

Biomechanikai rendszerek többléptékű modellezése

Fazekas Csaba, Pannon Egyetem, Veszprém
Kozmann György, MTA MFA, Budapest
Hangos Katalin, MTA SZTAKI, Budapest

Biomechanikai rendszerek elektromos gerjesztés hatására mechanikai választ adnak, ezáltal jön létre a rendszer mozgása. Különböző folyamatokhoz, tulajdonságokhoz és szerkezetekhez különböző időállandók és jellemző méretek tartoznak. Ez speciális modellezési módszer használatát teszi indokolttá, amit többléptékű modellezésnek neveznek. Erre alapozva egy olyan általános keretrendszer felépítését mutatjuk be, amellyel modellezhetőek egy adott biomechanikai rendszer bioelektromos és mechanikai folyamatai, tulajdonsága, és a rendszer felépítése úgy, hogy a rész-modelleket a keretrendszer megbízhatóan tudja integrálni. Ennek segítségével a biomechanikai rendszer mérhető elektromos bemenetének és mechanikai kimenetének függvényében következtetéseket tudunk levonni a mélyebb szintű folyamatok időbeli lefolyására, a rendszer belső felépítésére, és ennek alapján diagnosztikai és irányítási eljárások lesznek tervezhetőek.

BEVEZETÉS

Biomechanikai rendszerek elektromos gerjesztés hatására mechanikai választ adnak (pl. az izmok idegi gerjesztésre összehúzódnak), ezáltal jön létre a mozgás [1]. A bemeneti elektromos gerjesztésből a biomechanikai rendszer jól szervezett belső felépítésétől és folyamataitól függő módon keletkezik a rendszer mechanikai válasza. A biomechanikai rendszer egy mélyebb diagnosztikai célú modelljének így a biológiai és kémiai folyamatok mellett tartalmaznia kell a valós rendszer elektromos és mechanikai tulajdonságainak leírását is. Ismeretes ugyanakkor, hogy a különböző folyamatokhoz, tulajdonságokhoz és szerkezetekhez különböző időállandók és jellemző méretek tartoznak [1,12]. Így például a biokémiai reakciók általában néhány ezredmásodperc alatt lezajlanak és a harántcsíkolt izomban az egy szarkomerben lezajló biokémiai reakciók csak az adott szarkomerre hatnak, tehát a hatás néhány mikrométerre terjed ki. Ezzel szemben az egész izom aktiválása néhány tízezer másodperc alatt történik meg, magának a mozgásnak a lefolyása pedig másodperces nagyságrendű.

Így a biomechanikai rendszer mélyebb szintű modellezése megkívánja a nagyon különböző jellemző méretű és időállandójú folyamatok együttes modellezését [2]. Ez az igény speciális modellezési módszer használatát teszi indokolttá, amit többléptékű modellezésnek neveznek [7]. Ennek egy kezdeti változata már megjelent a [13]-ben. Célunk egy olyan általános keretrendszer felépítése, amellyel model-

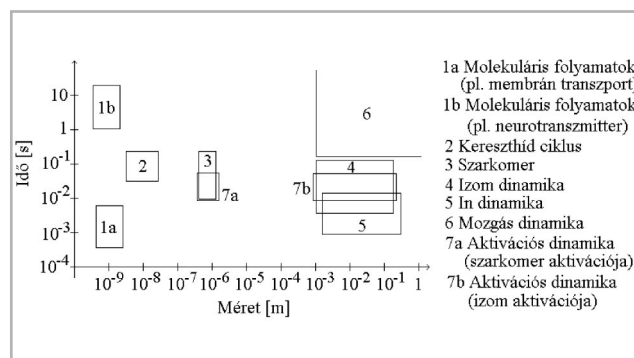
lezhetőek egy adott biomechanikai rendszer bioelektromos és mechanikai folyamatai, tulajdonságai és a rendszer felépítése úgy, hogy ezeket a rész-modelleket a keretrendszer megbízhatóan tudja integrálni. A keretrendszert célja, hogy segítségével a biomechanikai rendszer mérhető elektromos bemenetének (vagy állapotának) és mechanikai kimenetének függvényében következtetéseket tudjunk levonni a mélyebb szintű folyamatok időbeli lefolyására, a rendszer belső felépítésére, és ennek alapján a diagnosztikai és irányítási eljárások legyenek tervezhetőek.

Biomechanikai rendszereket különböző eszközökkel szoktak modellezni. Így léteznek geometriai, mechanikai, elektro-mechanikai, strukturális stb. modellek is. A keretrendszert úgy igyekeztünk megtervezni, hogy a fenti, eléggé különböző típusú modellek is megvalósíthatóak legyenek benne.

Eddig a harántcsíkolt izmot tartalmazó biomechanikai rendszerekre dolgoztuk ki a keretrendszert. A dolgozat ennek a keretrendszernek a szerkezetét és az általa megépíthető modellek skála-analízisét mutatja be.

MÓDSZER

A harántcsíkolt izom működését több, különböző időállandóval és jellemző mérettel rendelkező folyamat, ún. „mechanizmus” együttesen határozza meg [1, 12].



1. ábra
Példa a harántcsíkolt izommal rendelkező biomechanikai rendszerek jellemző időállandóinak és méreteinek skálaterképe

Az 1. ábrán vázlatosan mutatjuk be a harántcsíkolt izmokkal rendelkező biomechanikai rendszerekben fontos mechanizmusok jellemző méreteinek és időállandóinak skálaterképét. Hasonló skálaterképet az emberi biológiai alapú funkciókról az irodalomból ismerünk [5]. Az ábrán a jellemző

mechanizmusokat téglalapoknak feleltettük meg. Ezek átlapolódásakor a kétféle mechanizmus a jellemző méret és/vagy idő szempontjából nem különíthető el egymástól. Fontos megjegyezni, hogy a téglalapok abszolút és egymáshoz képesti relatív helyzete az adott biomechanikai rendszer tulajdonságaitól függően erősen változhat, átlapolódások keletkezhetnek, vagy megszűnhetnek.

Az 1. ábráról leolvasható, hogy a molekuláris folyamatok esetén a jellemző méret néhány nm (pl. membránon való áthaladás), míg a folyamatok lehetnek egészen gyorsak (pl. membránon való áthaladás), ill. lassúak (pl. neurotranszmitter fogyása hosszú ideig tartó gerjesztés esetén) is. Egy keresztírd ciklus jellemző ideje kb. 200 ms, míg a mérete kb. 11 nm. A szarkomerek dinamikájára a jellemző méret a szarkomer mérete, kb. 3 μm , míg időállandója kb. 200 ms. A mechanikai mozgás jellemző mérete tipikusan több cm, vagy m, míg időállandója néhány száz ms-tól indulva akár több másodperc is lehet.

Az 1. ábráról az is látható, hogy mélyebb szintű dinamikus modellezés esetén, ha a modell időállandója adott, akkor általában több nagyságrendnyi mérettartományt kell átfigyeni. Adott jellemző méret esetén pedig a modellezett mechanizmusok időállandói lehetnek nagyon eltérőek, azaz a probléma merevvé válhat (stiff egyenletekből álló modell keletkezik). Ez a folyamatok numerikus szimulációjakor okozhat problémát. Ennek egy megoldása lehet, hogy a számunkra fontos mechanizmusoknál sokkal gyorsabb ill. sokkal lassabb mechanizmusokat kvázi-stacionáriusnak tekintünk.

A különböző időállandójú és jellemző méretű mechanizmusok modellezése többléptékű modellezési technikával [5, 7, 11] kezelhetővé válhat. Ennek lényege az, hogy a hasonló időállandójú és jellemző méretű mechanizmusokat szintekbe soroljuk, és ezeket a szinteket külön-külön, a szinteknek megfelelő megoldási módszerrel szimuláljuk, miközben a szintek között lévő megfelelő kapcsolatokkal biztosítjuk az egész rendszer helyes működését.

A szintek definiálásakor érdemes figyelembe venni a valódi biomechanikai rendszer struktúráját is, ezáltal segíthető a rendszer szerkezetének modellezése. Az általunk vizsgált, harántcsíkolt izmokkal rendelkező biomechanikai rendszerekben elkülöníthető szinteket a 2. ábra szemlélteti. A harántcsíkolt izomnak nagyon szabályos felépítése van [1]. Az elemi erőgenerálás a szarkomerekben történik a filamentumok közötti keresztírd ciklussal. Párhuzamosan és sorosan kapcsolt szarkomerekből épül fel az izomrost. Azonos típusú izomrostok motoros egységekbe rendeződnek és egy motoros egységben lévő izomrostokat ugyanaz a motoneuron gerjeszt. A különböző típusú motoros egységek építik fel az izmot. Az izom az ín és az aponeurosis segítségével kapcsolódik a csontokhoz, míg a csontok ízületekben találkozáskor kapcsolódnak egymáshoz.

Mivel a keretrendszernek nem célja egy speciális modelltípushoz való illeszkedés, ezért a szinteket és a közöttük lévő kapcsolatokat úgy kellett megtervezni, hogy elég általánosak legyenek. A keretrendszer szerkezetét tehát úgy ala-

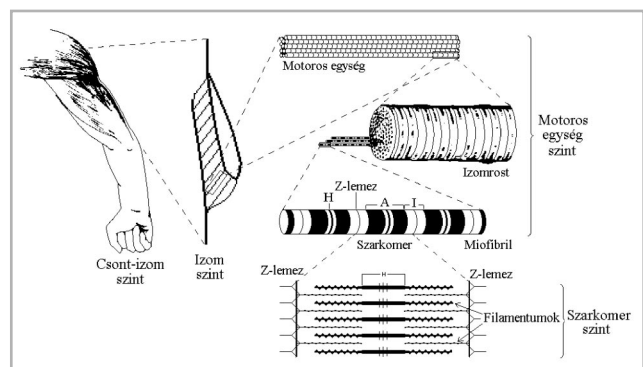
kítottuk ki, hogy az irodalomban legjobban elterjedt két különböző izommodell, a Hill [4] és a Huxley modell [6] is beépíthető legyen.

A keretrendszerbe illeszkedő modellek be- és ki-meneteinek megválasztásakor figyelembe kell venni a leendő modell felhasználását. Mivel a keretrendszer alapvető célja, hogy a modellekkel a „jól” mérhető jelekből mélyebb szintű folyamatokra tudjunk következtetni, így a keretrendszer bemeneteként elektromos gerjesztő jelet, míg elsődleges kimeneteként a mozgásmintázatot választottuk. Ugyanakkor másodlagos kimenetként definiáltuk az egyes izomerőket, ill. forgatónyomatékokat, mivel bizonyos vizsgálatoknál ezeket is méri.

Elektromos gerjesztő jel alatt egy absztrakt jelet értünk, és nem a biológiai gerjesztő jelet, a neuronok aktivitását. Ennek oka az, hogy a biomechanikai rendszer működése szempontjából a rendszer elektromos állapota játssza a döntő szerepet. Ennek becslése a konkrét modell feladata, mely történhet a valódi gerjesztő jelből ([10] nyomán), de történhet más, ezzel az elektromos állapottal kapcsolatos jelből is.

Mivel a motoneuronok gerjesztése nagyon nehezen valószínűsíthető meg, ezért ezt a fajta jelet felhasználó modellek nagyon nehezen validálhatók. Ezért az irodalomban csaknem kizárólagosan a jobban mérhető, az elektromos állapottal kapcsolatban lévő EMG jelet használják gerjesztőjelként egy jelfeldolgozási folyamat után (lásd például [13]). A keretrendszerben mindkét fajta bemenet használható a megfelelő konkrét részmodell behelyettesítésével.

A keretrendszer tervezése az egyes szintek meghatározását, lehetséges feladataik definiálását és a közöttük lévő kapcsolatok meghatározását jelenti a fenti elvek alapján. Irodalomból [13] már korábban ismert volt egy szintekbe sorolás: külön lehet kezelni az erőgenerálást és a mozgászámítást, melyek között a kapcsolatot az ízületi forgatónyomatékok és az ízületi szögek adják meg. Ezt a kezdeti szintekbe sorolást átvettük. A mozgászámítást tovább nem volt érdemes bontani, de az erőgenerálás folyamatát igen. Az erőgenerálás folyamatainak felosztását a harántcsíkolt izom felépítése, és az elkülöníthető mechanizmusok jellemző mérete, időállandói alapján végeztük el.



2. ábra Harántcsíkolt izmokkal rendelkező biomechanikai rendszerek lépték szintjei

EREDMÉNYEK

A keretrendszerben négy különböző szintet definiáltunk (2. ábra) úgy, hogy az egyes szinteken lévő mechanizmusoknak nagyságrendileg egyezik a jellemző méretük és időállandójuk. A legmélyebben fekvő szint a szarkomerek szintje, ahol a harántcsíkolt izomban lezajló biokémiai mechanizmusok és az elemi erőgenerálási mechanizmusok modellezhetők (Hill és a Huxley típusú is). Szintén itt történik meg az izom által már megszürt gerjesztő jelből a szarkomer elektromos állapotának a meghatározása. Ezen a szinten definiált mechanizmusoknak a jellemző mérete maximum néhány μm , míg időállandójuk maximum száz ms.

Következő szint a motoros egységek szintje, amelyek párhuzamosan kapcsolt izomrostokat tartalmaznak. Ennek feladata a motoros egységben lévő szarkomerek által generált erők integrálása, ennek módosítása a motoros egységben lévő és azt körülvevő membránok, hátrák tulajdonságaival, ill. a motoros egységben lévő elektromos állapot számítása a szarkomerek elektromos állapotából. Azért választottuk a motoros egységeket a következő szintnek az izomrostok helyett, mert a motoros egységek ugyanolyan típusú (ugyanolyan tulajdonságú) izomrostokat tartalmaznak, gerjesztés esetén az egész motoros egység aktiválódik és motoros egységből több különböző fajta létezik, pl. lassú és gyors. Ezen a szinten lévő mechanizmusok jellemző mérete mm és cm nagyságrendű, időállandójuk maximum néhány száz ms. A szint bevezetésének célja elsősorban az izom struktúrájának megfelelő modellezése volt.

Következő szinten található az izom modellje, amely három alszintet tartalmaz: a motoros egységeket, az izomhoz kapcsolódó ínt és az aponeurosis. Integrálja a motoros egységek által kifejtett erőt, figyelembe véve az izomban található passzív szövetek által kifejtett erőket is, valamint módosítja ezt az inak és az aponeurosis hatásával. Az ín és az aponeurosis alszint feladata az ín és az aponeurosis tulajdonságainak (vizkoelaszticitás, energiatárolás, ferdesség stb.) modellezése. Mivel ezek kapcsolják össze az izmokat a csontokkal, ezért ezek feladata az izomerőből a csontokra ható forgatónyomatékok kiszámítása. Ennek a szintnek a feladata az egyes motoros egységek elektromos állapotának számítása. A szinten lévő mechanizmusok jellemző mérete mm és cm, nagyságrendű, időállandójuk maximum néhány száz ms.

Végül az utolsó szint, a mechanikai mozgás szintje, a belső és a külső erőkből, ill. a forgatónyomatékokból meghatározza az ízületi szögek változását, továbbá a bementekből az egyes izmokhoz tartozó elektromos gerjesztést kiszámolja.

A szintek közötti kapcsolatot a különböző szinteken levő struktúrák mechanikai és elektromos állapotait leíró változók közötti megfeleltetés adja. Pl. a motoros egység szintje kiszámolja a mechanikai állapotából és az elektromos gerjesztéséből az öt alkotó szarkomerek mechanikai állapotát és a jelenlegi gerjesztéseiket. Ezeket átadja a szarkomer szintnek, ami kiszámolja a szarkomerek elektromos állapo-

tát és ebből, ill. a mechanikai állapotból, meghatározza a szarkomer által kifejtett erőt. Az erőt és az elektromos állapotot ezután visszaadja a motoros egység szintjének, ami ezekből meghatározza a motoros egység elektromos állapotát és az általa kifejtett erőt.

A keretrendszerben megadható, hogy hány csontból és izomból áll a modellezett csont-izom rendszer; az izmot milyen típusú motoros egységek építik fel, ezeknek milyen az aránya; egy motoros egység hány sorosan és párhuzamosan kapcsolt szarkomerből áll.

A keretrendszert MATLAB környezetben valósítottuk meg. Egyszerűség kedvéért jelenleg csak síkban való mozgást tud kezelni. Mind a csontok, mind az izmok száma tetszőleges lehet, ezen felül a csontok a végüknél tetszőleges elágazásban kapcsolódhatnak egymáshoz. Az izom lehet egy és két ízületet átfogó is. Az izom tetszőlegesen sok részből (különböző motoros egységekből) épülhet fel. Mivel síkmozgás modellezésére alkalmas a keretrendszer, ezért a csontok és az izmok pontos geometriája nem megadható, de az izmon belül az izomrostok iránya modellezhető. A keretrendszer megjeleníti a létrejött mozgást és a kiválasztott változók időfüggvényét.

A keretrendszer hatékonyságát több, az irodalomban szereplő modellen teszteltük. Munkánk a Laczkó és munkatársai által javasolt és fejlesztett neuro-mechanikai modellezési koncepcióból ered [9, 10], amely alapján készítettünk egy karmodellt, illetve megvalósítottunk egyéb modelleket is [2, 3, 12, 13].

A jelenlegi keretrendszer harántcsíkolt izmokat tartalmazó biomechanikai rendszerekre alkalmazható, azonban felépítése általános elvek alapján került meghatározásra. Ezért egyéb biomechanikai rendszerekre, például simaizmokból állóra könnyen módosítható.

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatban egy speciális biomechanikai rendszerre, a harántcsíkolt izmokat tartalmazó biomechanikai rendszerekre mutattunk be egy modellezési keretrendszert, amely négy szinten tartalmazza a rendszer mechanizmusainak megfeleltethető részmodelleket. A keretrendszer rendszerelméleti értelemben vett bemenete az izmok elektromos állapotát befolyásoló jel, míg kimenete a létrejött mozgás. Ez az elképzelésünk a Laczkó és munkatársai által végzett munkákból származik, ennek összefoglalása másutt megtalálható [8]. A keretrendszer szintjei közötti interfészek jól definiáltak és általánosak, így az egyes szintekre gyakorlatilag tetszőleges részmodellek beépíthetők, ill. az izom szerkezeti felépítése is modellezhető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Munkát az OTKA a T034548 és T042710 pályázatok által támogatta.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Enoka R.M.: Neuromechanics of Human Movement, Human Kinetics, Champagne, IL
- [2] Fazekas Cs., Kozmann Gy., Hangos K.M.: Hierarchical Modelling in Biology: Systematic Building of Limb Models, IFAC World Congress, 4-8 July 2005, Prague, Czech Republic. on CD.
- [3] Hatze H.: The Complete Optimization of Human Motion, Math Biosci, 1976; 28: 99-135.
- [4] Hill, A.V.: The Heat of Shortening and the Dynamic Constant of Muscle, Proc. R. Soc. Lond. B, 1938; 126: 136-195.
- [5] Hunter P.J., Borg T.K.: Integration from proteins to organs: the Physiome Project, Nat Rev: Mol Cell Bio, 2003; 4: 237-243
- [6] Huxley, A.F.: Muscle Contraction and Theories of Contraction. Prog. Biophys. Biophys. Biochem., 1957; 7: 225-318.
- [7] Ingram G.D., Cameron I.T., Hangos K.M.: Classification and analysis of integrating frameworks in multiscale modelling, Chem Eng Sci, 2004, 59: 2171-2187
- [8] Laczkó J.: Végtagok mozgás szabályozásának modellezése, IME, 2005, 4: 42-46
- [9] Laczko J., Walton K., Llinas R.: A model for swimming motor control in rats reared from P14 to P30 in microgravity, 2003, Abstract Viewer. Washington, DC: Society for Neuroscience, Prog. No. 493.11
- [10] Laczko J., Walton K., Llinas R.: A Neuro-mechanical Model for the Motor Control of Walking in Rats, 2005, Abstract Viewer, Washington, DC: Society for Neuroscience, Online, Prog. No. 601.5
- [11] Saez-Rodriguez J., Kremling A., Gilles E.D.: Dissecting the Puzzle of Life: Modularization of Signal Transduction Network, Comput Chem Eng, 2005; 29:619-629
- [12] Zajac F.E.: Muscle and Tendon: Properties, Models, Scaling, and Application to Biomechanics and Motor Control, CRC Crit Rev Biomed Eng, 1989; 17: 359-411
- [13] van Soest A.J, Bobbert M.F.: The Contribution of Muscle Properties in the Control of Explosive Movements, Biol. Cybern, 1993; 69: 195-204

A SZERZŐK BEMUTATÁSA



Fazekas Csaba Mérnök-informatikus, Veszprémi Egyetem, 2002. 2002-2005-ben a Veszprémi Egyetem Információs Rendszerek Tanszékének volt a Ph.D.

hallgatója. Jelenleg a MTA-SZTAKI Rendszer- és Irányításméleti Kutató Laboratóriumának Folyamatszabályozási Kutatócsoportjában fiatal kutató. Kutatási területe: biomechanika és atomfizikai rendszerek modellezése, szabályozása.

Dr. Kozmann György bemutatását lapunk II. évfolyamának 9. számában olvashatják.



Dr. Hangos Katalin Az MTA doktora. Okleveles vegyész oklevelet 1976-ban, okleveles programozói oklevelet 1980-ban szerzett az ELTE Természettudományi Karán. Ezt követően az MTA SZTAKI kutatója lett. Kezdetben vegyipari rendszerek dinamikus modellezésével foglalkozott, egyetemi doktori és kandidátusi értekezését is ebből a témából írta. Az MTA SZTAKI-ban a Folytonos Folyamatok Irányítása Osztály, majd a Rendszer- és Irányításméleti Kutató Laboratórium munkatársaként tudományos érdeklődése fokozatosan a folyamatirányítás, az intelligens irányítórendszerek, valamint a folyamatrendszerek dinamikus

modellezése és az ezen alapuló irányítási és diagnosztikai módszerek felé fordult. 1989-90-ben egy évet töltött vendégprofesszorként a Dán Műszaki Egyetem Kémiai Technológiai Tanszékén, majd 1997-ben fél évet az ausztrál University of Queensland Kémia Technológiai tanszékén szintén vendégprofesszorként, ahol jelenleg is évente egy hónapot dolgozik közös kutatásokon. A felsőoktatásba 1996-ban kapcsolódott be intenzíven a Veszprémi Egyetemen. A műszaki informatika szakon a rendszer- és irányításmélettel kapcsolatos kötelező és választható tárgyak kidolgozója és tárgyfelelős oktatója egyetemi tanárként. A Veszprémi Egyetem Informatika Tudományok Doktori Iskola tanácsának tagja, több végzett PhD doktor és doktorandusz hallgató témavezetője.