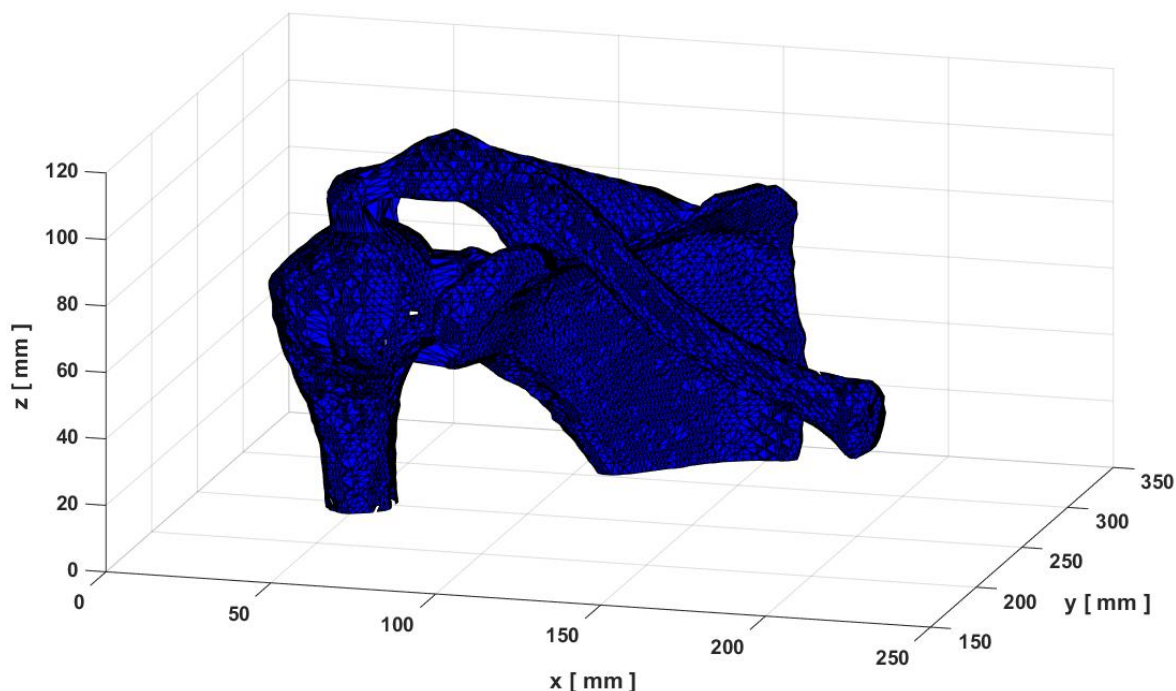


Obr. 23 - Postupná změna výsledného α -tvaru v závislosti na parametru α , vlevo nahoře α -tvar pro nízkou hodnotu α , vpravo dole pro hodnotu $\alpha = \infty$ [21].

V této práci jsme v programu Matlab pomocí funkce `alphavol`, která používá metodu α -tvarů, vytvořili 2 sítě geometrie kostí. Jednu hrubou s hodnotou $\alpha = 40\text{mm}$ pro výpočet geodetické dráhy svalu, čímž vznikla síť, na které zůstaly zachovány důležité útvary kostí pro správné určení dráhy svalu a vzniklá síť neobsahovala žádné nespojitosti (Obr. 24). Druhá síť s hodnotou $\alpha = 5\text{mm}$ představovala reálnou geometrii kostí a sloužila pro zobrazení skutečné výsledné dráhy svalu (Obr. 25).



Obr. 24 – Znáznornění vytvořené hrubé sítě geometrie kostí pro hodnotu $\alpha = 40\text{mm}$



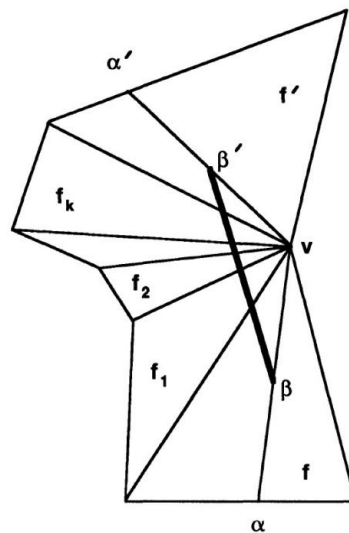
Obr. 25 – Znárodnění vytvořené jemné sítě geometrie kostí pro hodnotu $\alpha = 5\text{mm}$

5.1.3 Určení dráhy svalu na hrubé povrchové síti pomocí algoritmu MMP

Dalším bodem bylo na získané síti spočítat dráhu svalu. Výpočet dráhy svalu je založen na těchto předpokladech:

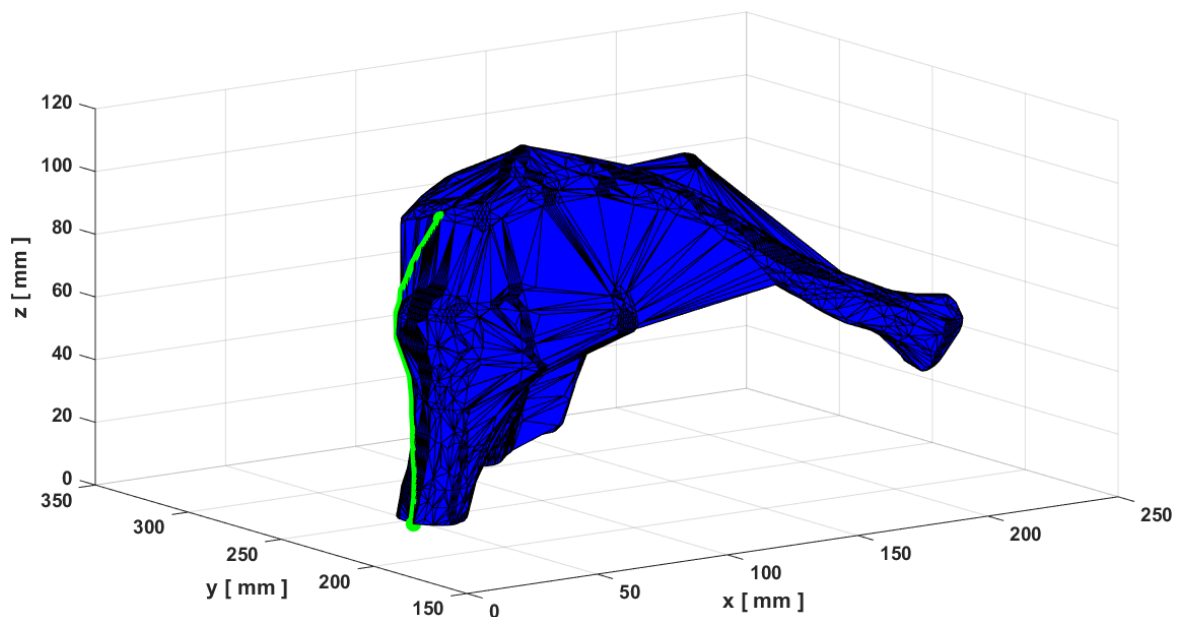
1. Dráha svalu je reprezentována konvexní křivkou.
2. Dráha svalu je tvořena spojením přímkových úseků.
3. Dráha svalu by se v odstupě a úponu měla napojit na síť povrchu kosti.
4. Optimální dráha svalu se stanoví jako nejkratší vzdálenost mezi odstupem a úponem svalu.

Pro výpočet dráhy svalu byl použit geodetický MMP algoritmus, který popsal Mitchel a spol., 1987. Slouží pro určení nejkratší dráhy mezi počátečním a koncovým bodem na libovolném (i nekonvexním) mnohostěnném povrchu, přičemž dráha musí ležet na povrchu. Algoritmus používá techniku, kterou sami autoři nazvali „kontinuální Dijkstrův algoritmus“ a je velmi podobná konstrukci Dijkstrova algoritmu. Rozdíl spočívá v tom, že MMP algoritmus nemusí běžet pouze po bodech mnohostěnného povrchu, ale dokáže si dopočítat body i na hranách segmentů tvořících mnohostěnný povrch. Výsledná dráha pak běží po povrchu přímou cestou mezi počátečním a koncovým bodem (Obr. 26).



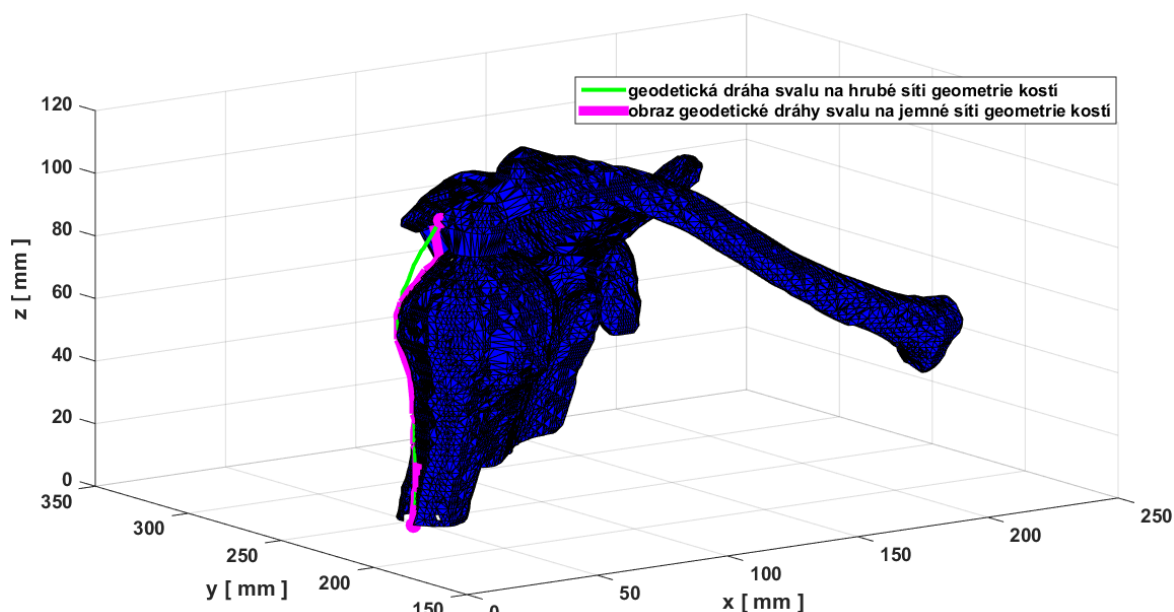
Obr. 26 – Nejkratší dráha na mnohostěnném povrchu spočítaná MMP algoritmem [22]

Proto, aby dokázal spočítat geodetickou dráhu svalu, jsme museli použít hrubou povrchovou 3D síť kostí. Po provedení algoritmu nám vyšla dráha svalu jdoucí po povrchu hrubé sítě geometrie kostí nejkratší možnou vzdáleností (Obr. 27). Tento výsledek ale nebyl uspokojivý a bylo tedy potřeba dalších úprav.



Obr. 27 – Znárodnění geodetické dráhy svalu na hrubé síti geometrie kostí

Dalším krokem bylo určit obraz geodetické dráhy svalu promítnutý na reálnou povrchovou síť kostí (Obr. 28). To jsme udělali proto, abychom dokázali zjistit vzdálenosti bodů geodetické dráhy svalu od jejího obrazu.



Obr. 28 – Promítnutí geodetické dráhy svalu z hrubé na jemnou síť geometrie kostí

5.1.4 Úprava dráhy svalu na skutečnou geometrii kostí

Zbylé úpravy geodetické dráhy svalu jsme prováděli v rovině, do které se geodetická dráha svalu promítla (Obr. 29). Požadavky na určení roviny:

1. Rovina musí procházet bodem odstupu a úponu dráhy svalu.
2. Druhé mocniny vzdáleností všech bodů geodetické křivky od roviny musí být minimální.

Postup určení roviny:

Máme bod odstupu $O [x,y,z]$ a úponu $U [x,y,z]$ vlákna svalu, což jsou vlastně vektory odstupu \vec{R}_O a úponu \vec{R}_U vlákna svalu ve fyzikálním globálním souřadnicovém systému. Z nich určíme jednotkový vektor \vec{e}_1 hledané roviny v globálním souřadnicovém systému.

$$\vec{e}_1 = \frac{\vec{R}_U - \vec{R}_O}{|\vec{R}_U - \vec{R}_O|} \quad (8)$$

Dále víme, že: $\vec{e}_2 \perp \vec{e}_1 \Rightarrow \vec{e}_2 \cdot \vec{e}_1 = 0$ z čehož si dopočítáme vektor \vec{e}_2 , podle následujícího vzorce pro námi zvolené e_{2x} a e_{2y} . Ty si volíme dle směru, do kterého chceme rovinu spočítat.

$$e_{1x}e_{2x} + e_{1y}e_{2y} + e_{1z}e_{2z} = 0 \quad (9)$$

$$e_{2z} = \frac{-e_{1x}e_{2x} - e_{1y}e_{2y}}{e_{1z}} \quad (10)$$

$$\vec{e}_2 = (e_{2x}, e_{2y}, e_{2z}) \quad (11)$$

Třetí jednotkový vektor roviny \vec{e}_3 určíme díky faktu, že všechny 3 vektory musí být navzájem kolmé:

$$\vec{e}_3 = \frac{\vec{e}_1 \times \vec{e}_2}{|\vec{e}_1 \times \vec{e}_2|} \quad (12)$$

$$\text{Z těchto vektorů získáme transformační matici } T = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Díky ní převedeme body geodetické dráhy v globálním souřadnicovém systému do lokálního souřadnicového systému roviny.

$$P - O = T^T \cdot p \quad (14)$$

P – souřadnice bodu geodetické dráhy v globálním souřadnicovém systému

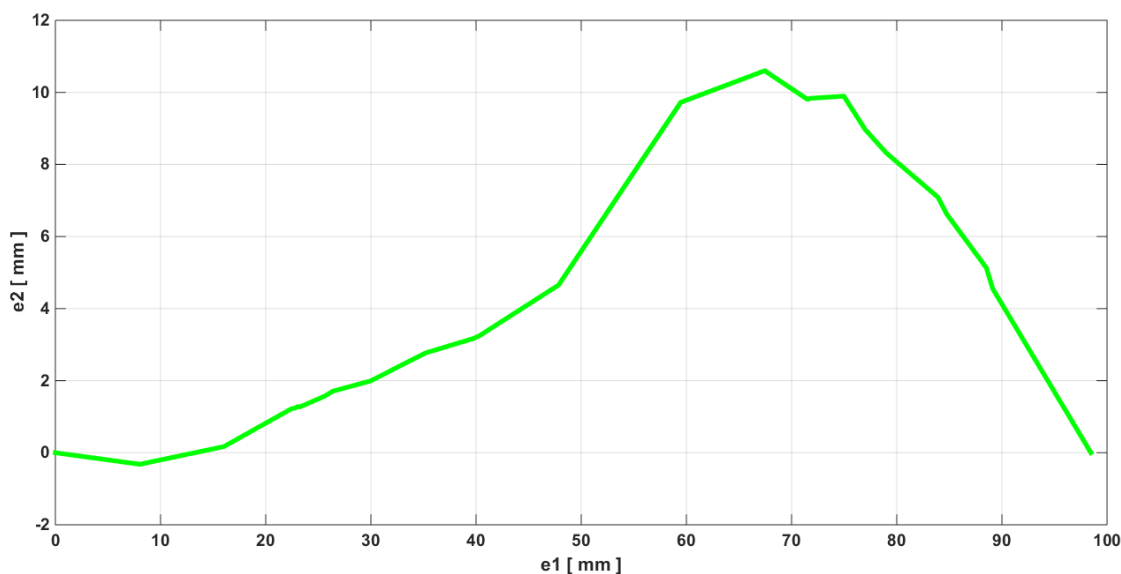
p – souřadnice bodu geodetické dráhy v lokálním souřadnicovém systému

O – souřadnice počátku lokálního souřadnicového systému v globálním

Daný vztah (14) platí za předpokladu, že známe všech 9 složek transformační matice. Pro určení roviny nám stačí znalost 3 bodů, ze kterých 2 musí být body odstopu a úponu svalu. Další body dráhy nám vytváří staticky neurčitý problém a není možné jednoznačně určit rovinu, která by vyhovovala všem bodům dráhy svalu. Proto jsme pro určení roviny, využili metodu optimalizace. Pro výpočet jsme použili funkci `fminsearch` v programu Matlab. Jako optimalizační kritérium jsme zvolili:

$$\min \sum_{i=1}^n p_{i3}^2 \quad (15)$$

Kde n je počet bodů obtáčení.

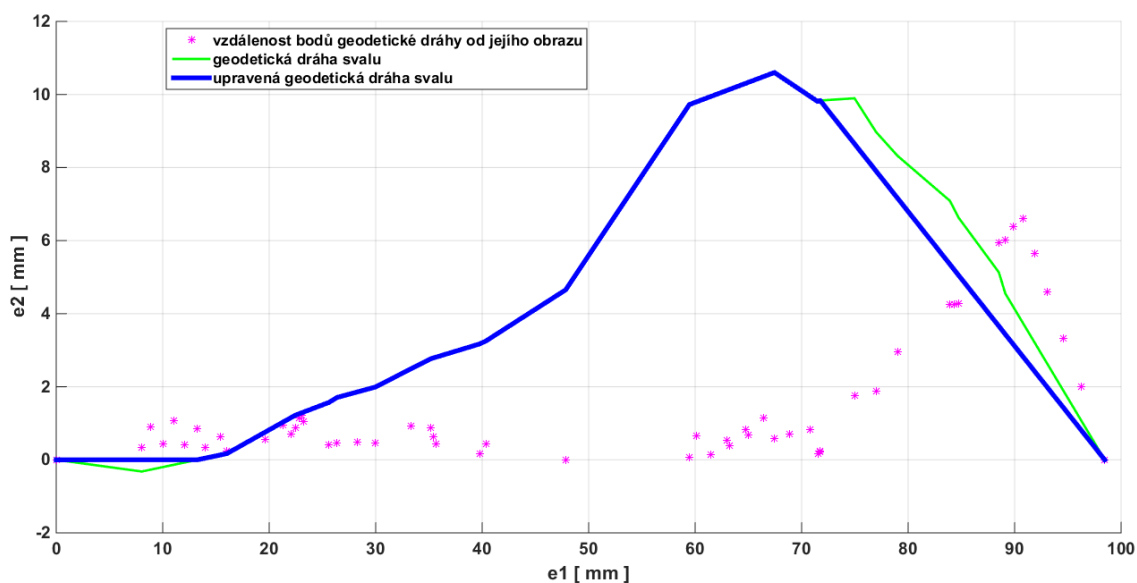


Obr. 29 – Znáznornění geodetické dráhy svalu, běžící po hrubé síti geometrie kostí, v rovině

Výsledná křivka obtáčení musí splňovat následující předpoklady:

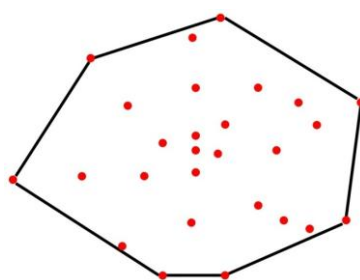
1. Body obtáčení musí ležet na povrchu kosti.
2. Křivka musí být konvexní vzhledem k povrchu kosti.

Splnění těchto předpokladů jsme dosáhli pomocí následujících úprav: první úprava geodetické křivky spočívala v tom, že jsme z ní odstranili body, které byly od obrazu křivky promítnutého na reálnou síť geometrie kostí vzdáleny více než 1mm a v druhé úpravě jsme odstranili body, které byly v záporných hodnotách (Obr. 30). Tyto body nám vznikly jako důsledek toho, že jsme museli pro výpočet geodetické křivky použít hrubou 3D síť kostí a geodetický algoritmus a priori dopočítává body intersekce.



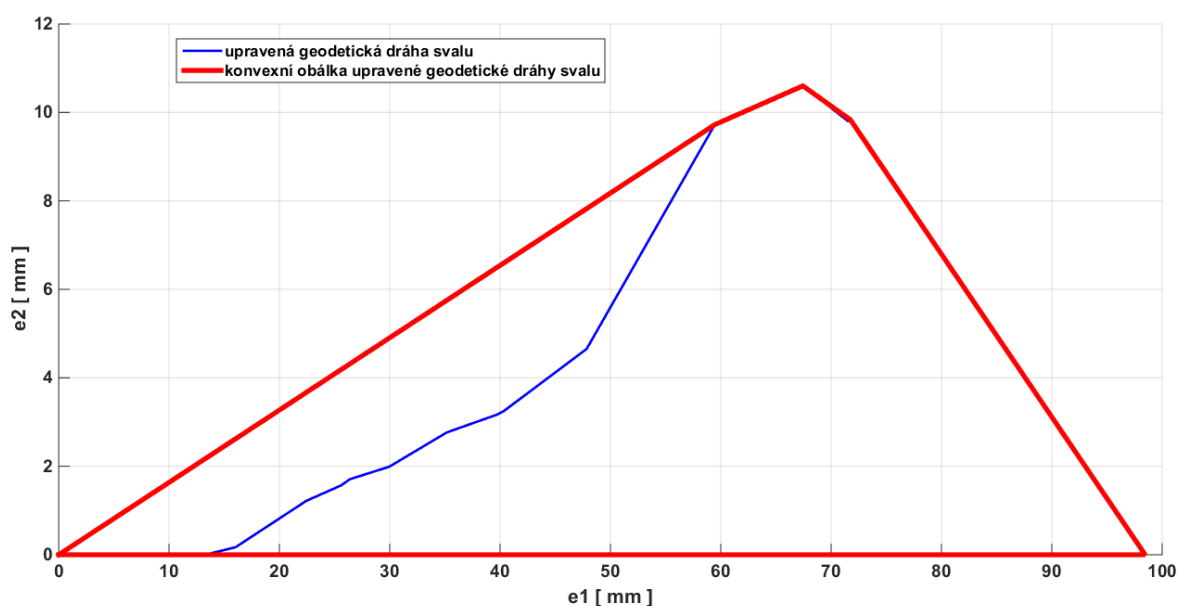
Obr. 30 – Znáznornění úpravy geodetické dráhy svalu, běžící po hrubé síti geometrie kostí, odstraněním nevhovujících bodů geodetické dráhy svalu

Geodetická dráha svalu je přesná, ale běží po částech nekonvexním povrchu kosti, což nám koliduje s prvním bodem předpokladu výpočtu dráhy svalu, že dráha svalu musí být konvexní. Tudíž jako finální úpravu používáme algoritmus vytvoření konvexní obálky ve 2D. Pojem konvexní obálky (convex hull) konečné množiny bodů K v rovině je přirozený a snadno pochopitelný. Podle definice je to nejmenší konvexní množina nad K (Obr. 31). Jednoduše si lze představit, že na množinu bodů K natáhneme elastické vlákno a její výsledný tvar bude aproximovat konvexní obal. Množina K se nazývá konvexní, jestliže úsečka spojující libovolné dva její body je částí této množiny [23, 24].



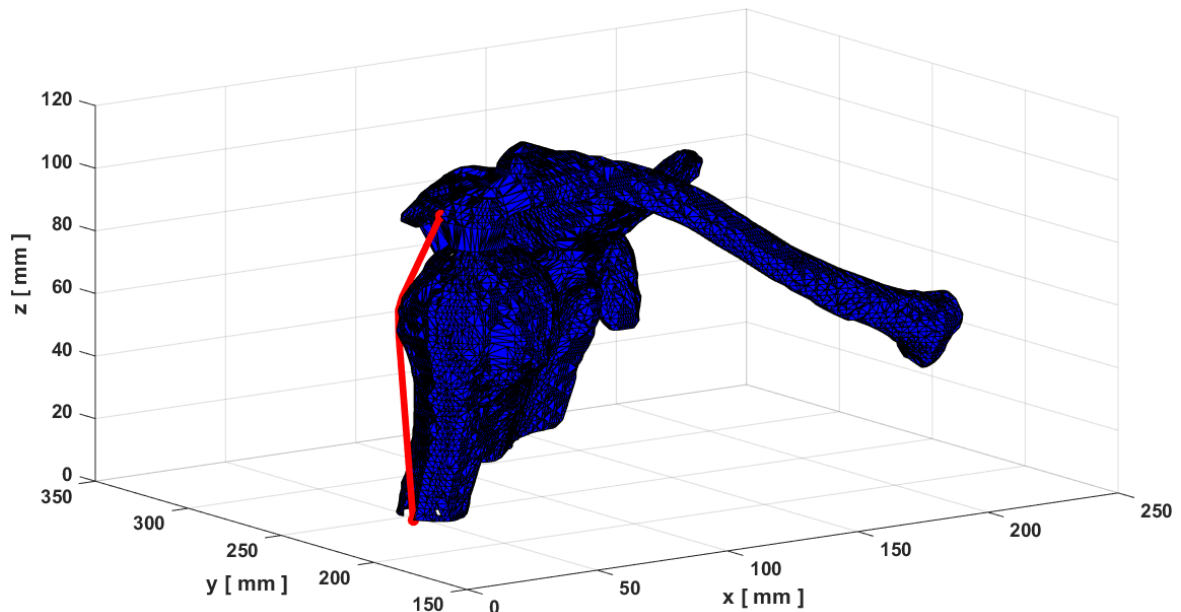
Obr. 31 – Konvexní obálka množiny bodů [24]

Upravená konvexní dráha svalu je znázorněna na obrázku 32.



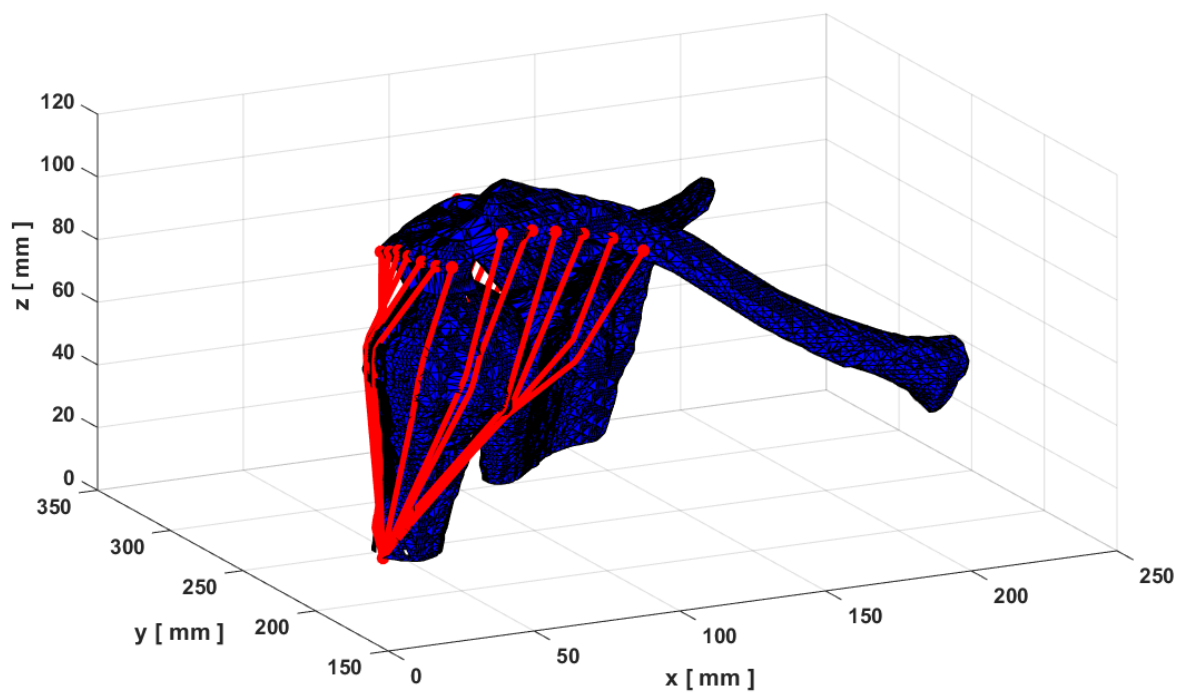
Obr. 32 – Znázornění použití konvexní obálky na upravenou geodetickou dráhu svalu

Posledním krokem už bylo pouze převedení výsledné dráhy do 3D zobrazení se sítí geometrie kostí (Obr. 33).



Obr. 33 – Znáznornění výsledné dráhy svalu určené pomocí námi vytvořené metody

Celý postup popsany v kapitole 5.1 jsme zopakovali pro všech 22 segmentů, na které jsme si deltový sval rozdělili [34].



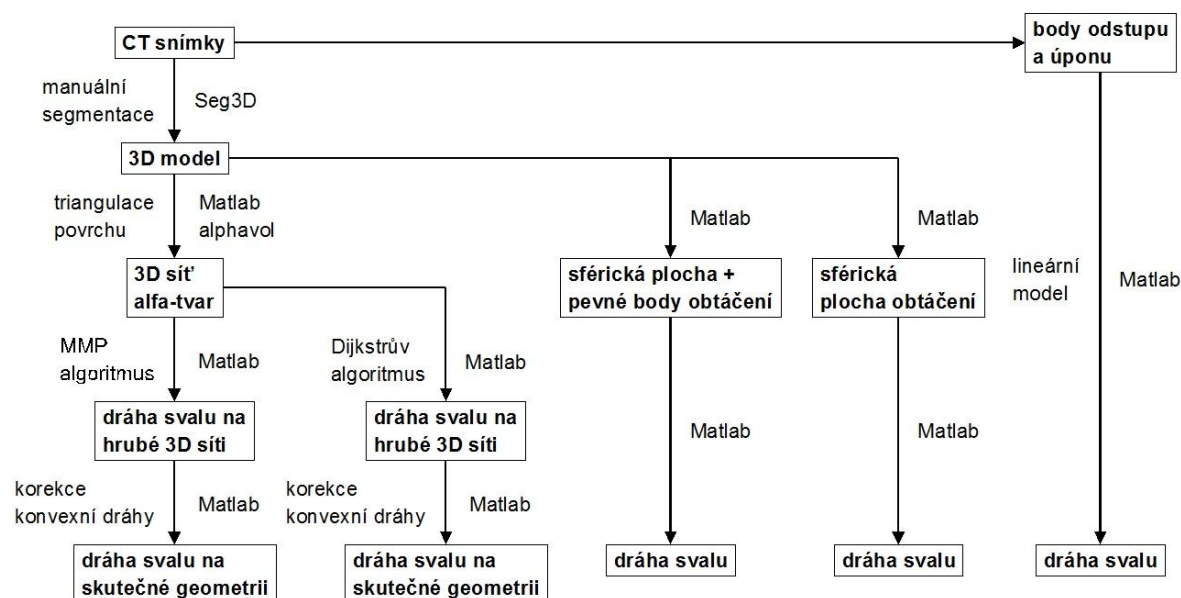
Obr. 34 – Znáznornění deltového svalu určeného pomocí námi vytvořené metody

5.2 Popis stávajících algoritmů

Platí stejné předpoklady jako v předchozí kapitole. Tato část se zabývá popisem již existujících modelů pro určení dráhy svalu pomocí:

- lineárního modelu, viz kapitola 2.1
- modelu obtáčení sférické plochy, viz kapitola 2.3
- modelu obtáčení sférické plochy a pevných bodů, viz kapitoly 2.2 a 2.3
- modelu na 3D geometrii kostí, který využívá Dijkstrův algoritmus, viz kapitola 2.4

Celkové schéma používaných metod, včetně souvislosti s naší vytvořenou metodou je v následujícím obrázku.

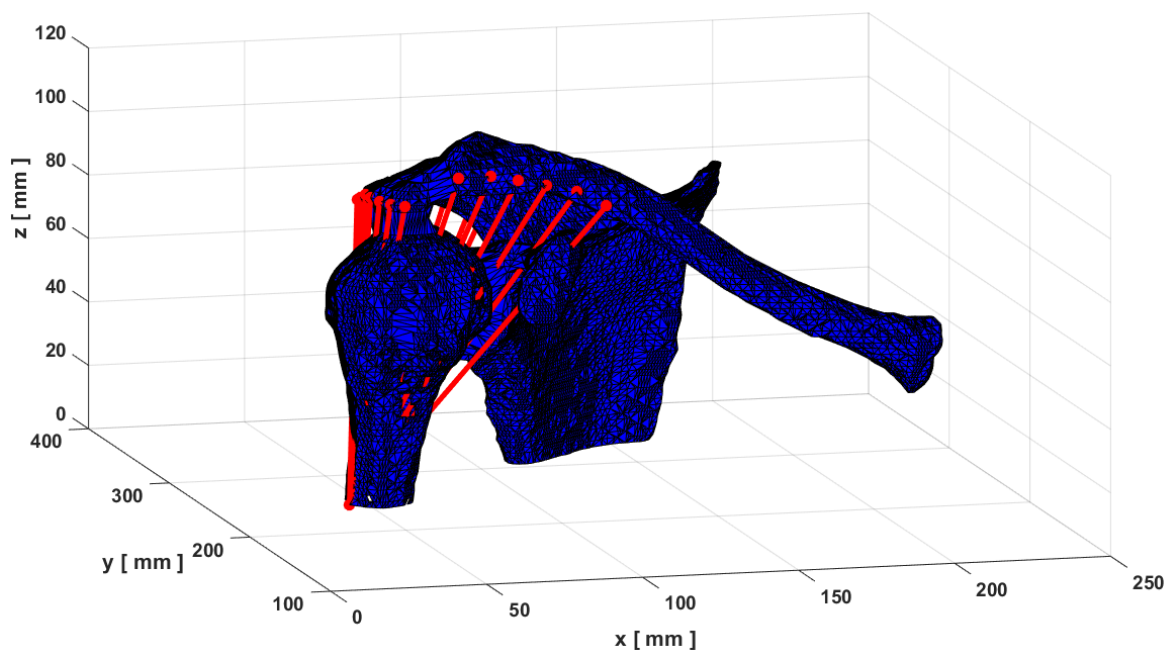


Obr. 35 – Schéma používaných metod, včetně napojení na naši vytvořenou metodu

5.2.1 Určení dráhy svalu pomocí lineárního modelu

V případě lineárního modelu výpočtu dráhy segmentů svalu (Obr. 36), jsme potřebovali zjistit pouze souřadnice odstupů a úponů segmentů svalu. Ty představovali počáteční a koncový bod úsečky, která byla naší hledanou dráhou segmentů svalu.

Výpočet směru dráhy svalu je uveden ve vztahu (1).



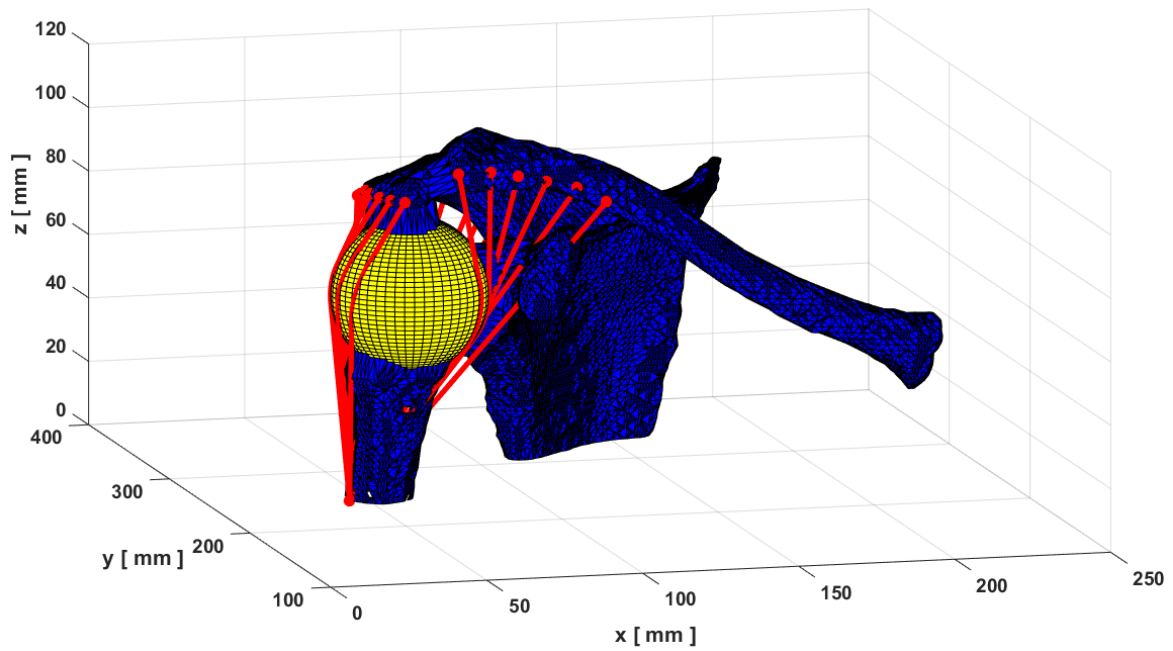
Obr. 36 – Znáznornění deltového svalu určeného pomocí lineárního modelu

5.2.2 Určení dráhy svalu pomocí obtáčení sférické plochy

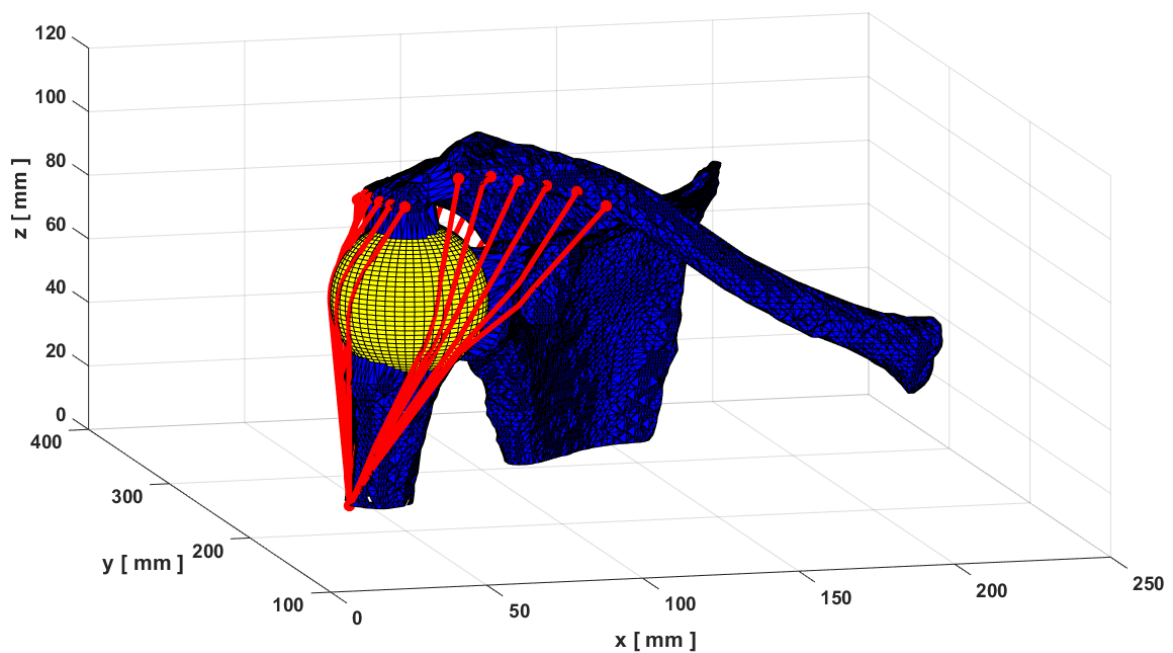
V tomto případě jsme 3D síť geometrie kostí jsme nahradili sférickou plochou a pevnými body, kolem kterých se dráha segmentů svalu obtáčí. Výpočet dráhy jsme převedli na rovinný problém, v němž jsme následně použili algoritmus konvexní obálky, který nám rovnou spočítal hledanou dráhu segmentů svalu. Jedná se tedy o problém obtáčení dráhy segmentů svalu kolem kulové plochy.

Uvažovali jsme 2 možnosti:

1. Sval je definovaný odstupem, úponem a sférickou plochou obtáčení (Obr. 37).
2. Definujeme dodatečné pevné body obtáčení pro zamezení kolize svalu s kostí. Ve výpočtu pak tyto body plní funkci efektivního odstupem, resp. úponu svalu (Obr. 38).



Obr. 37 – Znáznornění deltového svalu určeného pomocí obtáčení sférické plochy



Obr. 38 – Znáznornění deltového svalu určeného pomocí obtáčení sférické plochy a pevně určených bodů

5.2.3 Určení dráhy svalu pomocí Dijkstrova algoritmu

Výpočet dráhy svalu pomocí Dijkstrova algoritmu je až do bodu, kdy chceme určit dráhu svalu totožný s postupem výpočtu dráhy svalu pomocí MMP algoritmu. V tomto případě použijeme pro výpočet dráhy svalu na hrubé síti geometrie kostí Dijkstrův algoritmus.

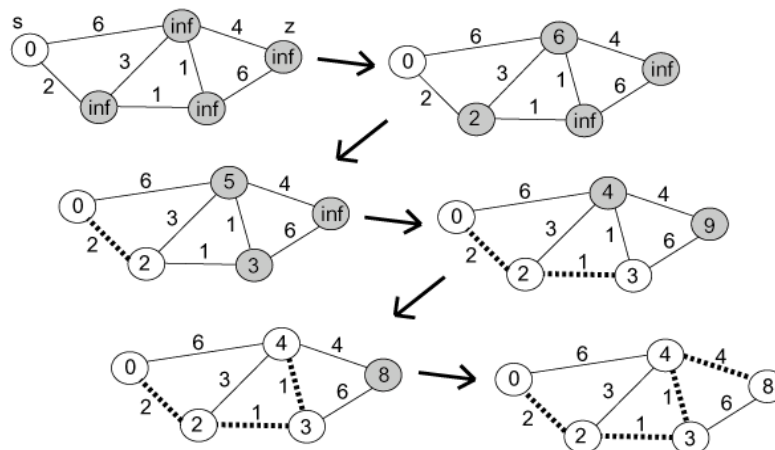
Dijkstrův algoritmus (Obr. 39) roku 1959 vymyslel informatik Edsger Wybe Dijkstra a slouží k nalezení nejkratší cesty v grafu. Je konečný (pro jakýkoliv konečný vstup algoritmus skončí), protože v každém průchodu cyklu se do množiny navštívených uzlů přidá právě jeden uzel. Průchodů cyklem je tedy nejvýše tolik, kolik má graf vrcholů. Funguje nad hranově kladně ohodnoceným grafem a nezáleží na tom, zda je graf orientovaný či nikoliv.

Algoritmus funguje následujícím způsobem. Mějme graf G , v němž hledáme nejkratší cestu. Řekněme, že V je množina všech vrcholů grafu G a množina E obsahuje všechny hrany grafu G . Algoritmus pracuje tak, že si pro každý vrchol v z množiny V pamatuje délku nejkratší cesty, kterou se k němu dá dostat. Označme tuto hodnotu jako $d[v]$. Na začátku mají všechny vrcholy v hodnotu $d[v]=\infty$, kromě počátečního vrcholu s , který má $d[s]=0$. Nekonečno symbolizuje, že neznáme cestu k vrcholu.

Dále si algoritmus udržuje množiny Z a N , kde Z obsahuje už navštívené vrcholy a N dosud nenavštívené. Algoritmus pracuje v cyklu tak dlouho, dokud N není prázdná nebo je navštíven koncový bod nejkratší možnou cestou. V každém průchodu cyklu se přidá jeden vrchol v_{min} z N do Z , a to takový, který má nejmenší hodnotu $d[v]$ ze všech vrcholů v z N .

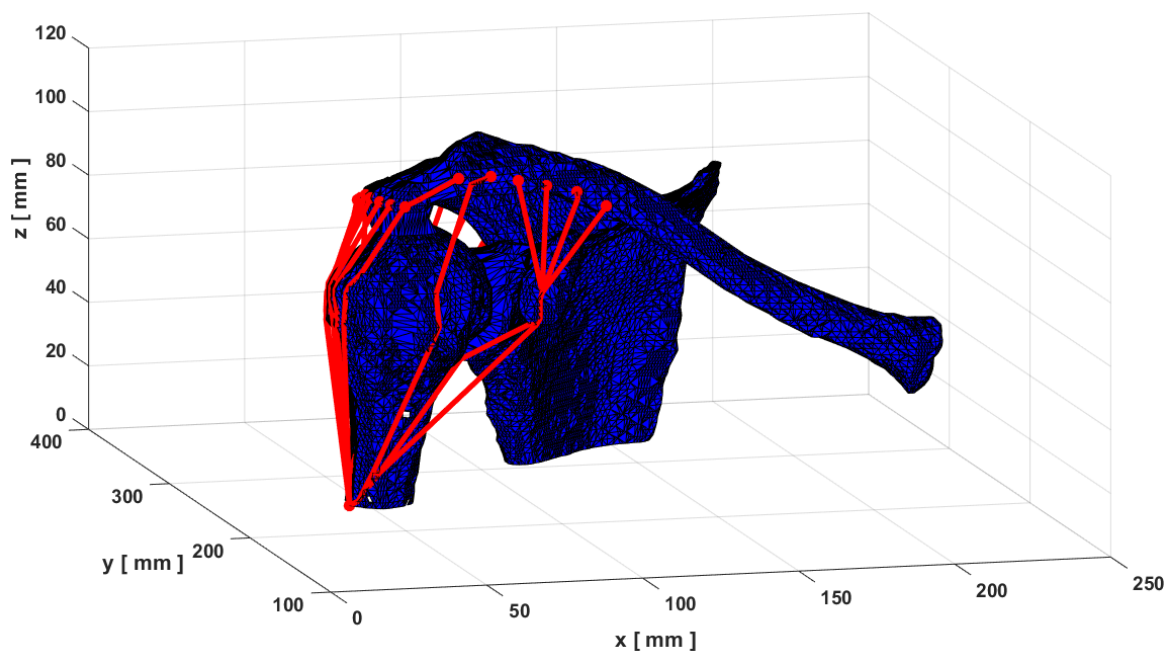
Pro každý vrchol u , do kterého vede hrana (označme její délku jako $l(v_{min},u)$) z v_{min} , se provede následující operace. Pokud $(d[v_{min}] + l(v_{min},u)) < d[u]$, pak do $d[u]$ přiřadíme hodnotu $d[v_{min}] + l(v_{min},u)$, jinak neprovádíme nic. Až algoritmus skončí, potom pro každý vrchol v z V je délka jeho nejkratší cesty od počátečního vrcholu uložena v $d[v]$.

[25]



Obr. 39 – Schéma postupu výpočtu Dijkstrova algoritmu [26]

Dále pracujeme v rovině, kterou získáme opět optimalizací druhých mocnin vzdáleností dráhy svalu od roviny. Při použití Dijkstrova algoritmu není nutné spočítanou dráhu ještě upravovat odstraňováním bodů, které jsou vzdáleny od kosti více než 1mm nebo jdou do záporných čísel, protože dráha spočítaná Dijkstrovým algoritmem běží přímo po síti geometrie kostí a žádné takové body tedy neexistují. Proto použijeme pouze úpravu dráhy konvexní obálkou a opět převedeme zpět do 3D zobrazení (Obr. 40).



Obr. 40 – Znárodnění deltového svalu určeného pomocí Dijkstrova algoritmu

5.3 Určení středu rotace kloubu

Určení středu rotace je nezbytné pro určení ramen sil svalů vůči kloubu. Střed rotace kloubu jsme určili aproximací hlavičky pažní kosti koulí (Obr. 41), jejíž střed znamenal hledaný střed otáčení. Aproximaci hlavičky jsme provedli pomocí metody nejmenších čtverců.

Kouli se středem $[x_0, y_0, z_0]$ a poloměrem r lze definovat jako množinu bodů $[x, y, z]$, které splňují rovnici:

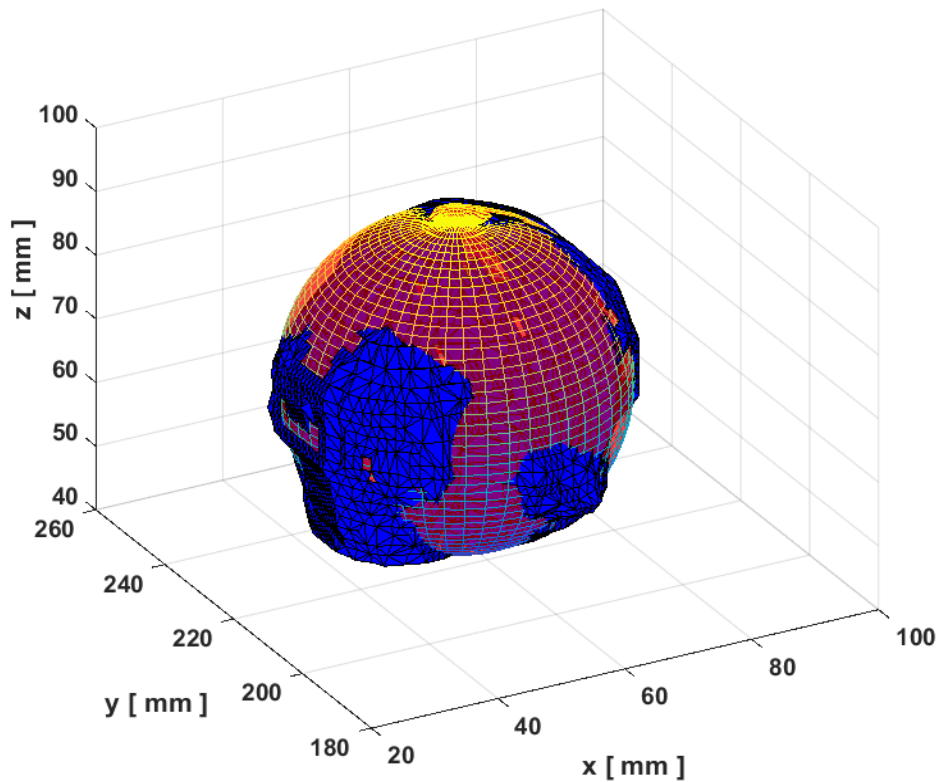
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (16)$$

Protože, množina bodů $[x, y, z]$ tvořící hlavičku humeru, kterou chceme aproximovat sférickou plochou, nám vytváří staticky neurčitou úlohu, musíme pro určení

sférické plochy použít metodu optimalizace. Z rovnice koule jsme určili optimalizační kritérium:

$$\min \sum (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - r^2 \quad (17)$$

Výstupem je poloha středu koule a její poloměr. Pro výpočet jsme použili funkci lsqnonlin v programu Matlab.



Obr. 41 – Aproximace hlavičky humeru koulí

5.4 Výpočet ramene síly svalového vlákna

Výpočet ramene síly svalu vzhledem ke středu otáčení kloubu je velmi důležitý z hlediska určení zatížení kloubu. Pro určení ramene jsme použili úsek dráhy svalu mezi posledním bodem dráhy na kosti, z které sval odstupuje (lopatka, kost klíční), a prvním bodem dráhy náležící kosti pažní. Hledané rameno pak byla kolmá vzdálenost tohoto úseku dráhy ke středu rotace ramenního kloubu.

$$\vec{e} = \frac{\vec{u} - \vec{o}}{|\vec{u} - \vec{o}|} \quad (18)$$

$$\vec{t} = \vec{o} - \vec{s} \quad (19)$$

$$R = |\vec{r}| = |\vec{t} \times \vec{e}| \quad (20)$$

\vec{e} ... jednotkový vektor ve směru svalového vlákna

\vec{u} ... vektor úponu svalu v globálním souřadnicovém systému

\vec{o} ... vektor odstupu svalu v globálním souřadnicovém systému

\vec{t} ... vektor odstupu svalu v lokálním souřadnicovém systému

\vec{s} ... vektor středu rotace ramenního kloubu v globálním souřadnicovém systému

\vec{r} ... vektor rameno svalu v lokálním souřadnicovém systému

R ... rameno svalu

5.5 Výpočet délky dráhy svalového vlákna

Délka dráhy svalových vláken se určila sečtením jednotlivých přímkových úseků dráhy.

$$L = \sum_{i=1}^{21} |P_i P_{i+1}| = \sum_{i=1}^{21} \sqrt{(PX_{i+1} - PX_i)^2 + (PY_{i+1} - PY_i)^2 + (PZ_{i+1} - PZ_i)^2} \quad (21)$$

L ... délka svalu

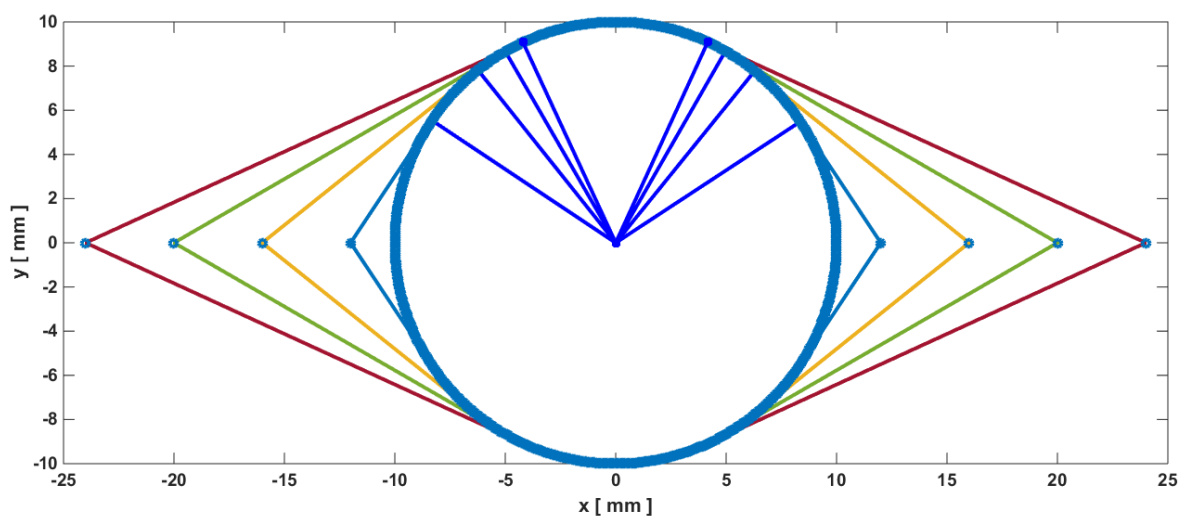
P ... bod dráhy vlákna svalu

PX, PY, PZ ... souřadnice bodu dráhy vlákna svalu

6 Výsledky

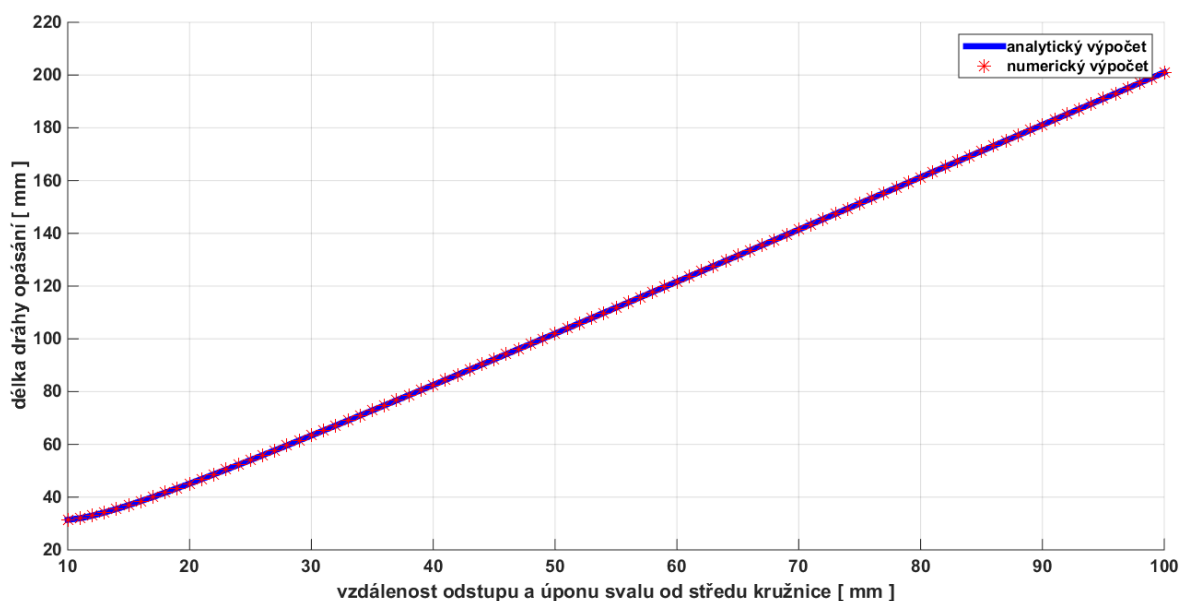
6.1 Verifikace metody

Správnost výsledků obtáčení dráhy svalu získané numerickou metodou jsme ověřili porovnáním s výsledky získanými analyticky. Jako zkušební příklad jsme použili případ obtáčení dráhy svalu kolem koule (Obr. 42). Pro výpočet jsme využili analytický vztah pro délku dráhy opásání používaný pro výpočet pasivních odporů [27].

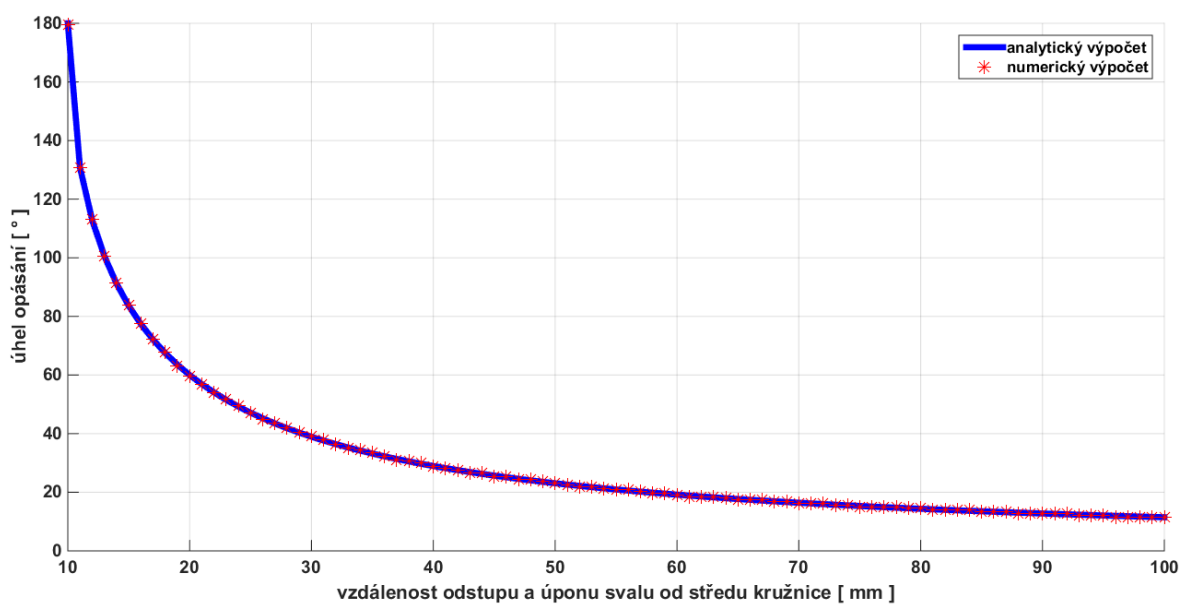


Obr. 42 – Obtáčení dráhy svalu kolem koule, promítnutí do roviny

Na grafech je vidět, že pokud kouli tvoří dostatečný počet bodů, křivka získaná analyticky probíhá přes body získané numerickým výpočtem (Obr. 43 a 44).

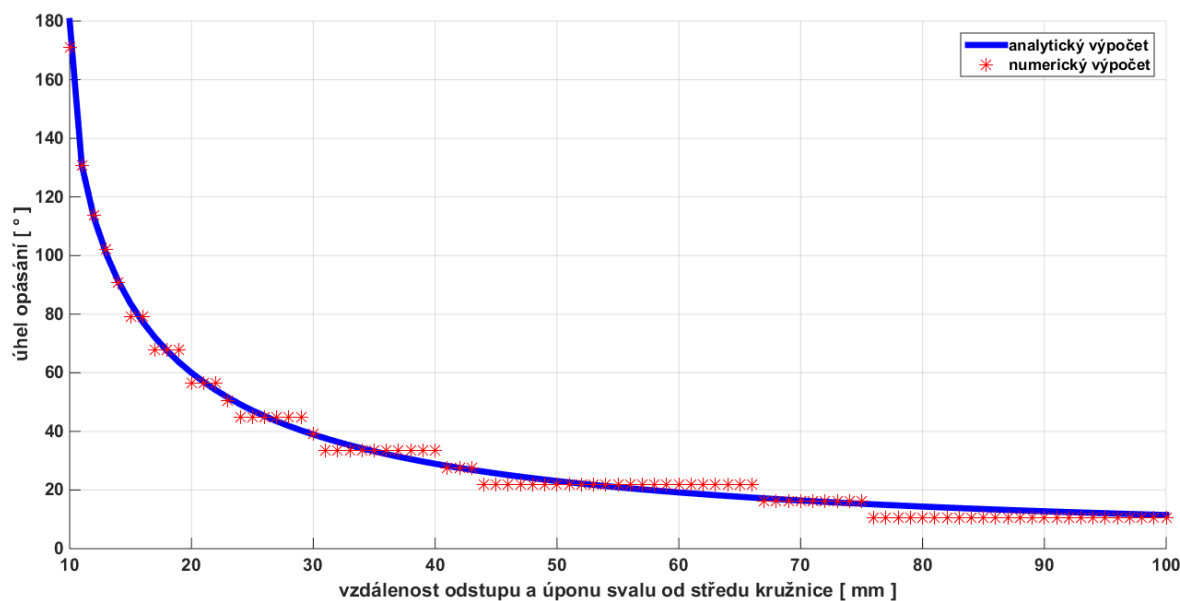


Obr. 43 – Znárodnění délky dráhy opásání při obtáčení kolem koule tvořené dostatečným počtem bodů, porovnání analytické a numerické metody výpočtu



Obr. 44 – Znáznornění velikosti úhlu opásání při obtáčení kolem koule tvořené dostatečným počtem bodů, porovnání analytické a numerické metody výpočtu

Při vykreslení kružnice pomocí menšího počtu bodů se nám výsledky získané numericky začnou odlišovat od výsledků získaných analyticky, nicméně odchylky nejsou tak velké, takže můžeme numerickou metodu prohlásit za přesnou.

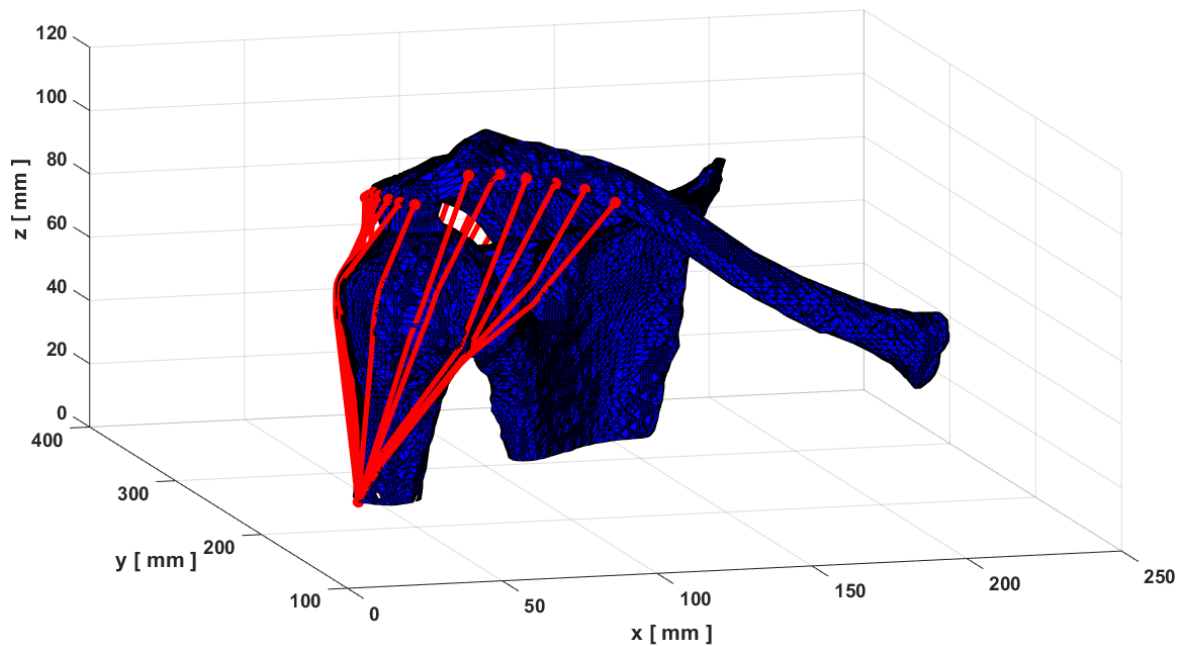


Obr. 44 – Znáznornění velikosti úhlu opásání při obtáčení kolem koule tvořené menším počtem bodů, porovnání analytické a numerické metody výpočtu

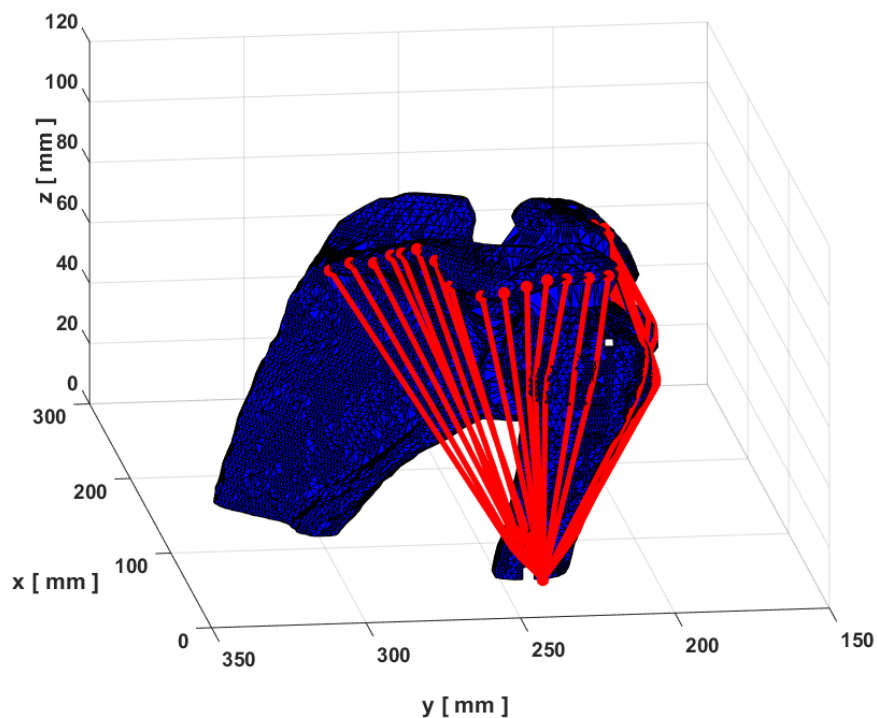
6.2 Výsledné dráhy segmentů svalu

Na obrázcích uvedených v této kapitole jsou znázorněny výsledné dráhy deltového svalu určené různými metodami.

6.2.1 Nově vytvořená metoda obtáčení svalů

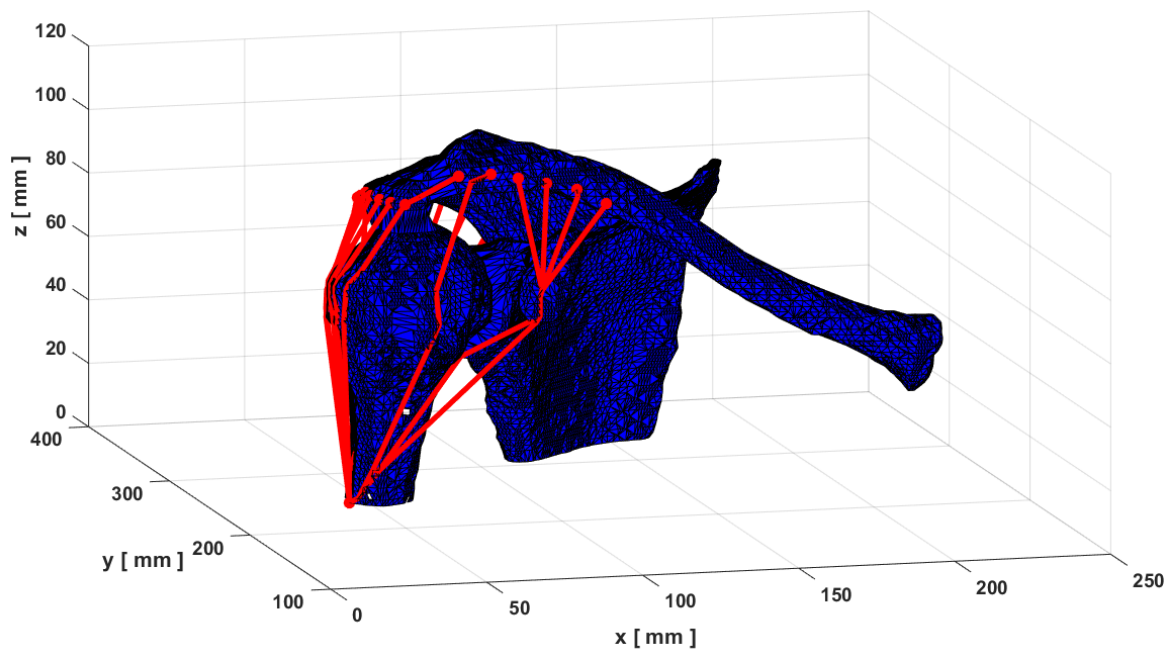


Obr. 45 – Znázornění dráhy deltového svalu určené nově vytvořenou metodou obtáčení svalů, pohled na lateroventrální stranu

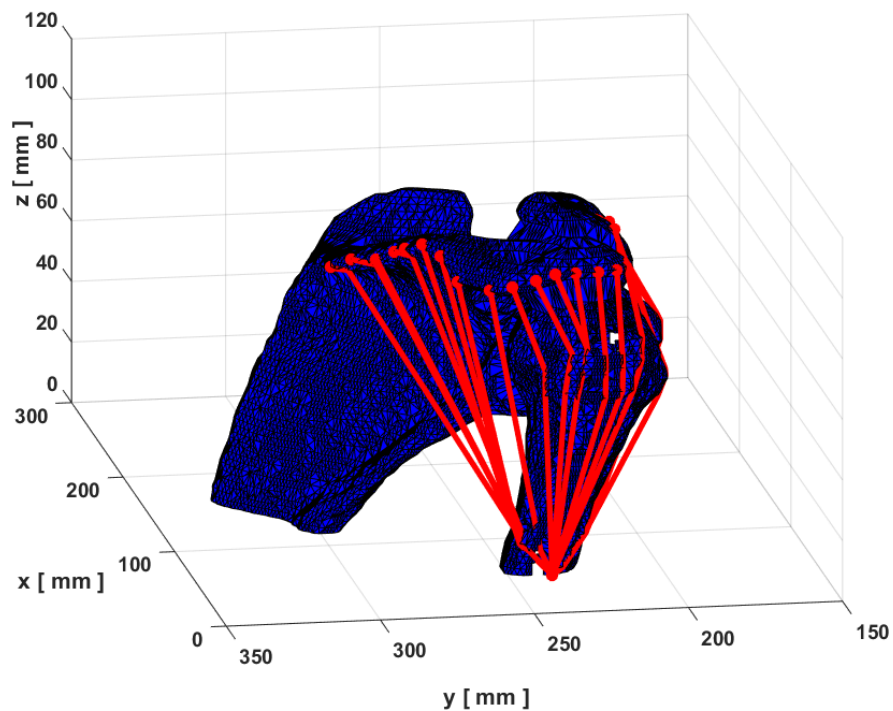


Obr. 46 – Znázornění dráhy deltového svalu určené nově vytvořenou metodou obtáčení svalů, pohled na laterodorsální stranu

6.2.2 Metoda používající Dijkstrův algoritmus

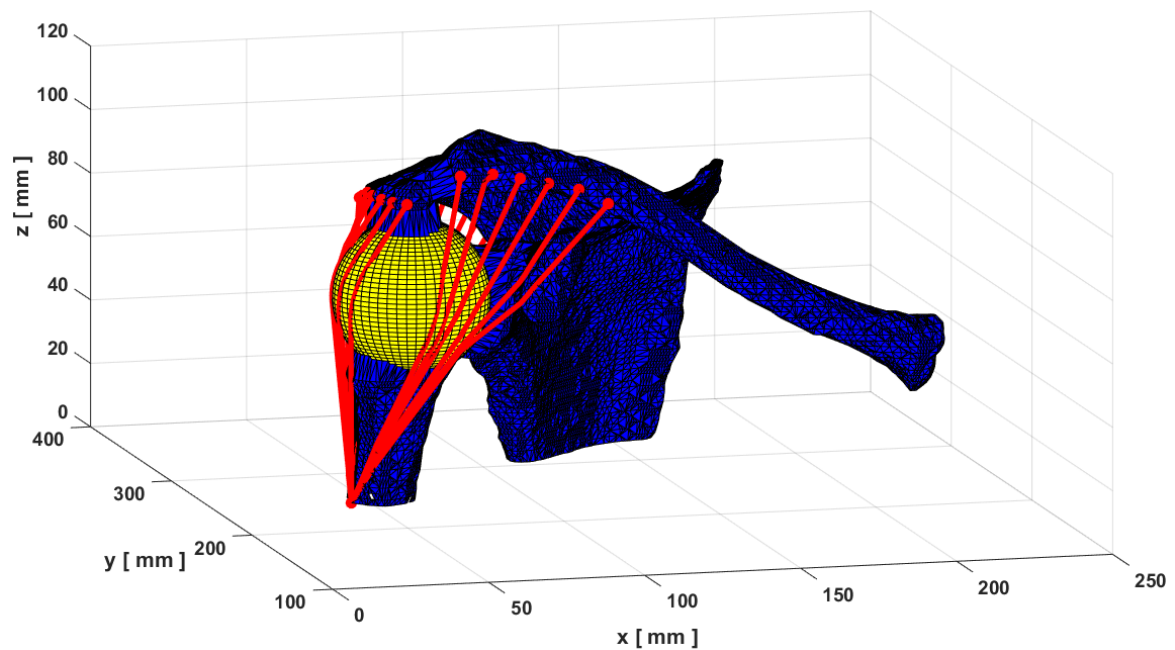


Obr. 47 – Znáznornění dráhy deltového svalu určené pomocí Dijkstrova algoritmu, pohled na lateroventrální stranu

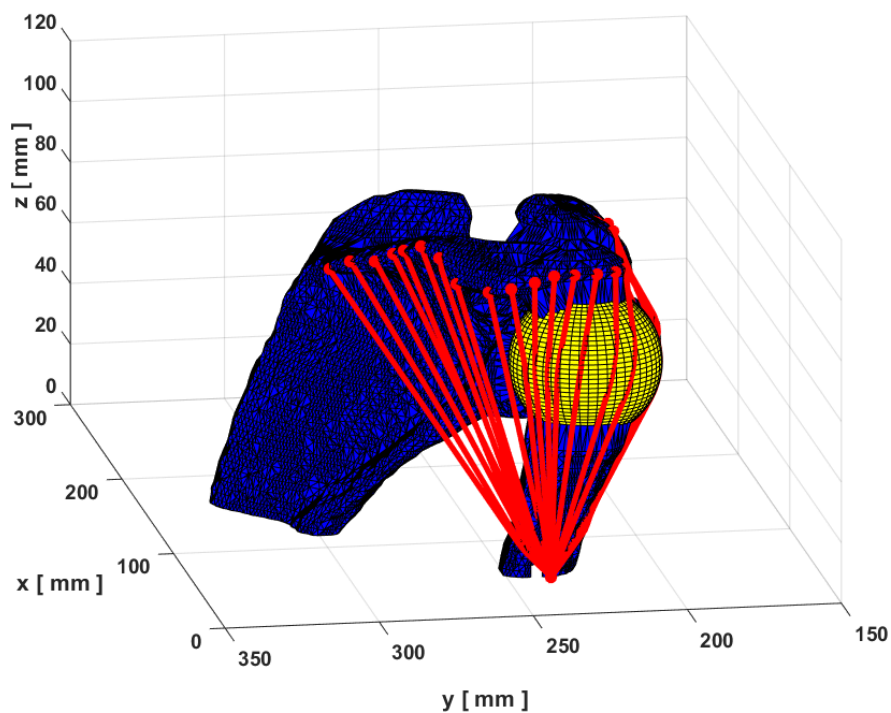


Obr. 48 – Znáznornění dráhy deltového svalu určené pomocí Dijkstrova algoritmu, pohled na laterodorsální stranu

6.2.3 Metoda obtáčení sférické plochy a pevných bodů

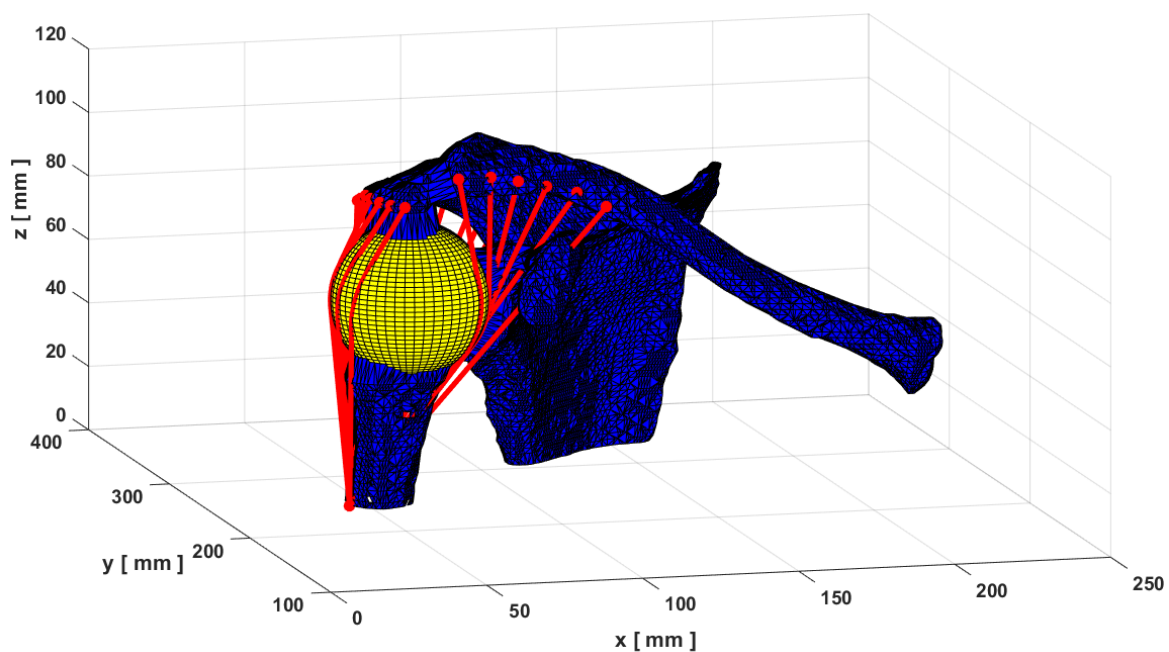


Obr. 49 – Znáznornění dráhy deltového svalu obtáčením kolem sférické plochy a definovaných pevných bodů, pohled na lateroventrální stranu

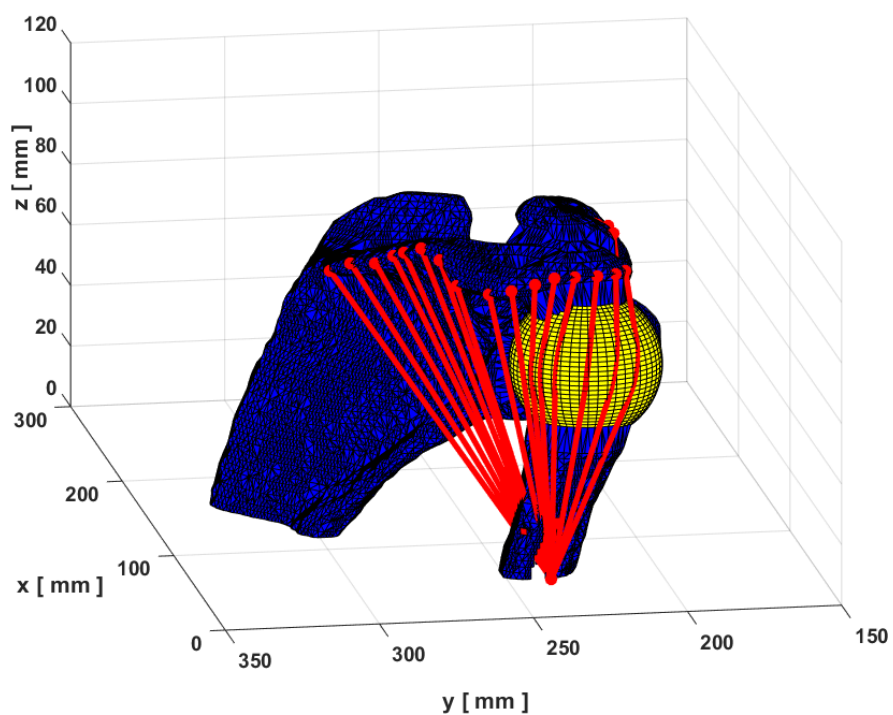


Obr. 50 – Znáznornění dráhy deltového svalu obtáčením kolem sférické plochy a definovaných pevných bodů, pohled na laterodorsální stranu

6.2.4 Metoda obtáčení sférické plochy

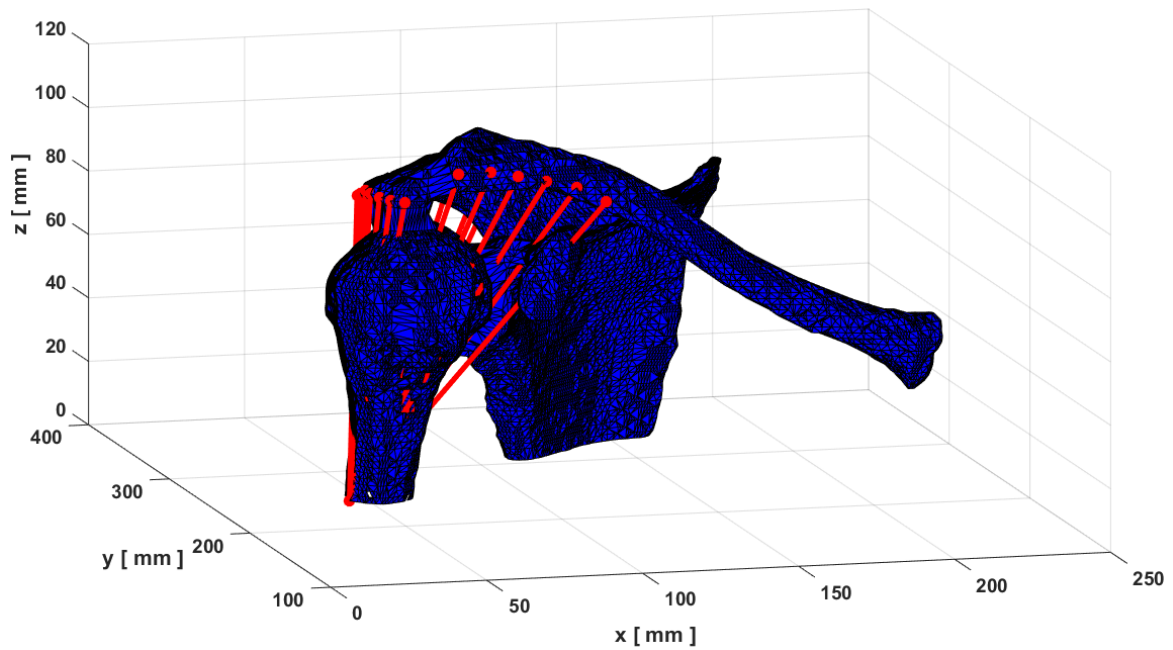


Obr. 51 – Znáznornění dráhy deltového svalu obtáčením kolem sférické plochy, pohled na lateroventrální stranu

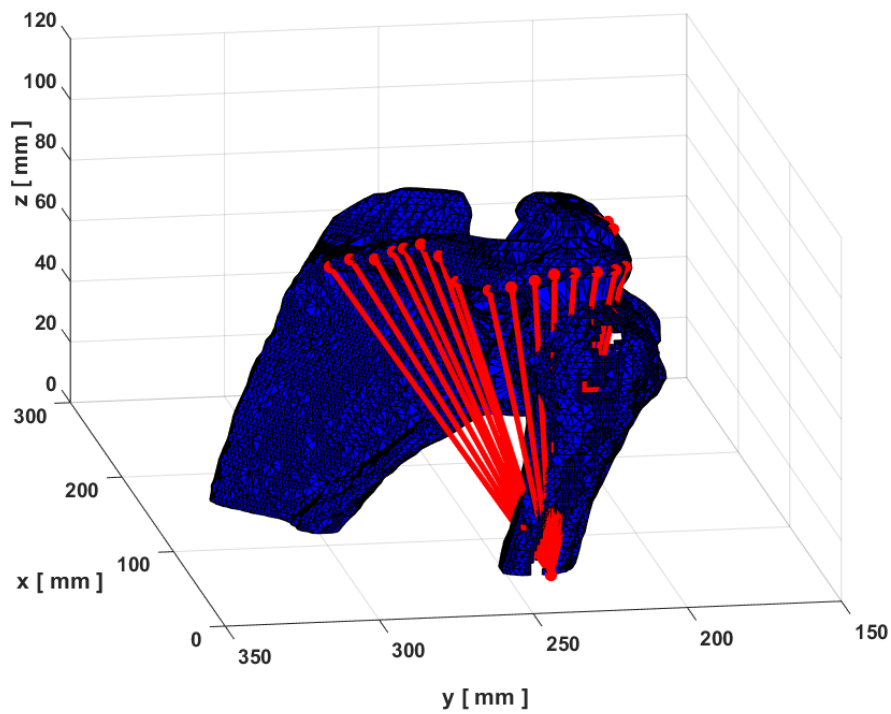


Obr. 52 – Znáznornění dráhy deltového svalu obtáčením kolem sférické plochy, pohled na laterodorsální stranu

6.2.5 Metoda používající lineární model svalu



Obr. 53 – Znáznění dráhy deltového svalu použitím lineárního modelu svalu, pohled na lateroventrální stranu



Obr. 54 – Znáznění dráhy deltového svalu použitím lineárního modelu svalu, pohled na laterodorsální stranu

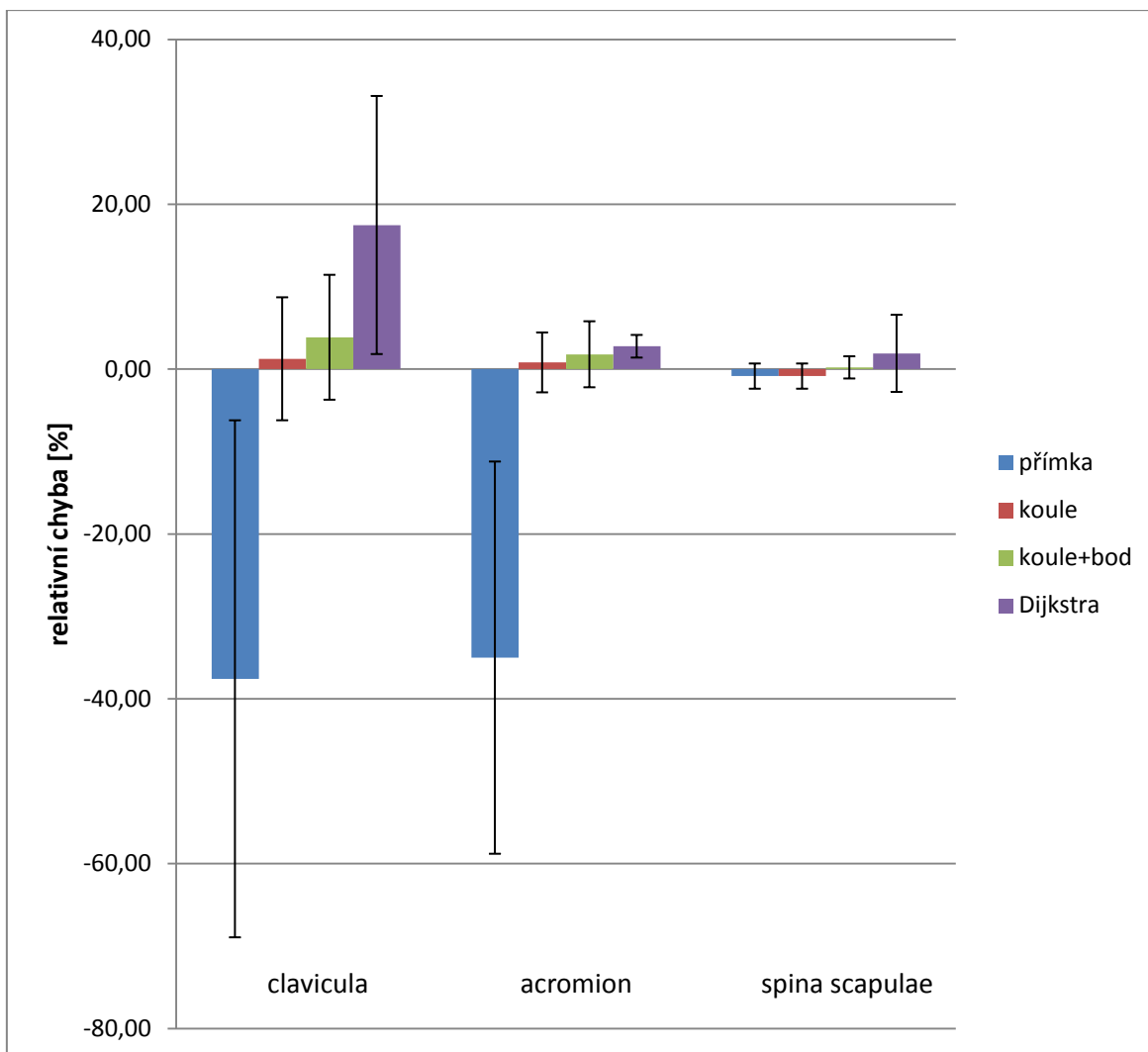
6.3 Ramena sil segmentů svalu

V následující tabulce jsou uvedena ramena sil segmentů svalu při použití různých metod výpočtu dráhy svalu.

segment svalu	typ algoritmu				
	lineární [mm]	sférická plocha [mm]	sférická plocha + pevné body [mm]	Dijkstra [mm]	MMP [mm]
1	28,8	28,8	28,7	25,3	26,7
2	24,0	24,6	25,3	34,1	27,9
3	19,1	24,6	25,2	34,1	25,8
4	13,8	24,6	25,8	34,1	24,5
5	8,4	24,6	26,0	23,0	22,8
6	3,0	24,6	24,6	26,5	22,9
7	9,0	24,6	24,6	26,5	26,3
8	10,7	24,6	24,6	25,7	24,8
9	12,2	24,6	24,8	25,0	24,7
10	14,8	24,6	25,5	24,8	24,2
11	17,6	24,6	25,2	24,9	24,0
12	21,0	24,6	24,7	24,6	23,9
13	25,0	25,0	24,9	24,8	23,6
14	28,0	28,0	27,9	28,7	28,1
15	31,9	31,9	32,5	34,7	32,5
16	33,2	33,2	34,3	36,3	33,0
17	35,9	35,9	36,8	38,9	37,0
18	39,7	39,7	40,9	42,2	41,1
19	42,1	42,1	41,5	40,6	41,5
20	45,6	45,6	45,4	46,3	45,4
21	49,2	49,2	49,6	46,9	49,6
22	52,3	52,3	52,5	50,6	52,5

Tab. 4 – Ramena sil segmentů deltového svalu při použití různých metod určení dráhy svalu

Na obrázku 55 je znázorněna relativní chyba ramen segmentů svalu při použití různých metod určení dráhy segmentů svalu. Relativní chyba je vztažena vzhledem k naší nové metodě určení dráhy svalu. Chyby ramen segmentů svalu jsou rozděleny do skupin podle toho, z jaké kosti případně její části segment svalu odstupuje.



Obr. 55 – Graf relativních chyb ramen sil segmentů deltového svalu, dosud používaných metod určení dráhy svalu, vzhledem k naší nové metodě určení dráhy svalu

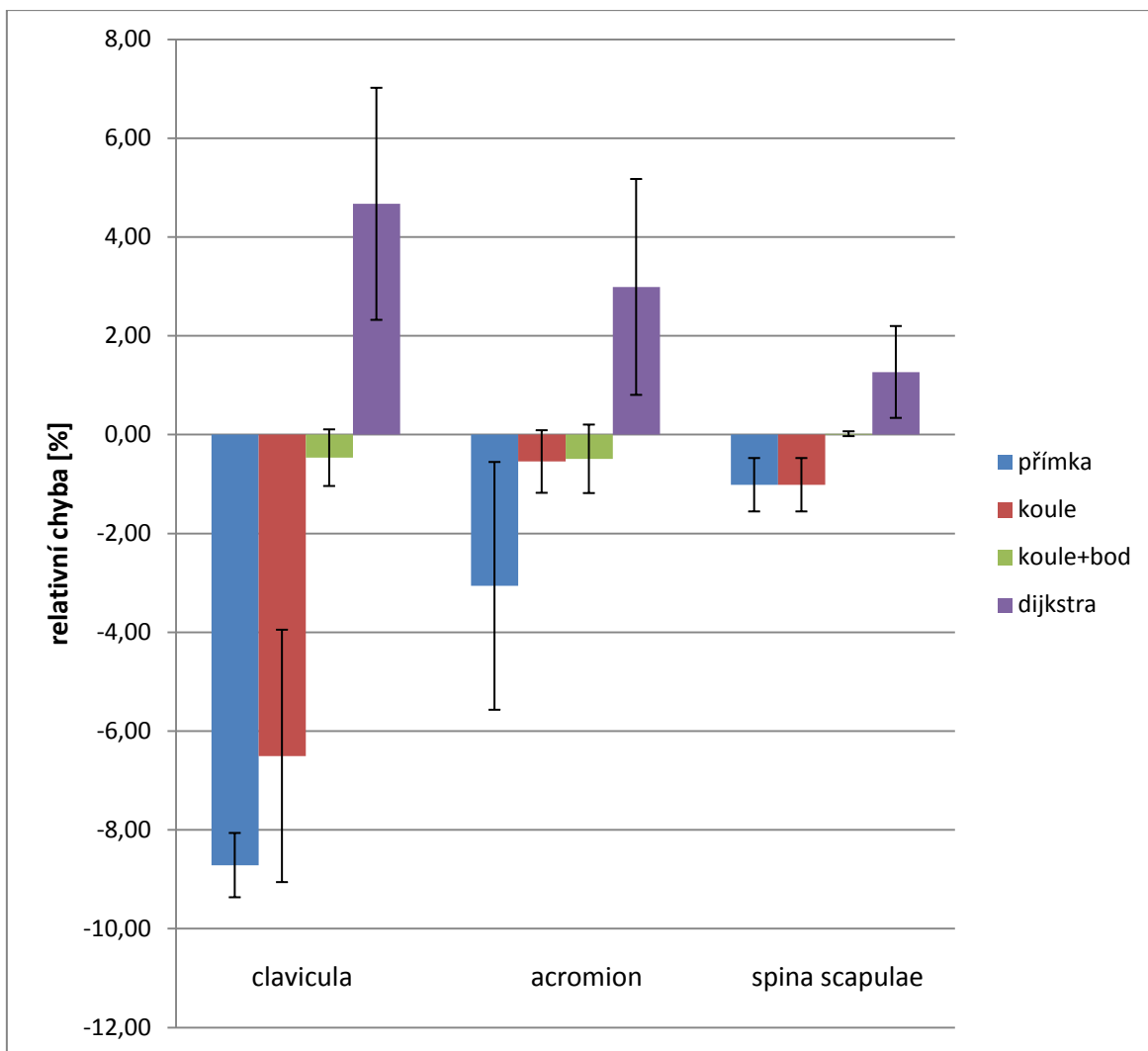
6.4 Délky segmentů svalů

V následující tabulce jsou uvedeny délky segmentů svalů při použití různých metod výpočtu dráhy segmentů svalů.

segment svalu	typ algoritmu				
	lineární [mm]	sférická plocha [mm]	sférická plocha + pevné body [mm]	Dijkstra [mm]	MMP [mm]
1	125,2	125,2	136,4	140,6	136,4
2	122,6	122,6	134,1	138,3	134,8
3	119,2	119,8	129,0	137,8	129,3
4	116,8	118,9	128,2	139,0	128,1
5	115,6	120,5	126,1	130,7	128,3
6	112,6	121,7	122,6	129,8	123,1
7	102,0	107,8	107,8	110,5	109,9
8	100,7	105,5	105,5	107,7	106,5
9	99,4	103,4	103,3	105,1	104,0
10	98,5	100,9	101,0	103,0	101,2
11	98,1	99,3	99,5	104,3	99,4
12	96,2	96,6	96,6	101,9	96,5
13	94,9	94,9	95,0	100,7	95,1
14	94,4	94,4	94,4	94,6	94,4
15	98,8	98,8	99,1	100,8	99,1
16	108,2	108,2	108,9	110,1	108,8
17	114,5	114,5	115,4	116,4	115,5
18	116,6	116,6	118,2	118,9	118,0
19	118,5	118,5	120,1	123,8	120,1
20	120,5	120,5	122,3	122,3	122,2
21	126,9	126,9	129,0	131,9	128,9
22	131,1	131,1	133,4	135,3	133,4

Tab. 5 – Délky segmentů deltového svalů při použití různých metod určení dráhy svalů

Na obrázku 56 je znázorněna relativní chyba délek segmentů svalů při použití různých metod určení dráhy segmentů svalů. Relativní chyba je vztažena vzhledem k naší nové metodě určení dráhy svalů. Chyby ramen segmentů svalů jsou rozděleny do skupin podle toho, z jaké kosti případně její části, segment svalů odstupuje.



Obr. 56 – Graf relativních chyb délek segmentů deltového svalu, dosud používaných metod určení dráhy svalu, vzhledem k naší nové metodě určení dráhy svalu

7 Diskuse

Jednou z hlavních úloh biomechaniky kosterně-svalového systému je určení zatížení jednotlivých kloubů. Proto, abychom byli schopni toto zatížení určit, potřebujeme znát ramena sil svalů, které na daný kloub působí. Z toho důvodu je důležité vytváření modelů pro výpočty obtáčení svalů kolem kloubů.

Protože přesnost určení jednotlivých sil a ramen sil svalů je podmíněna přesností definované dráhy svalu, je nutno vyvíjet přesnější metody pro její určení. Chybně určené rameno síly svalu vede k nesprávně definovanému momentu sil, který následně může negativně ovlivnit určení zatížení kloubu.

V této práci došlo k vývoji nové metody výpočtu dráhy pro obtáčení svalů. V porovnání s dosavadními metodami, můžeme vidět, že stávající metody vykazují podle jejich typu a také kosti, z které sval odstupuje, větší či menší nepřesnosti (Tab. 4 a 5).

Dijkstrův algoritmus je v současné době nejvíce používán a je považován za dostatečně přesný. My jsme ale zjistili, že při výpočtu některých svalů, tomu tak není (Obr. 55 a 56). Například pro deltový sval je tato metoda dostačující pouze pro výpočet ramen sil svalu a to jen pro část svalu, která odstupuje z akromionu a spina scapulae. Když ale určíme rameno sil svalu pro část, která začíná na klavikule, počítá Dijkstrův algoritmus se značnou chybou, která vzniká z důvodu hrubé sítě konvexní obálky v jedné části modelu a mimořádně jemné sítě v druhé části modelu. Dijkstrův algoritmus, který je závislý na kvalitě sítě, tak jako minimální dráhu vyhodnotí dráhu v řídké síti, i když je tato dráha anatomicky chybná. Hustá síť způsobuje vznik velkého počtu bodů obtáčení, které vedou na nehladkou křivku svalu. To je důvod proč Dijkstrův algoritmus vždy nadhodnocuje délku svalu (Tab. 5). Nejlépe je chybné určení dráhy svalu pomocí Dijkstrova algoritmu vidět při porovnání obrázků 45 a 47, kde je znázorněna část svalu, která odstupuje z klavikuly.

Výpočet dráhy deltového svalu použitím metody nahrazení kostní geometrie sférickou plochou a pevnými body obtáčení, nám poskytuje relativně přesné výsledky (Obr. 55 a 56). Grafy relativních chyb pro výpočet ramene sil svalu a délek svalu ukazují, že chyba této metody je přijatelná, což je vidět i při porovnání obrázků 45 a 46 s obrázky

49 a 50. Nevýhodou této metody je nutnost definice pevných bodů, které se určují z CT snímků.

Metoda, kdy nahrazujeme geometrii kostí sférickou plochou, pro některé části deltového svalu vykazuje značné chyby a naopak pro jiné části je velice přesná (Obr. 55 a 56). Největší chyba je, jako u Dijkstrova algoritmu, u části deltového svalu, která odstupuje z klíční kosti. Jelikož tento model nerespektuje geometrii kostí pro segmenty svalu začínající na klavikule, prochází sval kostmi a dokonce se obtáčí po spodní straně sférické plochy. Nejlépe je to vidět na obrázku 51.

Lineární model výpočtu dráhy svalu nám podle očekávání nabízí výsledky s největší chybou (Obr. 55 a 56). Tento algoritmus vždy podhodnocuje skutečnou délku svalu (Tab. 5) a předpovídá dráhu, která prochází kostí (Obr. 53 a 54).

Nedostatkem nově vytvořené metody určení dráhy svalu je nutnost ruční segmentace CT snímků, což je časově náročné. Ruční segmentaci snímků jsme zvolili pouze jako prostředek vývoje nového algoritmu, v budoucnu se předpokládá její nahrazení plně automatickou segmentací. Ručně se definovali také body odstupů a úponů svalu. Přesné určení polohy odstupu svalu se dá vyřešit využitím spojení metod CT a MR analýzy.

Celá metoda je vytvořena v programu Matlab. Pokud náš model chceme použít pro výpočet svalově-kosterních sil (OpenSim [12], AnyBody), je do budoucna vhodné naprogramovat metodu samostatně.

Model Desailly a kol., 2010 předpokládá, že celá dráha svalu leží v rovině. Výhoda našeho modelu je v tom, že počítá dráhu svalu v prostoru a v případě potřeby lze do našeho modelu podmínku roviny jednoduše dodat.

Momentálně je model určení dráhy svalu připraven a funkční. Předpokládáme, že model bude sloužit pro inverzní dynamický výpočet zatížení ramene a pro určení vlivu operačních postupů na stabilitu kloubu. Tyto studie budou prováděny ve spolupráci s oddělením ortopedie první lékařské fakulty Univerzity Karlovy v Praze a Fakultní nemocnice Motol.

8 Závěr

Hlavním výstupem této práce bylo, že jsme vyvinuli efektivní metodu pro výpočet dráhy svalu. Výhodou této metody je, že dráhu svalu počítá přímo na 3D geometrii kostí a nepotřebuje zadávat žádné dodatečné vstupy. Proto ji lze použít pro výpočet dráhy jakéhokoliv svalu a je použitelná přímo na konkrétního pacienta. Dalším důležitým zjištěním bylo, že naše metoda vykazuje méně artefaktů v určení dráhy svalu než doposud používané metody. Pro zavedení do klinické praxe by metoda mohla být dále vylepšena tím, že se plně automatizuje segmentace CT snímků a náš algoritmus bude implementován jako součást systému pro výpočet zatížení svalově-kosterního systému.

9 Bibliografie

- [1] SCHWERIN, Chuck.: *3 Lessons Sonostics Learned from Inbound Marketing*. Sonostics [online]. [cit. 2015-07-02], Dostupné z: <http://www.sonostics.com/4543-lessons-sonostics-learned-from-inbound-marketing-2>
- [2] INMAN, V.T.: *Functional aspects of the abductor muscles of the hip*. Journal of Bone and Joint Surgery 29, 1947, 607-619
- [3] DELP, S. L., LOAN, J. P., HOY, M. G., ZAJAC, F. E., TOPP, E. L., ROSEN, J. M.: *An interactive graphics-based model of the Loir extremity to study orthopaedic surgical procedures*. IEEE Transactions on Bomedical Engineering 37, 1990, 757-767
- [4] WINTERS, J.M., WOO, S.L-Y.: *Multiple Muscle Systems – Biomechanics and Movement Organization*. Springer-Verlag New York Inc., 1990, 129
- [5] *Lesson 3: Via-point muscles* [online]. AnyBody Technology [cit. 2015-06-30], Dostupné z: http://www.anybodytech.com/fileadmin/AnyBody/Docs/Tutorials/chap5_Muscle_modeling/lesson3.html#
- [6] MARSDEN, S. P., SVAILES, D. C., JOHNSON, G. R.: *Algorithms for exact multi-object muscle wrapping and application to the deltoid muscle wrapping around the humerus*. Journal of Engineering in Medicine, 2008, 1081-1095
- [7] GARNER, B. A., PANDY, M. G.: *The obstacle-set method for representing muscle paths in musculoskeletal models*. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Egeineering 3, 2000, 1-30
- [8] DELP, S. L., LOAN, J. P.: *A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement*. IEEE Computing in Science and Engineering 2, 2000, 46-55
- [9] VAN DER HELM, F. C. T., VEEGER, H. E. J., PRONK, H. G., VAN DER WOUDE, L. H. V., ROZENDAL, R. H.: *Geometry parameters for musculoskeletal modelling of the shoulder*. Journal of Biomechanics 25, 1992, 129-144

- [10] FERNANDEZ, J. W., HO, A., WALT, S., ANDERSON, I. A., HUNTER, P. J.: *Acerebral palsy assessment tool using anatomically based geometries and free-form deformation*. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology 4, 2005, 39-56
- [11] BLEMKER, S. S., DELP, S. L.: *Three-dimensional representation of komplex muscle architectures and geometries*. Annals of Biomedical Engineering 33, 2005, 661-673
- [12] DELP, S. L., ANDERSON, F. C., ARNOLD, A. S., LOAN, P., HABIB, A., JOHN, C. T., GUENDELMAN, E., THELEN, D. G.: *OpenSim: Open-source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2007
- [13] DESAILLY, Eric, SARDAIN, Philippe, KHOURI, Nejib, YEPREMIAN, Daniel, LACOUTURE, Patrick: *The convex wrapping algorithm: A method for identifying muscle paths using the underlying bone mesh*. Journal of Biomechanics 43, 2010, 2601-2607
- [14] ČIHÁK, R.: *Anatomie 1 - Druhé: upravené a doplněné vydání*. Grada Publishing, a.s., Praha, 2001.
- [15] *Interaktivní svalové tabulky* [online], Univerzita Karlova, Fakulta tělesné výchovy a sportu, obor fyzioterapie [cit. 2015-07-02], Dostupné z: <http://www.physiotherapy.cz/im/index.php?pg=i-list>
- [16] *Dilation (Morphology)* [online], Wikipedia – The Free Encyclopedia [cit. 2015-07-01], Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dilation_\(morphology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Dilation_(morphology))
- [17] EDELSBRUNNER, H. et al.: *On the shape of a set of points in the plane*. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 551-559
- [18] EDELSBRUNNER, H., MÜCKE, E. P.: *Three-dimensional Alpha Shapes* [online]. [cit. 2007-04-11]. Dostupné z: <ftp://ftp.ncsa.uiuc.edu/Visualization/Alpha-shape/alpha-documents/ref3-shapes-94.ps.Z>
- [19] FISCHER, K.: *Introduction to Alpha Shapes* [on-line]. [cit. 2007-04-11]. Dostupné z: <http://n.ethz.ch/student/fischerk/alphashapes/as.pdf>
- [20] NOVOTNÝ, Luděk.: *Aproximace a detekce kolize pomocí alfa-obalů*. Diplomová práce, Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, 2007

- [21] SLABÝ, R.: *Rekonstrukce ploch z množiny 3D bodů*. Diplomová práce, katedra počítačů ČVUT FEL v Praze, 2001
- [22] MITCHELL, J. S. B., MOUNT, D. M., PARADIMITRIOU, Ch. H.: *The discrete geodesic problem*. SIAM J. Comput, Vol. 16, No. 4, 1987, 647-668
- [23] FORIŠEK, Mišo: *Konvexné obaly*. [online]. [cit.2015-07-02]. Dostupné z:
[http://people.ksp.sk/~misof/skola/Zlozitost%20geometrickych%20algoritmov%20\(3ipg%204ipg\)/02%20Konvexne%20obaly.pdf](http://people.ksp.sk/~misof/skola/Zlozitost%20geometrickych%20algoritmov%20(3ipg%204ipg)/02%20Konvexne%20obaly.pdf)
- [24] SURYNKOVÁ, Petra: *Konvexní obal a množina* [online], Academic Website Petra Surinkova 2015. [cit. 2015-07-02]. Dostupné z:
http://surynkova.info/dokumenty/mff/PG/Prednasky/prednaska_8.pdf
- [25] HAMERNÍK, Michal: *Grafy a algoritmy pro hledání nejkratších cest*. Bakalářská práce, VUT v Brně, Fakulta podnikatelská, Ústav informatiky, 2009
- [26] *Graf_dijkstra*. Shortest Paths [online]. Heptargon. [cit. 2015-07-02]. Dostupné z:
<http://www.heptargon.de/algorithm/sssp.htm>
- [27] STEJSKAL, V., BŘEZINA, J., KNĚŽŮ, J.: *Mechanika I*, Skriptum FS ČVUT v Praze, Vydavatelství ČVUT, Praha 1998

Přílohy

Příloha 1 - zdrojové kódy

Výpis kódu pro výpočet obtáčení svalu a určení ramen a délek svalu

```
clear all; close all; clc;
global geodesic_library;
geodesic_library = 'geodesic_debug';          %"release" is faster and
"debug" does additional checks
rand('state', 0);                            %comment this statement if you
want to produce random mesh every time

%-----načtení a úprava matic bodů kostí-----
load('Humerus_P.mat')
h = 0;
H = [];
for h=1:59
    v = scirunnrrd.data(:, :, h);
    v1 = (v - v(:, [end, 1:end-1])) + (v - v(:, [2:end, 1])) + (v -
v([end, 1:end-1], :)) + (v - v([2:end, 1], :));
    hrana = (sign(v1)+1)/2.*abs(sign(v1));
    [i, j] = ind2sub([512, 512], find(hrana));
    H1 = [i, j, h*ones(size(i))];
    H = [H; H1];
end
Hi=ones(size(H));

load('Scapula_P.mat')
s = 0;
SS = [];
for s=1:59
    w = scirunnrrd.data(:, :, s);
    w1 = (w - w(:, [end, 1:end-1])) + (w - w(:, [2:end, 1])) + (w -
w([end, 1:end-1], :)) + (w - w([2:end, 1], :));
    hrana1 = (sign(w1)+1)/2.*abs(sign(w1));
    [m, n] = ind2sub([512, 512], find(hrana1));
    S1 = [m, n, s*ones(size(m))];
    SS = [SS; S1];
end
Si=2*ones(size(SS));

load('Clavicula_P.mat')
c = 0;
C = [];
for c=1:59
    u = scirunnrrd.data(:, :, c);
    u1 = (u - u(:, [end, 1:end-1])) + (u - u(:, [2:end, 1])) + (u -
u([end, 1:end-1], :)) + (u - u([2:end, 1], :));
    hrana2 = (sign(u1)+1)/2.*abs(sign(u1));
    [r, t] = ind2sub([512, 512], find(hrana2));
    C1 = [r, t, c*ones(size(r))];
    C = [C; C1];
end
Ci=3*ones(size(C));
```

```

SUM = [H;SS;C]; %spojení matic bodů kostí

%-----zadání odstupů a úponů svalů-----
odstup = [126 225 49];
upon = [45 257 1];
SUM = [odstup;SUM;upon];

%-----převedení souřadnicového systému-----
SUM = kron(ones(length(SUM),1), [0.923,0.923,2]).*SUM;

SUMi=[3 3 3;Hi;Si;Ci;1 1 1];

%-----vytvoření sítě-----
[V,S] = alphavol(SUM,40);
[V0,S0] = alphavol(SUM,5);

%-----geodesic algorithm-----
N = length(SUM); %number of points in a mesh
vertices = [SUM(:,1),SUM(:,2),SUM(:,3)]; %create "noisy sphere" mesh;
"vertices" contains 3D vertex coordinates; "faces" contains vertex id's
for every triangle
faces = S.bnd;

mesh = geodesic_new_mesh(vertices,faces); %initilize new mesh
algorithm = geodesic_new_algorithm(mesh, 'exact'); %initialize new
geodesic algorithm

vertex_id = 1; %create a single source at vertex #1
source_points =
{geodesic_create_surface_point('vertex',vertex_id,vertices(vertex_id,:))}
;

geodesic_propagate(algorithm, source_points); %propagation stage of the
algorithm (the most time-consuming)

vertex_id = N; %create a single destination at vertex #N
destination =
geodesic_create_surface_point('vertex',vertex_id,vertices(vertex_id,:));
path = geodesic_trace_back(algorithm, destination); %find a shortest
path from source to destination

distances = zeros(N,1); %find distances to all vertices of the mesh
(actual pathes are not computed)

[source_id, distances] = geodesic_distance_and_source(algorithm);
%find distances to all vertices of the mesh; in this example we have a
single source, so source_id is always equal to 1

geodesic_delete; %delete all meshes and algorithms

%-----vykreslení-----
hold off;
colormap('default');
trisurf(S0.bnd,SUM(:,1),SUM(:,2),SUM(:,3),'FaceColor','blue','FaceAlpha',
1) %plot the mesh
daspect([1 1 1]);

hold on;
plot3(source_points{1}.x, source_points{1}.y, source_points{1}.z, 'or',
'MarkerSize',3); %plot sources

```

```

plot3(destination.x, destination.y, destination.z, 'ok', 'MarkerSize',3);
%plot destination

[x,y,z] = extract_coordinates_from_path(path);    %prepare path data for
plotting
plot3(x,y,z, 'r-', 'LineWidth',2);    %plot path
title('Exaktní dráha svalu m. deltoideus, exact algoritmus, vlákno 1');
xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]'); zlabel('z [ mm ]');

figure
colormap('default');
trisurf(S0.bnd,SUM(:,1),SUM(:,2),SUM(:,3), 'FaceColor', 'blue', 'FaceAlpha',
1)
daspect([1 1 1]);
hold on
h = plot3(x,y,z, 'r-', 'LineWidth',2);
title('Změna dráhy svalu m. deltoideus, exact algoritmus, vlákno 1');
xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]'); zlabel('z [ mm ]');

%-----vzdálenost geodetické dráhy od jejího obrazu-----
sSUM = size(SUM);
for i=1:length(x)
    rozdil = SUM - kron([x(i),y(i),z(i)],ones(sSUM(1),1));
    rozdilV = sqrt(sum(rozdil.^2,2));
    indxMin = find(rozdilV==min(rozdilV));
    indxMin = max(indxMin);
    rozdilIdx(i) = indxMin;
    rozdilVM(i) = rozdilV(indxMin);
    rozdilM(i,:) = rozdil(indxMin,:);
end
figure(1)
plot3(SUM(rozdilIdx,1),SUM(rozdilIdx,2),SUM(rozdilIdx,3), 'r-
', 'LineWidth',2);
rozdili=SUMi(rozdilIdx,1);

%-----určení roviny pomocí optimalizace-----
P = [x,y,z];
E1 = P(end,:) - P(1,:);
e1 = E1/norm(E1);

e21 = -1;
e22 = 0;
[x,fval,exitflag,output] = fminsearch(@(x)
findSumR3(x,P,e1,P(1,:)), [e21,e22])

r = findR(x,P,e1,P(1,:))

%-----vykreslení 2-----
figure
plot(r(:,1),rozdilVM, '*')
grid on; title('Vzdálenost dráhy svalu m. deltoideus od kosti, exact
algoritmus, vlákno 1'); xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]');

figure
plot(r(:,1),r(:,2), 'r-')
grid on; title('Dráha svalu m. deltoideus, exact algoritmus, vlákno 1');
xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]');

%-----odstanění bodů z geodetické dráhy-----
rupr = r;
rupr(find(rozdilVM>1),2) = 1e-3*ones(size(rupr(find(rozdilVM>1),2)));

```

```

rupr(find(rupr(:,2)<0),2) = 1e-3*ones(size(rupr(find(rupr(:,2)<0),2)));
rupr1 = rupr(:,1);
rupr2 = rupr(:,2);

%-----konvexní obálka-----
k = convhull(rupr1,rupr2);

%-----vykreslení 3-----
figure
plot(rupr1(k),rupr2(k),'y-')
grid on; title('Konvexní obálka upravené dráhy svalu m. deltoideus, exact
algorithmus, vlákno 1'); xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]');

figure
hold on
plot(r(:,1),rozdilVM,'*')
plot(r(:,1),r(:,2),'r-')
plot(prupr1,prupr2,'-g')
grid on; title('Úprava dráhy svalu m. deltoideus, exact algorithmus,
vlákno 1'); xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]');
legend('vzdálenost od kosti','exaktní dráha svalu','upravená dráha
svalu');

figure
hold on
plot(prupr1,prupr2,'-g')
plot(rupr1(k),rupr2(k),'y-')
grid on; title('Úprava dráhy svalu m. deltoideus, exact algorithmus,
vlákno 1'); xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]');
legend('upravená dráha svalu','konvexní obálka upravené dráhy svalu');

figure
hold on
plot(r(:,1),rozdilVM,'*')
plot(r(:,1),r(:,2),'r-')
plot(prupr1,prupr2,'-g')
plot(rupr1(k),rupr2(k),'y-')
grid on; title('Úprava dráhy svalu m. deltoideus, exact algorithmus,
vlákno 1'); xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]');
legend('vzdálenost od kosti','exaktní dráha svalu','upravená dráha
svalu','konvexní obálka upravené dráhy svalu');

figure
colormap('default');
trisurf(S0.bnd,SUM(:,1),SUM(:,2),SUM(:,3),'FaceColor','blue','FaceAlpha',
1)
daspect([1 1 1]);
hold on
plot3(source_points{1}.x, source_points{1}.y, source_points{1}.z, '.r',
'MarkerSize',25);
plot3(P(k(2:end),1),P(k(2:end),2),P(k(2:end),3),'-r','LineWidth',3);
title('Výsledná dráha svalu m. deltoideus, exaktní algorithmus, vlákno
1'); xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]'); zlabel('z [ mm ]');

figure(2)
h2 = plot3(P(k(2:end),1),P(k(2:end),2),P(k(2:end),3),'y-','LineWidth',2);
legend([h,h2],'exaktní dráha svalu','finální dráha svalu');

figure
colormap('default');

```



```

trisurf(S0.bnd,SUM(:,1),SUM(:,2),SUM(:,3),'FaceColor','blue','FaceAlpha',
1)
daspect([1 1 1]);
hold on
prm = [SUM(1,:);SUM(end,:)];
plot3(prm(:,1),prm(:,2),prm(:,3),'-m','LineWidth',4)
plot3(prm(:,1),prm(:,2),prm(:,3),'m','MarkerSize',30)
title('Přímá dráha svalu m. deltoideus, vlákno 1'); xlabel('x [ mm ]');
ylabel('y [ mm ]'); zlabel('z [ mm ]');

```

Výpis kódu pro určení ramena síly svalu a délky svalu

- Pokračování předchozího kódu

```

draha = [P(k(2:end),1),P(k(2:end),2),P(k(2:end),3)];
kosti = rozdili(k(2:end));

%ramena dráhy svalu
rez = [draha(find((abs(kosti(1:end-1) - kosti(2:end)) .*
kosti(2:end))==1),1) draha(find((abs(kosti(1:end-1) - kosti(2:end)) .*
kosti(2:end))==1),2) draha(find((abs(kosti(1:end-1) - kosti(2:end)) .*
kosti(2:end))==1),3)];
reu = [draha(find((abs(kosti(1:end-1) - kosti(2:end)) .*
kosti(2:end))+1),1) draha(find((abs(kosti(1:end-1) - kosti(2:end)) .*
kosti(2:end))+1),2) draha(find((abs(kosti(1:end-1) - kosti(2:end)) .*
kosti(2:end))+1),3)];
ree = (reu - rez)/norm(reu - rez);
ret = rez - rs;
ReR = norm(cross(ret,ree))

%délka dráhy svalu
Le = 0;
for l=1:length(draha)-1
    Le1 = norm(draha(l+1,:)-draha(l,:));
    Le = Le + Le1;
end
Le

```

Výpis kódu pro určení středu rotace kloubu

```

clear all; close all; clc;
%-----načtení a úprava matice bodů humeru-----
load('Humerus_P.mat')
H = [];
for h=1:59
    v = scirunnrrd.data(:, :, h);
    v1 = (v - v(:, [end, 1:end-1])) + (v - v(:, [2:end, 1])) + (v -
v([end, 1:end-1], :)) + (v - v([2:end, 1], :));
    hrana = (sign(v1)+1)/2.*abs(sign(v1));
    [i,j] = ind2sub([512,512],find(hrana));
    H1 = [i,j,h*ones(size(i))];
    H = [H;H1];
end

H = kron(ones(length(H),1),[0.923,0.923,2]).*H; %převod souřadného
systému

```

```
H(find(H(:,3)<45), :) = []; %odstranění bodů které netvoří hlavici humeru
P=H;

%--optimalizace velikosti a polohy koule aproximované na hlavici humeru--
koule = @(x) sum((P(:,1)-x(1)).^2+(P(:,2)-x(2)).^2+(P(:,3)-x(3)).^2-
x(4)^2); %optimalizační kritérium

[x,fval,exitflag] =
lsqnonlin(koule, [mean(P(:,1)),mean(P(:,2)),mean(P(:,3)),20])

[V0,S0] = alphavol(H,5);

%-----vykreslení-----
hold off;
colormap('default');
trisurf(S0.bnd,H(:,1),H(:,2),H(:,3),'FaceColor','blue','FaceAlpha',1);
daspect([1 1 1]); xlabel('x [ mm ]'); ylabel('y [ mm ]'); zlabel('z [ mm
]');
hold on
[X,Y,Z] = sphere(50);
mesh(X*x(4)+x(1),Y*x(4)+x(2),Z*x(4)+x(3),'FaceColor','red','FaceAlpha',0.
5)

SUMK = [X(:)*x(4)+x(1),Y(:)*x(4)+x(2),Z(:)*x(4)+x(3)];
```