

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**MARTIN
KVĚTOŇ**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Geometrické charakteristiky svalů horní končetiny

Geometric characteristics of upper limb muscles

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Votava

Martin Květoň

Praha, srpen 2018

Anotační list

Jméno autora:	Martin Květoň
Název BP:	Geometrické charakteristiky svalů horní končetiny
Anglický název:	Geometric characteristics of upper limb muscles
Akademický rok:	2017/ 2018
Obor studia:	Teoretický základ strojího inženýrství
Ústav/ odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí BP:	Ing. Jan Votava
Bibliografické údaje:	Počet stran: 47 Počet obrázků: 24 Počet tabulek: 2
Klíčová slova:	Fyziologický průřez svalu; 3D model; ramenní kloub; struktura svalu.
Keywords:	Physiological cross - section area of muscle; 3D model; shoulder joint; muscle architecture.
Anotace:	Tato práce se zabývá určením fyziologických průřezů svalů horní končetiny s využitím programu pro vytvoření 3D modelu svalu. A zároveň nalezením určité metody, jak průřezy spočítat.
Abstract:	This thesis deals with measuring of physiological cross - section areas of upper limb muscles using of a program for creating 3D model of muscle. At the same time to find a method, how to calculate that cross - sections.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Geometrické charakteristiky svalů horní končetiny vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů, které uvádím v seznamu bibliografických odkazů.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 17.08.2018

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Votavovi za pomoc při vedení bakalářské práce, cenné rady a poskytnutí kvalitních materiálů. Mé poděkování patří také fyzioterapeutce Bc. Gabriele Skřivánkové za pomoc při zpracování svalů. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat své rodině a všem blízkým za podporu při celém studiu a při psaní bakalářské práce.

Abstrakt

Práce se zabývá měřením fyziologických průřezů svalů horní končetiny. Konkrétně šesti svaly, které se podílí na pohybu ramene.

Cílem je určení fyziologických průřezu s využitím 3D modelovacího programu. A z vytvořených 3D modelů svalů naměření správných parametrů k vypočtení průřezu. Jako program byl zvolen Seg3D.

Práce má tři hlavní části. Anatomická část slouží k vysvětlení základních pojmů, které slouží jako základní kameny pro práci s kryogenními snímky. Druhou částí je vysvětlena funkce svalu, od jeho struktury až po vnitřní stavbu. Třetí, experimentální část se věnuje postupu při modelaci v Seg3D a výpočtům.

Z vypočtených fyziologických průřezů má největší sval deltový.

Abstract

This thesis deals with measuring of physiological cross - section areas of upper limb muscles. Specifically, 6 muscles involved in the shoulder movement.

The aim is to calculate physiological cross - section area using a 3D modeling program. Measure right parameters to calculate cross - section area from the created 3D models. Seg3D was chosen as a program.

The thesis has three main parts. There is the anatomical part, which is necessary for explaining basic concepts for working with cryogenic images. Second part explains muscle function, from its muscle architecture to the inner structure. The third, experimental part deals with the process of modeling in Seg3D and calculations.

The greatest cross - section area has deltoid muscle.

Obsah

1	Úvod	1
2	Anatomická část.....	2
2.1	Kloub (articulatio synovialis).....	2
2.2	Svaly.....	5
2.3	Kosti	12
2.4	Pohyby ramenního kloubu.....	15
3	Funkce svalu.....	17
3.1	Struktura svalu	17
3.2	Textura vláken	20
3.3	Strukturální charakteristiky sval	22
3.3.1	Anatomický průřez svalu - anatomical cross-section area (ACSA)	24
3.3.2	Fyziologický průřez svalu - physiological cross-section area (PCSA)	24
4	Cíl práce	26
5	Experimentální část.....	27
5.1	The Visible Human Project - snímky	27
5.2	3D modelace svalů.....	27
5.3	Výpočet průřezu	33
6	Výsledky měření.....	38
7	Diskuze.....	39
8	Závěr	42
9	Seznam použité literatury	43
10	Seznam použitých obrázků.....	46
11	Seznamu použitých tabulek.....	47

1 ÚVOD

Rameno je nepohyblivějším kloubem v těle a veškeré jeho pohyby zajišťují svaly. Kosterní svaly jsou v biomechanice zajímavou živou tkání schopnou přeměnit chemickou energii na energii mechanickou. Proto je důležité vědět, jak souvisí jejich pohyb s geometrickými vlastnostmi a strukturou vláken. Tyto vlastnosti jsou nezbytné při stanovení celkové síly, vyvíjenou vlákny.

Práce se zabývá konkrétně průřezy svalu a je rozdělena do 3 hlavních částí. Anatomická část slouží jako úplný základ a definice základních pojmů horní končetiny s níž související svaly, kosti a pohyby. Druhá část je zaměřena na strukturu svalových vláken od jejich rozložení ve svalu až po funkci. A ve třetí části je popsána metoda vytvoření svalu do 3D modelu z něhož se následně určí veličiny a parametry potřebné ke spočtení průřezů.

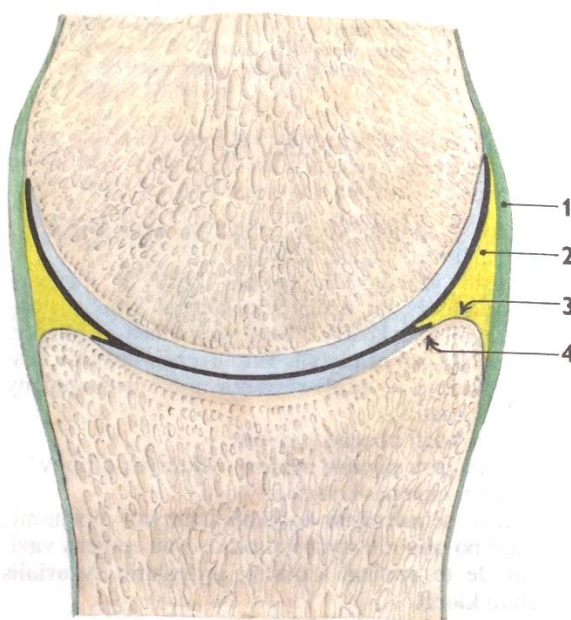
2 ANATOMICKÁ ČÁST

V této části práce jde o vysvětlení základních pojmů, které s ramenním kloubem a jeho anatomii souvisejí. Anatomická část byla zpracována dle Čihák, 2001.

2.1 Kloub (articulatio synovialis)

Senoviální kloub lze definovat jako dotykové spojení dvou a více kostí, jejichž kontaktní plochy jsou povlečeny chrupavkou uvnitř vazivového pouzdra. Podélný řez kloubem je znázorněn na Obr. 1. Artikulující kosti jsou spojeny kloubní dutinou (štěrbinou), která je vystlána synoviální membránou. Konce artikulujících kostí jsou spojeny vazivovým kloubním pouzdrem.

Je nutné rozlišit kloubní hlavici a kloubní jamku. Z geometrického hlediska jsou kloubní jamky konkávní, popřípadě ploché a hlavice bývají většinou konvexní.



94. PODÉLNÝ ŘEZ KLOUBEM (obecné schéma)
1/ pouzdro kloubní
2/ synoviální vrstva
3/ přechodná zóna synoviální membrány (na kosti a přes okraj kloubní jamky)
4/ okraj chrupavky kloubní jamky. Chrupavka kloubních ploch modře, štěrbinu kloubní černě

Obrázek 1- Schematicky znázorněný podélný řez [1]

Rozdělní kloubů

Dle počtu složek:

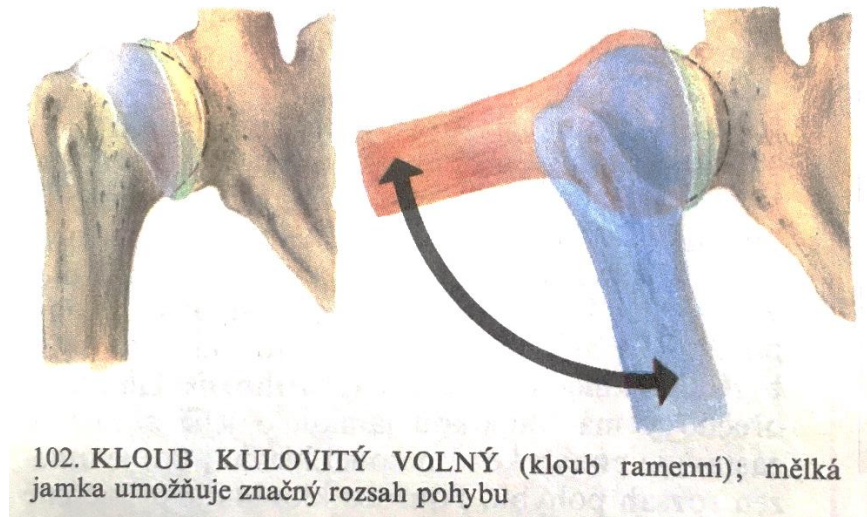
- Kloub jednoduchý (*articulatio simplices*) - tvořen pouze dvěma kostmi.
- Klouby složité (*articulatio compositae*) - tvořen alespoň třemi kostmi (kloub loketní) nebo se mohou stýkat pouze dvě kosti, avšak mezi nimi je vložena nitrokloubní destička (kloub čelistní s diskem, kloub kolenní s menisky).

Dle tvaru styčných ploch:

- Kloub kulovitý (*articulatio sphaeroidea*)
- Kloub elipsovité (*articulatio ellipsoidea*)
- Kloub sedlový (*articulatio sellaris*)
- Kloub válcový (*articulatio cylindroidea*)
- Kloub kladkový (*articulatio trochlearis*)
- Kloub plochý (*articulatio plana*)
- Kloub tuhý (*amphiarthrosis*)

Ramenní kloub (articulatio humeri)

Ramenní kloub je kloub volný, kulovitý. Jedná se o nejpohyblivější kloub v lidském těle a zároveň o největší kloub horní končetiny.



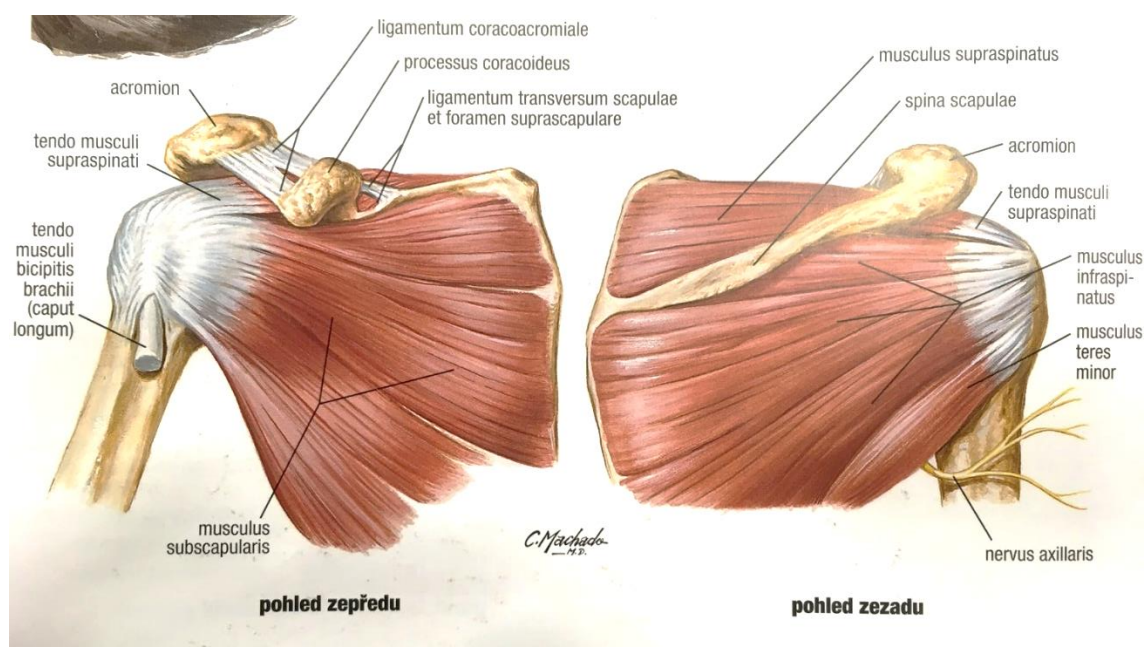
Obrázek 2- Kloub kulovitý volný - ramenní kloub [1]

Kloubní plochy tvoří hlavice (caput humeri), jež je rozsahem větší než jamka ramenního kloubu (cavitas glenoidalis scapulae). Ta je rozšířená a prohloubená chrupavčítým lemem (labrum glenoidale). Kloubní pouzdro začíná po obvodu jamky a upíná se na anatomický krček (collum anatomicum humeri).

2.2 Svaly

Pro aktivní pohyb kloubu jsou nezbytné svaly. Pohyblivost a stabilizaci ramene zajišťuje přibližně 30 svalů. Ke svalům horní končetiny patří z vývojového hlediska svaly spinohumerální a svaly thorakohumerální, které se svou funkcí vztahují k pletenci horní končetiny a k ramennímu kloubu. Mezi tyto svaly patří m. trapezius, m. latissimus dorsi, m. rhomboidei, m. levator scapulae, m. pectoralis major, m. pectoralis minor, m. subclavius a m. serratus anterior.

Svaly ramenní a lopatkové zahrnují velký deltový sval, který obklopuje ramenní kloub a dále svaly přicházející od lopatky. Funkce všech těchto svalů se vztahuje ke kloubu ramennímu a doplňuje funkce spinohumerálních a thorakohumerálních svalů. Část ramenních svalů s popisky je na Obr. 3.



Obrázek 3 - Svaly ramenního kloubu [12]

Sval deltový - musculus deltoideus

Funkce: předpažení, upažování. Celý sval klidovým napětím udržuje hlavici kloubu ramenního v jamce;

Začátek svalů: zevní dvě třetiny lopatkového hřebene (spina scapulae), nadpažek (acromion), zevní konec klíční kosti (clavikula);

Úpon svalů: tuberositas deltoidea humeri, rozlišujeme klavikulární, akromiální a spinální část svalů;

Typ svalů: mnohozpeřený (multipennate).



Obrázek 4 - Sval deltový [3]

Sval nadhřebenový - musculus supraspinatus

Funkce: abdukce paže, zevní rotace;

Začátek svalů: fossa supraspinata;

Úpon svalů: tuberculum majus humeri;

Typ svalů: zpeřený (pennate).



Obrázek 5 - Sval nadhřebenový [3]

Sval podhřebenový - musculus infrapsoinatus

Funkce: zevní rotace paže, abdukce paže;

Začátek svalů: fossa infrapsoinata;

Úpon svalů: tuberculum majus humeri;

Typ svalů: zpeřený (pennate).



Obrázek 6 - Sval podhřebenový [3]

Malý sval oblý - musculus teres minor

Funkce: zevní rotace paže, dorsální flexe paže, addukce paže;

Začátek svalů: scapula (střed laterálního okraje);

Úpon svalů: tuberculum majus humeri;

Typ svalů: zpeřený (pennate).



Obrázek 7 - Malý sval oblý [3]

Velký sval oblý - musculus teres major

Funkce: addukce paže, vnitřní rotace paže;

Začátek svalů: angulus inferior scapulae;

Úpon svalů: crista tuberculi minoris humeri;

Typ svalů: zpeřený (pennate).



Obrázek 8 - Velký sval oblý [3]

Sval podlopatkový - musculus subscapularis

Funkce: vnitřní rotace paže, dorsální flexe paže, addukce paže;

Začátek svalů: scapula (facies costalis);

Úpon svalů: tuberculum minus humeri;

Typ svalů: mnohozpeřený (multipennate).



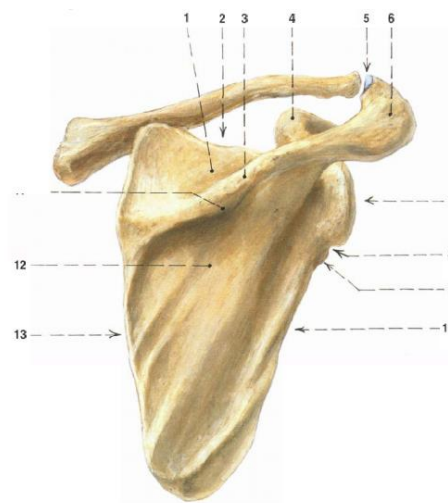
Obrázek 9 - Sval podlopatkový [3]

2.3 Kostí

Kosti jsou pevné, tvrdé a v jistém rozmezí i pružné orgány žlutobílé barvy. Jejich soubor, kostra - skeleton, spolu s připojenými chrupavkami a s kloubním a vazivovými spoji kostí vytváří pasivní pohybový aparát. Kostra horních končetin se skládá z pletence horní končetiny a kostry volné končetiny. Konkrétně kost pažní (humerus), kost klíční (clavicula), lopatka (scapula).

Lopatka (Scapula)

Lopatka je plochá kost tvaru trojúhelníku, tvar je možno vidět na Obr. 10. Tvoří je okraj margo superior, medialis, lateralis. Její okraje se stýkají v úhlech angulus superior, inferior a lateralis. Lopatka má přední a zadní plochu. Přední plocha (fascies costalis) je k žebřům přivrácená plocha, její tvar je mírně konkávní. Zadní plocha (fascies dorsalis) je rozdělná hřebenem, její tvar je lehce konvexní. Lopatka je umístěna ve svalstvu zad ve výši 2. až 7. žebra a skloubena s kostí klíční.



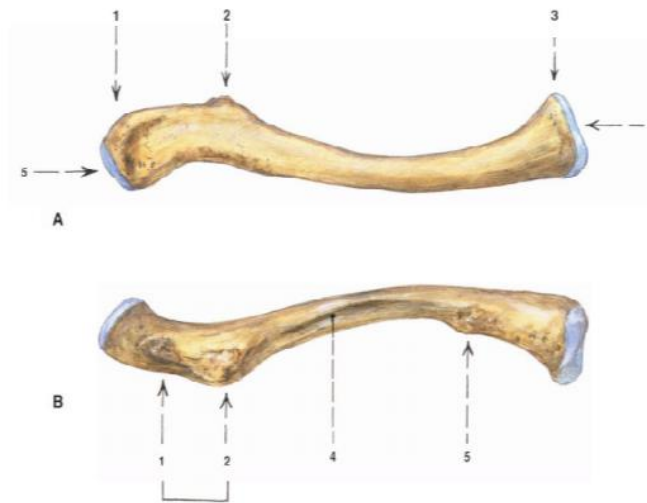
Obr. 241. PLETENEC HORNÍ KONČETINY; scapula a clavicula;
pravá strana; pohled zezadu
1 fossa supraspinata
2 margo superior
3 spina scapulae
4 processus coracoideus
5 facies articularis acromii
6 acromion
7 okraj cavitas glenoidalis na angulus lateralis
8 collum scapulae
9 tuberculum infraglenoidale
10 margo lateralis
11 tuberculum deltoideum (tuberositas triangularis spineae)
12 fossa infraspinata
13 margo medialis

Obrázek 10 - Pletenec horní končetiny; scapula a clavicula [1]

Kost klíční (clavicula)

Klíční kost je štíhlá kost, dlouhá 12 - 16 cm, transversálně spojující kost s hrudní kost s nadpažkem (acromion). Lopatku lze popsat při pohledu na Obr. 11 vnitřním, silnějším, hrudním koncem (extremitas sternalis) a vnějším nadpažkovým koncem (extremitas acromialis). Spodní stranu tvoří tuberositas coracoidea, impressio ligamenti costoclavicularis a sulcus subclavius.

Klíční kost přenáší na hrudní kost 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.



Obr. 244. CLAVICULA; pravá strana
A pohled shora
1 extremitas acromialis
2 tuberculum conoideum
3 extremitas sternalis
4 facies articularis sternalis
5 facies articularis acromialis
B pohled zdola
1 linea trapezoidica
2 tuberculum conoideum
3 tuberositas coracoidea
4 sulcus musculi subclavi
5 impressio ligamenti costoclavicularis

Obrázek 11- Clavicula [1]

Kost pažní (humerus)

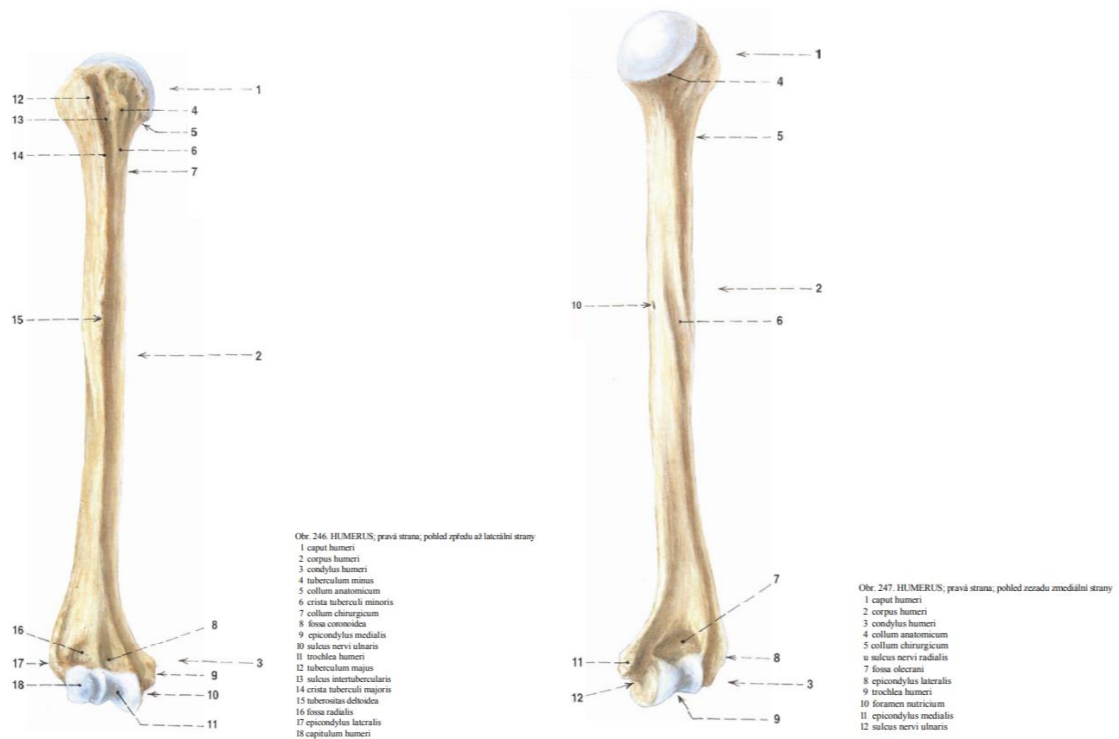
Na humeru je nutné rozlišit:

- **Hlavici pažní kosti** (caput humeri) - Caput humeri nese kulovitou styčnou plochu, která je hlavicí ramenního kloubu, viz Obr. 12. Osa hlavice je nakloněná tak, že s osou těla kosti svírá úhel 130°. Hlavice odpovídá jedné třetině povrchu koule. Při obvodu hlavice se upíná kloubní pouzdro. Anatomický krček (collum anatomicum) - místo úponu kloubního pouzdra po obvodu hlavice. Pod hlavicí jsou na přední straně kosti dva hrboly, tuberculum majus (laterálně) a tuberculum minus (ventrálně). Oba hrboly jsou místa úponů svalů.

Tuberculum majus má shora dolů tři plošky, na které se upíná nahoře **m. supraspinatus**, uprostřed **m. infraspinatus**, dole **m. teres minor**. Na crista tuberculi majoris se upíná **m. subscapularis** a na crista tuberculi minoris **m. teres major** a **m. latissimus dorsi**. Zeštíhlení humeru pod oběma hrboly se nazývá chirurgický krček (collum chirurgicum). Svůj název nese proto, že je místem častých zlomenin.

- **Tělo pažní kosti** (corpus humeri) - Corpus humeri nese vpředu laterálně drsnatinu (tuberositas deltoidea) pro úpon deltového svalu. Žlábek vřetenního nervu (sulcus nervi radialis) se táhne po zadní straně těla humeru šikmo shora z vnitřní strany distálně a zevně.

- **Distální kloubní konec** (condylus humeri) - distální konec humeru se předozadně oploštuje. Mediálně a laterálně vybíhá v přístřední nadkútek (epicondylus medialis) na straně vnitřní a boční nadkútek (epicondylus lateralis) na straně zevní; na obou začínají předloketní svaly.



Obrázek 12- Vlevo: kost pažní pravé strany - pohled zředu a ze strany. Vpravo: Kost pažní pravé strany - pohled zezadu a z mediální strany [1]

2.4 Pohyby ramenního kloubu

Ramenní kloub patří k nejpohyblivějším na lidském těle. Ze základní polohy je možné provést tyto pohyby:

- *ventrální flexe* - předpažení, do 80°;
- *dorsální flexe (extense)* - zapažení, dorsální flexe je menší, do 40°;
- *abdukce* - upažení (pohyb v glenohumerálním kloubu), abdukce je možná jen do horizontály 60°, kdy humerus narazí na vaz ligamentum coracohumerale, poté je další pohyb do upažení možný jen za současné zevní rotace dolního úhlu lopatky do 180°;

- *addukce* - připažení, za současné flexe nebo extenze je možná i hyperaddukce (horizontální abdukce a addukce)
- *rotace kloubu* - probíhá kolem podélné osy spojující caput a capitulum humeri. Rozsah má přibližně 90°.

Všechny ostatní pohyby vznikají kombinací těchto zmíněných pohybů. Ve všech těchto pohybech je v součinnosti lopatka. Na počátku se lopatka účastní v malé míře. Pokud se přibližujeme krajní poloze, její účast na pohybu se zvyšuje. Upnuté svaly na lopatky pomáhají vykonat tyto pohyby. Střední (centrovaná) poloha ramenního kloubu se nachází při částečné abdukci a v mírné ventrální flexi.

3 FUNKCE SVALU

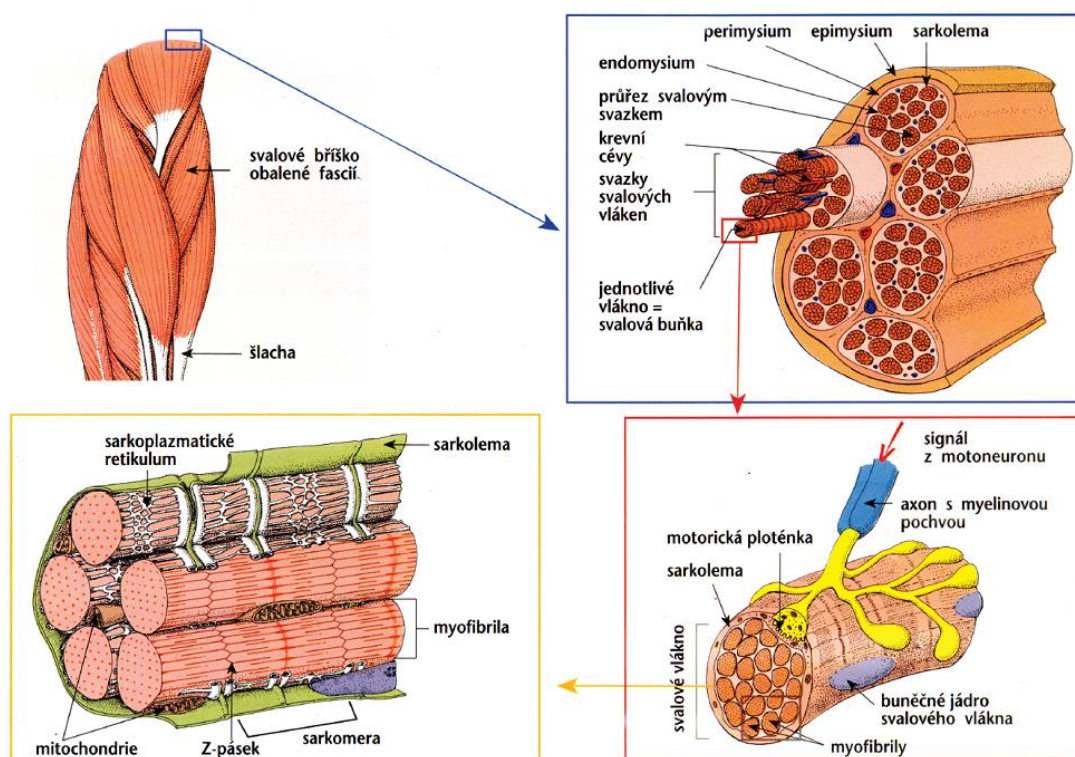
Kosterní svaly nalezneme hlavně kolem kloubů, působí silou na kostru v různých směrech. Z pohledu základní funkce svalu rozeznáváme agonistu, který je hlavní iniciátor pohybu. Naopak sval, který koná protichůdný pohyb je antagonist. Pokud se daného pohybu některý sval spoluúčastní, nazýváme tyto svaly synergické.

3.1 Struktura svalu

Mechanické vlastnosti svalu je možné pozorovat na několika úrovních:

- Ultrastruktura svalu - sarkomera;
- Mikrostruktura svalu - svalové vlákno;
- Mezostruktura svalu - svalový snopeček;
- Makrostruktura svalu - anatomický sval.

Kosterní sval je na svém povrchu obalen fascií, vazivem, složeného z kolagenních, retikulárních a elastických vláken, dále pak tukovými buňkami a buňkami pojivové tkáně.



Obrázek 13 - Zobrazení struktury kosterního svalu [8]

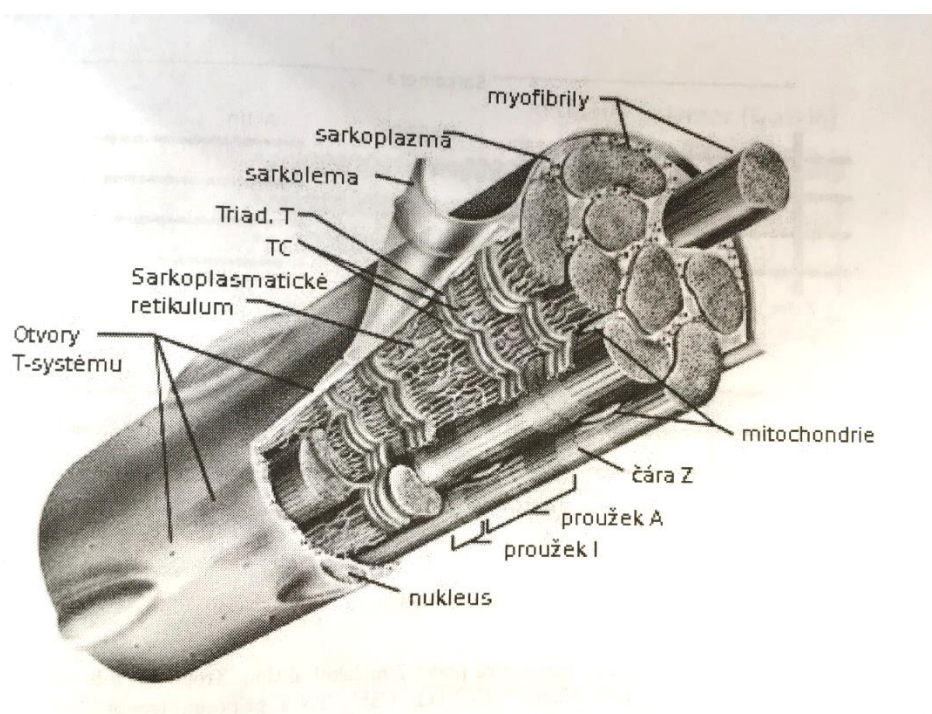
Obecnou funkcí svalu je kontrakce a relaxace. Energie chemická se mění v energii mechanickou. Hlavní funkcí je působení silou na kostru. Vedle svalstva kosterního odlišujeme ještě hladkou svalovinu, srdeční svalovinu a myoepitel.

Z makrostrukturální úrovně je sval tvořen svalovými vlákny. Rozbor svalu a jeho vnitřní struktury je na Obr. 13. Svalové vlákno je mnohояaderná buňka s délkou od $5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ až $0,32 \mu\text{m}$. Vlákna se mohou táhnout bez přerušení napříč celým svalem nebo jsou spojena vazivovou tkání do 2 až 3 vláken. Každé vlákno je obaleno sarkolemou, skládající se z vnější bazální a vlastní buněčné membrány. Bazální membrána tvoří tenkou vrstvu bohatou na polysacharidy. Tato vrstva postupně přechází v síť kolagenních vláken (endomysium) a odděluje od sebe jednotlivá

svalová vlákna. Na koncích svalů vlákna přeházejí ve svalový úpon, který je tvořen perimyziem a epimyziem.

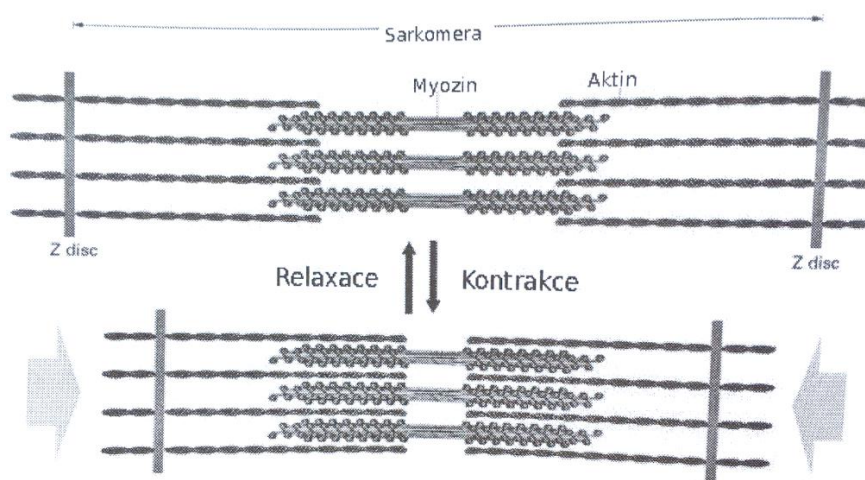
Dalším zkoumáním kosterní svaloviny se dostaneme do mikrostrukturální úrovně. Cytoplasma (sarkoplazma) svalového vlákna obsahuje myofibrily, mitochondrie, ribozomy a další látky jako lipidy, bílkoviny. Myofibrily jdou podél svalového vlákna a jsou uloženy hustě vedle sebe ($3 \cdot 10^4$ myofibril/mm²). Mitochondrie provádí oxidaci a resyntézu adenosintrifosfátu (ATP).

Jednotlivé myofibrily jsou složeny ze vzájemně se dotýkajících kontraktilních vláken a proteinů (titin, nebulin, tropomyozin, troponin). Kontraktilní vlákna jsou podélně orientované aktinové a myozinové filamenty, které právě vytváří typické příčné pruhování, způsobené pravidelným střídáním izotropní a anizotropní hmoty ve svalovém vlákně - střídání úseku vláken aktinu a myozinu.



Obrázek 14 - Struktura vlákna kosterního svalu [2]

Světlejší I proužek obsahuje aktinová filamenta, tmavší A proužek obsahuje samotná myozinová filamenta, zobrazeno na Obr. 14. Rovina, kde jsou ukotvena aktinová filamenta se nazývá Z - linie, naopak kde jsou ukotvena myozinová filamenta se nazývá M - linie. Délku sarkomery lze definovat jako vzdálenost mezi Z - liniemi. Sarkomera se zkracuje při kontrakci, to je schematicky znázorněno na Obr. 15. Kontrakci dochází ve svalu k vzájemné interakci (skluzu) mezi aktinovými a myozinovými filamenty. [2] [10]

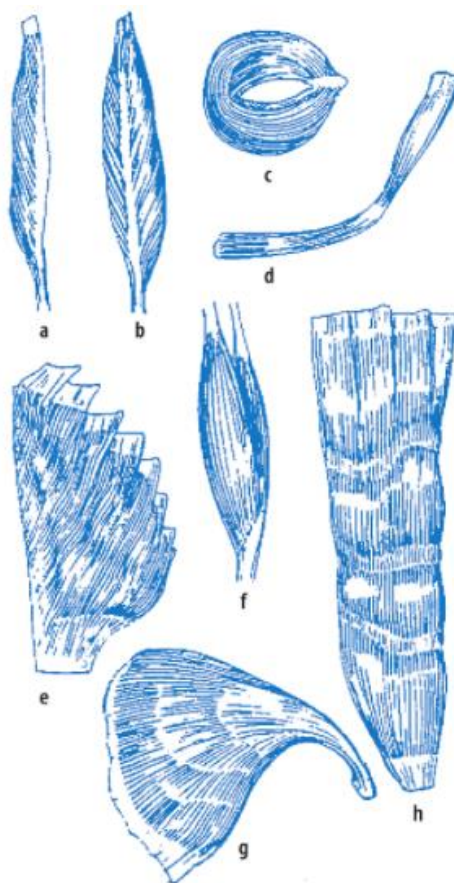


Obrázek 15 - Uspořádání myofilament [2]

3.2 Textura vláken

Většina svalů je tvarově složitá. Z vnějšího pohledu lze sval popsat tvarem a počtem svalových bříšek a také dle toho v jakém vztahu jsou svalové snopce k úponové šlase. Svaly mohou být vřetenovité, jednohlavé resp. vícehlavé, ploché, kruhovitě. Dané tvary svalů jsou na Obr. 16, jednozpeřený sval (a), dvojzpeřený sval (b), kruhový svěrač (c), dvojbříškový sval se vsunutou šlachou (d), plochý sval

s aponeurotickou šlachou (e), dvojhlavý sval (f), nálevkovitý, zpeřený sval (g), plochý sval se vsunutými šlachami (h).



Obrázek 16 - Tvary svalů [4]

Nezáleží pouze na vnějším tvaru svalu, ale také na orientaci snopců a geometrickém uspořádání vláken, které nazýváme textura svalu. Velikost výstupní síly, jež je daný sval schopný vykonat závisí na směru průběhu svalových vláken. To je úhel, který svírají vlákna svalu a šlachy. Tyto zmíněné vlastnosti určují i rychlost smrštění svalu.

Pro měření je důležité definovat svaly zpeřené (pennate muscles). Jsou to svaly, které mají šikmý průběh snopců. Rozlišujeme následující texturu svalových vláken:

- Paralelní a paralelně přerušovanou (např. přímý sval břišní)
- Úplně nebo částečně zpeřenou (např. deltový sval) [4] [7]

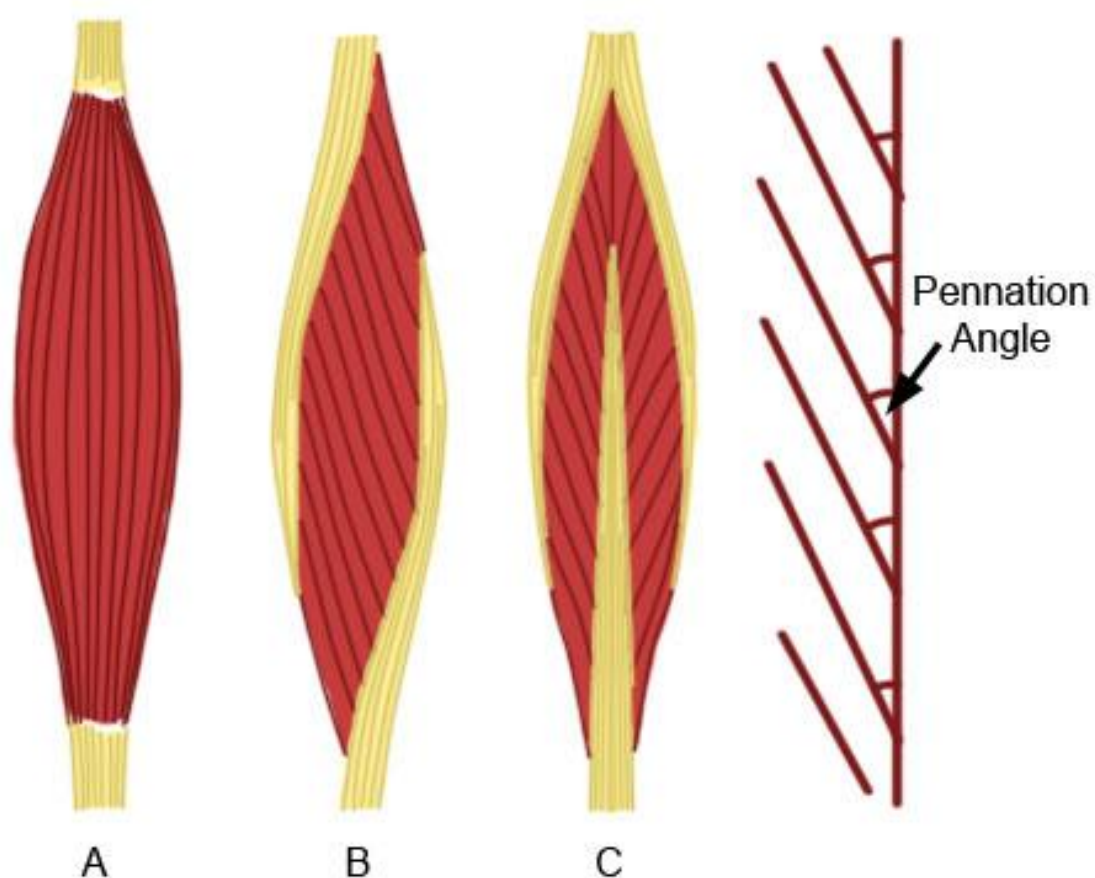
3.3 Strukturální charakteristiky sval

Jak bylo zmíněno výše, svaly je možné rozlišovat podle strukturálních uspořádání svalových snopců na paralelní svalová vlákna nebo zpeřená svalová vlákna.

Paralelní svaly, někdy též označeny jako nezpeřené svaly uvedené na Obr. 17 (A), mají svalové a šlachové snopce uspořádány paralelně. Umístění je ve směru tahu svalu. Tvoří dlouhé snopce a vyznačují se menším množstvím svalových snopců. Při stahu paralelního (nezpeřeného) svalu dochází k velkému zkrácení, vyvinutí malé kontraktilní síly (menší počet zúčastněných vláken), ale velké rychlosti kontrakce. Úpon svalu je daleko od osy rotace.

Svaly zpeřené mají svalové snopce uspořádány šikmo k průběhu šlach, viz Obr. 17 (B). Svírají se šlachami ostrý úhel. Vlákna zpeřených svalů probíhají šikmo k ose tahu. Tvoří velké množství svalových snopců, které jsou krátké. Stažením zpeřeného svalu dojde k malému zkrácení, velké kontraktilní síle a nízké rychlosti kontrakce. Úpon svalu leží blízko osy rotace. U zpeřených svalů rovněž dochází později ke svalové únavě, a to je zaručeno díky uspořádání svalových snopců, které zajišťují více místa pro cévy i při kontrakci svalu. [2] [4]

Struktura svalů ovlivňuje jeho chování a tím i přenášenou sílu do šlach a kostí. Jedním z velmi důležitých parametrů k měření svalových charakteristik je právě úhel zpeření, který je definován jako vzor uspořádání svalových vláken ve vztahu k ose generované síly stejným svalem, což jeden z hlavních faktorů určující svalovou výkonnost, závislost vyvinuté síly a rychlosti zkrácení svalu. Úhel zpeření se v minulosti měřil pomocí pitevního rozboru, ale hodnoty úhlů mezi vlákny se při této metodě mění díky zkrácení a také není možno analyzovat vliv svalové kontrakce.



Obrázek 17 - Úhel zpeření (pennation angle). (A) - paralelní sval, (B) - jednozpeřený, (C) - dvojzpeřený [5]

Přesné informace o úhlu zpeření jsou důležité ve studiu biomechaniky ze dvou hledisek. Prvním hlediskem je výpočet pohybů kloubu založené na předpovězení generované síly svalu ve směru svalových vláken. Druhým důležitým hlediskem je výpočet síly vyvolané ve směru svalových vláken. [6]

3.3.1 Anatomický průřez svalu - anatomical cross-section area (ACSA)

Je to největší průřez v délce daného svalu. Měří se kolmo ve směru na šlachy (na jeho podélnou osu), která daný sval upíná ke kosti. [2] [6]

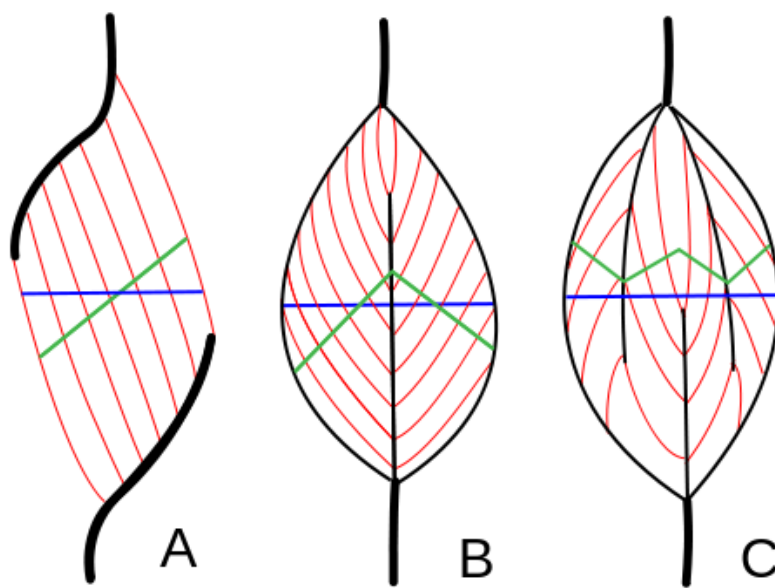
3.3.2 Fyziologický průřez svalu - physiological cross-section area (PCSA)

Fyziologický průřez svalu (PCSA) je průřez, který rozřízne všechna vlákna v pravém úhlu. Je to součet všech příčných průřezů všemi vlákny daného svalu.

$$PCSA = \frac{V}{L} \quad (1.1)$$

Kde V je objem svalu, L je celková délka svalu.

U paralelních (nezpeřených) svalů se fyziologický průřez rovná anatomickému průřezu. Síla vyvinutá každým typem svalu je úměrná počtu sarkomer uspořádaných paralelně, a tudíž k jeho fyziologickému průřezu. Příklady způsobu měření průřezů různých druhů zpeření svalových vláken jsou na Obr. 18. [2] [6]



Obrázek 18 - Příklady průřezu svalů. Zelená barva - PCSA, modrá barva - ACSA [11]

4 CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je měření fyziologických průřezů šesti vybraných svalů, které se podílejí na pohybu ramene s využitím dat z kryogenních snímků. Vytvořit 3D model každého svalu, zjistit jeho objem a délku k vypočtení fyziologického průřezu.

Specifické body práce:

1. Vypracování rešerše anatomie ramenního kloubu
2. Vypracování rešerše způsobu měření fyziologického průřezu svalu (PCSA)
3. Vytvoření 3D modelu geometrie svalu ramenního kloubu
4. Určení fyziologických průřezů svalů ramenního kloubu

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Před samotným modelováním svalů do 3D modelu bylo třeba nastudovat detailně anatomii svalů, k čemu výborně posloužila online 3D anatomie člověka od BioDigital [13]. Odtud se dalo čerpat, kde sval začíná, upíná se, který sval jej překrývá nebo odřezávat dané kosti, nervy, kloubní pouzdra či svaly. Většina svalů je na sobě velice těsně poskládaná a různě se překrývají. Jako dalšího pomocníka jsem použil vedle Anatomie 1 [1] také Netterův anatomický atlas člověka [12].

5.1 The Visible Human Project - snímky

K měření průřezů v této práci jsem použil snímky z projektu The Visible Human Project, o které jsme emailem zažádali přímo Národní knihovnu medicíny Spojených států, protože tento projekt už není volně přístupný.

Jedná o projekt Národní knihovny medicíny Spojených států vytvořen k veřejně přístupné prezentaci anatomie lidského těla. Konkrétně mrtvého mužského a ženského těla. Snímky vznikly, tak že těla byla zamražena a následně řezána v axiální rovině. Vznikl vždy tak kryogenní řez - anatomický snímek, který byl následně snímán počítačovou tomografií (CT) a magnetickou rezonancí (MRI).

Pro mou bakalářskou práci jsme zvolili ženu. Axiální anatomické snímky jsou získány v intervalech 0,33 mm. Rozměry snímků jsou 2048 x 1216 pixelů. Jeden pixel odpovídá 0,33 mm. [9]

5.2 3D modelace svalů

K měření a vytvoření 3D modelu svalů jsem použil program Seg3D. Seg3D je volně dostupný program ze stránek University of Utah Scientific Computing and Imaging (SCI) Institute. Program je vyvinutý od Center for Integrative Biomedical

Computing. Mezi další programy je možné ještě využít ImageJ nebo OsirX, ale s tímto programem modeluje i vedoucí mé bakalářské práce a tudíž bylo vysvětlení základních funkcí jednodušší. Vypracování 3D modelů je velice pracné a časově hodně náročné.

První krokem před nahráním snímků do programu je třeba přesně vybrat rozsah snímků, se kterými chceme pracovat. Program totiž neumožňuje další přidání nebo napojení snímku v průběhu práce. Snímky ve formátu PNG jsou rozděleny na několik částí (abdomen, head, legs, pelvis, thighs, thorax). V této práci se zabývám horní částí těla, proto jsem vybral snímky head a thorax. Snímky je nutné nakopírovat do společné složky a odstranit některé z nich, aby na sebe plynule navazovaly. Head končí na začátku deltového svalu a thorax začíná v polovině krku. Celkový počet nahraných snímků do programu Seg3D je 1464.

Druhý krok, časově nejvíce náročný, spočíval ve vykreslení obrysu svalu. Pomocí funkce *POLYLINE* jsem se snažil pro každý sval aproximovat jeho skutečný tvar obecným polygonem od jeho začátku až po úpon. Jako příklad je uveden snímek axiální řezu bez segmentů na Obr. 19.



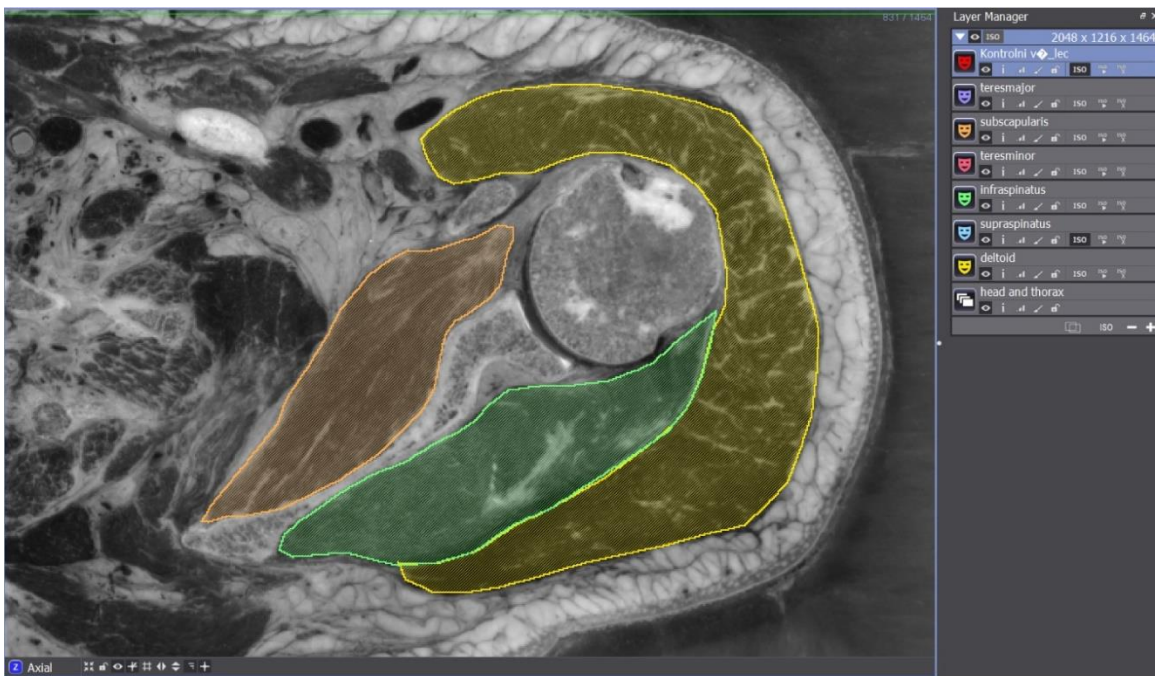
Obrázek 19 - Axiální řez bez segmentů v Seg3D

Vykreslení polygonů a vyplnění segmentů:

žlutě m. deltoideus,

zeleně m. infraspinatus,

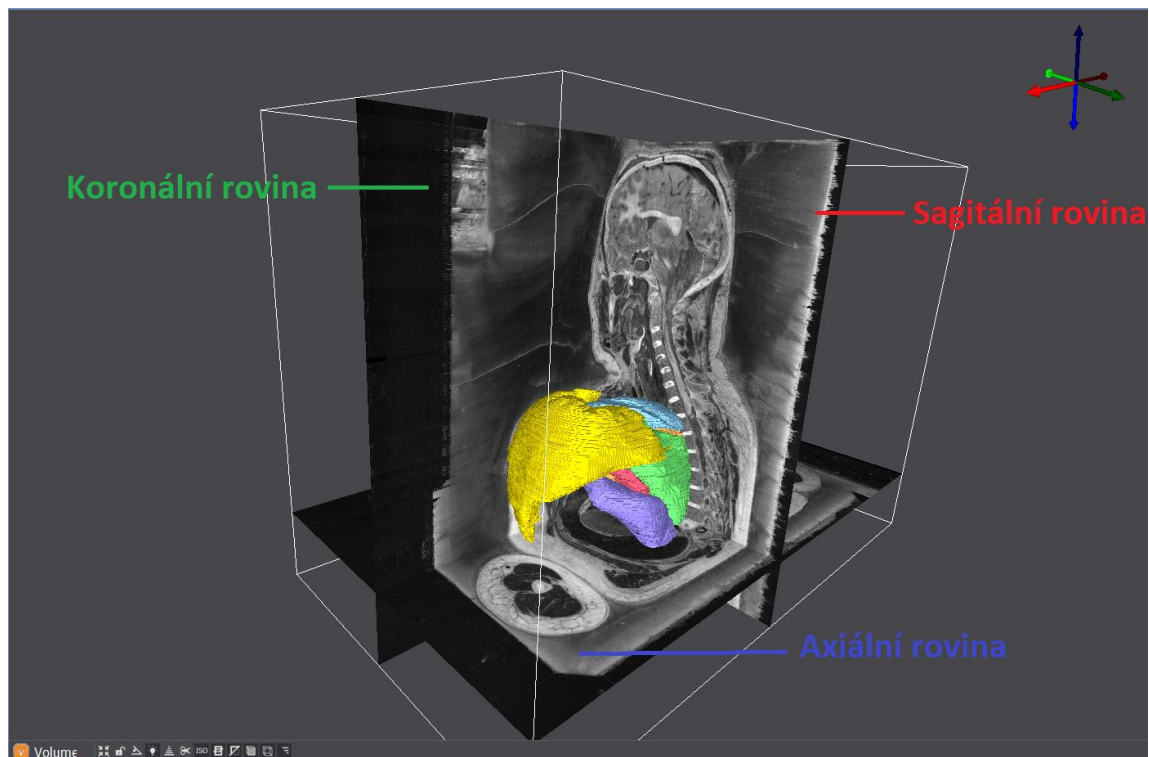
oranžově m. subscapularis.



Obrázek 20 - Aproximace svalů obecným polygonem v Seg3D

Každý polygon jsem vyplnil, aby bylo možné následné vytvoření 3D svalu, jak je vidět na Obr. 20. Kryogenní řezy byly dělány po třetině milimetru. Spoustu hodin vzalo jednak kreslení přesných polygonů, přibližně 500 snímků, ale velká zdržení nastala u svalů (m. infraspinatus, m. teres minor, m., m. latissimus dorsi a m. teres major), které nebylo takřka možné rozpoznat ani podle struktury vláken, ani podle 3D modelu Biodigital. Až po konzultaci s fyzioterapeutkou, zkoumání sagitálních a koronálních pohledů a nastavování různých hodnot jasu bylo možné svaly oddělit.

Funkcí *ISO* se nechali barevně odlišené isoplochy spočítat a program vytvořil 3D modely daných svalů. Souřadnicový systém a roviny jsou znázorněny na Obr. 21.

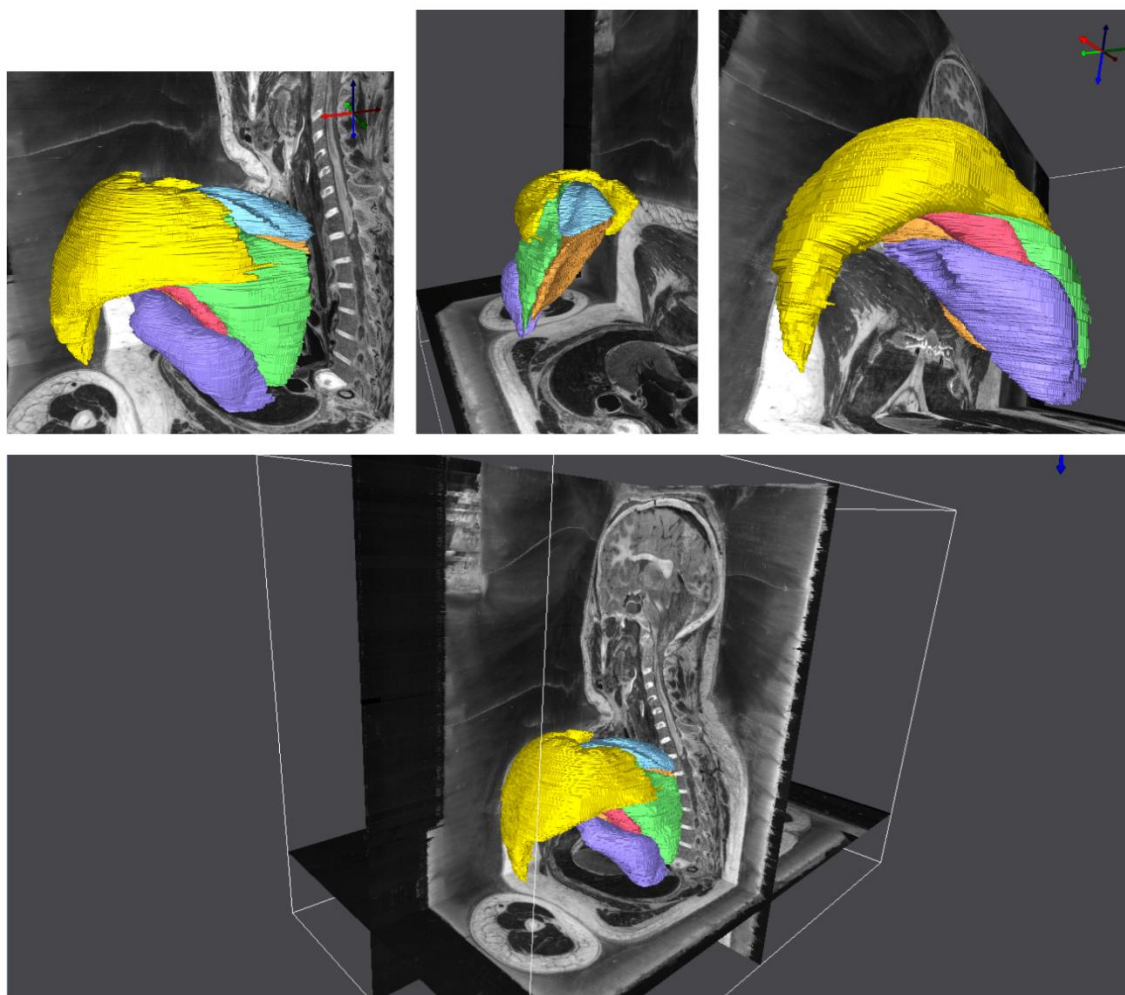


Obrázek 21 - Souřadnicový systém a vyznačení rovin

Barvy svalů

Jednotlivým svalům byla přidána barva pro lepší přehlednost, viz Obr. 22.

- Žlutá barva - musculus deltoideus
- Modrá barva - musculus supraspinatus
- Zelená barva - musculus infraspinatus
- Červená barva - musculus teres minor
- Oranžová barva - musculus subscapularis
- Fialová barva - musculus teres major



Obrázek 22 - Barevně odlišené svaly v Seg3D

5.3 Výpočet průřezu

Původním plán zahrnoval spočítání průřezů v programu Matlab (MATLAB 8.0, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, U.S.), bohužel v programu Seg3D nastala neočekávaná chyba. Nebylo možné exportovat data žádným způsobem. Při exportu segmentů, který vytvoří matice do programu Matlab, se uložily jen nulové matice. Druhým možným způsobem bylo exportování isopovrchů ve formátu ASCII, ale ukládal se stále dokola jen jeden sval. Nefungovala ani starší verze programu Seg3D 2.4.0.

Měření jsem tedy provedl v samotném programu Seg3D. Program spočítá objem, ale jednotky jsou uvedeny v pixelech. Vytvořil jsem tedy kontrolní válec o známých rozměrech. Zadaná hodnota velikosti jednoho pixelu $\alpha = 0,33$ mm, zvolená hodnota průměr válce $D = 200$ pixel a výška válce $H = 3$ pixel.

Objem v pixelech

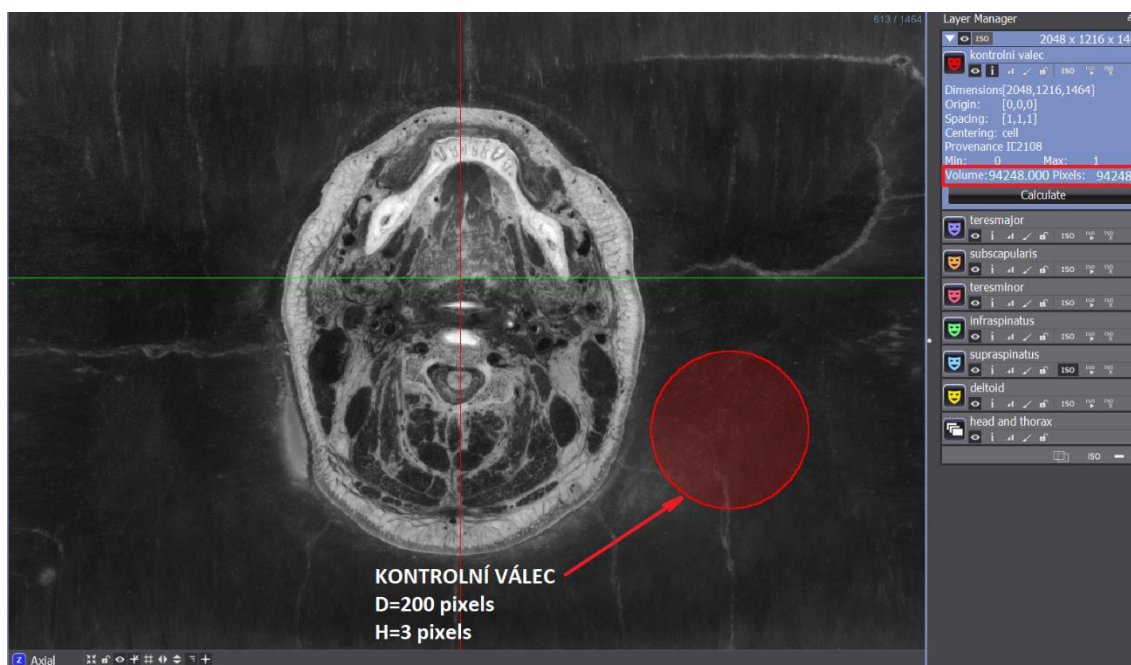
Objem pro výpočet v původních jednotkách:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad (1.2.)$$

dosadím

$$V = \frac{\pi \cdot 200^2}{4} \cdot 3 = 94247,7797 \text{ [pixel]},$$

stejný objem vyšel i v programu, kde je výsledek zaokrouhlen na celé číslo, možno vidět v pravém horním rohu na Obr. 23.



Obrázek 23- Kontrolní válec pro verifikaci

Objem ve skutečných jednotkách

Převedení průměru válce D z pixelu na mm:

$$D_S = \alpha \cdot D \quad (1.3.)$$

dosadím

$$D_S = 0,33 \cdot 200 = 66 [mm].$$

Převedení výšky válce H z pixelu na mm:

$$H_S = \alpha \cdot H \quad (1.4.)$$

dosadím

$$H_s = 0,33 \cdot 3 = 0,99 [mm].$$

Skutečný objem V_s s převedenými rozměry:

$$V_s = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4} \cdot H_s \quad (1.5.)$$

dosadím

$$V_s = \frac{\pi \cdot 66^2}{4} \cdot 0,99 = 3386,9825 \text{ mm}^3.$$

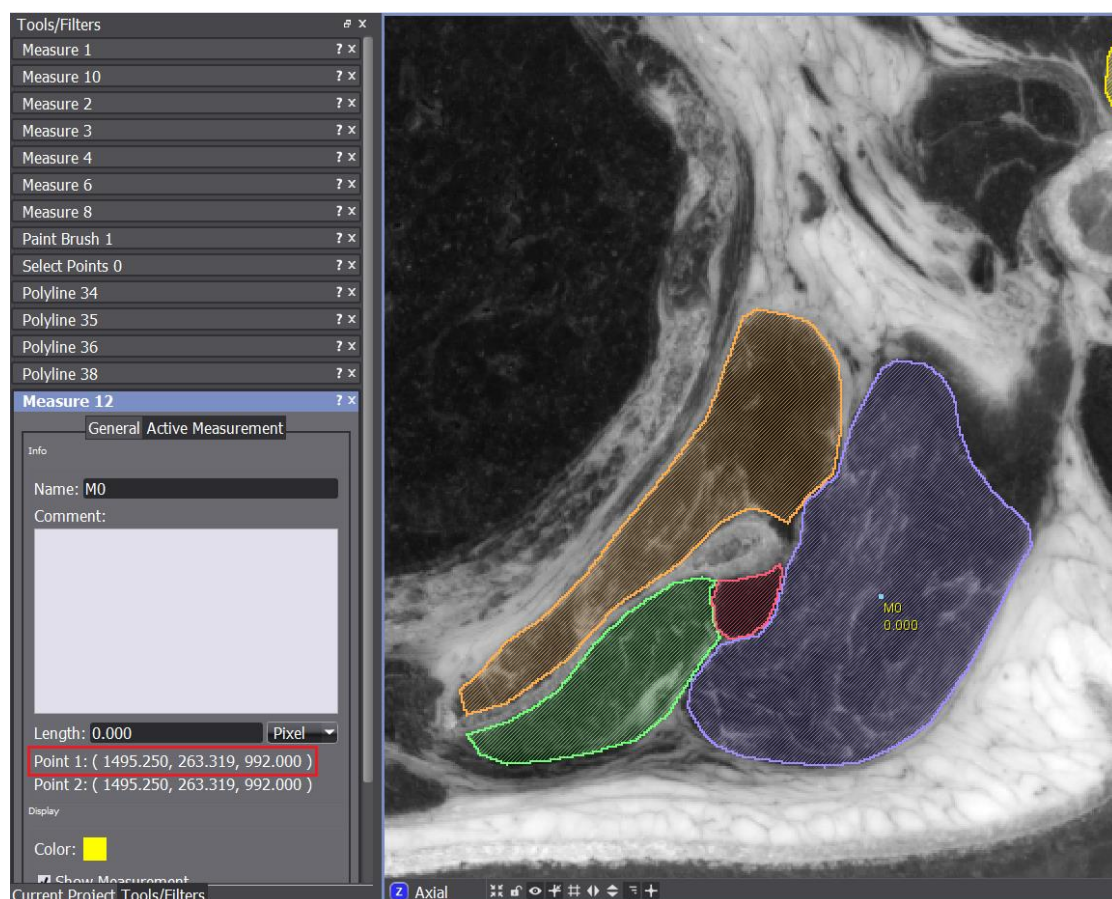
Porovnáním obou výsledků jsem zjistil, že objem v pixelech je poměrově stejný jako objem v mm^3 , pouze roznásoben 3x hodnotou velikosti pixelu α , to je dáno 3dimenzionálním prostorem. Tím jsem verifikoval správnost výsledků a pro přepočítání objemů svalů do skutečných jednotek (tzn. mm) použiji vztah:

$$V_s [mm^3] = \alpha^3 \cdot V \quad (1.6.)$$

Měření délek svalu

Druhou potřebnou veličinou pro spočítání PCSA je délka svalu. Pro zjištění délky každého svalu je potřeba vědět, kde má sval začátek a kde se upíná. To je uvedeno v anatomické části 2.2.

V programu Seg3D jsem vytvořil bod v těžišti každého svalu pomocí funkce *MEASURE*.



Obrázek 24 - Těžiště svalu a jeho souřadnice

Zvolil jsem krok po 5 snímcích, neboť tvar polygonu se mění velice plynule. Každý bod měl tak přiřazené souřadnice x , y , z . Funkce *MEASURE* s příslušnými souřadnicemi je vidět na Obr. 24. Souřadnice každého bodu jsem rovnou zapisoval do kalkulačky, který počítá vzdálenosti mezi body v prostoru dané rovnicí:

$$L_i = |AB| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}, \quad (1.7.)$$

sečtením absolutních vzdáleností je pak celková délka svalů v pixelech:

$$L = \sum_{i=1}^n L_i . \quad (1.8.)$$

Převod celkové délky L do skutečné délky L_s :

$$L_s = \alpha \cdot L . \quad (1.9.)$$

Výsledné délky svalů jsou uvedeny v Tab. 1.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Upravením rovnice (1.1.) pro skutečné hodnoty dostaneme vztah:

$$PCSA = \frac{V_s}{L_s} \quad (1.10.)$$

Výsledné hodnoty jako objem, celková délka a fyziologický průřez jsou uvedeny v Tab. 1.

Tabulka 1- Výsledné fyziologické průřezy

Sval	Typ svalu	Objem V_s [mm ³]	Délka L_s [mm]	PCSA [mm ²]
m. deltoideus	mnohozpeřený	312081,47	158,28	1971,71
m. supraspinatus	zpeřený	43729,83	114,33	382,50
m. infraspinatus	zpeřený	123579,43	237,96	519,33
m.subscapularis	mnohozpeřený	129209,58	116,17	1112,25
m. teres major	zpeřený	79479,85	152,65	520,67
m. teres minor	zpeřený	17703,82	99,99	177,06

7 DISKUZE

Jak bylo zmíněno výše, průřez svalu souvisí s izometrickou silou a napětím svalu. Tyto veličiny jsou důležité pro výpočty aktivní a pasivní síly. K porovnání výsledků jsem využil 3 studie, které se též zabývaly měřením průřezu svalů ramenního kloubu. Hodnota izometrického napětí/ kontrakce se pohybuje v rozmezí 0,35 až 1,37 MPa, ale nejčastěji se pro výpočty bere hodnota izometrického napětí 1 Mpa a proto má PCSA a izometrická síla stejnou hodnotu, pokud je PCSA v mm² a izometrická síla v jednotkách Newtonů. Toho lze využít k dalším výpočtům. [14]

Měřením PCSA se zabývali J. E. Wood [15], H. E. J. Veeger [16] a J. E. Langernderfer [17] a srovnání jejich hodnot s mými jsou uvedena v Tab. 1. Hlavním rozdílem oproti mému postupu je metoda měření. Měření dle Wood (1989) vycházela z Coonsovi křivky k změření objemu, který byl vydělen délkou svalu. Zbylé dvě metody byly měřeny na mrtvolách pitevním rozborem. Všechna tři měření, které jsem zvolil k porovnání byla spočtena jako průměrná hodnota mužů a žen dohromady. Svou metodu bych hodnotil jako mnohem přesnější, neboť výsledné průřezy nevycházejí jako průměrná hodnota z více pacientů. Pracoval jsem se snímky individuálního pacienta, konkrétně se jednalo o ženu. Pro níž jsem přímo vytvořil 3D modely svalů z kryogenních snímků. Kryogenní řezy byly dělány po 0,33 mm, tudíž výsledný 3D model vyšel opravdu přesně. Výhodou je také, že lze pracovat se snímky v programu bez nutnosti pitvat mrtvoly.

Nejvíce se mé výsledky shodují s Langernderferem (2006), který ale měřil jen 3 svaly rotátorové manžety. Celkově jsou největší rozdíly u musculus deltoideus, což je způsobeno mužským zastoupením v měřeních, neboť průřez mužského ramene je mnohem větší než u ženského pohlaví. Muži mají obecně větší svalový rozvoj.

Měření objemů a délky svalu bylo plánované v programu Matlab. V programu Seg3D se ale vyskytla neočekávaná chyba při exportování dat. Jednou možností bylo uložení segmentů v podobě matice, které ale program ukládal jen jako nulové. Druhou možností bylo uložení dat ve formátu ASCII, ale ani tento způsob nefungoval. Program ukládal nahodile pouze dva svaly. Tudíž jsem musel v průběhu práce improvizovat a vymyslet jinou metodu. Celé měření jsem pak provedl v Seg3D. Program spočítal objem svalu, jeho rozměry bylo ale nutné verifikovat. Délku svalu jsem měřil sečtením těžišťových bodů.

Hlavní nevýhodou tohoto způsobu měření je časová náročnost. Vytváření 3D modelů a určování těžiště zabralo nejvíce času. Jedná se přibližně o 500 snímků, kde je nutné v každém snímku daný sval najít a funkcí polyline vytvořit obecný polygon každého svalu. Body těžiště jsem zkrátil a určoval každý 5. snímek. Každý bod těžiště měl tak své souřadnice v prostoru x , y , z . Tyto souřadnice bylo potřeba přepsat a spočítat celkovou délku. Každý sval měl minimálně 50 takových bodů. Tato metoda by tedy nebyla výhodná u delších svalů, například dolní končetiny.

K vytvoření 3D modelů přímo ze snímků už dnes slouží programy. Většinou pracují s CT snímky. Nejsou ale ještě tak přesné k rozpoznání daných svalů. Rozhodně se vyplatí s měřením pokračovat ve výpočetním programu Matlab nebo jiném. Důvod selhání programu je pravděpodobně ten, že má určité omezení dat, které je schopný exportovat.

Tabulka 2- Porovnání výsledků

Sval	PCSA [mm²]	Tato práce 2018	H.E.J. Veeger 1991	Wood et al 1989	J. E. Langernderfer 2006
m. deltoideus		1971,71	2590	2900	-
m. supraspinatus		382,50	521	520	360
m. infraspinatus		519,33	951	840	718
m. subscapularis		1112,25	1351	1360	-
m. teres major		520,67	1002	840	-
m. teres minor		177,06	292	250	202

8 ZÁVĚR

Hlavním výstupem této práce bylo změření fyziologických průřezů šesti zvolených svalů ramenního kloubu. S tím souviselo i vytvoření určité metody, jak vůbec průřezy vypočítat. Nakonec se veličiny jako objem a délka svalu měřili přímo v programu Seg3D po zhotovení 3D modelů. To se ukázalo jako výhodou, neboť se nemusel použít další výpočetní program. Díky velice jemným kryogenním řezům jsou tak 3D modely velice přesné. Své výsledky jsem porovnal s výsledky jiných prací. Výsledky se liší v řádech stovek, což je způsobeno tím, že v mé práci jsem měřil pouze ženu, kdežto v ostatních byly měřeny muži a ženy dohromady.

Průřez svalu je důležitým parametrem při určování síly svalu nebo momentu a tudíž by se výsledky dali použít jako část dalších výpočtů.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 1*. 2. vydání. Praha : Grada, 2001. 497 s. ISBN 80-7169-970-5.
2. KONVIČKOVÁ, Svatava, Jaroslav VALENTA a Tomáš MAREŠ. *Biomechanika svalstva člověka*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03911-3.
3. Anatomie: Svaly ramenní a lopatkové. *Medicína | Ronnie.cz* [online]. Praha: Erasport, 2001, 16.12.2003 [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <https://medicina.ronnie.cz/c-481-svaly-ramenni-a-lopatkove.html>
4. DYLEVSKÝ, Ivan. *Funkční anatomie*. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-3240-4.
5. *Biomechanics: EXSC 362-Kinesiology & Biomechanics of Sport & Exercise* [online]. Brigham Young University [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: [https://biomechanics.byu.edu/exsc362\(hunter\)/chapter11.html](https://biomechanics.byu.edu/exsc362(hunter)/chapter11.html)
6. NARICI, Marco. *Human skeletal muscle architecture studied in vivo by non-invasive imaging techniques: functional significance and applications*. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 1999, 9.2: 97-103.
7. REZASOLTANI, A, B LAHOUTI a N NAMAVARIAN. Pennation Angle and Fascicle Length of Human Skeletal Muscles to Predict the Strength of an Individual Muscle Using Real-Time Ultrasonography. *Journal of Clinical Physiotherapy Research*. School of Rehabilitation, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran, 2016, **2016**(1(2), 42-48. DOI: 10.22037/jcpr.2016.01.
8. HANZLOVÁ, Jitka a Jan HEMZA. *Základy anatomie pohybového ústrojí*. 2., přepracované. Brno: Masarykova univerzita, 2009. 100 s. ISBN 978-80-210-4937-6.

9. The National Library of Medicine's Visible Human Project. *National Library of Medicine*[online]. Rockville Pike: National Institutes of Health, 1995, 11 September 2003 [cit. 2018-08-06]. Dostupné z: https://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html
10. KITTNAR, Otomar. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3068-4.
11. Physiological cross - sectional area. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 20 July 2016 [cit. 2018-08-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Physiological_cross-sectional_area
12. NETTER, Frank H. *Netterův anatomický atlas člověka*. 2. vyd. Přeložil Vladimír HOLIBKA, přeložil Hana CHLEBEČKOVÁ. Brno: CPress, 2012. ISBN 978-80-264-0079-0.
13. *BioDigital: 3D Human Visualization Platform for Anatomy and Disease* [online]. Broadway Suite, New York: Frank Sculli, John Qualter, 2013 [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <https://www.biodigital.com>
14. Thomas D. BROWN & Albert B. FERGUSON (1980) *Mechanical Property Distributions in the Cancellous Bone of the Human Proximal Femur*, *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 51:1-6, 429-437, DOI: [10.3109/17453678008990819](https://doi.org/10.3109/17453678008990819)
15. WOOD, J.E., S.G. MEEK a S.C. JACOBSEN. Quantitation of human shoulder anatomy for prosthetic arm control—I. Surface modelling: the origin, evolution, and impact of doi moi. *Journal of Biomechanics* [online]. 1989, 2000, **22**(3), 273-292 [cit. 2018-08-15]. DOI: 10.1016/0021-9290(89)90094-8. ISSN 00219290. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021929089900948>

16. VEEGER, H.E.J., F.C.T. VAN DER HELM, L.H.V. VAN DER WOUDE, G.M. PRONK a R.H. ROZENDAL. Inertia and muscle contraction parameters for musculoskeletal modelling of the shoulder mechanism. *Journal of Biomechanics* [online]. 1991, **24**(7), 615-629 [cit. 2018-08-15]. DOI: 10.1016/0021-9290(91)90294-W. ISSN 00219290. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002192909190294W>

17. LANGENDERFER, Joseph E., Cameron PATTHANACHAROENPHON, James E. CARPENTER a Richard E. HUGHES. Variability in isometric force and moment generating capacity of glenohumeral external rotator muscles. In: *Clinical Biomechanics* [online]. Department of Biomedical Engineering, University of Michigan, USA: Clinical Biomechanics, 2006, **21**(7), s. 701-709 [cit. 2018-08-15]. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2006.02.010. ISSN 02680033. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268003306000520>

10 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1- Schematicky znázorněný podélný řez [1].....	2
Obrázek 2- Kloub kulovitý volný - ramenní kloub [1].....	4
Obrázek 3 - Svaly ramenního kloubu [12].....	5
Obrázek 4 - Sval deltový [3].....	6
Obrázek 5 - Sval nadhřebenový [3]	7
Obrázek 6 - Sval podhřebenový [3]	8
Obrázek 7 - Malý sval oblý [3].....	9
Obrázek 8 - Velký sval oblý [3].....	10
Obrázek 9 - Sval podlopatkový [3]	11
Obrázek 10 - Pletenec horní končetiny; scapula a clavicula {1}.....	12
Obrázek 11- Clavicula [1].....	13
Obrázek 12- Vlevo: kost pažní pravé strany - pohled zepředu a ze strany. Vpravo: Kost pažní pravé strany - pohled zezadu a z mediální strany [1].....	15
Obrázek 13 - Zobrazení struktury kosterního svalu [8]	18
Obrázek 14 - Struktura vlákna kosterního svalu [2].....	19
Obrázek 15 - Uspořádání myofilament [2].....	20
Obrázek 16 - Tvary svalů [4]	21
Obrázek 17 - Úhel zpeření (pennation angle). (A) - paralelní sval, (B) - jednozpeřený, (C) - dvojzpeřený [5]	23
Obrázek 18 - Příklady průřezu svalů. Zelená barva - PCSA, modrá barva - ACSA [11].....	25
Obrázek 19- Axiální řez bez segmentů v Seg3D.....	29
Obrázek 20-Aproximace svalů obecným polygonem v Seg3D.....	30
Obrázek 21 - Souřadnicový systém a vyznačení rovin	31
Obrázek 22 - Barevně odlišené svaly v Seg3D	32
Obrázek 23- Kontrolní válec pro verifikaci	34
Obrázek 24 - Těžiště svalu a jeho souřadnice	36

11 SEZNAMU POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1- Výsledné fyziologické průřezy	38
Tabulka 2- Porovnání výsledků	41

