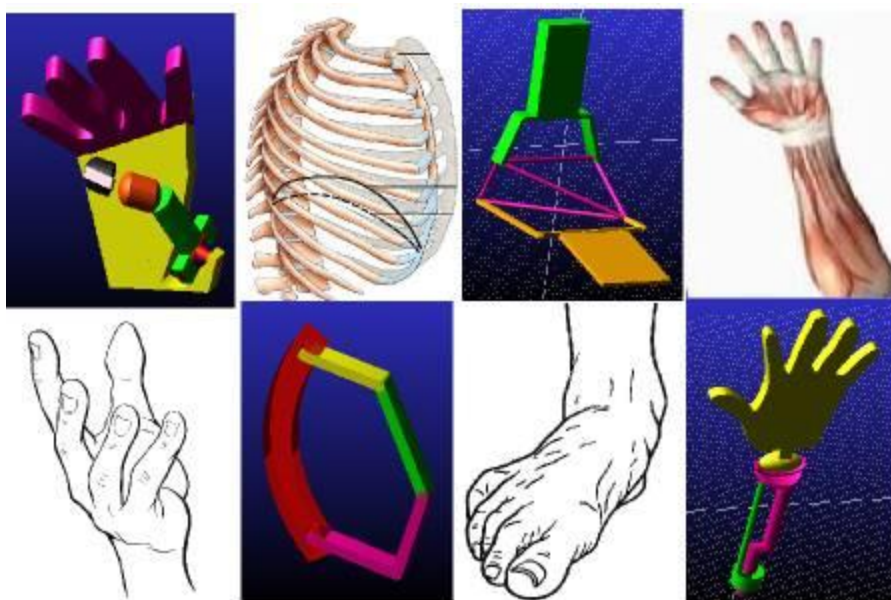




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék

Humán ízületek modellezése mechanizmusokkal



TDK dolgozat

Készítette

Somló Kinga

Mechatronikai mérnöki alapszakos hallgató, III. évf.

Konzulens

Dr. Kiss Rita

egyetemi docens

Budapest, 2014

Tartalom

1	Bevezetés	3
2	A mellkas alakváltozása légzés közben	4
2.1	Általános biológiai ismeretek [6]	4
2.2	A bordák, bordaporcok és a szegycsont mozgása [3].....	6
2.3	A légző mozgás mechanizmusa [3]	9
2.4	A légzés mechanizmusának modellezése [11]	10
2.5	Bordaporcok rugalmasságának vizsgálata [3]	11
3	Alkar hossz tengelye körüli forgása és a csukló mozgása	13
3.1	Pronáció-szupináció jelentősége [1]	13
3.2	Az alkar anatómiája és mozgásai [1]	13
3.3	A pronáció- szupináció mozgástengelye [1]	18
3.4	Az alkar rotációjának modellezése	19
3.5	A csuklóízületi komplexuma [1]	20
3.6	A cirkumdukció mozgása és modellezése [1]	22
4	A hüvelykujj mozgása.....	23
4.1	Anatómiai ismeretek [1]	24
4.2	Az ízületek analízise [1]	25
5	A láb összetett ízület rendszere.....	31
5.1	A bokaízület [2]	31
5.2	A hátsó lábtőízület működése [2]	33
5.3	A láb univerzális ízülete és modellezése [2]	34
6	Összefoglalás	35
7	Irodalomjegyzék	37
8	Ábrák forrása	37

1 Bevezetés

A dolgozat célja az emberi szervezetben található mechanikai szempontból érdekesebb ízületek mechanizmusokkal történő modellezése. Ízületeknek nevezzük két vagy több csont összeköttetését, ahol a csontok egymáshoz képest elmozdulhatnak, azaz az ízület megszakított. Mechanizmusok meghatározására több definíció is használható: általános esetben megfogalmazható, hogy a mechanizmus egymáshoz képest elmozduló merevtestekből összekapcsolt szerkezet. Az előbbiekből következik, hogy az ilyen típusú modellezés esetén, a mozgás vizsgálata során kizárólag a csontos alkotókkal foglalkozunk, a szalagok és az izmok szerepére nem térünk ki, hatásukat elhanyagoljuk. A dolgozat négy egymástól teljesen független ízületet/ízületi komplexumot dolgoz fel. A megfelelő mechanizmus elkészítéséhez, szükséges az adott témához kapcsolódó anatómia, élettan ismerete és a lehetséges mozgások részletes vizsgálata. A modellek mozgásának szimulációját Adams VIEW nevű program segítségével valósítottam meg.

A dolgozat négy témája: a hüvelykujj, a bokaízület, a mellkas és a csukló, valamint az alkar mozgása. Részletesen tárgyaljuk a légzés következtében fellépő csontos alkotók mozgását. Megvizsgáljuk a hüvelykujj lehetséges szabadságfokait, szó esik továbbá ujjunk fogásban és az oppozícióban betöltött szerepéről. Elemezzük, hogy milyen kapcsolat van a boka, és a hüvelykujjunk mozgása és egy autóban működő sebesség váltó között. Bemutatjuk, hogy a váll középpontú gömbi mozgástérben kezünk szinte tetszőleges helyzetet fel tud venni.

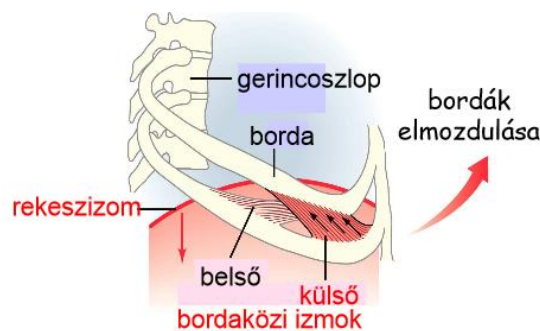
Megjegyzem, hogy egyes fejezetek, alfejezetek címe után [] zárójelben megadott irodalom, arra vonatkozik, hogy az egész fejezetet azon irodalom alapján került összeállításra. A szövegben többet erre az irodalomra nem hivatkozunk.

2 A mellkas alakváltozása légzés közben

A légzés, az éloszervezetek nagy részére jellemző életműködés, amely során a szervezet az energiatermeléshez szükséges oxigént felveszi, az anyagcsere folyamatokban termelődött széndioxidot leadja. Az élővilágban a légzési mechanizmusok széles skálája megtalálható, ez a folyamat alapjaiban eltérő a növényvilág, a mikroorganizmusok, és az állatvilág esetében. A következő fejezet az emberi légzéssel, azon belül is annak (bio)mechanikájával foglalkozik. [7]

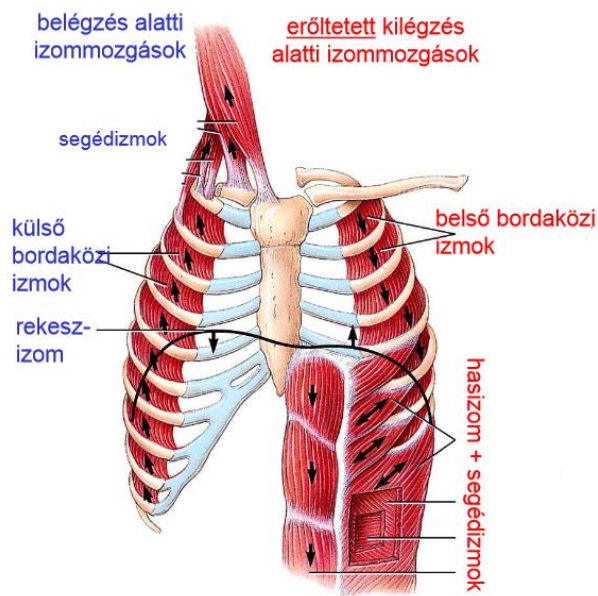
2.1 Általános biológiai ismeretek [6]

A levegő áramlásának az irányát, a tüdő és a külvilág közötti nyomásviszonyok szabják meg. Az emberi belégzés (2.1 ábra), egy aktív folyamat, mely során a rekeszizom és a külsőbordaközi izom összehúzódik, ezzel biztosítva a mellkas megemelkedését. (erőltetett belégzéshez szükségesek a nyak és a mellkas izmai is 2.2 ábra). A tüdő önálló mozgásra, nem képes, mivel fala izmot nem, csak rugalmas kötőszövetet tartalmaz, így térfogatának növekedését a mellkas tágulása okozza. A tüdőben lévő légnyomás lecsökken (térfogatának növekedésének következtében), így a levegő a tüdőbe áramlik. A mellkas- és a tüdőfala kétrétegű mellhártyán keresztül tapad egymáshoz (a két hártyaréteget vákuum tartja össze).

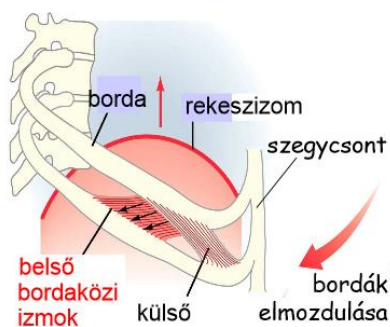


2. 1. ábra Belégzés [6]

Kilégzéskor (2.3 ábra) ellentétes folyamat játszódik le, a rekeszizom elernyed és a belső bordaközi izom összehúzódik. Erőltetett kilégzés esetén (40/perc feletti légző mozgásoknál) a tüdő térfogatának csökkentésében a hasizom is részt vesz. Így a tüdő térfogata csökkenésével a levegő kiáramlik.

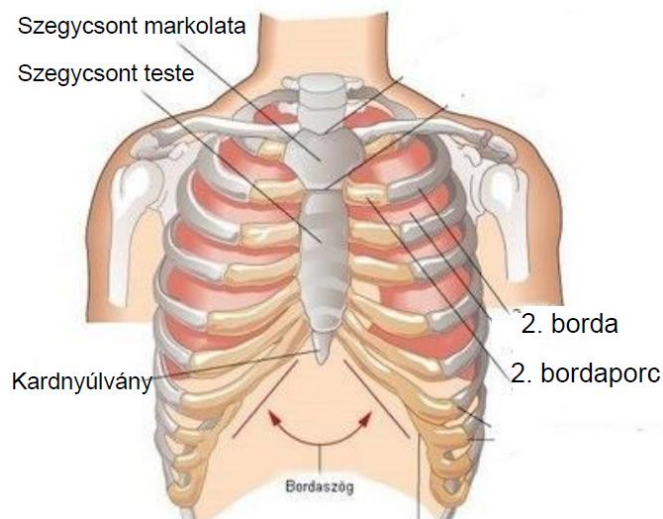


2.2. ábra Ki-és belégzés alatti izommozgások [6]



2.3 ábra Kilégzés [6]

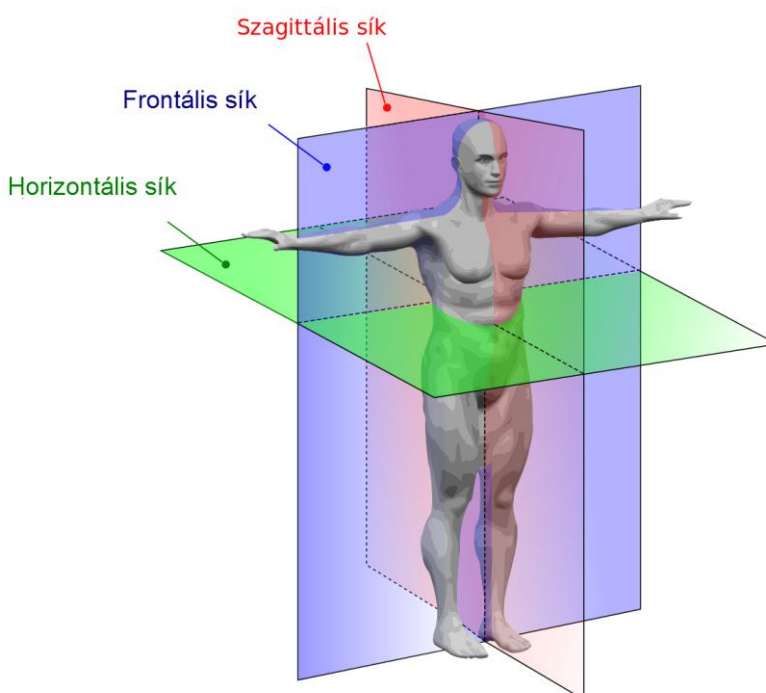
A légzés biomechanikájának megértéséhez, modellezéséhez szükséges csontos alkotók a háti csigolyák, szegycsont (sternum), és a bordák (costa) (2.4. ábra). Az ember 12 pár bordával rendelkezik, melyek a háti csigolyákból erednek, ezek közül a felső 7 valódi borda, azaz közvetlenül a sternumhoz kapcsolódik. Az álborderák közül a 8-10. pár a felettük lévő bordák porcainhoz rögzült. Az utolsó két pár lengőborda, mivel porcain szabadon végződnek. A bordák csontos ívei mindig hátulról előre, fentről lefelé haladnak, csak a porcok rész halad felfelé, és síkjaik, lefelé haladva egyre kijebb helyezkednek el.



2.4. ábra Mellkas csontos alkotói [www1]

2.2 A bordák, bordaporcok és a szegycsont mozgása [3]

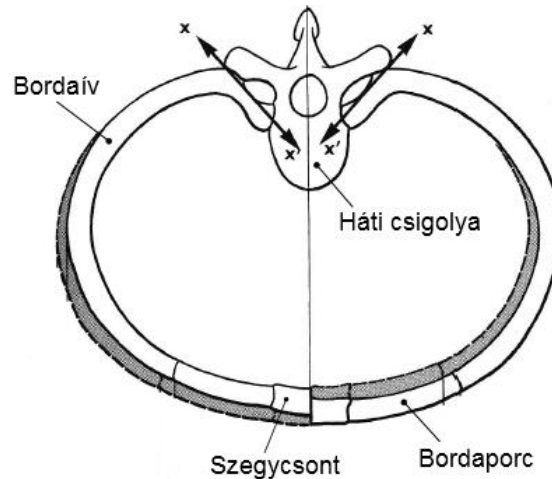
A különböző mozgások leírása a biomechanikában a Descartes koordináta-rendszerben és az anatómiai viszonyítási rendszerben történhet. Az egységes megjelenés érdekében dolgozatomban az anatómiai viszonyítási rendszerben adom meg, melyet a 2.5. ábra mutat.



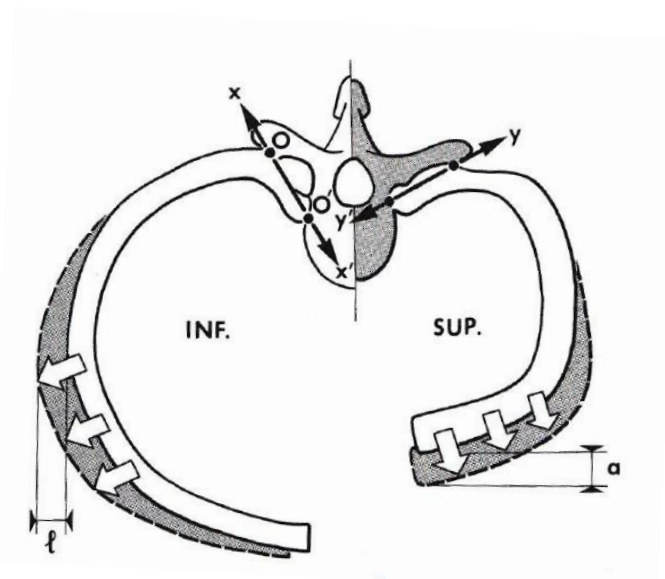
2.5. ábra Anatómiai síkok [www2]

A mellkas csontos alkotói a horizontális síkban a 2.6. ábrán látható. A bordák mozgásának vizsgálata során valójában két mechanikailag összefüggő ízület (costovertebralis és costotransversalis) közös mozgását értjük, amely kizárólag tengely körüli rotáció lehet. Ez a

tengely áthalad az ízületek középpontjain (O és O') és egyben a borda forgástengelyét adja, amely a gerinc két pontján (O és O') van felfüggesztve. Az alsóbordák esetén, (2.7. ábra bal oldala) az $x-x'$ tengely közel párhuzamos a szagittális síkkal, ezért a borda emelkedése a mellkas harántátmérőjét l távolsággal növeli.



2.6. ábra Mellkas csontos alkotói a horizontális síkban [3]

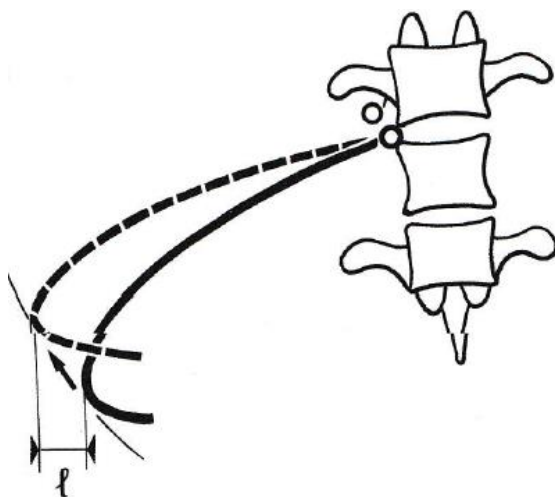


2.7. ábra Borda mozgása a horizontális síkban [3]

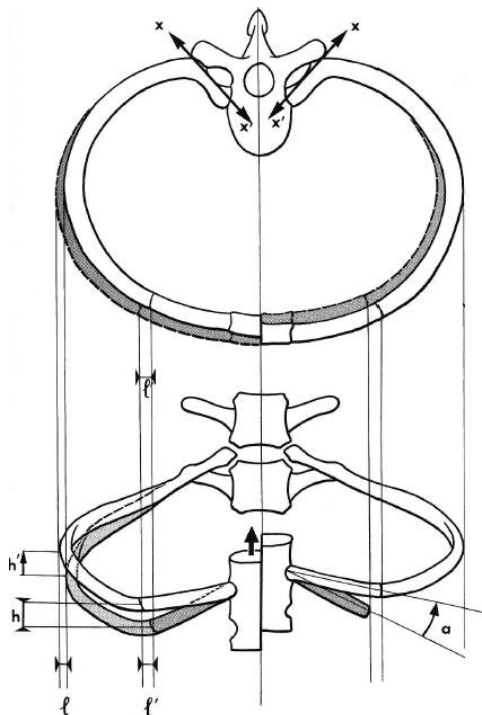
Amikor a borda a tengelye körül elfordul (2.8. ábra) az O középpont körül íves mozgást végez, ferde lefutása csökken állása vízszintesebb lesz, ennek következtében a borda legszélső (laterális) éle l távolsággal oldalra mozdul. A felsőbordák $y-y'$ mozgástengelyének iránya (2.7. ábra jobb oldala) a frontális síkhoz közelít, így e bordák mozgása a mellkas szagittális átmérőjének a távolsággal történő növekedését okozzák. Ezek alapján, megállapítható hogy a

középső bordák emelkedése a haránt- és a szagittális átmérő növekedését egyaránt eredményezi, ugyanis tengelyük 45° -ot zár be a szagittális és a horizontális síkkal.

Érdemes megvizsgálni a bordaporcok, és a szegycsont mozgását is (2.9. ábra felülről, és szemből mutatja). Ha a borda külső laterális része h' magasságot megemelkedik, l távolságot is kitér oldalra, a borda elülső vége addig h magasságot emelkedik, és előre mozdul l' távolságot. Ugyanakkor a szegycsont is megemelkedik és a bordaporc vízszintesebb helyzetű lesz, eredeti lefutásával szöget zár be. (2.9. ábrán a -val jelölt elfordulás)



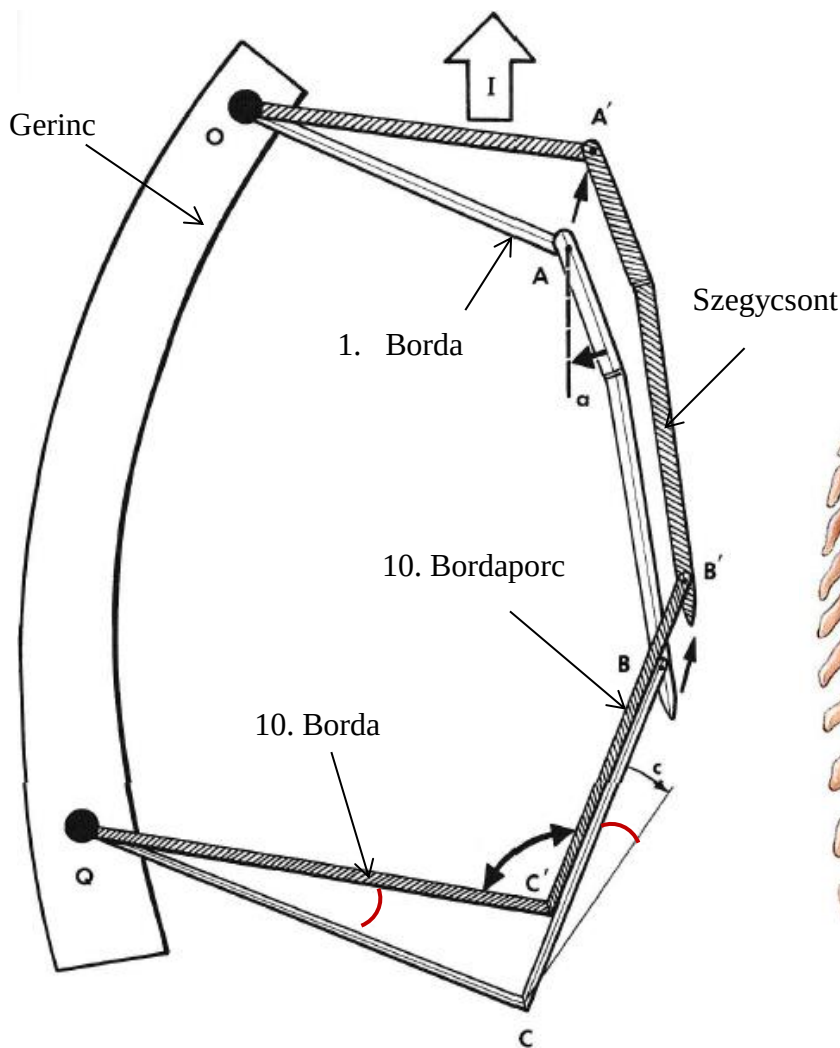
2.8. ábra Borda elfordulása [3]



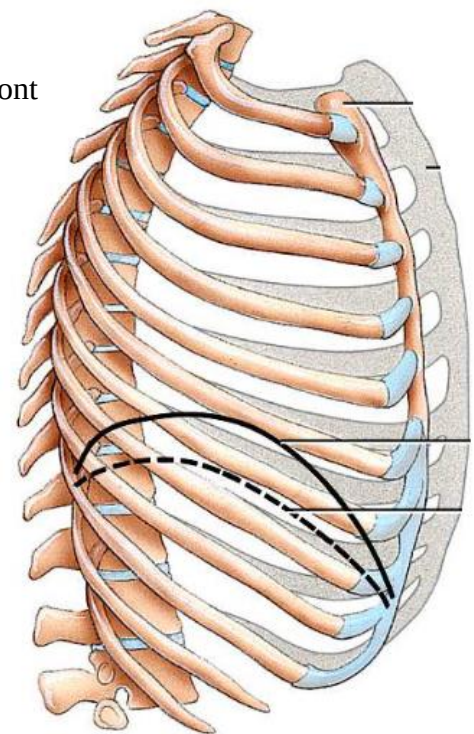
2.9. ábra Szegycsont ill. borda mozgása [3]

2.3 A légző mozgás mechanizmusa [3]

Az előbbi ismeretek összefoglalása alapján belátható, hogy a mellkas alakváltozása a szagittális síkban belégzés közben hasonlóan működik, mint egy négy csuklós mechanizmus. A mozgásban résztvevő csontos alkotók: a gerinc, az első borda, a szegycsont és a tizedik bordaporc és borda. A gerincet (függőleges helyzetben) rögzítettnek tekintve, a változások a következők, (2.10. ábra) az első borda megemelkedik, a costovertebralis ízület O körül íves mozgást végez, így elülső vége $A-A'$ körívet ír le, ennek hatására a szegycsont $A-B$ helyzetből $A'-B'$ helyzetbe kerül. A mechanizmus utolsó, hajtott elemét a 10. borda ($Q-C$) és az ahhoz kapcsolódó bordaporc ($C-B$) képezi. A 2.10. ábra is szemlélteti, hogy ez a kapcsolat nagyon rugalmas, (C és C' pontban eltérő szöget zárnak be az egyenesek). Mechanizmusról klasszikusan merevtestek esetén beszélünk, azonban itt a rugalmasság nem elhanyagolható. A bordaporcok rugalmassága biológiai működés szempontjából, nagyon nagy jelentőséggel bír, így figyelembe kell venni a modell készítés során.



2.10. ábra Mellkas csontos alkotóinak modellje [3]



2.11. ábra Törzs a szagittális síkban [6]

2.4 A légzés mechanizmusának modellezése [11]

Adams VIEW nevű programmal (MSC Software, 2013 Student Edition) megalkottam a mozgás szimulációját. Először azzal a közelítéssel éltem, hogy a bordát és a borda porcot egyetlen merevtestnek tekintem, így egy négycsuklós mechanizmust kapunk (2.12. ábra CD: 2.1legzes). Majd egy lényegesen pontosabb eredményre jutunk, ha külön elemnek tekintjük a porcokat, ezzel egy 5 csuklós mechanizmus (2.13. ábra) mozgása valósul meg. Utóbbi egyértelműen határozatlan szerkezet, azaz egy tag mozgása esetén nem határozható meg a többi tag mozgása, mert 1-től eltérő szabadságfokkal rendelkezik. Ez belátható az alábbi egyenlet alapján.

$$S_m = 3(n-1) - 2p_2 - p_1$$

ahol,

S_m : a szabadsági fokok száma

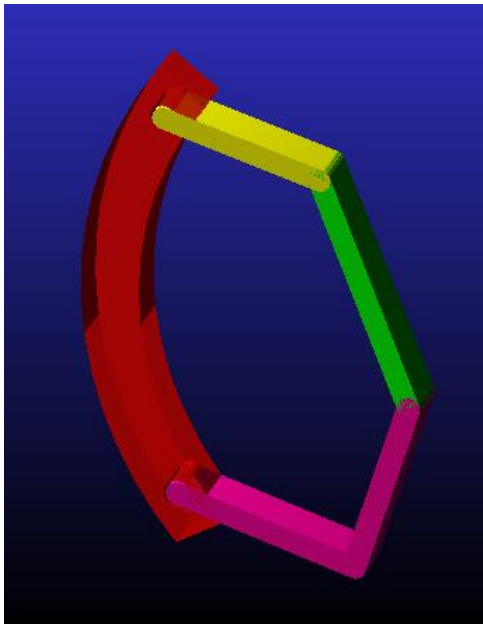
n : a mechanizmust alkotó merev testek száma

p_k : k kötöttségű kinematikai párok száma

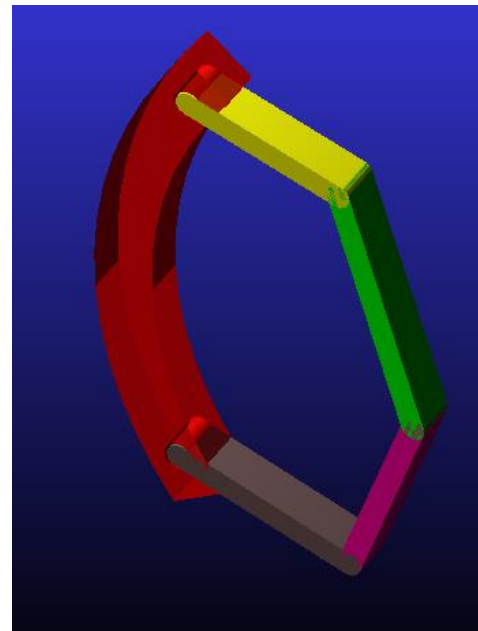
$$5 \text{ csuklós eset : } S_m = 3(5-1) - 2 \cdot 5 - 0 = 2$$

$$4 \text{ csuklós eset : } S_m = 3(4-1) - 2 \cdot 4 - 0 = 1$$

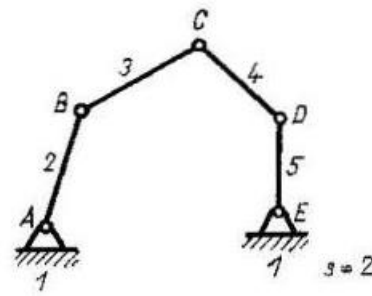
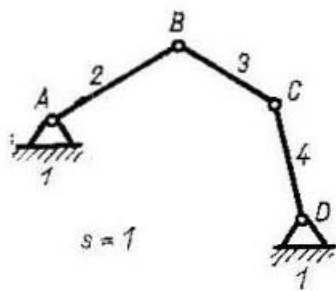
A mechanizmusok sematikus ábrái a 2.14 ábrán láthatóak. Azt a következtetést vonhatjuk, le hogy öt csuklós esetre nézve, még egy kinematikai feltételt kell adni. A 2.10. ábra alapján célszerű azt a feltételezést tenni, hogy a bordaporcok iránya a szagittális síkban nem változik (CD: 2.2legzes). A mozgást mindkét modell esetén egy periodikus nyomatékgerjesztés okozza, biológiai megfontolásból pontosabb lenne egy felületmentén megoszló erőrendszert alkalmazni, de a mozgás szempontjából ez a különbség elhanyagolható.



2.12. ábra Négycsuklós mechanizmus



2.13. ábra Ötcsuklós mechanizmus

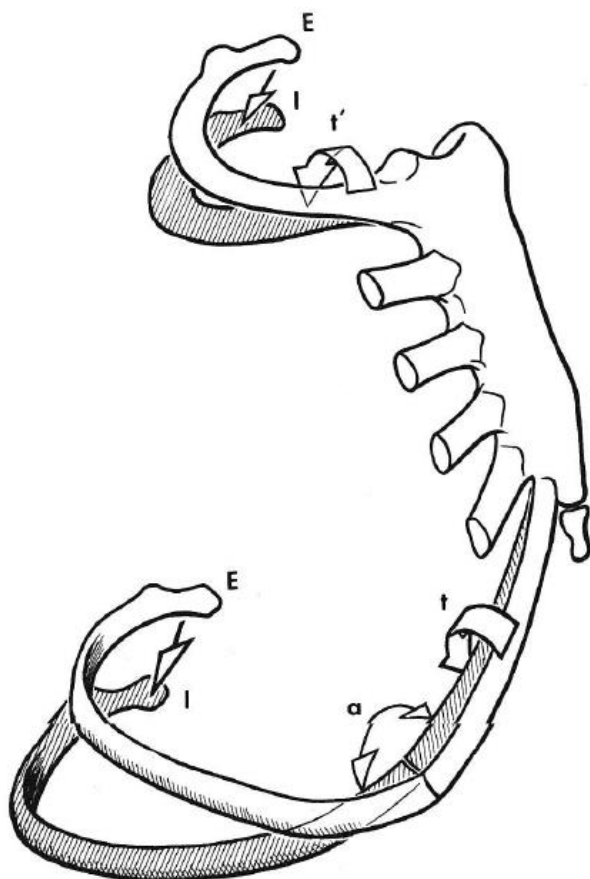


2.14. ábra Négy-ill. ötcsuklós mechanizmus sematikus rajza [11]

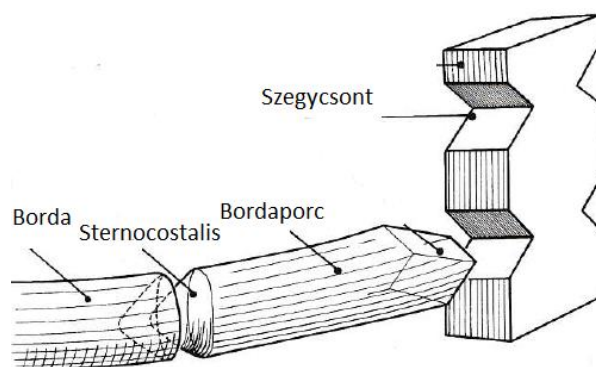
2.5 Bordaporcok rugalmasságának vizsgálata [3]

Érdeemes a porcok rugalmasságát részletesebben tárgyalni, mivel ez okozza, hogy a négycsuklós mechanizmus egy nagyon felületes és pontatlan modellje mellkasunk csontos vázának. Ki- és belégzés során a bordaporcok axiális rotációt végeznek (t , t' -vel jelzett irányban, 2.15. ábra), mert a borda dorzális (háti) végét a costovertebralis ízület a gerinchez rögzíti. A szegycsont megemelkedése a porcokat, hossz tengely körüli elfordulásra kényszeríti. A costochondralis és a sternocostalis által bezárt szög megváltozik (α). Az említett ízületek kapcsolódása és a bordaporc és a szegycsont csatlakozása (2.16. ábra) rotációt egyáltalán nem tesz lehetővé, de némi vertikális és laterális mozgást igen. Az előbbieket összefoglalva gépészethez közelebb álló terminológiával, azt mondhatjuk, hogy a bordaporcok torziós rúdként viselkednek. A torziós rúdnak tekintett porcok a belégző izmok energiáját rugalmas

energiaként tárolják, amikor az izmok aktivitása megszűnik, a bordaporcok rugalmassága visszahozza a mellkast a kiindulási helyzetbe. A meszesedés következtében, a porcok alakváltozási képessége a kor előrehaladtával csökken, amely a mellkas rugalmasságának és a légzés hatékonyságának csökkenéséhez vezet. A modellezés szempontjából ez szűkebb mozgásterjedelmet, azaz kisebb maximális szögelfordulást jelent.



2.15. ábra Borda és porcának elfordulása [3]



2.16. ábra Boda, bordaporc és szegycsont csatlakozása [3]

3 Alkar hossztengelye körüli forgása és a csukló mozgása

A humán felső végtag összesen hét szabadságfokkal rendelkezik: három a váll, egy a könyök, kettő a csukló ízület, a hetedik az alkar axiális rotációja, amely két ízülethez (a csuklóhoz és a könyökhöz) is szorosan kapcsolódik. Az alkar rotációs mozgása a legfontosabb a kéz helyzetének irányításában. Csuklónkkal együtt ez lehetővé teszi, hogy a váll ízületi középpontú gömb alakú mozgástérben, kezünk bármilyen helyzetben megfogjon, megtartsa egy tárgyat. A felső végtagunk végrehajtó részének pozicionálásához elegendő a csuklóízület két szabadságfoka és az alkar axiális rotációja, azaz a hét szabadságfokból három.

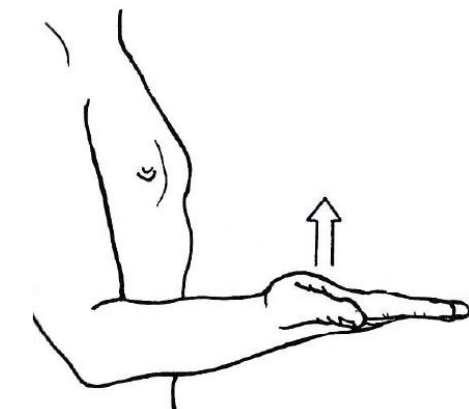
3.1 Pronáció-szupináció jelentősége [1]

Rendkívül ésszerű és hatékony lépés, a rotációs mozgást az alkar ízületeivel megvalósítani. Így nem szükséges csontos támasz, a mobilis szerkezet megtartásához, és az alkar izmai áthaladhatnak a csuklón. Ha a kéz longitudinálisan rotálna, akkor az izmok összezsavarodnának, azaz a kéz mozgását biztosító összes izomnak a kézen kellene erednie, amely hatékonyságának és méretének rovására menne.

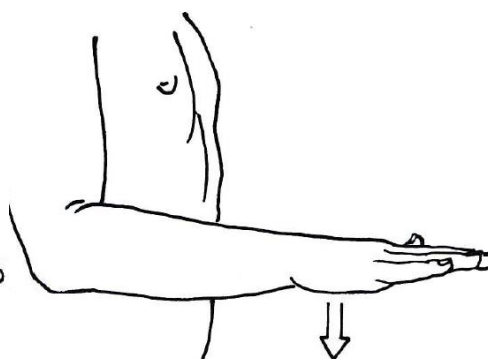
3.2 Az alkar anatómiája és mozgásai [1]

Az alkar mozgásának tárgyalásához szükséges definíciók:

- Szupinációs helyzet esetén a tenyér fölfelé néz és a hüvelykujj kifelé mutat (3.1. ábra)
- Pronációs helyzetben a tenyér lefelé néz és a hüvelykujj a mediál (közép sík) felé mutat (3.2 ábra)

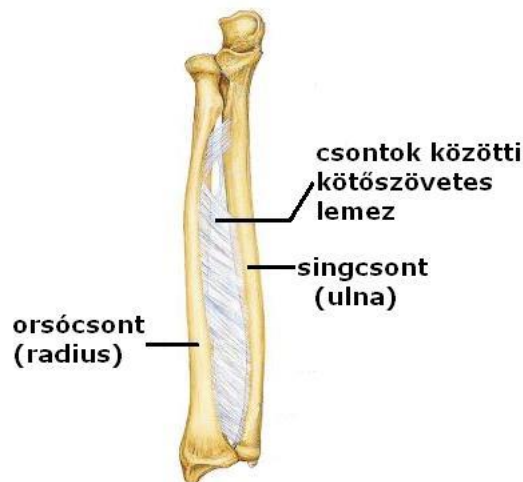


3.1. ábra Szupinációs helyzet [1]



3.2. ábra Pronációs helyzet [1]

Az alkar csontos vázának szerkezetét két csont alkotja az orsócsont (radius) és a singcsont (ulna) (3.3. ábra).

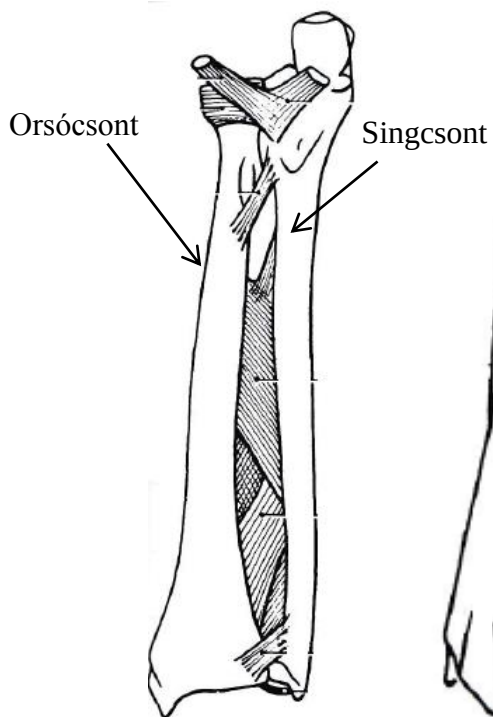


3.3. ábra Alkar csontjai [www3]

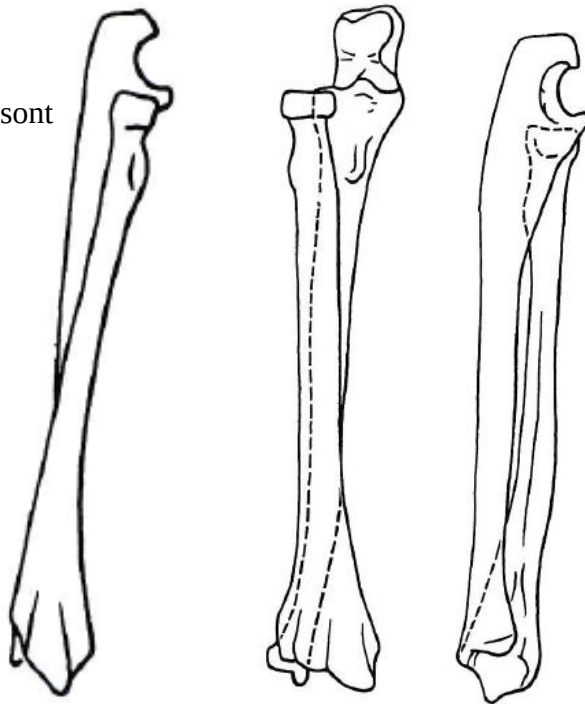
Szupináció esetén a mozgásterjedelem 90° -ot, míg pronációnál 85° körüli értéket ér el. A kis eltérésnek csontszerkezeti magyarázata van. Ezt a különbséget modell készítés során nem vettem figyelembe.

Szupinációs helyzetben az orsócsont és a singcsont egymás mellett fekszik, a singcsont a mediális oldalon és tengelyük egymással párhuzamos. (3.4. ábra előlnézet, oldalnézet) Oldalnézetben a radius enyhén konkáv görbülete figyelhető meg, mely a későbbiekben a mozgás vizsgálatánál is szerepet játszik.

Pronációs helyzetben az orsócsont és a singcsont keresztezik egymást. Pronációban az orsócsont proximális vége laterálisan, disztális vége mediálisan helyezkedik el a singcsonthez képest (testhez közeli vége oldal irányba a testtől távolabb, testtől távolabbi vége a szagittális sík felé) (3.5. ábra előlnézet, oldalnézet)

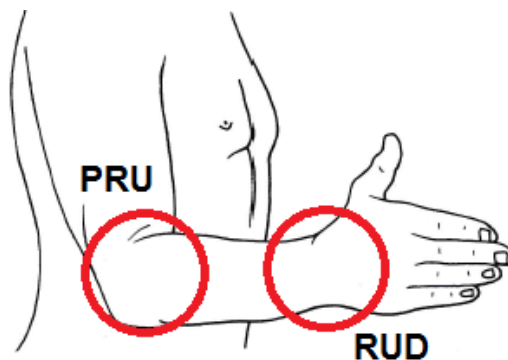


3.4. ábra Szupinációs helyzet szemből ill. oldalról [1]



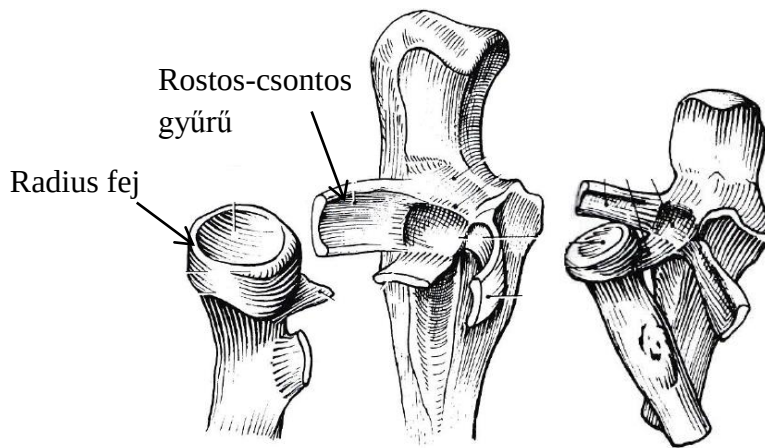
3.5. ábra Pronációs helyzet szemből ill. oldalról [1]

A mozgásban két mechanikai összeköttetésben álló ízület vesz részt. A proximális radioulnaris (PRU) ízület, amely anatómiailag a könyökízülethez tartozik, és a disztális radioulnaris (RUD) ízület, anatómiailag a csuklóízülettől különálló ízület (3.6. ábra).



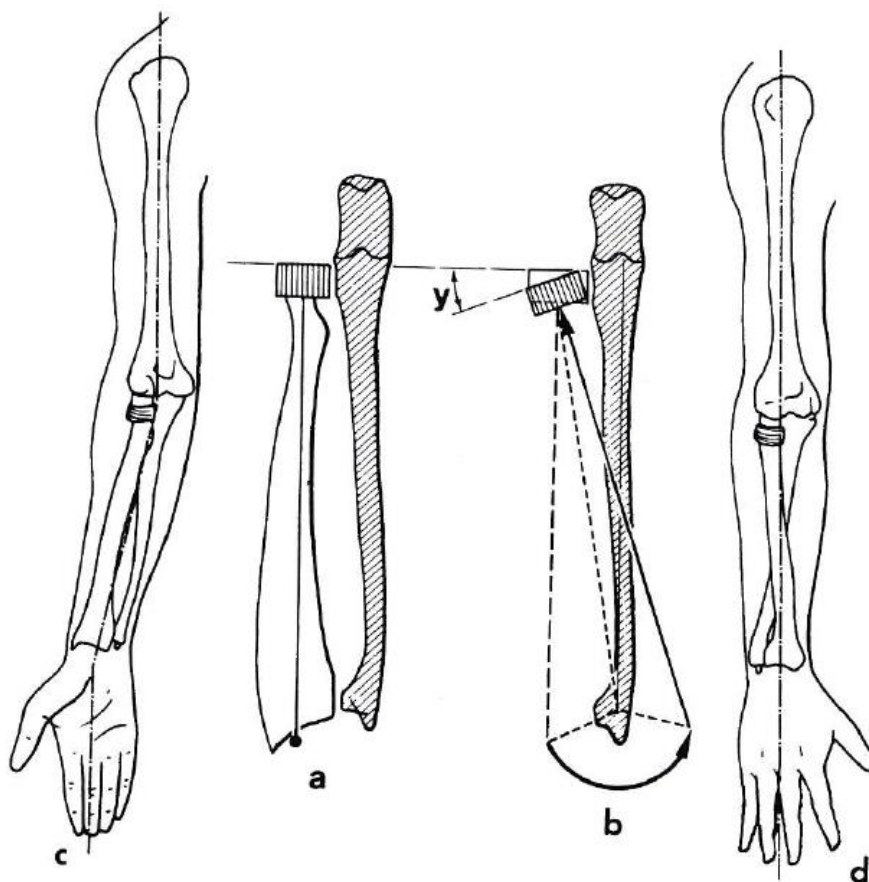
3.6. ábra Alkar ízületei [1]

A proximális radioulnaris ízület, mely a könyök ízülettel van mechanikai összeköttetésben, henger formájú ízfelszínének köszönhetően egy szabadságfokkal rendelkező forgóízület. A mozgás mechanikailag olyan akár egy csapágyazott tengely elfordulása (3.7. ábra).



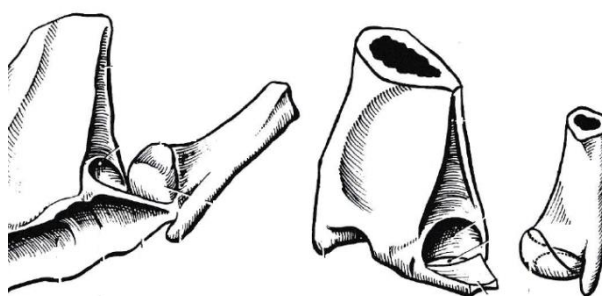
3.7. ábra Proximális radioulnaris ízület [1]

Részletesebb vizsgálat esetén a radius feje nem tekinthető henger alakúnak, ugyanis kissé ovális. Ez indokolja, hogy a radius körüli gyűrű nem lehet teljesen merev, mert a tökéletes rögzítést, a rugalmasságával biztosítja. A mechanikai modell esetén szabályos hengert és merev testeket használtam. Az ovális alaknak jelentős szerepe van, mert emiatt pronáció közben a radius tengelye laterális irányba mozdul el. Így biztosítva helyet a szupinátor izom tapadásának. Az említett tengelynek a mozgása olyan kúpfelszínen történik, melynek tengelye a két radioulnaris ízület (proximális, disztális) közös tengelye (3.8. ábra b). Az orsócsont felső ízfelszínének a síkja lefelé és kifelé billen pronáció alatt (3.8. ábra b) y), ez a járulékos mozgás az orsócsont, singcsont körüli rotációja miatt jön létre. Érdeemes megfigyelni, hogy az alkar rotációja során a radius hossz tengelyének irányváltozása miatt az alkar és a kar által bezárt szög is változik.



1.8. ábra Radius tengelyének változása pronáció során [1]

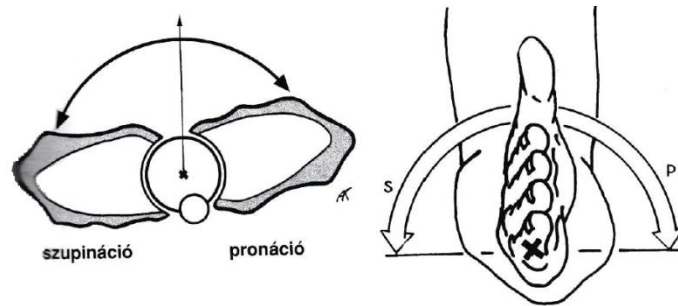
A proximális radioulnaris ízülethez hasonlóan, a disztális ízület is egyszabadságfokú, henger felszínű forgó ízület. Feladata a radius és az ulna összekapcsolása (3.9. ábra), hogy biztosítsa az ulna feje és a kéztőcsontok között ne legyen közvetlen kapcsolat.



3.9. ábra Disztális radioulnaris ízület [1]

Disztális irányból vizsgálva a mozgást, feltételezhető, hogy az ulna mindig helyben marad, míg a radius elmozdul, azaz az ulna körül rotációt végez. A rotáció tengelye az ulna mediális élén és a kisujjon halad végig (3.10. ábra X a forgástengely). A pronációs és szupinációs véghelyzetben a csontos ütközés korlátozza a mozgást. Ebből következik, hogy az ízfelszínek

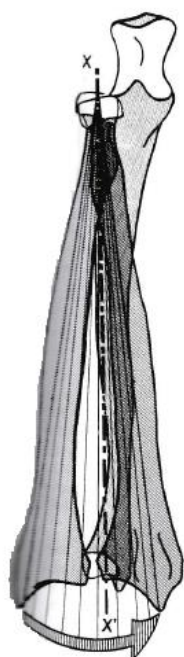
maximálisan érintkeznek, azaz a rotációs középhezelyzetben a görbületi sugarak egy vonalba esnek. [1]



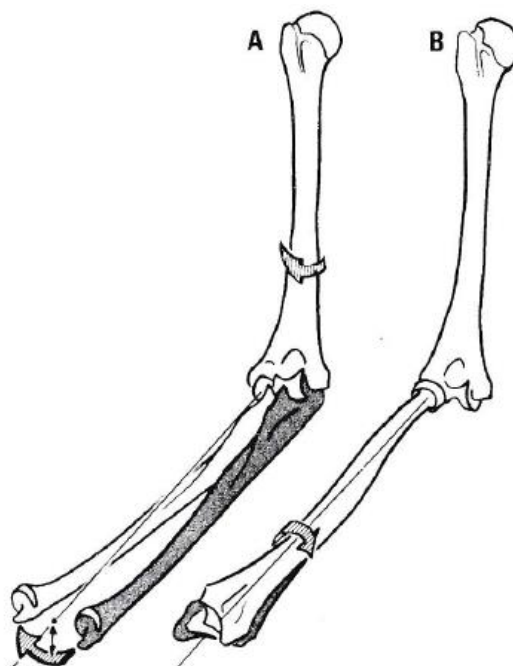
3.10. ábra Disztális irányból a radius forgás tengelye [1]

3.3 A pronáció- szupináció mozgástengelye [1]

A 3.2 fejezetben külön vizsgált két ízület, funkcionális párosként működik, közöttük mechanikai kapcsolat van. A két radioulnaris ízület működésének feltétele, a közös mozgás tengely (mozgás tengelyeik egybe essenek). A funkcionális kapcsolat az ízfelszínek kongruenciájával is magyarázható. A pronáció-szupináció mozgás során az orsócsont és a singcsont közös tengely körül rotálódik, de ez jelentősen eltérő mozgást eredményez a két csont esetében. Az orsócsont mozgása egy olyan kúp palástján történik, amelynek csúcsa a könyöknél, alapja a csuklónál helyezkedik el (3.11. ill. 3.12. ábra B része). A singcsont rotációja során szinte teljesen párhuzamos marad önmagával, és disztális végével egy félkörívet ír le (3.12. ábra A része). Ez annak a következménye, hogy a közös mozgástengely kisebb szöget zár be a singcsont tengelyével, mint a radiuséval. Azonban ennek a tengelynek a mozgása változó, alkalmazkodó és térbeli helyzetét nem lehet pontosan meghatározni. Érdeemes megemlíteni a felkar jelentős szerepét is az alkar rotációs mozgásában: ennek szemléletes bizonyítéka, hogy teljesen kinyújtott kar esetén a pronáció-szupináció mozgásterjedelme lecsökken.



3.11. ábra Alkar csontjainak mozgása [1]



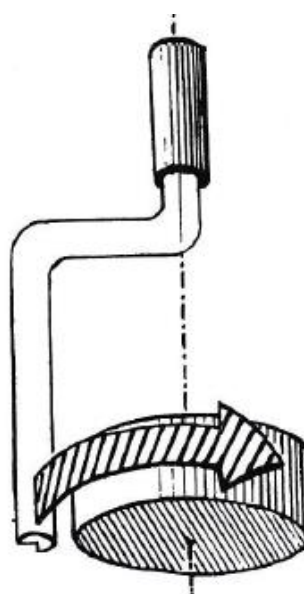
3.12. ábra Singesont, ill. orsócsont mozgása [1]

3.4 Az alkar rotációjának modellezése

A 3.3. fejezetben vázolt bonyolult mozgás egy indítókar mozgásával modellezhető (CD: 3.1csuklo). Ezt az egyszerűsítést a radius mozgása és alakja teszi lehetővé: (3.13. ábra) a radius három szegmensből áll, disztális vége szintén körívet ír le. Ha a felkar mozdulatlan, akkor az alkar mozgása az ulna fejének hengere körül egy köríven történik (3.14. ábra).



3.13. ábra Három szegmensből álló radius [1]

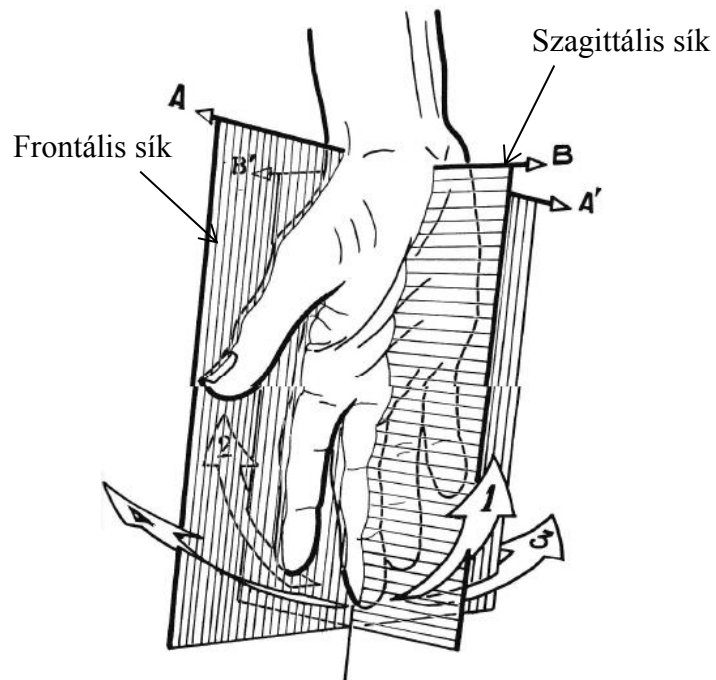


3.14. ábra Indítókar mozgása [1]

3.5 A csuklózületi komplexuma [1]

Csuklózületünk két szabadságfokkal rendelkezik, amely két egymásra merőleges tengely körüli forgást tesz lehetővé (3.15. ábra):

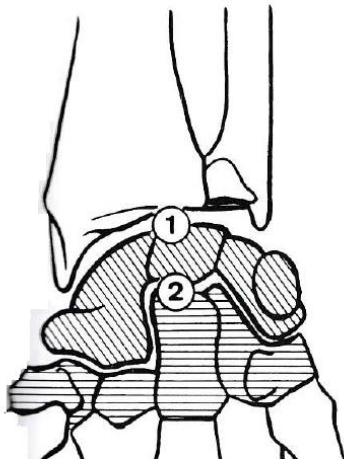
- a frontális síkban futó $A-A'$ tengely körüli elfordulás, a szagittális síkban flexió-extenzió mozgást okoz:
 - ✓ flexió: 1-es nyíl a kéz tenyéri felszíne az alkar elülső felszínéhez közeledik
 - ✓ extenizó: 2-es nyíl a kéz dorzális felszíne közelít az alkar hátulsó felszínéhez
- a szagittális síkban futó $B-B'$ tengely körüli elfordulással, a frontális síkban jön létre az abdukciós-addukciós mozgás
 - ✓ addukció: 3-as nyíl a kéz a test középvonala felé mozog
 - ✓ abdukció: 4-es nyíl a kéz a test középvonalától távolodik



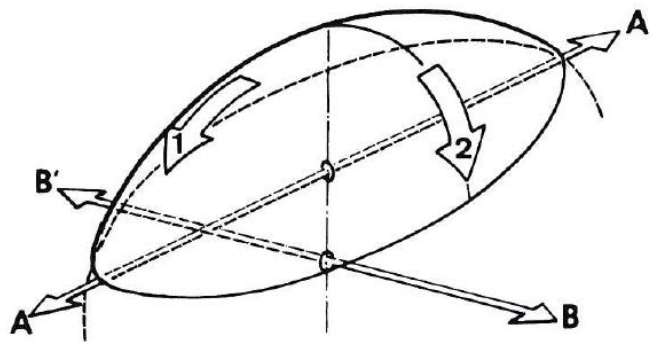
3.15. ábra Csuklózület mozgástengelyei [1]

A két tengely körüli forgást a csukló két ízülettel valósítja meg:

- Radiocarpa (RC) ízület: az orsócsont feje és a proximális kéztőcsontsor alkotja (3.16. *ábra 1* jelű rész)
- Intercarpa (IC) ízület: a proximális és disztális kéztőcsontsorok által alkotott ízület (3.16. *ábra 2* jelű rész)



3.16. *ábra* Csuklóízületi komplexum tagjai [1]

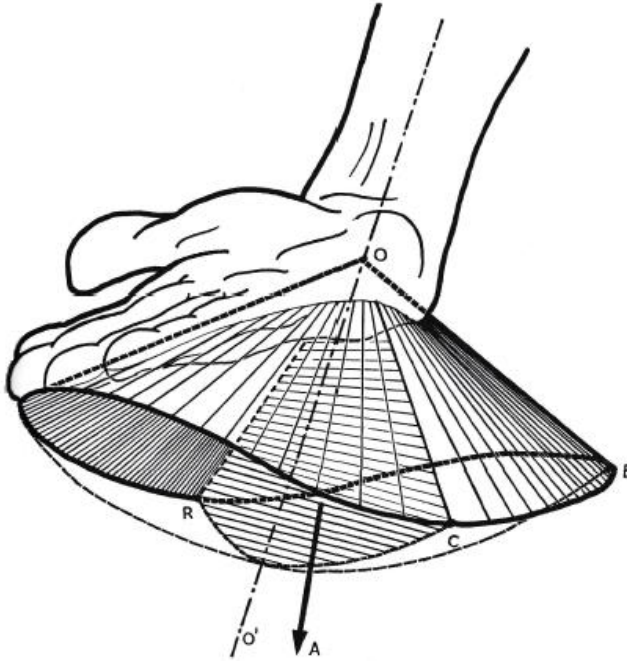


3.17. *ábra* Radiocarpalis ízület [1]

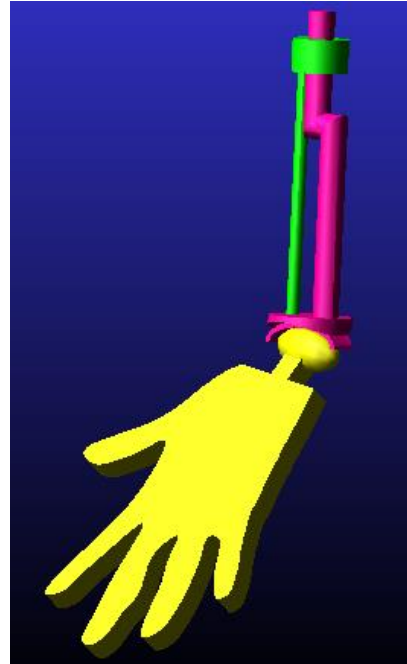
Az RC ízület ellipszoid alakjával biztosítja a csukló eltérő terjedelmű mozgásait. A flexiós és extenziós mozgás az $A-A'$, míg az abdukciós-addukciós mozgás a $B-B'$ tengely körül történik (3.17. *ábra*). Modell készítés során csak az RC ízületet vettem figyelembe, mivel az egyéb ízületi komplexumhoz vagy kéztőcsontokhoz tartozó ízületekben szinte nincs mozgás.

3.6 A cirkumdukció mozgása és modellezése [1]

A cirkumdukció a flexiós, extenziós, addukciós és abdukciós mozgások kombinációjaként jön létre, azaz a kéz a csuklóízület két tengelye körül egyszerre mozog. A maximális cirkumdukció során kezünk a térben egy kúpfelszín jár be, melynek csúcsa a csuklóízület középpontja (3.18. ábra).



3.18. ábra Cirkumdukció mozgás [1]



3.19. ábra Cirkumdukció mozgás modellje

A mozgás során bejárt kúp nem szabályos: alapja kör helyett ellipszis, mivel az egyes tengelyek körüli mozgásterjedelem eltérő. Ezt a mozgás modellezése során (3.19 ábra CD: 3.2csuklo) úgy valósítottam meg, hogy tengelyek körüli forgás eltérő nagyságú nyomatékkal történik. Az egyikre sinusos, míg a másikra cosinusos gerjesztés hat, azaz az ellipszis analitikus egyenletét kell használni.

4 A hüvelykujj mozgása

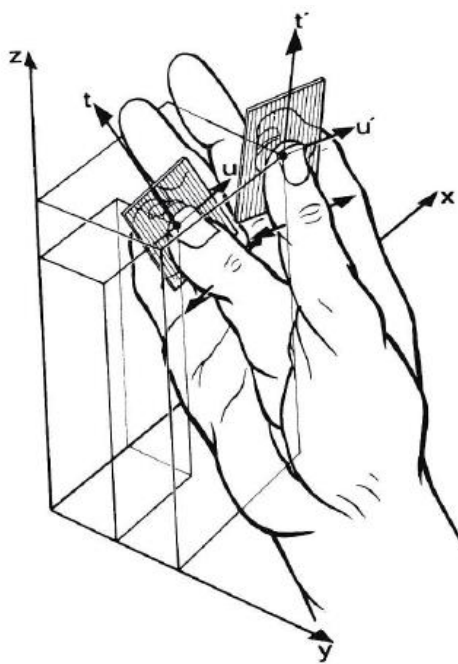
Kéznek nevezzük a főemlősök mellső végtagján lévő fogószervet. A fogás lehetőségének számtalan formája létezik. Először az ízeltlábúaknál jelent meg (például a rák ollója). Az egyik legfejlettebb fogószerv a majmok keze, de még itt se fejlődött ki megfelelően a hüvelykujj. Tökéletes fogásra csak az ember képes. Kezünk figyelemre méltó szerkezet, funkció szempontjából a felső végtag végrehajtó szerve, amely számtalan feladatot képes ellátni. Működésének kulcsa a hüvelykujj sajátos mozgása. Az oppozíció, az a képesség, amikor egyik ujjunk képes szembefordulni a többivel. Ez a funkció már bizonyos nagy emberszabású majmoknál is megjelent, de működése még tökéletlen. Az emberi kéz az egyetlen, amely a hüvelykujj és a többi ujj között képes kapcsolatot létesíteni. Az emberszabású majmoknál a kitüntetett ujj mérete (rövidsége) a tökéletesség gátja. Hüvelykujj nélkül kezünk elveszítené a legtöbb képességét, kiemelkedő szerepét annak is köszönheti, hogy a tenyértől és a többi ujjtól előbbre helyezkedik el (4.1. ábra) [1].

Ujjbegyeink összeérintéséhez összesen öt szabadsági fokra van szükség: (4.2. ábra):

- három szabadságfok szükséges a pontok találkozásához (x, y, z)
- kettő szabadságfok szükséges a síkok tökéletes illesztéséhez (t, u)



4.1. ábra Elöl helyezkedő hüvelykujj [1]



4.2. ábra Oppozíció [1]

4.1 Anatómiai ismeretek [1]

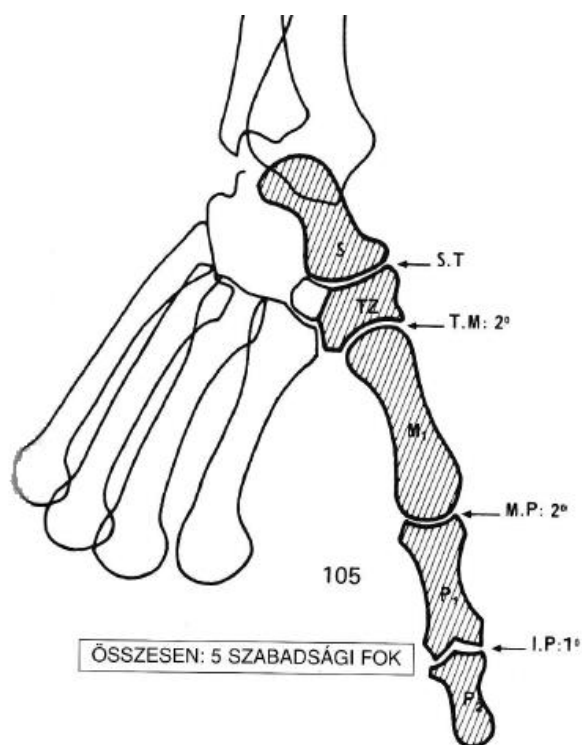
A hüvelykujj sajátos elrendeződésű csontízületi oszlopa öt csontból álló szerkezet a kéz laterális szélén (4.3. ábra):

- os scaphoideum (S)
- os trapezium (TZ)
- első metacarpus (M_1)
- első phalanx (P_1)
- második phalanx (P_2)

A mozgásban résztvevő ízületek (4.3. ábra):

- articulatio carpometacarpea pollicis (TM)
- articulatio metacarpophalangea (MP)
- articulatio interphalangea (IP)

A hüvelykujjnak mindössze két ujjperce van, ezek oszlopa sokkal proximálisabban (közvetlenebbül) kapcsolódik a kézhez, mint a többi ujj esetén. Occam univerzális takarékosági elve, szerint a szervezet az optimális funkcióhoz mindig a minimálisan szükséges alkotóelemet biztosítja. Ez esetben ez öt csontos alkotót jelent. (Bármelyik irányba változna a hüvelykujjunk mérete az oppozíciót, így a megfelelő fogást akadályozná). A hüvelykujj oppozíciós mozgásához öt szabadsági fok szükséges és elegendő. A TM és az MP ízület két-két szabadsági fokot valósít meg (4.3. ábra) míg a felső ujjperc képes további egy tengely körüli forgásra (IP ízület).

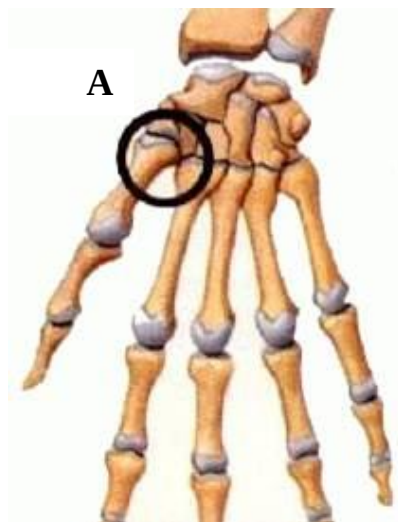


4.3. ábra Hüvelykujj ízületei és csontjai [1]

articulatio carpometacarpea pollicis (TM); articulatio metacarpophalangea (MP); articulatio interphalangea (IP)

4.2 Az ízületek analízise [1]

A hüvelykujj mobilis oszlopának alapján fekvő TM (articulatio trapeziometacarpea) ízület döntő abban, hogy ujjunk a kézhez viszonyított bármilyen helyzetet felvegyen. Ezt a kapcsolatot egy nyereg ízülettel valósítja meg (4.4. ábra), amely két, egyik irányba konvex, másik irányba konkáv nyereg alakú felszínből áll. Az ízfelszíneket a trapezium és az első metacarpus bázisa alkotja. Az ízületek felszíne sok vizsgálat után sem egyértelmű, de egy nyeregfelülettel jól modellezhető, amely egy parabolának, egy parabola mentén történő eltolásával képezhető. Az ízfelszíneken funkcióban is fontos szerepet játszó barázda húzódik végig. Bár az ízfelszínek illeszkedése nem tökéletes, de záródásuk megakadályozza a metacarpus longitudinális rotációját (4.5. ábra ϕ) a trapéziumhoz képest.

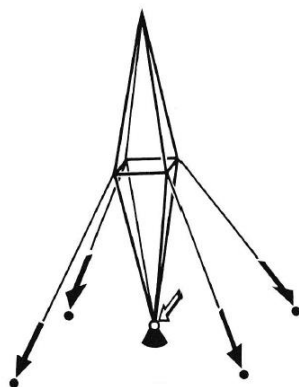


4.4. ábra MP ízület elhelyezkedése [www4]



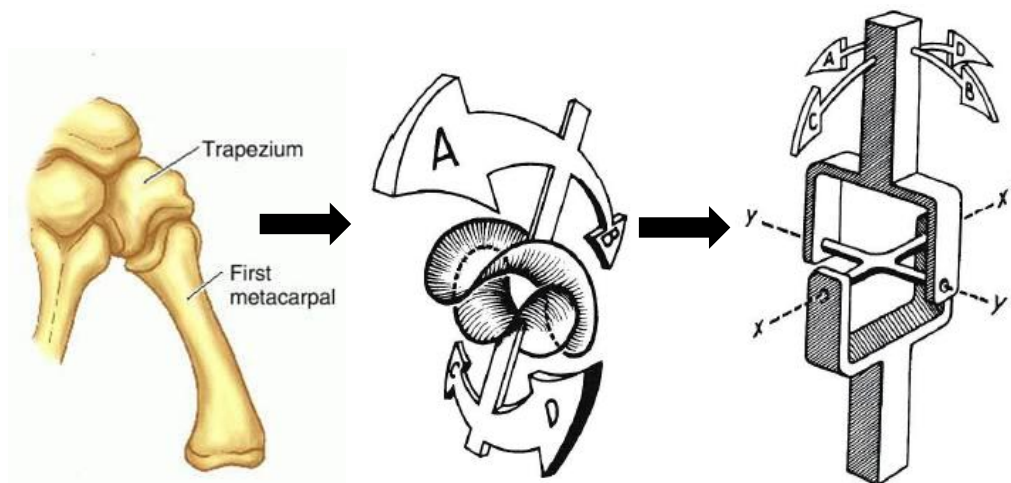
4.5. ábra Oppozíció [1]

Az első metacarpus ezzel a kapcsolattal - az ízfelszínek összetartása mellett - a térben bármilyen helyzetet képes felvenni. A felszínek stabilitásában nagy szerepe van az TM ízület szalagjainak és az izmoknak is. Az első metacarpus mozgása egy olyan rácsos tartószerkezethez hasonlítható, melynek magassága a rögzítő kötelek hosszával változtatható (4.6. ábra).



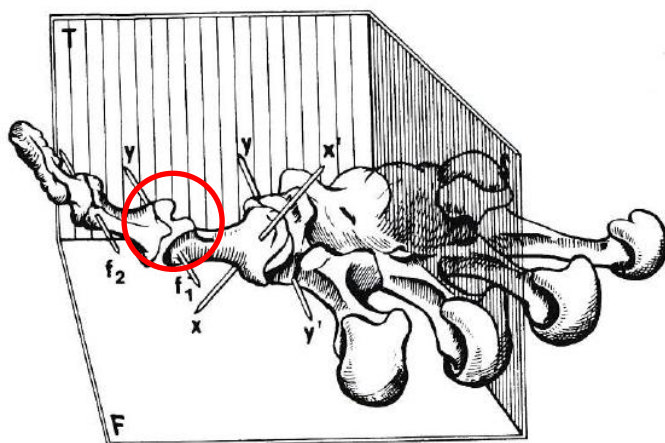
4.6. ábra Rácsos szerkezet (a kifeszítő kötelek hosszának csökkentésével a rácsos tartó magassága csökken, de ehhez szükséges a belső négyzetet alkotó rudak hosszának változása) [1]

A mozgások vizsgálatánál, első sorban a csontos alkotókra fókuszálunk, a szalagok és az izmok szerepét mellőzzük. A nyeregízület, két szabadságfokú mozgást valósít meg (kéttengelyű ízület): két, egymásra merőleges tengely körüli elfordulást. Részletesebb elemzéséből következik, hogy ennek az ízületpárnak a mechanikai modellje nem más, mint egy univerzális ízület, amely a gépészetben a kardántengelynek megfelelő szerkezet (4.7. ábra).

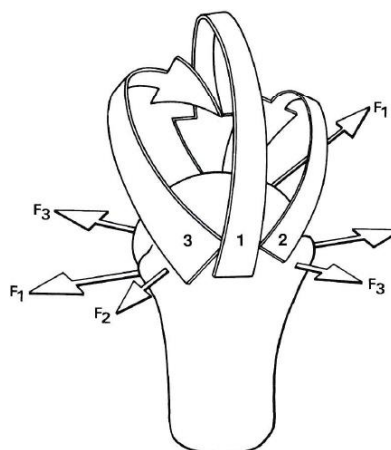


4.7. ábra TM ízülettől a kardántengelyig [1]

A hüvelykujj öt szabadsági fokából, így kettő tisztázott, a következő két szabadságfokot a metacarpophalangea ízület (4.8. ábra) biztosítja. Ebben az esetben az ízület működése csupán a csontos alkotókkal nem demonstrálható, mivel csatlakozó csont felületek nem olyan szemléletesek, továbbá a mozgás kiterjedése is kisebb léptékű.



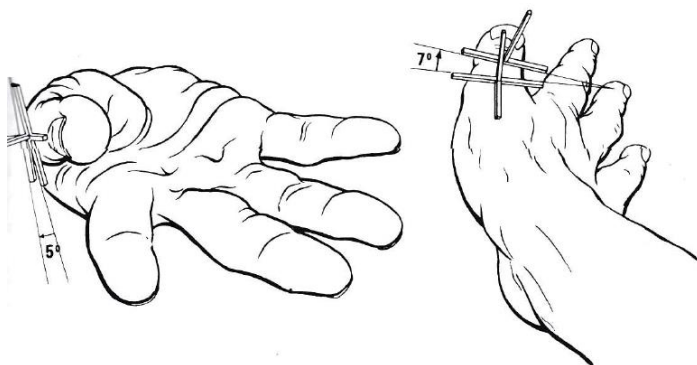
4.8. ábra MP ízület [1]



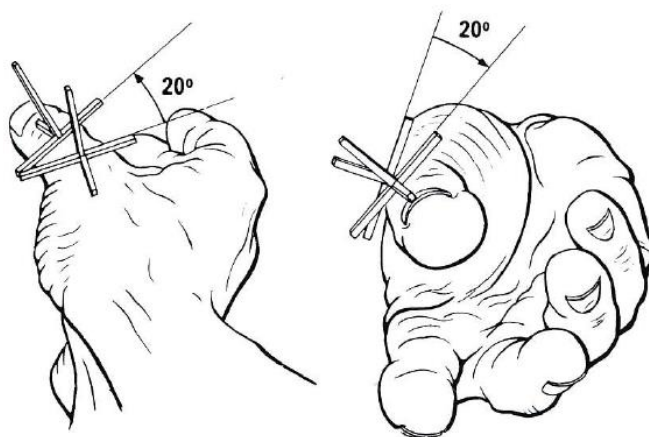
4.9. ábra MP ízület körüli forgás irányok [1]

Az ízületben teljesen nyújtott helyzetből indulva kétféle mozgás jöhet létre:

- tiszta MP ízületi flexió (4.9. ábra 1-es nyíl), melyet a laterális és mediális szezámmizmok összehangolt működése hozza létre
- komplex oldalirányú mozgással és axiális rotációval kombinált mozgások:
 - ✓ mediális irányú mozgással és kirotációval ($5-7^\circ$) kombinált flexió (4.9. ábra 2-es nyíl, szemléltetése 4.10. ábra)
 - ✓ laterális irányú mozgással és berotációval (20°) kombinált flexió (4.9. ábra 3-as nyíl szemléltetése 4.11. ábra)



4.10. ábra Mediális irányú flexió [1]

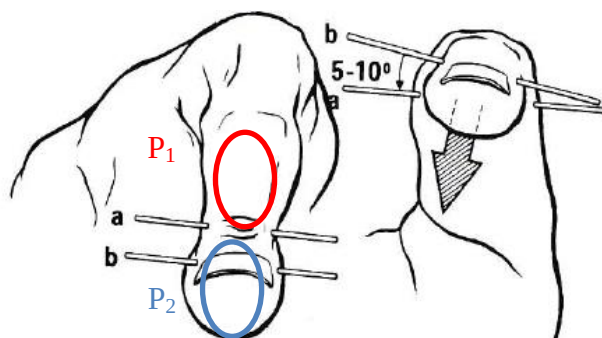


4.11. ábra Laterális irányú flexió [1]

Összegzésként az mondható, hogy az MP ízület működése során járulékos mozgások figyelhetők meg: a maximális flexió laterális elmozdulással és berotációval társul, ami első sorban az M_1 (első metacarpus) fejének asszimetriája és a szalagok eltérő feszülése miatt lép fel.

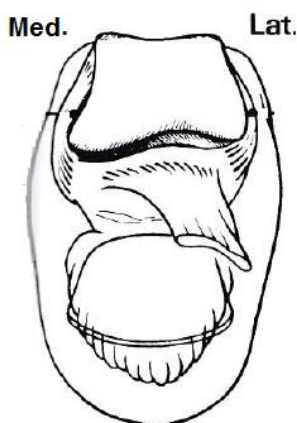
A hüvelykujjunk még nem részletezett ízülete az interphalangea (IP) ízület, amely első ránézésre egyszerű. Az IP ízület egy csukló ízület, amely fix transzverzális tengellyel

rendelkezik és P_1 ízfelszín körül extenziót és flexiót valósít meg. Valójában ezek a mozgások, sokkal bonyolultabbak, mert a mozgás következtében létre jön egy járulékos elfordulás, aminek következtében P_2 berotálódik (4.12. ábra).

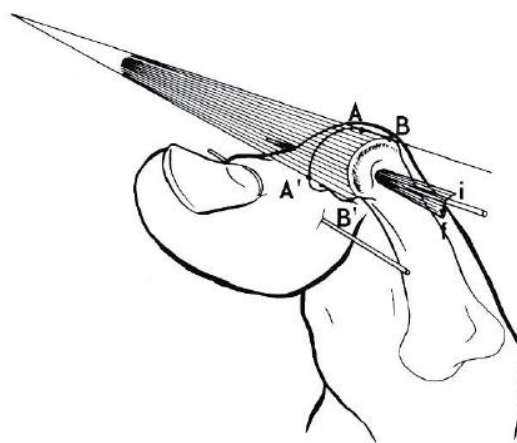


4.12. ábra Első phalanx járulékos rotációja [1]

A 4.12. ábra azt szemlélteti, hogy teljes extenzióban (kép bal oldala) P_1 fején (a) és P_2 bázisán (b) átfutó tű párhuzamos, azonban flexió során már 5-10°-os szöget zárnak be egymással. Ez a jelenség az ízületek felszínének anatómiai szerkezetével magyarázható. P_1 ízület felszíne (amelyen az elfordulás történik) asszimmetrikus, ugyanis a mediális csontvég jobban kiemelkedik előre és nagyobb, mint a laterális csontvég. Továbbá a laterális condylus (csontvég) görbületi sugara kisebb, így nagyobb lejtést és hosszabb útszakaszt is eredményez P_2 számára, mint a mediális condylus (4.13. és 4.14. ábra A-A' < BB').

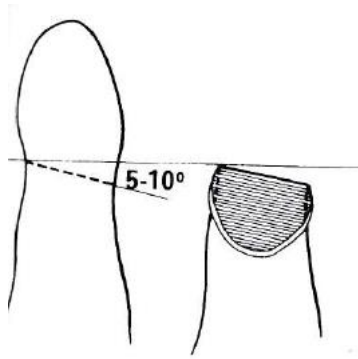


4.13. ábra P_1 ízület felszíne [1]



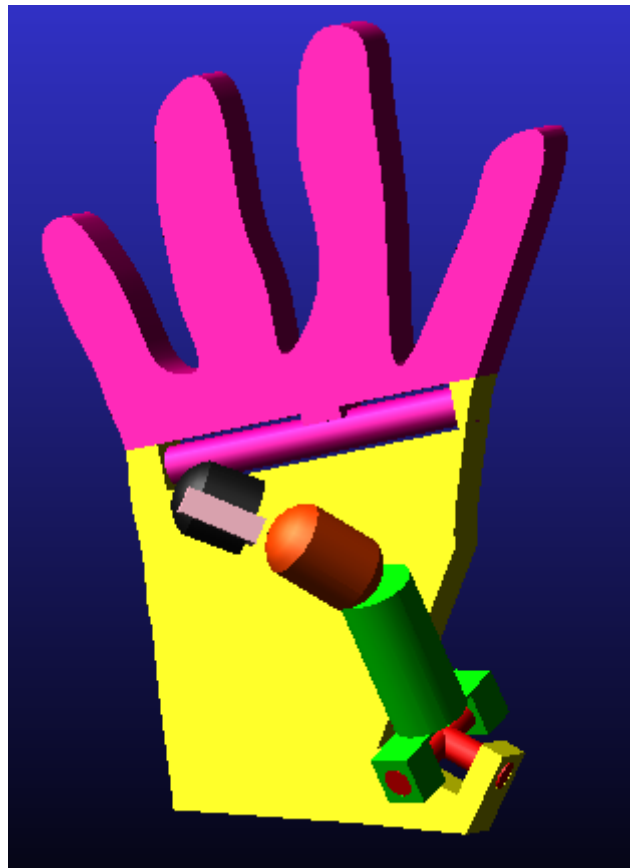
4.14. ábra Flexiós tengelyek sorozata [1]

Belátható, hogy a flexiós-extenziós mozgásnak nem csak egy tengelye van, hanem a kiindulási helyzettől kezdve a véghelyzetig tengelyek sorozata létezik (4.14. ábra). Az oppozíció mozgás modellezése során az IP ízület viselkedését, úgy vettem figyelembe, hogy tengelye nem merőleges az ujjra, hanem azzal 5-10°-os szöget zár be (4.15. ábra).



4.15. ábra P_2 flexiójának modellje [1]

A 4.1. és 4.2. fejezetek alapján modelleztem a hüvelykujj oppozíciós mozgását (4.16. ábra CD: 4oppozíció).



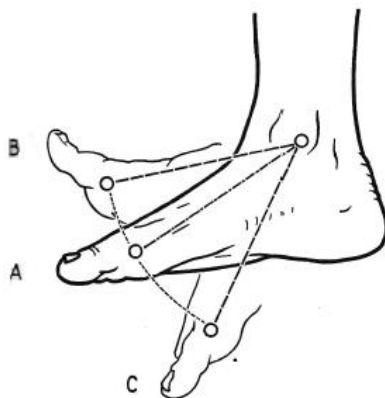
4.16. ábra Oppozíciós mozgás mechanizmusa

5 A láb összetett ízület rendszere

Lábunk ízületi rendszerének elsődleges feladata a teherátadás és a haladó mozgás biztosítása. Bár az alsó végtag funkciójában és felépítésében is jelentős eltér a felső végtagtól, nem elhanyagolható a hasonlóság. A láb ízülete a térd axiális rotációjával kiegészülve három szabadsági fokkal rendelkezik. Ez biztosítja, hogy a térben a láb bármilyen helyzetet fel tudjon venni. Ugyan ezt a képességet felső végtagunk a csuklóval és az alkari rotációval valósítja meg, azonban a felső végtag esetén a fogás és a mozgékonyság a jelentősebb. A láb mozgása lehetővé teszi az egyenes és egyenetlen talajon való járást. Nélkülözhetetlen feladata a testsúly, valamint a járás, futás és egyéb sporttevékenységek következtében fellépő erőhatások viselése.

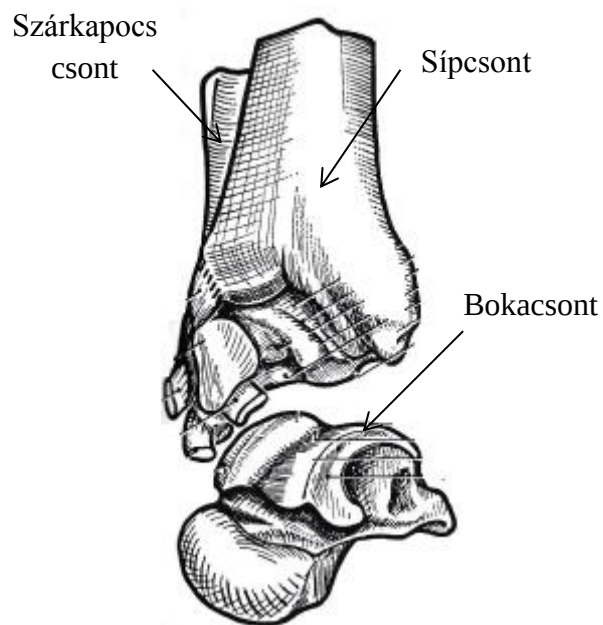
5.1 A bokaízület [2]

A boka az alsó végtag egy szabadságfokú disztális csuklóízülete. Ebben az ízületben a láb a lábszárhoz képest a szagittális síkban képes elfordulni, azaz mozgása flexió-extenzió. Extenzió során a láb a lábszár irányába mozdul (5.1. ábra B jelű rész), míg flexió esetén a láb dorzális felszíne távolodik a lábszártól (5.1. ábra C jelű rész).



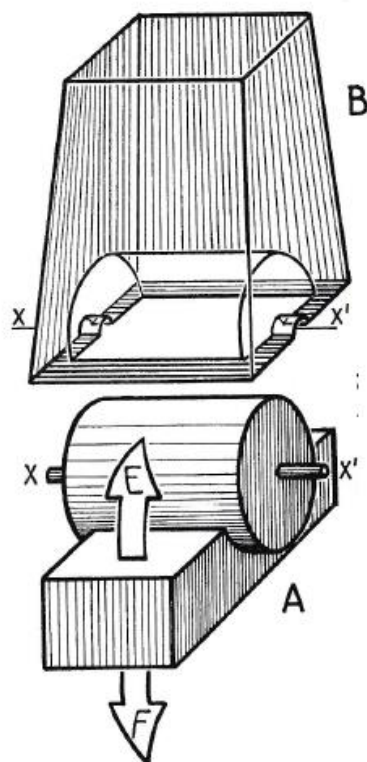
5.1. ábra Bokaízület flexiós, extenziós mozgása [2]

A bokaízület három csont kapcsolata (5.2. ábra). A sípcsont (tibia) és a szárkapocs csont (fibula) dorzális vége egy közös szerkezetet alakít ki, melynek felszíne lehetővé teszi, bokacsont (talus) elfordulását. A tibia és a fibula henger alakú üregébe illeszkedik a bokacsont henger alakú felszíne, ez a struktúra lehetővé teszi a talus oldal irányú rögzítését is.



5.2 ábra Bokaízület csontjai [2]

Az ízület egyszerűsített mechanikai modellje két merevtestre redukálható (5.3. ábra). A bokacsont az A jelű elemet, a lábszár csontjai a B jelű részt alkotják. A flexió-extenzió az X - X' tengely körül történik.



5.3. ábra Bokaízület mechanikai modellje [2]

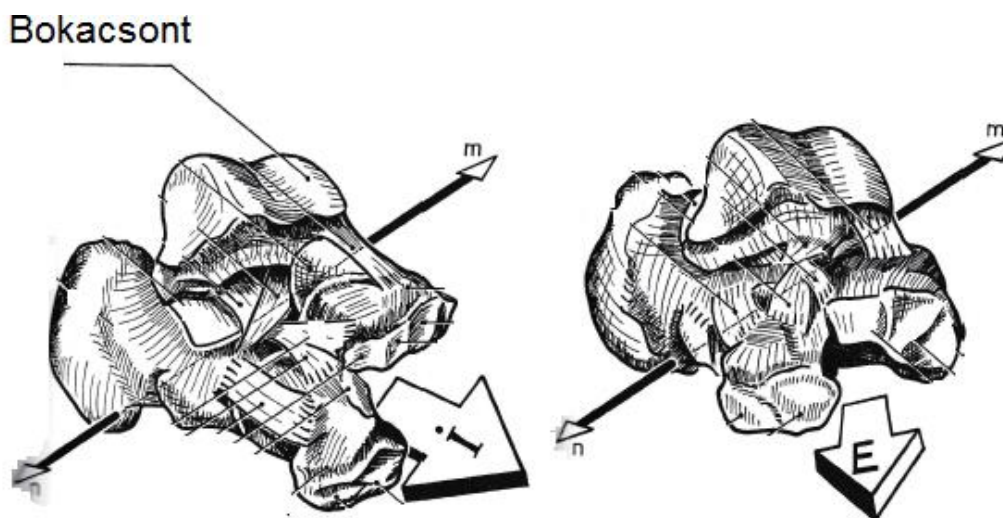
5.2 A hátsó lábtőízület működése [2]

A láb mozgásának jellemzésére is használhatjuk a már megismert mozgásokat (flexió-extenzió, pro-szupináció stb.) azonban ezek kizárólag kombinációkban (járulékosan) léphetnek fel. Inverzióknak nevezzük a szupináció, addukció és enyhe flexió együttesét (5.4. ábra 2 számú része). Ezzel ellentétes mozgás az everzió, amely pronáció, abdukció és extenzió társulásaként jön létre (5.4. ábra 3 számú része).



5.4. ábra A láb inverziós, semleges, és everziós helyzete [2]

A lábtő hátsó ízületei egymással mechanikai összeköttetésben vannak és egy megbonthatatlan funkcionális egységet alkotnak, a hátsó lábtőízületi komplexumot. Az ízületi komplexum egy szabadságfokkal rendelkezik, mely az úgy nevezett Henke-tengely körüli forgás (5.5. ábra m-n tengely), azaz az inverzió és everzió mozgást valósítják meg.

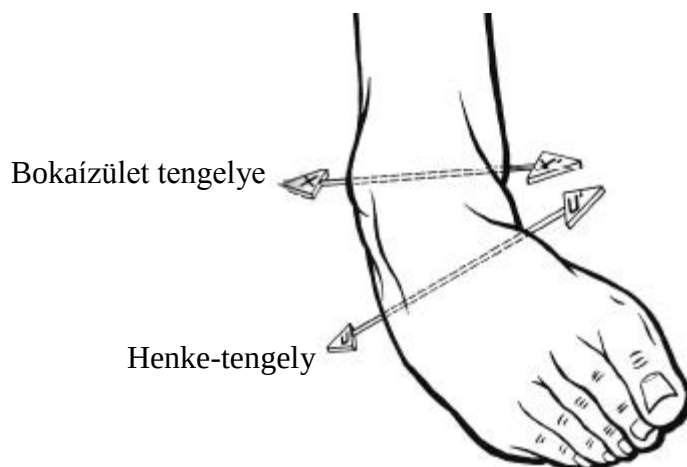


5.5. ábra Lábtőcsontok inverziós és everziós helyzetben [2]

Az 5.5. ábra szemlélteti négy lábtőcsont elmozdulását a bokacsonthoz képest inverziós és everziós helyzetben.

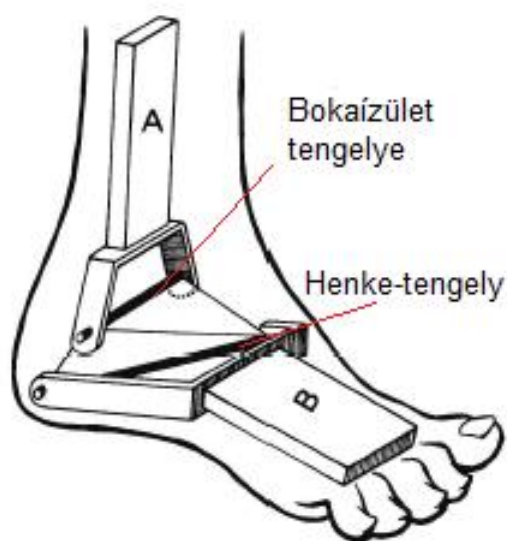
5.3 A láb univerzális ízülete és modellezése [2]

Az 5.1 és 5.2 fejezetekben vizsgált egytengelyű ízületek együtt alkotják a láb univerzális ízületi komplexumát. Szintén univerzális ízületet vizsgáltunk a hüvelykujjban található TM ízületnél és a csukló ellipszoid ízületénél. A gépészetben kardántengelyként ismert mechanizmus a biomechanikában is különböző ízületekben, különböző formákban előfordul. A láb ízület hagyományos értelemben nem nevezhető univerzális ízületnek, mert a bokaízület tengelye és a Henke-tengely nem merőleges egymásra, hanem ferdén keresztezik egymást (5.6. ábra). Ez a heterokinetikus univerzális ízület a lábtő mozgásainak megfelelően egy változtatható ferdeséget hoz létre.

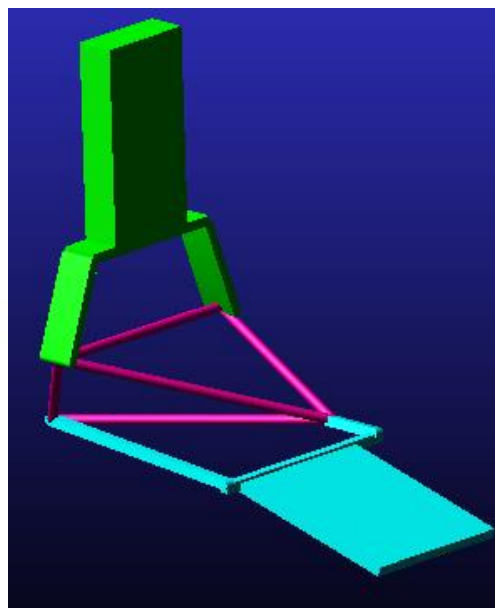


5.6. ábra Lábízület forgástengelyei [2]

A lábízületi komplexum mechanikai modellje az 5.7. ábrán látható, A jelű rész a lábszárat, a B jelű pedig az előlábát takarja. A modellben a mozgás két tengely körüli elfordulás együttese (5.8. ábra CD: 5boka).



5.7. ábra Lábízület modellje [2]



5.8. ábra Lábízület modellje

6 Összefoglalás

A dolgozat témája a mechanikai szempontból érdekesebb humán ízületek modellezése. Az egyes ízületek megfelelő modellezéséhez nélkülözhetetlen az anatómia, élettan és a lehetséges mozgások részletes ismerete. A ismeretszerzést követően elkészítettem az egyes ízületek egyszerűsített mechanizmusát és mozgásának szimulációját.

Légzés közben mellkasunk hasonlóan működik akár egy négycsuklós mechanizmus, melynek alkotói a gerinc, az első borda, a szegycsont és a 10. borda és annak porca. A bordaporcaink, rendkívül rugalmasak, így nem célszerű a bordával egy merevtestnek tekinteni. Öt csuklós mechanizmusként és egy kinematikai feltétellel élve mellkasunk mozgása sokkal pontosabban modellezhető.

Felső végtagunk hét szabadságfokú rendszerében az alkari rotáció és a csukló mozgása biztosítja, hogy kezünk a térben a váll középpontú gömbi környezetben bármilyen helyzetet felvegyen. Alkarunk rotációja modellezhető, úgy akár egy indítókar mozgása, ahol az orsócsont a singcsont körüli forgásával mozgatja a kezünket. Csuklónk két egymásra merőleges tengely körüli elfordulását ellipszoid alakú ízület valósítja meg.

Hüvelykujjunk a fogás funkciójában nélkülözhetetlen öt szabadságfokú rendszer. Legjelentősebb mozgását egy két szabadságfokú nyeregízület biztosítja, amely egy kardántengely működésével írható le.

A kardántengely a láb ízületi komplexummal is párhuzamba hozható: itt két egytengelyű ízület együtteséből adódik a mozgás. A forgástengelyek a kardántengellyel ellentétben, nem merőlegesek, hanem ferdén keresztezik egymást.

A dolgozat egyes ízületek mechanizmusokkal történő leírását mutatja: ez egyrészt a mozgásokat szemléletessé teszi, másrészt segítséget jelent a protézisek tervezésében. Továbbá az ízületek működésének modellezésével megállapítható, hogy bizonyos sérülések, rendellenességek esetén hogyan változik a mozgás. Például a 2. *fejezetben* említett porc meszesedés következtében csökken a bordaporcok mozgásterjedelme. A modellben a mozgásterjedelem egyetlen paraméter segítségével változtatható, szimulálható és használatával ki lehet számolni, hogy ez hogyan befolyásolja a belélegzett levegő mennyiségét.

7 Irodalomjegyzék

- [1] Kapandji IA (2007): Az ízületek élettana 1. kötet: A könyök, A csuklóízület, A kéz . Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp.110-260
- [2] Kapandji IA (2007): Az ízületek élettana 2. kötet: A boka, A láb. . Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp. 158-224
- [3] Kapandji IA (2007): Az ízületek élettana 3. kötet: A törzs és a gerinc. Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp. 148-169
- [4] Donáth T (2013): Anatómia-élettan. Légzőrendszer fejezet Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp.181-192
- [5] Donáth T (2013): Anatómia-élettan. Részletes csonttan és ízülettan fejezet Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp. 56-76.
- [6] http://physiology.elte.hu/elettan_pszicho_ppke.html 6. és 10. előadás diái (2014.07.30)
- [7] <http://hu.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9gz%C3%A9s> (2014.07.15)
- [8] http://hu.wikipedia.org/wiki/Az_anat%C3%B3mia%C3%A1ban_haszn%C3%A1lt_s%C3%ADkok_%C3%A9s_ir%C3%A1nyok (2014.08.20)
- [9] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Gerinc> (2014.08.20)
- [10] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Borda> (2014.08.20)
- [11] Páy G (2013): Mechanizmusok I. Mechanizmusok szerkezeti felépítése és osztályozása. Nyíregyháza: Bessenyei Könyvkiadó pp. 7-30.

8 Ábrák forrása

- 2.1-2.3, 2.11 ábrák: http://physiology.elte.hu/elettan_pszicho_ppke.html 6. előadás
- 2.4. ábra www1: <http://www.vitalhirek.hu/csontvazunk/> (mellkas)
- 2.5. ábra www2: http://hu.wikipedia.org/wiki/Az_anat%C3%B3mia%C3%A1ban_haszn%C3%A1lt_s%C3%ADkok_%C3%A9s_ir%C3%A1nyok#mediaviewer/File:Human_anatomy_planes_hu.svg
- 2.5-2.10, 2.15, 2.16 ábrák: Kapandji IA (2007): Az ízületek élettana 3. kötet: A törzs és a gerinc. Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp. pp.148-169.
- 2.14. ábra Páy G (2010): Mechanizmusok: I. Mechanizmusok szerkezeti felépítése és osztályozása Nyíregyháza: Bessenyei Könyvkiadó pp. 7-30

3.1, 3.2, 3.4-3.18., 4.1-4.3, 4.5-4.15. ábrák: Kapandji IA (2007): Az ízületek élettana 1. kötet: A könyök, A csuklóízület, A kéz . Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp.110-260

3.3 www3: <http://emberi-test.uw.hu/osztaly-11/ora-012/ora-012-n.jpg>

4.4. ábra www4:

<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/antropologia/ch01s02.html>

5.1-5.7 ábrák: Kapandji IA (2007): Az ízületek élettana 2. kötet: A boka, A láb. Budapest: Medicina Könyvkiadó Zrt, pp. 158-224.