

Daria Ćurko
Vladimir Medved

OPENSIM™: INŽENJERSKI PRISTUP BIOMEHANIČKOJ ANALIZI GIBANJA LJUDI I ŽIVOTINJA

1. UVOD

U području kineziološke biomehanike gibanje se proučava kroz kinematiku, ne razmatrajući uzroke gibanja, odnosno kroz kinetiku, mjerenjem sila i momenata koji nastaju kao reakcija podloge. Kinematičkim pristupom dobivaju se, među ostalim, trajektorije gibanja te se tako mogu izračunati neki traženi parametri, kao što su duljine, brzine i ubrzanja pojedinih dijelova tijela, kutovi među njima i dr. (*SmartAnalyzer Handbook*, 2009). Mjerni uređaji koji se pritom koriste su visokobrzinske infracrvene kamere koje snimaju gibanje pripadajućih pasivnih oznaka (markera) odgovarajuće pozicioniranih na tijelu. Za potrebe kinetike rabe se platforme koje mjere silu reakcije podloge i moment koji nastaju prilikom oslanjanja. Ponekad se dodatno rabi elektromiografski uređaj za praćenje aktivnosti skeletne muskulature. Koristeći ove mjerne uređaje provode se biomehaničke analize gibanja. Ono što ostaje kao bitna nepoznanica sile su i momenti koji se javljaju unutar samih mišića i zglobova mišićno-koštanog sustava i koji su nemjerljivi. Ovdje je uobičajen inverzni dinamički pristup, kojim se resultantne sile i momenti u zglobovima mogu matematički procijeniti (Medved, 2006, Medved, 2011, 2014; Medved i Kasović, 2007).

Osim nemogućnosti mjerenja unutrašnjih sila u mišićima i zglobovima, spomenute eksperimentalne metode imaju još jednu veliku manu: ne mogu objasniti uzročno-posljedične veze kompleksnih dinamičkih sustava, kao što je ljudsko tijelo. Određivanje utjecaja pojedinog mišića na promatrano gibanje komplicirano je iz razloga što jedan mišić može djelovati na zglobove koje ne obuhvaća i segmente tijela na koje nije vezan (Delp i sur., 2007).

Kako bi se došlo do dubljih spoznaja o gibanju, unutrašnjim silama i momentima, motoričkoj kontroli te samim funkcijama mišića, razvijen je novi pristup istraživanju lokomocije živih bića koji nadopunjuje postojeće. Pristup koristi računalno modeliranje i simulaciju te na taj način omogućuje testiranje hipoteza i predviđanje funkcijskih ishoda gibanja, poglavito u području rehabilitacijske medicine i prevencije od ozljeda. S obzirom na svoju široku primjenjivost, ovakve metode nalaze svoju važnost u područjima poput ortopedije, robotike, ergonomije, sporta i sportskih performansi

te dizajnu medicinskih konstrukcija, a u praksi se mogu rabiti kao alat za otkrivanje uzroka abnormalnosti gibanja i za pronalazak najboljeg pristupa liječenju tih abnormalnosti (Tao i sur., 2012).

2. O MATEMATIČKIM MODELIMA MIŠIĆNO-KOŠTANOG SUSTAVA

Osnove biomehaničkog modeliranja mišićno-koštanog sustava postavio je Giovanni Alfonso Borelli još u 17. stoljeću. Proučavajući statiku i dinamiku životinja, njihove je kretnje opisivao rabeći mehanički pristup te tako stvorio prve konceptualne modele. Moderni pak razvoj virtualnih matematičkih modela mišića, tj. mišićno-koštanog sustava, započeo je u sedamdesetim godinama prošloga stoljeća paralelno s razvojem računala. Nelinearne dinamičke jednadžbe tipične za opisivanje gibanja mišićno-koštanog sustava mogle su se riješavati računalnim putem. Od prvih dinamičkih računalnih simulacija iz 1976. godine do danas odgovarajući modeli su uvelike napredovali kako bi se problemi prvenstveno ljudske, ali i životinjske lokomocije riješavali na puno točniji, lakši i brži način (Tablica 1).

Tablica 1. Prikaz evolucije modela za dinamičku simulaciju hoda (SSG-broj stupnjeva slobode gibanja) (Seth i sur., 2009)

Istraživači	SSG	Broj sila u modelu	Vrijeme obrade podataka (s)
Chow i Jacobson (1976)	5	5	nepoznato
Davy i Audu (1987)	3	9	nepoznato
Yamaguchi i Zajac (1990)	8	10	nepoznato
Anderson i Pandy (2001)	23	64	8,000,000
Thelen i Anderson (2006)	21	92	1,800

Ukazujemo na model koji se rabi u računalnim simulacijama i numeričkim analizama ljudskog hoda koji sadrži 92 mišića te ima 21 stupanj slobode gibanja (Thelen i Anderson, 2006).

3. RAČUNALNI PROGRAM OPENSIM™

OpenSim™ je slobodno dostupna računalna programska platforma za razvoj modela mišića, simulaciju i analiziranje funkcije živčano-mišićno-koštanog sustava ljudi i životinja baziran na programskim jezicima C++ i Java. Razvili su ga Scott Delp i suradnici na Sveučilištu Stanford 2006. godine te je 2007. godine ušao u komercijalnu uporabu. Ovaj se program konstantno gradi, održava i nadopunjuje od

strane sve većeg broja korisnika. Baziran je na *plug-in* arhitekturi koja korisnicima omogućava da prošire funkcionalnost programa razvijajući vlastite modele mišića i provode njihove analize, ali također razvijajući i izgled samog grafičkog sučelja. Putem interneta su dostupni razni alati za analiziranje mišićno-koštanih modela, generiranje simulacija i vizualizaciju rezultata. Svi dostupni alati razvijeni su za pojedine konkretne mišićno-koštane podsustave, ali zbog njihove općenite primjenjivosti mogu se koristiti s bilo kojim OpenSim™ modelom (Delp i sur., 2007).

OpenSim™ modeli sastoje se od nekoliko elemenata: kostiju (kruta tijela), zglobova (mobilizatori, ograničenja i sile), kontaktnih elemenata (kruta ograničenja i sukladne sile), ligamenata i mišića (sile) (Seth i sur., 2011). Svi dinamički mišićno-koštani modeli moraju se skalirati kako bi odgovarali antropomjerama promatranog subjekta. Nakon što se određeni mišićno-koštani model skalira, treba naći obrazac mišićne ekscitacije koji simulira određeni pokret. Najpoznatiji alat za simulaciju dinamičkog gibanja je SimTrack™ (Pauwels i sur., 2015). Ovakve simulacije se evaluiraju pomoću podataka dobivenih eksperimentalnim metodama, odnosno, trajektorije virtualne simulacije uspoređuju se s pravim gibanjima subjekta. Kada se potvrdi točnost simulacije, ona se analizira kako bi se istražilo koliko pojedini mišić doprinosi nekom pokretu. Također se mogu provoditi simulacije određenih planiranih medicinskih tretmana (tipično kirurških zahvata), na temelju čega se mogu predvidjeti posljedice istih.

Analiza se provodi matematičkim izračunom: inverznom kinematikom i inverznom dinamikom (Dunne i sur., 2014).

4. PROJEKTI VEZANI UZ OPENSIM™

Simtk.org je organiziran repozitorij podijeljen u projekte vezane uz biomedicinu temeljenu na fizikalnim zakonima. Projekt predstavlja istraživački pothvat, programski paket ili zbirku dokumenata i publikacija. Baza podataka simtk.org je 08.04.2016. godine sadržavala 557 projekata, od kojih je 317 imalo javno dostupnu dokumentaciju. Broj projekata izravno vezanih uz programsku platformu OpenSim™, odnosno broj istraživanja vezanih uz koštano-mišićni sustav, iznosio je 209, od čega je 117 bilo javno dostupno (Slika 1). Projekti su dalje razvrstani prema područjima primjene: rehabilitacija, ortopedija, robotika, ergonomija, performanse i inženjerski dizajn.



Slika 1. Osnovna podjela projekata u repozitoriju prema podacima sa www.simtk.org

Cilj je projekta pod nazivom *Umbrella Project Overview* osigurati zainteresiranima rad u OpenSim-u™, pristup nizu modela mišićno-koštanog sustava, uključujući modele cijelog tijela, gornje i donje ekstremitete, lumbalnu i vratnu kralježnicu i dr.

Rehabilitacija: Širok je raspon poremećaja mišićno-koštanog sustava, uključujući cerebralnu paralizu, osteoartritis, moždani udar, ozljede leđne moždine i Parkinsonovu bolest koji mogu ograničiti mobilnost. Računalno modeliranje i simulacije omogućuju istraživačima i kliničarima da otkriju mehanizme koji su temelj poremećaja kretanja te da konstruiraju učinkovite terapije, kao što su treninzi za jačanje mišića ili ponovno učenje hoda (<http://opensim.stanford.edu>).

Ortopedija: Kirurzi često operiraju na kostima i mišićima u tijelu čovjeka. Oni vrše operacije tetivnog transfera kako bi dali mišićima nove funkcije, produljuju mišiće, poravnavaju kosti ili zamjenjuju cijele zglobove umjetnim implantatima. Računalne simulacije pomažu odgovoriti na pitanja kao što su: kako se mišićne duljine mijenjaju nakon tretmana i kako bi operacija mogla promijeniti sile koje se pojavljuju u zglobu koljena (<http://opensim.stanford.edu>).

Robotika: Osim ljudskog i životinjskog gibanja, OpenSim™ omogućava istraživačima modeliranje robotskih sustava. Istraživači diljem svijeta razvijaju humanoidne robote koji se mogu prototipizirati i čije se gibanje može simulirati koristeći alate ovog računalnog programa. Nadalje, inženjeri konstruiraju robotske sustave kako bi pomogli ljudsku lokomociju. Ovakva interakcija između čovjeka i robota također se može simulirati (<http://opensim.stanford.edu>).

Ergonomija: U svakodnevnim radnjama, čovjek se nalazi u interakciji s okolinom. Neki primjeri uključuju vožnju automobilom, dugotrajno sjedenje pred računalom ili u školskoj klupi, nošenje teške školske torbe na leđima ili vrećica iz dućana itd. Računalno modeliranje i simulacije ovdje donose poboljšanja u dizajnu radnih mjesta, opreme i automobila kako bi se ostvarile sigurne i produktivne interakcije čovjeka s okolinom (<http://opensim.stanford.edu>).

Performanse: Mnoga kretanja u sportu, ako se nepravilno izvode, mogu dovesti do ozljede sportaša. Za vrijeme gibanja u sportu, sportaš treba postići optimalnu performansu bez da se ozlijedi. Simulacije mogu pojasniti način na koji mišići stvaraju i usklađuju pokrete prilikom skokova, sprinta, udaranja lopte nogom, vožnje bicikla i sl. Ove su informacije bitne za identifikaciju obrazaca koji maksimiziraju performansu ili, s druge strane, dovode do istegnuća mišića ili preopterećenja u zglobovima (<http://opensim.stanford.edu>).

Inženjerski dizajn: Protetika, ortotika, invalidska kolica, implantati i preostali uređaji potrebni su mnogim pojedincima kako bi mogli obavljati svakodnevne poslove koji se na prvi tren mogu učiniti banalnim. Motorička kontrola gibanja je kompleksna. Računalne simulacije omogućavaju istraživačima, kliničarima i inženjerima da razumiju međudjelovanje ovih uređaja i implantanata s mišićno-koštanim sustavom. Pomoću računalnih simulacija konstruktori mogu pokušati optimizirati funkciju medicinskih uređaja na koje se ljudi oslanjaju za sigurno i bezbolno gibanje (<http://opensim.stanford.edu>).

5. ZAKLJUČAK

OpenSim™ omogućava istraživačima diljem svijeta da ustanove kvantitativne uzročno-posljedične veze, mišićne sile, vanjske reakcijske sile i kretanje tijela koje se promatra u laboratoriju. Zajedno s eksperimentalnim mjerenjima, simulacije pojašnjavaju interakciju elemenata mišićno-koštanog sustava da bi se proizveo pokret te na taj način uvelike pomažu rehabilitaciju pojedinaca s patološkom lokomocijom. Unatoč tome što danas postoji velik broj javno dostupnih modela za simulacije (simtk.org), potrebno je sve više *in vivo* mjerenja mišićno-koštane geometrije i kinematike kako bi se pojasnilo načine na koji veličina, dob, deformitet ili pretpostavljeni kirurški zahvat utječu na predviđanja modela i da se utvrde uvjeti pod kojima se simulacija bazirana na generičkom modelu može primijeniti na određenu osobu.

6. LITERATURA

1. Delp, S.L., Anderson, F.C., Arnold, A.S., Loan, P., Habib, A., John, C.T. i sur. (2007). OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 54, 1940-1950.
2. Dunne, J. i sur. (10. veljače 2014). Tutorial 3 - Scaling, Inverse Kinematics, and Inverse Dynamics - OpenSim Documentation. Preuzeto osmog travnja 2016., sa <http://simtk-confluence.stanford.edu:8080/x/zw9O/>
3. Medved, V. (2006). Biomedicinsko inženjerstvo. U: P. Barišić (gl. ur.), *Prvi kongres hrvatskih znanstvenika iz domovine i inozemstva, Zagreb – Vukovar, 15. – 19. studenoga 2004* (str. 282-286). Zagreb: Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

4. Medved, V. (2011). Električna svojstva mišića; elektromiografija u biomehanici i Kinematika i kineziologija lokomocije (str. 463-496). U: V. Nikolić, M. Hudec i sur. (ur.), *Principi biomehanike*. Zagreb: Naklada Ljevak.
5. Medved, V. (2014). Biomehanička analiza hoda. U: M. Jelušić, I. Malčić i sur. (ur.), *Pedijatrijska reumatologija* (str. 133-137). Zagreb: Medicinska naklada.
6. Medved, V., Kasović, M. (2007). Biomehanička analiza ljudskog kretanja u funkciji sportske traumatologije, *Hrvatski športskomedicinski vjesnik*, 22(1): 40-47. (Ispravka Slike 3. objavljena u: *Hrvatski športskomedicinski vjesnik*, 24(1): 59, 2009).
7. National NIH Center for Simulation in Rehabilitation Research (n.d.). Preuzeto sa: <http://opensim.stanford.edu/> i <http://www.simtk.org/>
8. Pauwels, K., Kragic, D. (2015). SimTrack: A Simulation-based Framework for Scalable Real-time Object Pose Detection and Tracking. U: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (str. 1300-1307); 28. rujna – 02. listopada 2015; Hamburg, Germany. IEEE, 2015.
9. Seth, A., Reinbolt, J.A., Delp, S.L. (2009). Musculoskeletal Modeling: How It Began, What It Offers, and Where It Is Heading. U: P. Mills (gl. ur.), *Proceedings of the 7th Australian Biomechanics Conference* (14-15). Gold Coast (Australia): School of Physiotherapy and Exercise Science, Griffith University.
10. Seth, A., Sherman, M., Reinbolt, J.A., Delp, S.L. (2011). OpenSim: a Musculoskeletal Modeling and Simulation Framework for In Silico Investigations and Exchange. *Procedia IUTAM*, 2, 212-232
11. SmartAnalyzer Handbook. (20. veljače 2009). Milano (Italy): BTS Bioengineering.
12. Tao, W., Liu, T., Zheng, R., Feng, H. (2012). Gait Analysis Using Wearable Sensors. *Sensors*, 12(2), 2255-2283
13. Thelen, D.G., Anderson, F.C. (2006). Using Computed Muscle Control to Generate Forward Dynamic Simulations of Human Walking From Experimental Data. *Journal of Biomechanics*, 39, 1107-1115