

BOKA ÍZÜLET 3D MODELLEZÉSE

3D MODELING OF THE ANKLE JOINT

Dr. Kátai László*, Nagy István**, Dr. Gárdonyi Péter***

ABSTRACT

The ankle joint is one of the most complex articulations of the human body, playing a crucial role in locomotion and weight-bearing. This study focuses on the 3D modeling of the ankle joint with the aim of providing a precise biomechanical and kinematic representation. The research first reviews the anatomical and structural characteristics of the foot and ankle, highlighting the bones, ligaments, and movement constraints that define its mechanical behavior. Based on these findings, engineering and kinematic approaches were applied to develop a computational model capable of simulating joint movements under different conditions. The resulting 3D model enables the analysis of load distribution, range of motion, and joint stability, which are essential for both clinical diagnostics and the design of medical devices. Furthermore, the model provides a foundation for virtual simulations and potential future applications in orthopedics, rehabilitation, and prosthetic development. Overall, the study demonstrates how engineering methodologies and anatomical knowledge can be combined to create a robust digital twin of the ankle joint, facilitating both research and medical practice.

1. BEVEZETÉS

A boka az egyik igen összetett ízülete az emberi testnek. Kinematikai modellezése kihívást jelentő feladat. A bokaízület teljes egysége az alsó lábszárból és a lábfejből áll, és olyan kinetikus összeköttetést képez, amely lehetővé teszi az alsó végtagok és a talaj közötti kölcsönhatást, ami a járás és más mindennapi tevékenységek elengedhetetlen feltétele.

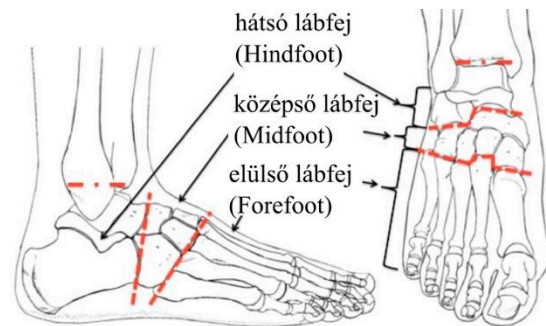
A kutatási téma elsősorban arra irányul, hogy a boka egyes részegységeit megvizsgáljuk, ezt műszaki szempontok szerint értelmezzük, majd ennek figyelembevételével lehetővé tesszük egy kinematikai szerkezetet létrehozását, amely később lehetőséget biztosít a boka mozgásának számítógépes szimulációjára.

2. A BOKA ANATÓMIÁJA

2.1. A lábfej struktúrája

Az emberi boka értelmezéséhez meg kell ismernünk a teljes lábfejet, és annak alkotó részeinek összességét. A mozgások kordinációja során a lábfej egésze meghatározza milyen mozgási kényszerekkel rendelkezik a boka, ez pedig nagymértékben függ a

csontozat kialakításától. Az emberi lábfej kiképzéséből adódóan egy ízületi komplexnek felel meg. A különböző talajtípus, érintkezési felület esetében biztos alapot kell teljesítenie, ami mellett a talajjal szemben az emberi szerkezetnek egyfajta rugalmasságot kell biztosítania. Mozgási lehetőségei alapján az izomerőt továbbítani képes legyen a talaj irányába. Szerkezete gördülékeny mozgást megfelelően elősegítse, végül a legfontosabb feladata az egyensúly állandó megtartása. [1] A lábfej szerkezeti felépítése alapján három nagy csoportba oszthatóak, ezek a hátsó lábfej (Hindfoot), a középső lábfej (Midfoot) és az elülső lábfej (Forefoot), ahol a lábfej szakaszai pozíciójuk alapján struktúrákba vannak osztva (1. ábra).



1. ábra A lábfej strukturális felépítése [2]

Fontos, hogy a lábszár irányából is vizsgálni kell a struktúráját, ahol további csontokat és ízületi kapcsolódásokat találhatunk. Továbbá ezek a csontok is hatással lesznek a boka mozgáslehetőségeire, annak korlátjához. A két legfontosabb csont, amely a boka szerkezetét köti össze lábszárral, a sípcsont (Tibia) és a szárkapocscsont (Fibula), amelyek a hátsó lábfej pozíciójától „felfele” helyezkednek el, későbbiek során ezt y iránynak fogjuk nevezni.

A bokaízületen tovább haladva a talaj irányába, három csont találkozásának és kapcsolódásának jellege adja az elsődleges bokamozgást jellemző csuklós elmozdulást, ezek az előbbiek során említett Tibia és Fibula, amelyek foglalatik kiképzésükbe illeszkedik az ugrócsont (Talus). Tovább haladva a szerkezeti felépítésen a Talus további két csonton fekszik fel, amelyek a Tibia és Fibula által meghatározott főtengelyhez képest első és hátsó irányba orientálódnak, ez a két csont a sarokcsont (Calcaneus) és a sajkacsont (Navicular).

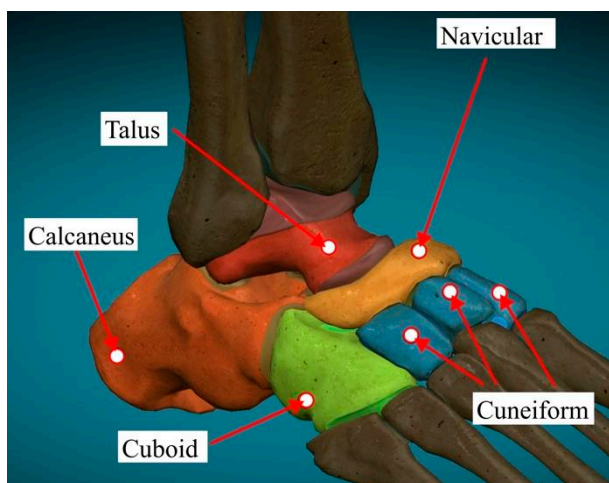
Fontos megjegyezni, hogy a hátsó pozíciójú Calcaneus csont közvetlen kapcsolatban van a talajjal,

* egyetemi tanár, MATE, Műszaki Intézet

** mesteroktató, MATE, Műszaki Intézet

*** egyetemi adjunktus, MATE, Műszaki Intézet

míg a Navicular a további négy lábtő (Tarsal) csonttal van kapcsolatban, így a szerkezeti felépítést tagoltabbá téve. A három darab lábközépcsont (Cuneiform) és a Cuboid kapcsolódik a lábfejjel, így a lábujjakkal (2. ábra). A lábfejen a talajjal érintkező felületet Plantar surface-nek nevezzük.

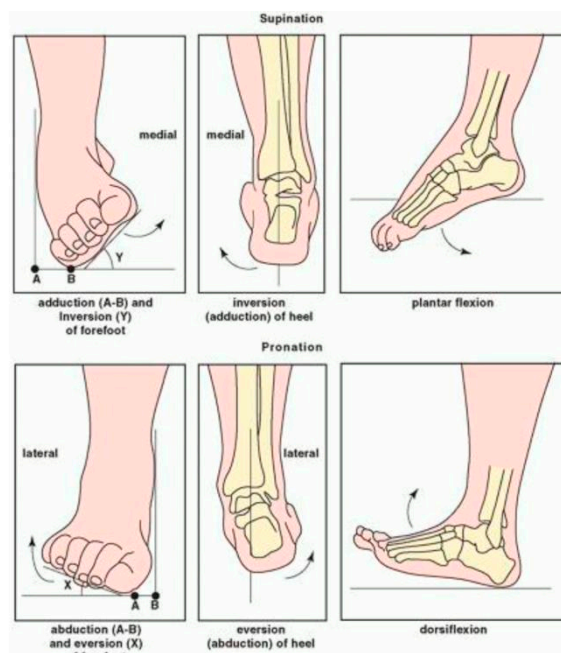


2. ábra A bokát alkotó csontok [3]

2.2. Boka mozgások

Három alapvető sík található meg az anatómiai test felosztásában. A testet két félre osztó síkot Sagittal felületnek nevezünk. Erre a síkra merőleges, de a test hossz tengelye mentén futó síkot Coronal felületnek nevezünk. A harmadik sík az előző két síkra merőlegesen helyezkedik el, ez pedig a Transverse felület.

A boka mozgása magába foglalja mindhárom síkot így a síkok mentén képesek vagyunk a különböző típusú és irányú mozgások értelmezésére. Az elsődleges mozgások azok, amelyeket a leggyakrabban véghez viszünk a lábfejen, ez jelen esetben a lábfej emelését és döntését jelenti, amely mozgást Dorsal flexiónak és Plantar flexiónak nevezük. Ez a mozgás egyfajta csuklópánt mozgásként írható le a boka foglatában. Tengelye a Transverse és a Coronal sík metszetével párhuzamosan helyezkedik el. Másodlagos mozgásnak nevezhetjük az Everziós és Inverziós mozgást, amely a boka fő tengelye körül megy végbe, tengelye párhuzamos a Coronal és a Sagittal sík metszetével. Ezt a mozgásformát talajra szorítva is véghez tudjuk vinni, kifelé és befelé mozgatva a lábfejünket. A boka elmozdulása Inverziós mozgás esetében a lábfej külső irányban tolja el a Sagittal síkot, Everziós hajlítás esetében a Sagittal sík belső irányba mozdul el. A harmadlagos mozgások a Transverse és Sagittal metszetében meghatározható tengely körül létrejövő mozgást Abdukciós és Addukciós mozgásnak nevezük. Ilyen mozgás bokakificamodás esetében előfordul, ezekben az elmozdulásokban nem tudjuk megtartani stabilitásunkat, hiszen a talpunk bizonyos szögben helyezkedik el a talajjal [4]. A fentiekben ismertetett lábfej elmozdulások lehetőségeit a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra A jobb lábfej elmozdulási lehetőségei [5]

Az elmozdulások két csoportba bonthatóak fel annak függvényében, milyen irányban történik ez a mozgás, ezt a felosztás foglalja össze az 1. táblázat.

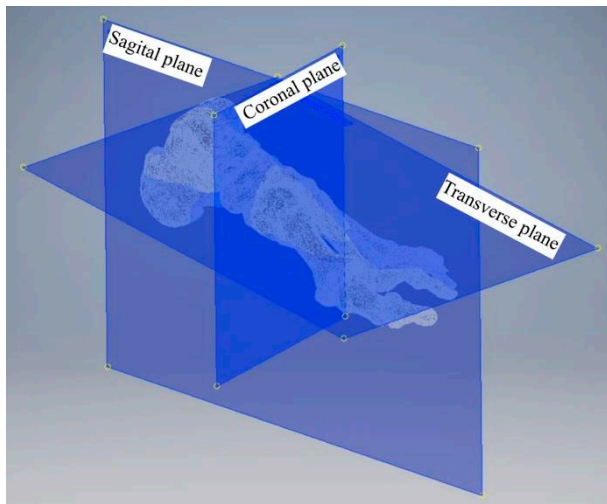
1. táblázat Elmozdulások csoportosítása

Szupináció	Pronáció
Addukció	Addukció
Everzió	Inverzió
Dorsal flexió	Plantar flexió

2.3. A boka 3D modellezése

A 3D modell elkészítésének célja, hogy olyan bokamoddellel rendelkezünk, amely alkalmas lehet a boka mozgások kinematikai modellezésére, elemzésére. Erre a célra egy szkennelt modellt készítettünk, amely alapját egy anatómiai csontvázmodell biztosította. A modell a 3D szkennelésének és a digitalizálásnak köszönhetően nem szilárd test elemekből, hanem Mesh hálóból áll, viszont ezt skeleton felületekké tudtuk konvertálni. A modelltől csak azokat a csontokat használtuk fel, amelyek a szakirodalmi elemzés alapján hatással vannak a boka mozgásának működésére.

Az összeállítás alapját a teljes szkennelt boka adja, amelyre hivatkozni tudunk és a kényszerek a többi egység kényszereinek alapját is alkotja. Ennél a modellnél meghatároztuk a három alapvető síkot, amelyet a Transverse sík meghatározásával lehetett elérni, hiszen ez a sík párhuzamos a talajjal így a lábboltozat talajjal való érintkezéséből definiálhatóvá vált. A Sagittal és a Coronal sík erre a síkra merőlegesen helyezkedik el, így felépült az alapvető 3D modell (4. ábra).

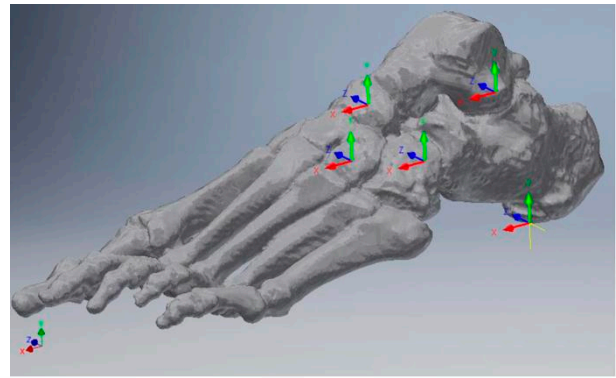


4. ábra A boka mesh modellje a fő síkokat jelölő felületekkel

Másik fontos szempont, amely a teljes modellezést és kinematikát meghatározza, hogy a bokán alapvetően az előző fejezetekben értelmezett ízületeket vizsgáljuk, így ennek a tulajdonságait vezetjük vissza a modellünkbe, nem pedig az egyes csontok helyeit határozzuk meg. Az ízületi egységek a kapcsolódási felületek az egyes egységek között, továbbá nincs akkora mértékű méret és forma béli különbség modellek függvényében, mint a csontok esetében. Minden egyes ízületi kapcsolatonál 1-1 ízületi pontot határozzuk meg, amelyen keresztül áthaladnak az ízületi tengelyek. Az ízületi pontokat a kapcsolódási felületen letérképezéssel majd középpont meghatározásával szerkesztettük ki, így végig haladva minden egyes vizsgált ízületen.

Ezzel az eljárással eljutottunk a boka modell kinematikai alapját jelentő pontok meghatározásáig. A továbbiakban ezek lesznek a referencia pontok, így a kinematikai szerkezetünk alapját jelentik, ezzel együtt elhagyhatóvá válnak a skeleton felületek. A skeleton modellezés fő feladata, hogy az egész vázszerkezetről skeleton modellt készítünk, amely a további lépéseknél referencia keretként használható. Így jelen esetben a csatlakozási pontok rendelkezésünkre állnak, és függetlenül attól, hogy a továbbiakban milyen módosítások történnek, ezeket a pontokat fix pontokként értelmezhetjük.

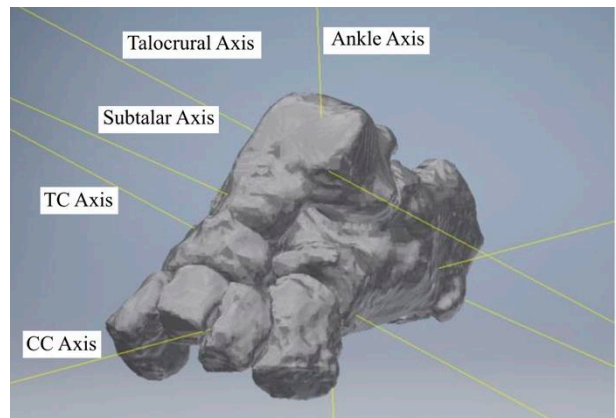
Következő feladat az egyes pontok térbeli helyeinek meghatározása. Az előre megtervezett modellépítésnek köszönhetően az ún. „Origin” felületek egyben a boka meghatározott síkjai, így a CAD szoftver segítségével egyszerűen leolvasható az egyes pontok távolságai az „Origin” síkuktól. Erre azért van szükség, mivel a pontokat koordináta rendszerbe való átvitelükhöz koordináta pontokkal kell jellemeznünk, így az X , Y és Z tengelyektől való távolságukat minden esetben ismernünk kell. Ezen túlmenően meghatároztuk a boka legalsó, Calcaneus pontját, amely a talajjal való érintkezési pontot adja meg. A koordináta pontok kiosztása az eddig értelmezettek alapján történt (5. ábra).



5. ábra Ízület kapcsolódási koordináta pontok

3. EREDMÉNYEK

Az ízületi pontok meghatározását követően vált lehetővé a mozgáselemzéshez használható ízületi tengelyek kiszervezése, a szakirodalmi információk alapján. Ezek a boka három síkjával zárnak be szöveget, a metszéspontjaikat meghatároztuk. Minden egyes tengelyt, különböző irányban eltoltt síkkal, továbbá kiegészítő tengelyekkel kiszerveztünk, hiszen távolságok és szögértékek meghatározásával a két végző sík metszete kirajzolta az adott helyen szükséges tengelyt. Ennek értelmében meghatároztuk az összes tengelyt, amely a 6. ábrán látható.



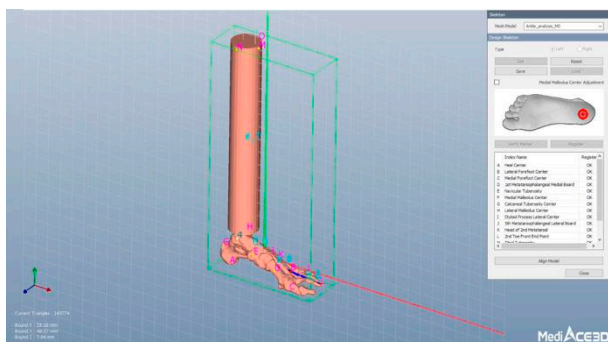
6. ábra Ízületek tengelyei

Meghatároztuk, hogy az egyes tengelyek mentén milyen típusú érintkezés található és milyen irányultságú a tengely kiképzési irányához képest. A tengelyek a 6. ábrán láthatóak.

- CC tengely (Longitudinal tengely) merőleges a CC síkra.
 - Elsődlegesen az Inverziós és az Everziós elmozdulásban vesz részt
 - Cuboid konkáv a Calcaneus konvex felülettel rendelkezik
- TN tengely (Oblique tengely) párhuzamos a TN síkkal.
 - Az Abdukciós/Addukciós illetve a Dorsiflexiós/Plantar flexiós mozgásért felel.

- Navicular konkáv a Talus konvex felülettel rendelkezik.
- Subtalar tengely merőleges a Subtalar síkra.
 - Subtalar sík „közel” sík-sík felületet mutat.
- Talocrural tengely párhuzamos a Talocrural síkkal.
 - Csuklós rotációs kialakítás jellemzi.
- Boka tengely merőleges a boka rotációs irányaira.

A mozgatható lábfej végső kialakításához a digitalizált modellt a MediACE3D szoftverbe integráltuk. Ez a szoftver alapvetően ortézis eszközök tervezésére és vizsgálatára lett megalkotva, hasonló lehetőségek állnak rendelkezésre, mint bármely más programban. A program a mozgásokhoz szükségessé teszi a térd jellegének betáplálását is, így az eredeti digitalizált modellünket kiegészítettük egy lábszárt reprezentáló hengeres testtel. A programban ezután az adott modellünk skeleton szerkezetét kell kialakítanunk, mégpedig a lábfej különböző pontjait kell bejelölnünk az adott modellünkön. Ennek megfelelően kialakítottuk a modellünket, amelyet az 7. ábrán látható



7. ábra A mozgáshoz szükséges pontok definiálása

Ennek eredményeként mozgathatóvá válik a lábfej és a különböző mozgásait szemléltetni is képes

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A bokaízület az emberi mozgásszervi rendszer egyik legbonyolultabb ízülete, amely központi szerepet játszik a mozgásban, a stabilitásban és a terhelés átvitelében. Ez a cikk a bokaízület 3D digitális modelljének fejlesztését mutatja be, amelynek célja a pontos biomechanikai és kinematikai elemzés lehetővé tétele. 3D-szkennelés és digitális rekonstrukció segítségével hálól alapú modellt hoztunk létre, amelyet csontvázszerkezetté alakítottunk át. Referencia síkokat és ízületi pontokat határoztunk meg a mozgás tengelyeinek definiálásához, lehetővé téve a dorsiflexió, plantarflexió, inverzió, eversió, abdukció és addukció meghatározását a digitális környezetben. A kinematikai modellt ezután integráltuk egy orvosi CAD-környezetbe (MediACE3D) a valóság-hű ízületi mozgások szimulálása és a funkcionális tartományok értékelése érdekében. Az eredmények bizonyítják, hogy mérnöki alapú modellezési módszerekkel lehetséges az ízületek viselkedésének ábrázolása, amely betekintést nyújt a terhelésseloszlásba, az ízületi tengelyek

orientációjába és a stabilitási mechanizmusokba. Ez a kutatás hozzájárul a mozgásszervi elemzéshez használt digitális ikrek fejlesztéséhez, és potenciális alkalmazási lehetőségeket kínál a klinikai diagnosztikában, a rehabilitációs technika területén, valamint az ortopédiai és protézis eszközök tervezésében.

5. SUMMARY

The ankle joint is one of the most complex articulations of the human musculoskeletal system, playing a central role in locomotion, stability, and load transfer. This study presents the development of a 3D digital model of the ankle joint with the objective of enabling accurate biomechanical and kinematic analysis. Using 3D scanning and digital reconstruction, a mesh-based model was created and converted into a skeleton framework. Reference planes and joint points were established to determine axes of movement, allowing the definition of dorsiflexion, plantarflexion, inversion, eversion, abduction, and adduction within the digital environment. The kinematic model was then integrated into a medical CAD environment (MediACE3D) to simulate realistic joint movements and assess functional ranges. The results demonstrate the feasibility of using engineering-based modeling methods to represent joint behavior, providing insights into load distribution, joint axis orientation, and stability mechanisms. This research contributes to the development of digital twins for musculoskeletal analysis and has potential applications in clinical diagnostics, rehabilitation engineering, and the design of orthopedic and prosthetic devices.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a 2018-1.3.1-VKE-2018-00013 jelű projekt részeként az NKFIH Alap finanszírozásával valósult meg.

Köszönet György Attila Gépészmérnök MSc szakos hallgatónak a munkában nyújtott értékes közreműködéséért.

7. IRODALOM

- [1] Brockett CL, Chapman GJ. Biomechanics of the ankle. *Orthop Trauma*. 2016 Jun;30(3):232-238. doi: 10.1016/j.mporth.2016.04.015. PMID: 27594929; PMCID: PMC4994968.
- [2] Anatomy of the Foot and Ankle. <https://orthopaedia.com/page/Anatomy-of-the-Foot-Ankle>
- [3] https://anatomylearning.com/webgl2021v1/browse_r.php
- [4] Biomechanics. <https://www.ankleinfo.net/biomechanics>
- [5] Lower Limb III: Ankle and Foot. <https://radiologykey.com/lower-limb-iii-ankle-and-foot-2/>