https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.13

BOKA ÍZÜLET MOZGÁSANALÍZISE KINEMATIKAI SZERKEZETTEL

MOTION ANALYSIS OF THE ANKLE JOINT USING A KINEMATIC MECHANISM

Dr. Kátai László[*], *Dr. Mező Róbert*[**], *Dr. Gárdonyi Péter*[***], *Nagy István*[****]

ABSTRACT

The aim of this study was to develop a simplified kinematic mechanism for the spatial analysis of ankle and foot motion and to demonstrate a coordinate-based method for determining the displaced position of anatomical reference points. The model was constructed according to the main anatomical relationships of the ankle and foot, with the Talus as the central element connecting the Talocrural, Subtalar and Talonavicular joints. A coordinate system related to the anatomical planes was assigned to the mechanism, and characteristic coordinates were defined for the joint points. Homogeneous coordinate transformation was applied to determine the spatial position of a selected point after a prescribed combined motion. The method was demonstrated for a combined dorsiflexion of 27.5° and eversion of 17°, using the Talonavicular joint point as an example. The resulting coordinates and their differences provide a quantitative description of the spatial displacement caused by the prescribed motion. The results demonstrate that the developed kinematic representation can numerically describe complex ankle motion and compare different motion states based on the position changes of selected kinematic points.

1. BEVEZETÉS

A bokaízület összetett biomechanikai rendszer, amelynek mozgását a lábszár és a lábfej csontos struktúrái, valamint azok ízületi kapcsolatai együttesen határozzák meg. A mozgások térbeli leírása a sagittalis, coronalis és transversalis síkok, valamint az ezekhez rendelt koordinátarendszer segítségével valósítható meg. Jelen munkában a boka mozgásának vizsgálatára egy egyszerűsített kinematikai szerkezetet alakítottunk ki, amely a főbb anatómiai kapcsolatok mechanikai viszonyait és a hozzájuk tartozó koordinátapontokat modellezi. A cél olyan számítási módszer alkalmazása volt, amely az ismert kiinduló koordináták és mozgásszögek alapján meghatározza az egyes kinematikai pontok elmozdult térbeli helyzetét.

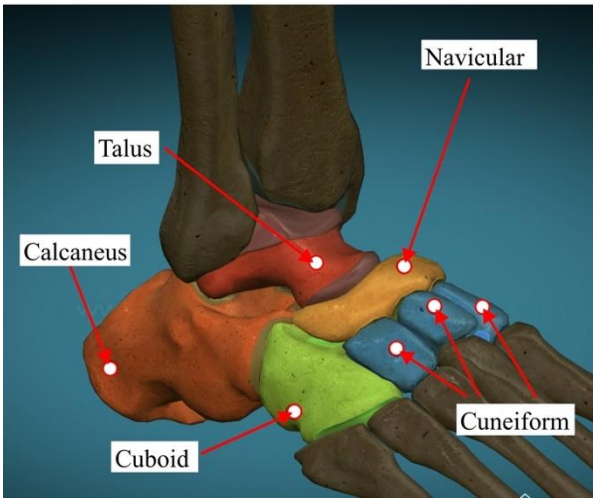
2. A BOKA ANATÓMIÁJA

2.1. A lábfej struktúrája

A bokaízület elsődleges csontos elemeit a lábszár csontjai, a sípcsont (Tibia) és a szárkapocscsont (Fibula), valamint az ezek által közrefogott ugrócsont (Talus) alkotják. A Tibia és a Fibula alsó végei ízületi villát képeznek, amelybe a Talus illeszkedik. Ez a kapcsolat biztosítja a bokaízület fő, csuklószerű mozgását [1].

A Talus a lábfej további csontjaival is kapcsolatban áll. Hátulsó irányban a sarokcsonttal (Calcaneus), előrefelé pedig a sajkacsonttal (Navicular) illeszkedik. A Navicularhoz kapcsolódik a három ékcsont (Cuneiform), míg a lábfej laterális oldalán a köbcsont (Cuboid) helyezkedik el. Ezek a csontok alkotják a lábtő (tarsus) fő szerkezeti egységét, amely a boka és a láb elülső része közötti mechanikai kapcsolatot biztosítja [2, 3].

Az 1. ábra a boka és a közvetlenül kapcsolódó lábtőcsontok térbeli elhelyezkedését szemlélteti. A vizsgált mozgások szempontjából kiemelt jelentőségű a Tibia–Fibula–Talus alkotta bokaízület, valamint a Talushoz kapcsolódó Calcaneus és Navicular helyzete.



1. ábra A bokát alkotó csontok [3]

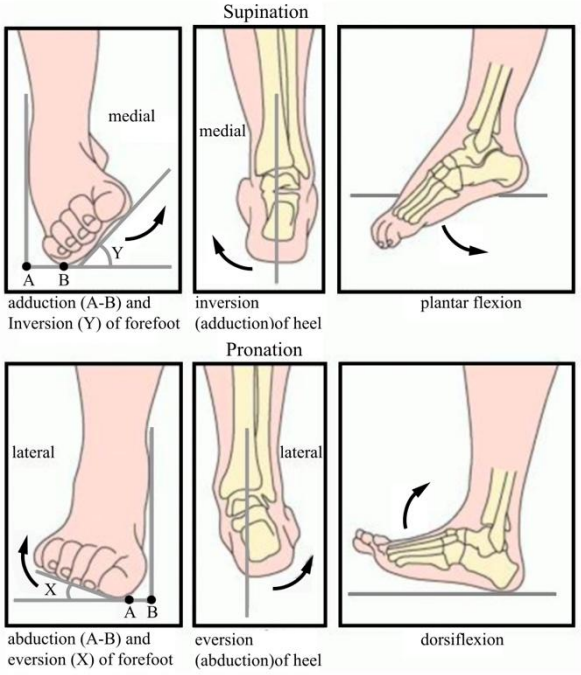
* *egyetemi tanár, MATE, Műszaki Intézet*
** *mesteroktató, MATE, Műszaki Intézet*
*** *egyetemi adjunktus, MATE, Műszaki Intézet*
*****főorvos, LBT Kereskedelmi és Szolgáltató Kft., Budapest*

2.2. Boka kinematikai alapjellemzői

Az anatómiai mozgások leírására három egymásra merőleges síkot különböztetünk meg. A testet jobb és bal részre osztó sagittalis sík, az erre merőleges, a test hossztengelyével párhuzamos coronalis (frontális) sík, valamint az ezekre merőleges transversalis (haránt) sík szolgál a mozgások térbeli értelmezésére.

A boka és a lábfej mozgásai mindhárom síkban értelmezhetők. A sagittalis síkban a legfontosabb mozgások a dorsalflexió és a plantarflexió, amelyek a lábfej emelését, illetve lefelé irányuló mozgását jelentik. A coronalis síkban az inverzió és az everzió értelmezhető, amelyek során a talp befelé, illetve kifelé fordul. A transversalis síkban az abdukció és addukció a lábfej oldalirányú, illetve a test középvonala felé történő elmozdulását jelenti [4].

A fenti alapmozgások kombinációjaként jön létre a szupináció és a pronáció. A szupináció az inverzió, az addukció és a plantarflexió, míg a pronáció az everzió, az abdukció és a dorsalflexió összetett mozgásaként értelmezhető. A jobb lábfej jellemző mozgásait a 2. ábra szemlélteti [5].



2. ábra A jobb lábfej elmozdulási lehetőségei [5]

1. táblázat Elmozdulások csoportosítása

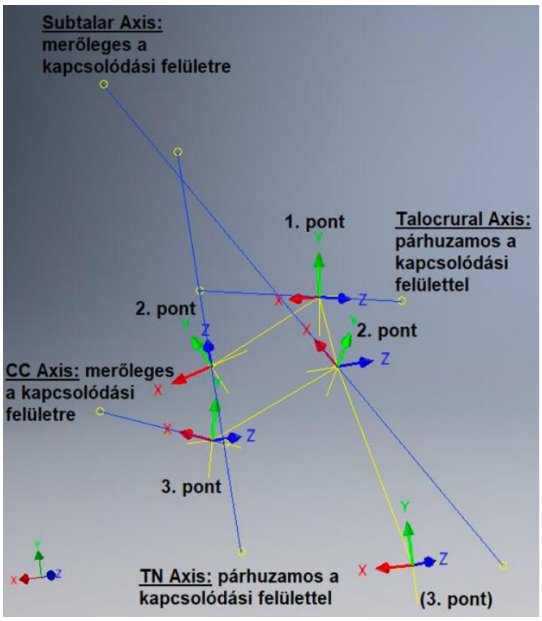
Mozgási sík	Alapmozgások	Összetett mozgások
Sagittalis	dorsalflexió, plantarflexió	szupináció, pronáció
Coronalis	inverzió, everzió	szupináció, pronáció
Transversalis	abdukció, addukció	szupináció, pronáció

2.3. A kinematikai szerkezet felépítése

A boka és a lábfej mozgásainak vizsgálatához olyan egyszerűsített kinematikai szerkezet került kialakításra, amely az anatómiai csontok és ízületi kapcsolatok főbb mechanikai viszonyait reprodukálja. A modell koordinátarendszerének alapját az előzőekben definiált anatómiai síkok adják. Az X tengely a sagittalis, míg a Z tengely a coronalis síkkal párhuzamos irányultságot reprezentálja. A modellhez egy további, a transversalis síkkal párhuzamos sík is tartozik, amely a talajjal való érintkezési felületet szemlélteti.

A kinematikai modellben a koordinátapontok az egyes részegységekhez tartoznak, ezért azok a mozgások során az adott egységgel együtt változtatják helyzetüket és irányultságukat. Ez lehetővé teszi az egyes ízületi kapcsolatok és a teljes szerkezet mozgásának geometriai leírását. A koordinátapontok és az ízületi tengelyek irányultságát az anatómiai ízületek kapcsolódási geometriája alapján határoztuk meg. A koordináta pontos és ízületi tengelyek értelmezését szemlélteti a 3. ábra.

A szerkezet alapját egy talp- és lábfejegység képezi, amely a lábfej külső elmozdulását és a talajjal való kapcsolatot reprezentálja, valamint rögzítési és forgási pontokat biztosít a további részegységek számára.



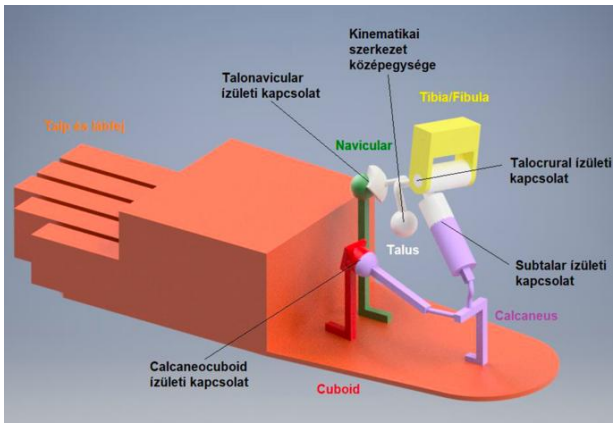
3. ábra A koordináta pontok, ízületi tengelyek (kék) és kapcsolati vonalak (sárga)

A Talocrural ízület modellezése során a Tibia és Fibula által kialakított foglalati geometria került figyelembevételre, amelybe a Talus illeszkedik és amely a boka fő forgási kapcsolatát biztosítja. A Calcaneus a modellben merev, karos mechanizmusként jelenik meg, amely a Subtalar és Calcaneocuboid kapcsolatokon keresztül kapcsolódik a rendszerhez. A modell mindkét kapcsolatnál gömbcsuklós jelleget alkalmaz, kiegészítve a talp egységéhez viszonyított forgási lehetőséggel. A Navicular a Talonavicular kapcsolatot reprezentálja, amelynek mozgását gömbfejes kapcsolat modellezi. A

Cuboid a Calcaneushoz hasonlóan gömbcsuklós kapcsolaton keresztül csatlakozik a rendszerhez.

A kinematikai szerkezet központi eleme a Talus, amely három fő ízületi kapcsolatot köt össze: a Talocrural, a Subtalar és a Talonavicular ízületet. Ennek megfelelően a Talus biztosítja a lábfej és a lábszár közötti, valamint a lábtő irányába történő mozgások központi mechanikai kapcsolatát. A modellben külön központi koordinátapont is meghatározásra került, amely a boka geometriai középpontját reprezentálja, és lehetőséget biztosít a különböző mozgásállapotok helyzet- és szögváltozásainak összehasonlítására.

A kialakított kinematikai modell teljes felépítését a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra A kialakított kinematikai szerkezet

3. EREDMÉNYEK

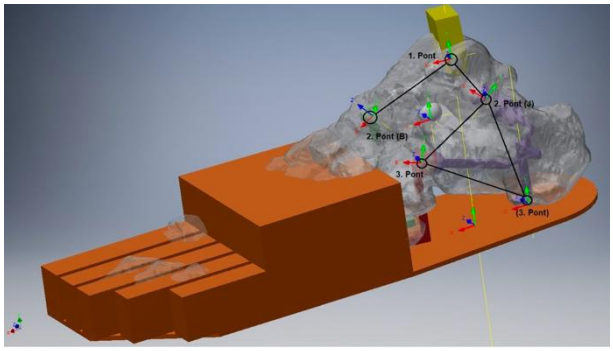
Az elkészített kinematikai szerkezet alkalmas a boka összetett mozgásának a szimulációjára és a mozgás során történő elmozdulásak meghatározására. Erre vonatkozóan megfelelő koordináta számításokat végeztünk el.

Az egyes pontok kiinduló koordinátáit az alábbi táblázat mutatja.

2. táblázat Stabil lábfej koordináta pontjai

Koordináta pont helyzete	Koordináta síkjainak bezárt szöge	Ízületi kapcsolati pontok
$O_n = \begin{pmatrix} -35 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 0° (XZ) Transverse: 0° (XY) Sagittal:0°	Kinematikai szerkezet középső koordináta pontja (origó)
$P_{TTF} = \begin{pmatrix} -49{,}698 \\ 31{,}699 \\ 3{,}519 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 15,5° (XZ) Transverse: 9,8° (XY) Sagittal:18,27°	Talocrural ízületi kapcsolat (1. csuklópont)
$P_{TN} = \begin{pmatrix} -12{,}386 \\ 16{,}326 \\ 6{,}864 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 26,5° (XZ) Transverse: 40° (XY) Sagittal:46,72°	Talonavicular ízületi kapcsolat (2. csuklópont (B))
$P_{TC} = \begin{pmatrix} -58{,}184 \\ 13{,}867 \\ -5{,}660 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 46° (XZ) Transverse: 41° (XY) Sagittal: 157°	Subtalar ízületi kapcsolat (2. csuklópont (J))
$P_{CC} = \begin{pmatrix} -22{,}255 \\ -1{,}566 \\ -13{,}305 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 17,7° (XZ) Transverse: 165° (XY) Sagittal:9,5°	Calcaneocuboid ízületi kapcsolat (3. csuklópont)
$P_{CG} = \begin{pmatrix} -49{,}698 \\ -42{,}940 \\ 3{,}519 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 0° (XZ) Transverse: 0° (XY) Sagittal:0°	Calcaneus-Ground elfordulási középpont (3. csuklópont)

Az ízületi kapcsolatokat reprezentáló koordináta pontok és a hozzájuk tartozó megfelelő kinematikai párok megfeleltetését az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra A boka és a kinematikai reprezentatív modellje

A kinematikai modell egyik vizsgált pontja, a Talonavicular ízületi kapcsolat (2. csuklópont, B) stabil helyzetben a következő koordinátával rendelkezik:

$$p_{TN} = \begin{pmatrix} -12{,}386 \\ 16{,}326 \\ 6{,}864 \end{pmatrix}$$

míg a kinematikai szerkezet középpontját jelentő referenciaorigó helyvektora:

$$O_n = \begin{pmatrix} -35 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Egy összetett lábfejmozgás vizsgálatára 27,5° dorsalflexiót és 17° everziót választottunk. A modellben a dorsalflexió a Z tengely, míg az everzió az X tengely körüli elfordulásként került értelmezésre. A két elfordulás együttes hatása a rotációs mátrixok egymást követő alkalmazásával írható le:

$$R = R_Z(\gamma) R_X(\alpha),$$

ahol, γ=27,5°, a=17°.

A Z tengely körüli forgatást leíró mátrix:

$$R_Z(27{,}5^\circ) = \begin{pmatrix} \cos 27{,}5^\circ & -\sin 27{,}5^\circ & 0 \\ \sin 27{,}5^\circ & \cos 27{,}5^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

az X tengely körüli forgatás pedig:

$$R_X(17^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 17^\circ & -\sin 17^\circ \\ 0 & \sin 17^\circ & \cos 17^\circ \end{pmatrix}$$

A két mátrix szorzataként:

$$R = \begin{pmatrix} 0{,}88701 & -0{,}44157 & 0{,}13500 \\ 0{,}46175 & 0{,}84825 & -0{,}25934 \\ 0 & 0{,}29237 & 0{,}95630 \end{pmatrix}$$

A Talonavicular pont elmozdult helyzete ezután a forgatott pontvektor és a referenciaorigó összegeként határozható meg:

$$p'_{TN} = R\, p_{TN} + O_n.$$

A referenciaorigó figyelembevételével az elmozdult helyzet koordinátái:

$$p'_{TN} = \begin{pmatrix} -17{,}269 \\ 6{,}349 \\ 11{,}337 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -35 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix} = \boxed{\begin{pmatrix} -52{,}269 \\ 16{,}349 \\ 11{,}337 \end{pmatrix}}$$

értékűre adódnak.

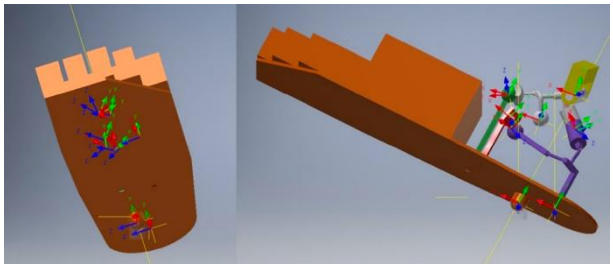
Ez alapján a Talonavicular ízületi pont stabil helyzetből történő elmozdulása koordinátánként:

$$\Delta p_{TN} = p'_{TN} - p_{TN}$$

$$= \begin{pmatrix} -52,269 - (-12,386) \\ 16,349 - 16,326 \\ 11,337 - 6,864 \end{pmatrix} = \boxed{\begin{pmatrix} -39,883 \\ 0,023 \\ 4,473 \end{pmatrix}}$$

értékű.

A számítás szemlélteti, hogy a kinematikai szerkezetben az egyes anatómiai pontok térbeli helyzete kizárólag a kiinduló koordináták és a vizsgált elfordulási szögek ismeretében meghatározható. Így egy adott mozgás – jelen esetben a dorsalflexió és az everzió együttes alkalmazása – számszerűen leképezhető, és az eredeti, valamint az elmozdult helyzet koordinátáinak összevetésével az egyes kinematikai pontok elmozdulása is meghatározható. A leírás a homogén koordináta-transzformáció alkalmazásával történt, amelynek célja a nyugalmi és a mozgás utáni helyzet közötti kapcsolat meghatározása.



6. ábra A Dorsal flexiós és Everziós elmozdulás szemléltetése

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

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálat során a boka és a lábfej főbb anatómiai és kinematikai sajátosságaira épülő egyszerűsített kinematikai szerkezetet alakítottunk ki. A modell központi eleme a Talus, amely a Talocrural, Subtalar és Talonavicular ízületi kapcsolatokat köti össze, míg a Calcaneus, Navicular és Cuboid a hozzájuk tartozó kapcsolatokon keresztül vesznek részt a mozgásban. A szerkezethez az anatómiai síkokhoz illesztett koordinátarendszert és az egyes ízületi pontokat jellemző koordinátákat rendeltünk.

A mozgásállapotok meghatározására koordináta-transzformációt alkalmaztunk, amely a kiinduló pontkoordináták és az elfordulási szögek alapján határozza meg az új térbeli helyzetet. A módszer alkalmazását 27,5° dorsalflexió és 17° everzió együttes vizsgálatával mutattuk be. A Talonavicular ízületi pont példáján keresztül meghatároztuk a stabil és az elmozdult helyzet koordinátáit, valamint az ezek közötti koordinátaváltozásokat.

Az eredmények alapján a kialakított kinematikai modell alkalmas a boka összetett mozgásának kinematikai leképezésére, valamint az anatómiai pontok helyzetváltozásának számszerű meghatározására. A módszer lehetőséget biztosít a különböző mozgásállapotok koordinátaalapú összehasonlítására, ezáltal megfelelő alapot teremthet a boka mozgásának további kinematikai elemzéséhez.

5. SUMMARY

During the study, a simplified kinematic mechanism was developed based on the main anatomical and kinematic characteristics of the ankle and foot. The central element of the model is the Talus, which connects the Talocrural, Subtalar, and Talonavicular joints, while the Calcaneus, Navicular, and Cuboid participate in the motion through their respective joint connections. A coordinate system aligned with the anatomical planes was assigned to the mechanism, together with coordinates characterizing the individual joint points.

To determine the different motion states, coordinate transformation was applied to determine the new spatial position based on the initial point coordinates and the rotation angles. The method was demonstrated by considering a combined 27.5° dorsiflexion and 17° eversion. Using the Talonavicular joint point as an example, the coordinates of the stable and displaced positions, as well as the coordinate changes between these positions, were determined.

The results demonstrate that the developed kinematic model is suitable for the kinematic representation of complex ankle motion and for the quantitative determination of changes in the positions of anatomical points. The method enables coordinate-based comparison of different motion states and thus provides an appropriate basis for further kinematic analysis of ankle motion.

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/browser.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/