XIII. FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2008. március 14-15.

NÉHÁNY GONDOLAT A BIOMECHANIKÁRÓL A TÉRDIZÜLET KAPCSÁN

M. Csizmadia Béla

Abstract

Since the biomechanics is a new field of science, it can be only examined by a tight cooperation of human and technical scientists. In the beginning of the lecture the division and the aims of the biomechanics will be introduced. Then, one specific segment of the human biomechanics, the human mechanical model will be presented and summarized with both numerical and experimental results.

Összefoglalás

A biomechanika egy viszonylag új tudományterület, amely az élő szervezetekkel foglalkozó kutatók és a műszaki szakemberek szoros együttműködésével művelhető. Az előadásban a biomechanika felosztása és célkitűzéseinek ismertetése után egyetlen humán biomechanikai kérdéssel, a térdizület mechanikai modelljének megalkotásához végzett többretű számításaink és kísérleteink eredményeiről adunk összefoglalót.

1. A biomechanika

A biomechanika – a legáltalánosabb értelmezés szerint – az élő szervezetek mechanikai viselkedését leíró, multidiszciplináris tudomány.

A definíciót elemezve egyrészt fontos, hogy *élő szervezetekről* beszélünk, és itt élőknek tekintjük a szervezetet akkor is, ha az élet, a növekedés, az öfenntartás jeleit már nem mutatja, de korábban élő volt. Sőt tulajdonképpen a talaj, a valóban termő, létező talaj is „élőknek” tekinthető. Másrészt a biomechanika *multidiszciplináris tudomány*, azaz az élő szervezet mechanikai viselkedése a szervezet felépítését, működését, életét leíró tudomány eredményeinek felhasználása, művelőinek bevonása nélkül nem képzelhető el. Harmadrészt *mechanikai viselkedést* leíró tudomány, azaz bele tartozik a szervezet morfológiájának, a szervezetet felépítő anyag tulajdonságának, a szervezet szilárdsági, kinematikai és kinetikai viselkedésének a leírása is.

A biomechanikát – ilyen értelmezés szerint – humán és nem humán biomechanikára bonthatjuk (ez utóbbit korábban mezőgazdasági anyagok mechanikájának is nevezték). *A nem humán biomechanika* tovább csoportosítható állati, növényi anyagok és élő anyagból felépülő halmazok (szecskák, maghalmazok, stb.) mechanikájára. Mindhárom területen belül a morfológiai leírások a szilárdsági tönkremenetel, anyag- ill. szerkezet-jellemzők (néhány esetben sajátos jellemzők, pl. kohézió, belső súrlódási szög stb.), ezen anyagok feldolgozása, tárolása, szállítása közbeni jelenségek vizsgálata (pl. növényi szárak vágása, halmazok tárolása, gyümölcsök szállítás közbeni sérülése, stb.) tartozik a tárgykörbe.

A nem humán biomechanikai vizsgálatokban a bioanyag vagy *teherhordó*, vagy *terhelést okozó* lehet. Ennek megfelelően a mechanikai vizsgálatok is jelentősen különböznek. Például teherhordó a búzaszár a kalász súlyának és a szélnyomásnak az elviselésekor és terhelést okozó betakarításkor. Teherhordó a szecskahalmaz boltozódáskor, terhelést okozó a hatása tároláskor, stb. A mechanikai vizsgálatok célja – figyelembe véve ezt a kettős hatást – szintén kettős. Egyrészt az, hogy elemezze a bioszer-kezetek teherviselő képességét. E cél oka – a természet megismerésén túl – az, hogy az ember a természet szabályos rendjébe folyamatosan beavatkozik. Ennek széles körben vannak pozitív hatásai, de negatív mellékhatásai is. A mi szempontunkból csupán néhányat említünk. Például többlet terem a nemesített búza, de nem biztos, hogy a búzaszál elviseli a természetes hatásokat, vagy a baromfitenyésztés eredményeként megnő az állat testsúlya, a tartástechnológia miatti mozgáshiány viszont gyengíti a csontozatot, amely eredményeként nem bírja el a terhelést, stb.

1. táblázat

Osztályozás	Tématerületek
Biotopológia	szimmetria tulajdonságok, geometriai leírás, stb.
Bioanyagok	Anyag (szerkezet) modellek mechanikai leírása csontok biomechanikája lágyszövetek biomechanikája erek biomechanikája mesterséges bioanyagok mechanikája (protézis anyagok, lebomló kompozitok)
„Szerkezeti elemek”, ép testrészek biomechanikája	tartó és mozgatórendszer biomechanikája gerinc biomechanikája ízületek biomechanikája szív és érrendszer dinamikája
Emberi mozgás biomechanikája	fiziológiai testhelyzetek biomechanikája (lépés, járás, futás ...) ergonómiai biomechanika sport biomechanika fizikai terhelés biomechanikája rendellenességek szűrése
Beteg testrészek mechanikája	degenerációs folyamatok biomechanikája (osteoporosis, porckorong tönkremenetele) baleseti terhek, sérülések mechanikája (nyak, fej, mellkas)
Gyógykezelések biomechanikával	konzervatív kezelések biomechanikája műtéti eljárások biomechanikája rehabilitációs biomechanika implantátumok biomechanikája

A kutatások másik célja az, hogy a technológiai folyamatban a bioanyaggal kapcsolatba kerülő gépészeti szerkezetek méretezéséhez kell terhelési adatokat szolgáltatnia.

A *humán biomechanikának* többféle osztályozása lehetséges. Egyet az 1. táblázatban közlünk.

A tématerületek osztályozása utal a vizsgálatok céljára, amire később térünk ki. Észrevehetjük, hogy az itteni tématerületek átfedésben vannak, és lehetnek egymással. Például – a későbbiekben sorra kerülő – térd mechanikájának vizsgálata besorolható az ízületek biomechanikájába és a fiziológiai testhelyzetek biomechanikájába is, de kapcsolódhat az implantátumok biomechanikájához is. Mindenesetre ez a felsorolás is mutatja, hogy a biomechanika széles körben, sok ágon beépült az orvoslásba, annak részét képezi.

2. Humán biomechanika

A humán biomechanika az a terület, amelyet ma általánosságban csak biomechanikának neveznek. Az 1. táblázat kapcsán utaltam a lehetséges célokra. Mint a nem humán biomechanikában itt is *több fő cél* érdekében folynak a vizsgálatok. Az egyik a nem ismert emberi „szerkezet”, *a szervezet mechanikai működésének pontosabb modellezése*. Ide tartozik a táblázati beosztás szerinti „biotopológia”, a „bioanyagok” és a „testrészek biomechanikája”. A másik cél a kutatási *eredményeknek a gyógyászatban történő felhasználása*. Ez utóbbi kapcsán is két rész cél fogalmazható meg: az egészségmegőrzés (prevenció) és a gyógyítás. Az előzőhöz az „emberi mozgás biomechanikája”, a másodikhoz a „beteg testrészek” és a „gyógykezelések biomechanikája” tartozik.

Természetesen itt is vannak átfedések. Hogy példaként a következőkben említésre kerülő térdizület mechanikájával kapcsolatos vizsgálatokat említsem, ennek célja a térd mechanikai modellezése és ezen keresztül a működésének jobb megismerése, de ugyanakkor a gyógyítás is, jobb protézis kialakítása.

A biomechanikai vizsgálatok célkitűzése különbözik a műszaki mechanika célkitűzéseitől. Nézzük meg, hogy milyen további különbségek és hasonlóságok vannak! A hasonlóság az, hogy a természettörvények természetesen mindkét esetben érvényesülnek. A megnyilvánulási formák azonban különbözőek. Ezekre a különbségekre mutat rá a 2. táblázat.

2. táblázat

Műszaki mechanika	Biomechanika
Geometriai tervezés	Biomorfológia, biotopológia
Anyagtörvények	Szerkezzettörvények
Anyagállandóság	Anyag épülés, bomlás
Kontinuummechanika	Diszkrét elemes mechanika
„Ideális” kényszerek (csukló, befogás, csuszka)	Ismeretlen kényszerkapcsolatok (ízületek)
Mozgató elemek ismeretek	Izom működése változó
Vezérlő rendszer ismert	Idegrendszer bizonytalan
← Mozgástörvények →	

Látható, hogy – csak néhány dolgot kiemelve – mivel nem ismerjük a vizsgált szerkezetet (az emberi szervezetet), annak alaktani morfológiai formájának és felépítésének tanulmányozása szükséges, ugyanakkor a helye, helyzete, az alakzatok geometriai leképezése (biotopológia), azok változatlan tulajdonságainak – az objektumok kapcsolatainak – geometriai vizsgálata is szükséges a műszaki mechanikában alkalmazott geometriai tervezéssel szemben. Vagy egy másik kérdés az anyagtörvények vizsgálata. A bioanyag nem homogén, ezért csak „szerkezet törvényeket” határozhatunk meg az anyag tulajdonságainak leírásakor. És így tovább a 2. táblázat szerint. Egyedül a mozgástörvények, amelyek mindenhol állandóak.

A vizsgálati módszerek kérdésében is vannak hasonlóságok és különbségek. Hasonló, hogy a biomechanikában is léteznek kísérleti és számítási módszerek. Ez utóbbiak hasonlóak lehetnek: áramlástani, szilárdsági számítások, mozgásvizsgálatok. Itt azonban – az előző anyagtörvények miatt – a kontinuummechanika csak korlátozottan, sok feltételezéssel használható, hiszen a bioanyag messze nem kontinuum. A kísérleti vizsgálatok egyik jelentős különbsége a műszaki mechanikával szemben, hogy itt élő emberen és halott mintadarabon (cadaver) végezhetők a mérések az ebből adódó korlátok és nehézségek mellett. Az így kapott mérési eredmények kiértékelési módszerei sokkal összetettebbek és nehezebben alkothatók meg a mechanikai, matematikai modellek.

3. A térdizület mechanikája

A Szent István Egyetem Biomechanikai Kutatócsoportja a térdizület mechanikájával, annak kinematikai-kinetikai modelljének megalkotásával foglalkozik a Szent János Kórház professzorával és az ő munkatársaival, illetve a SZTAKI-val együttműködve. A továbbiakban ennek a kutatómunkának az eredményeiről adok rövid beszámolót.

A térdizület az emberi test legbonyolultabb izülete. Rendkívül összetett mozgások végzésére teszi alkalmassá az embert, de az izület mozgása is rendkívül összetett. A combcsonthoz viszonyítva a lábszárcsont behajlítás közben – akaratunktól függetlenül – tengelye körül 5-10°-os elfordulást (rotáció) és néhány fokos síkból való kitérést (abductio) végez. Csak az „Isten tudja” miatt. Feltehetően a járás-stabilitás biztosítása érdekében. Ezt a tényt már régen ismerik, de számszerűsíthető és azokat magyarázó adatok nincsenek. A mozgás illetően létrejöttének okaként (nem céljaként) a szakirodalomban fellelhető egyik koncepció azt állítja, hogy a szalagok a másik koncepció azt, hogy az ízfelszín, a csontfejek felülete vezérli a mozgást. A mi kutatásunk alapkonceptiója – magunkévá téve Krakovits Gábor professzor feltételezését – az utóbbiból indult ki és ezt kívánta és kívánja bizonyítani. Ennek és a mechanikai modellnek a megalkotása érdekében sokrétű, egymáshoz szorosan kapcsolódó vizsgálatokat végeztünk, amelyekről nagyon röviden az alábbiakban számolunk be.

3.1. Elemi számítások

A térd egyik, igen bonyolult mozgásának, a guggolásnak az elemzését egy egyszerű síkbeli mechanikai modellel kezdtük el. Ennek *célja* az volt, hogy a combizomban a guggolás során keletkező

erő változásának jellegét és annak maximális értékét meghatározzuk. Ehhez a síkbeli modell is elegendőnek bizonyult. A térden belüli mozgásokat elemezve (1. ábra) egy egyszerű csuklós rúdszerkezeti modellt alkottunk (2. ábra), amely vizsgálata eredményeként számíthatókká váltak az izomban és a térdben keletkező erők az α behajlítási szög függvényében. Ezek közül itt csak a combizomban (quadriceps) keletkező F_q erő számítását adjuk meg az egy lábra eső testsúlyhoz (G_1) viszonyítva. Számszerű eredményeket ebből a modelltől bizonyos peremfeltételek, a súlyerő vándorlásának (helyének) ismerete, nélkül (az összefüggésekben λ_3 , $\gamma(\alpha)$, λ_f) nem lehetett megkapni. Ezért a számításhoz élő embereken végeztünk méréseket.

$$\frac{F_q}{G_1} = \frac{\lambda_3(\alpha) \sin(\alpha - \gamma(\alpha))}{\lambda_f},$$

$$\text{ahol } \lambda_3 = \frac{l_3}{l_{30}},$$

$$\lambda_f = \frac{l_f}{l_{30}} \approx 0,13.$$

1. ábra. Térd-mozgás modell

2. ábra. A guggolás mechanikai modellje

3.2. Kísérletek élő embereken

A súlyvonal mozgása természetesen a testhelyzettől a test tömegeloszlásától, és egyéb változó paraméterektől is függ. Ezért előírt módon, egyenes gerinccel és kinyújtott kézzel végeztettük a mozgásokat erőmérőkkel alátámasztott lapokon álló emberekkel. A vizsgálatokat tizenegy egyetemista fiú és lány bevonásával végeztük (3. ábra) Az eredményeket itt nem részletezett módon grafikus és numerikus értékeléssel kaptuk. Ezek közül csupán egyet, a λ_3 változását a 4. ábra mutatja, amely – matematikai statisztikai elemzés után – az α behajlítási szög függvényében állandó értéknek vehető.

Ezen ismeretek birtokában az elemi számítási modellel a combizomban keletkező erő számíthatóvá vált (5. ábra). A combizomban keletkező erő és főleg annak változása ismeretében lehetővé vált, hogy a

további vizsgálatokat cadaver térden végezzük. A cadaver térd alkalmazását azért tartjuk szükségesnek, mert egyrészt élő emberen a lábszár rotációjának mérése csak nagy hibával lehetséges, ugyanis a mozgásérzékelőket a bőrre lehet rögzíteni, a bőr és a csont pedig egymáshoz képest elmozdul a behajlítás során. Másrészt a cadaver térden a szalagok elvághatóak és hatásuk mérhető.

3. ábra A súlyvonal változás mérése

4. ábra. Súlyvonal lábszár metszésvonal meghatározása

5. ábra. A combizomban keletkező fajlagos erő változása a behajlítás során

3.3. Kísérleti vizsgálatok cadaver térden

6. ábra. A kísérleti berendezés vázlata

A cadaver térd jó kísérleti modellnek bizonyult, mivel a térdmodellek valóságosak voltak, hiszen ép térdű

hullákból származtak. A mozgást létrehozó izomzatot kellett egy mesterséges izommodellel helyettesíteni. Mivel azonban most már rendelkezésünkre állt a combizom karakterisztikája egy megfelelő gumi izommodell beépítésével a cadaver térd alkalmassá vált arra, hogy a térdizületet kísérleti modellként használjuk.

A combcsontokat mereven befogtuk az erre a célra kialakított berendezésbe (6. ábra). A kiegyenesített lábat modellező vízszintes helyzetet a gumi izommodellben keletkező erő biztosította. A behajlítást súlyerő hozta létre. Az erőket a HBM Spider erőmérő rendszerével, a lábszár helyzetét Poláris infravörös fénnel működő térbeli helymeghatározó rendszer felhasználásával mértük. Az egyik mérés egyik fázisát mutatja a 7. ábra.

7. ábra. Emberi cadaver (hulla) térd kísérleti vizsgálata

A mérés kiértékelésének nehézségeit az adta, hogy a Polaris mérőrendszer a lábszár helyzetét Euler-szögekkel (Ψ , Θ , Φ) adja meg, míg az orvosi és a természetes emberi helyzet meghatározás ettől eltérő: a behajlítás szöge (ρ_1) a két velőűr közötti, függőleges síkbeli szög, a síkból való kitérés (ρ_3) a lábszár velőűrtengelyeinek függőleges síkkal bezárt szöge, a rotáció (ρ_2) pedig a lábszár velőűrtengely körüli elfordulása (8. ábra).

8. ábra Az Euler-szögek és a lábszár helyzetet megadó természetes szögek viszonya

Az átszámítást, azaz a kiértékelést egy háromhengeres mechanizmus alkalmazásával oldottuk meg, amiről Bíró számolt be [1]. Egy eredményt, a rotációnak a változását a behajlítási szög függvényében a 9. ábra mutatja.

3.4. Numerikus modellek

Élő ember térdéről készült MR vizsgálatokból kiválasztottuk azt a jellemző metszetet, amely geometriája jellemző. Ennek alapján kialakítottunk egy numerikus modellt, amely célja a térden belüli moz-

9. ábra. A rotáció változása a behajlítási szög függvényében

gások modellezése. Az irodalom [2] szerint az érintkezési pontok által, az érintkezési felületeken meghatározott görbék különböző hosszúságúak. Ez azt jelenti, hogy van csúszás és gördülés is. Az ívhosszak különbségének a nagyobb ívhosszhoz viszonyított aránya 0, ha csak gördülés van és 1, ha csak csúszás van. Guggolásnál kapott egyik eredményünket mutatja a 10. ábra.

10. ábra. A fajlagos csúszási jellemző a behajlítási szög függvényében

Irodalom

1. Bíró István: Az emberi térd három-hengeres kinematikai modellje. X. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, 2007. augusztus 27-29.
2. Zhi-Kui Ling, Hu-Qing Guo, Stacey Boersma: Analytical study on the kinematic and dynamic behaviors of a knee joint, Department of Mechanical Engineering and Engineering Mechanics, Michigan, Technological University, Houghton, MI 49931, USA Received 1 September 1995, accepted 10 May 1996

dr. M. Csizmadia Béla, CSc egyetemi tanár

Munkahely: Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechanikai és Géptani Intézet

Cím: 2103, Magyarország, Gödöllő, Páter K. u. 1.

Telefon / Fax: +36-28-522000

E-mail: csizmadia.bela@gek.szie.hu