



BIOMEHANIČKA ANALIZA LJUDSKOG KRETANJA U FUNKCIJI SPORTSKE TRAUMATOLOGIJE

Autor: Slobodan Milošević¹

Mentori: Profesor dr Milorad Mitković², Doc. dr Ivana Mladenović-Ćirić²

¹Univerzitet u Nišu Fakultet sporta i fizičkog vaspitanja u Nišu,

²Univerzitet u Nišu Medicinski fakultet u Nišu.

SAŽETAK

Moderni pristup dijagnostici ljudskog kretanja, za potrebe medicinskih, kao i raznih sportskih primena, bazira se na laboratorijskim biomehničkim merenjima i analizama. Eksperimentalni podaci obuhvataju prostorne kinematičke veličine, silu reakcije podloge i višekanalnu površinsku elektromiografiju (EMG). Inverznim dinamičkim pristupom ostvaruje se matematička procena unutrašnjih sila i momenata sila u zamišljenim središtima zglobova. Prikazan je postupak u okviru savremeno opremljene laboratorije, gde se mogu meriti i biomehnički analizirati različite strukture kretanja. Postupak je ilustrovan primerom iz sportske traumatologije. U prvom redu, namera je bila proceniti funkciju kolenog zgloba u cilju poboljšane dijagnostike i lečenja. Tu kombinujemo merenja hoda sa specifično dizajniranim testovima.

Opisani pristup (uz nedostatak još nekih metoda, kao što su, u prvom redu, merenje potrošnje kiseonika) predstavlja "state - of - the - art" metodologiju analize ljudskog kretanja za čije je efikasno korišćenje bitna interdisciplinarna saradnja lekara specijalista sa biomehaničarima, kineziolozima i tehničkim stručnjacima.

Ključne reči: biomehanika, analiza hoda, sportska traumatologija, koleno zglob

UVOD

Poslednjih decenija svedoci smo značajnog prodora biomehaničkih metoda merenja i analize ljudskog kretanja u medicinsku kliničku praksu. Iako su teorijske osnove, kao i praktična realizacija odgovarajućih postupaka, već duže vremena deo tradicije primenjene biomehanike lokomocija, ipak, tek je u poslednje vreme, zahvaljujući, pre svega, brzom razvoju elektronske merne tehnike i primenjenog računarstva, zabeležena široka primena dotične metodologije u kliničkoj sredini, najčešće kroz analizu hoda (1, 5, 6, 19). Moderne klinike i instituti u svetu mesta su akumulacije brojnih novih iskustava na tom polju, što doprinosi područjima ortopedije, neurologije, traumatologije, rehabilitacione medicine, sportske medicine, pa i u okviru sportske traumatologije.

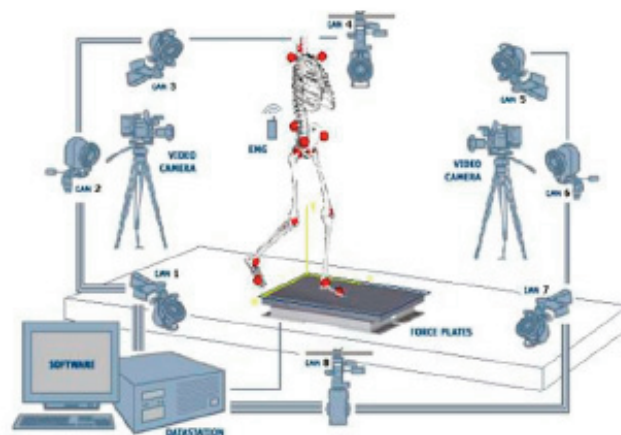
MATERIJAL I METODE

Biomehaničke analize ljudskog kretanja

U periodu nakon Drugog svetskog rata u SAD je delovao tzv. "The Berkeley Group" s osnovnim ciljem protetičkog zbrinjavanja brojnih ratnih povreda, te se tada počelo sa merenjem ljudskog hoda. Akademik SANU Miodir Vukobratović je na institutu Mihailo Pupin prvi u svetu na naučnoj osnovi izmerio ljudski hod. Kasnije je razvoj područja rezultirao standardizacijom metodologije bazirane na merenju kinematičkih, kinetičkih i elektromiografskih (EMG) veličina, kao ulaznih podataka kojima se praćena lokomocija kvantitativno karakteriše. Kombinovanjem tako izmerenih veličina sa onima koji proizilaze iz inercijalnog svojstva telesnih segmenata i tela u celini moguće je matematički proceniti unutrašnje sile i momente sila koje deluju u zamišljenim središtima zglobova takvog sistema. To je tzv. inverzni dinamički pristup, teorijski zasnovan na Njutnovim zakonima.

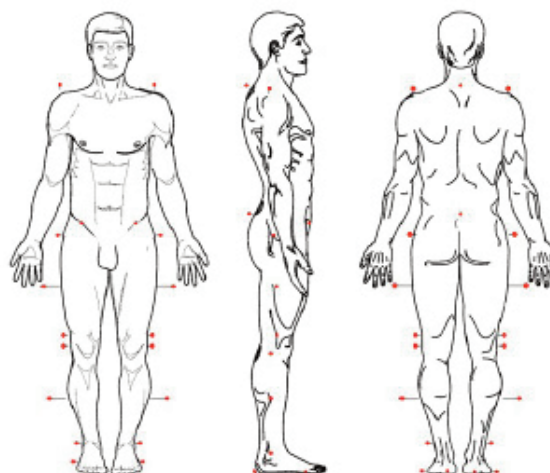
Kao izlazne veličine ovakvih sistema dobijaju se krive u funkciji vremena pojedinih varijabli kao što su: uglovi u pojedinim zglobovima (u tri dimenzije), momenti u pojedinim zglobovima, sila i moment sile reakcije podloge, koordinate centra pritiska tokom oslanjanja o podlogu i više kanalni površinski EMG signali. Vremenska osa na dotičnim krivama, kao što je uobičajno, prikazana je u procentima ukupnog ciklusa hoda. Potpun prikaz je upotpunjen i mogućnošću 3D animacije kretanja ispitanikovog tela prikazanog na ekranu računara u vidu štapićastog dijagrama (na osnovu izmerenih podataka), kao i video zapisom. Ova metodologija je ostvarena upotrebom sistema ELITE, koji uključuje 8 kamera i osmokanalnu telemetrijsku površinsku elektromiografiju spojenu na računar. Sistem italijanske proizvodnje, firme Bioengineering Technology & Systems (BTS) iz Milana, pogodan je za te potrebe.

Prostorni pomaci ljudskog tela automatski se registruju brzinom 100 puta u sekundi, uz prostornu tačnost merenja reda veličine nekoliko mm. Radni prostor iznosi 6k 2k 2m, a to je za potrebe lokomotorne aktivnosti kao što je hod sasvim dovoljno (7,17). Dodatno se koriste i platforma za merenje sile reakcije podloge (Slika 1).



Slika 1. Šematski prikaz mernog sistema 1

Pri merenju ljudskog kretanja tipično se koristi tzv. Davisov protokol, posebno razvijen za potrebe analize hoda, koji podrazumeva standardizovani način prikupljanja kinematičkih podataka, prilagođen kliničkoj medicinskoj upotrebi (4, 9). Ispitanika treba obeležiti malim belim reflektujućim oznakama sferičnog oblika na predviđenim mestima na površini tela (Slika 2).



Slika 2. Prikaz položaja telesnih oznaka pri Davisom protokolu (7, 9)

Uzima se 11 antropometrijskih mera ispitanikovog tela. Te su mere potrebne da bi se na osnovu izmerenih prostornih položaja praćenih oznaka mogli utvrditi prostorni položaji zamišljenih centra zglobova, kao i da bi se mogao provesti inverzni dinamički postupak. Takođe, na površini tela iznad muskulature koju želimo meriti treba pozicionirati površinske EMG elektrode, što se takođe radi prema odgovarajućem međunarodno prihvaćenom protokolu (8). Postupak pripreme ispitanika za merenje traje oko 30 minuta.

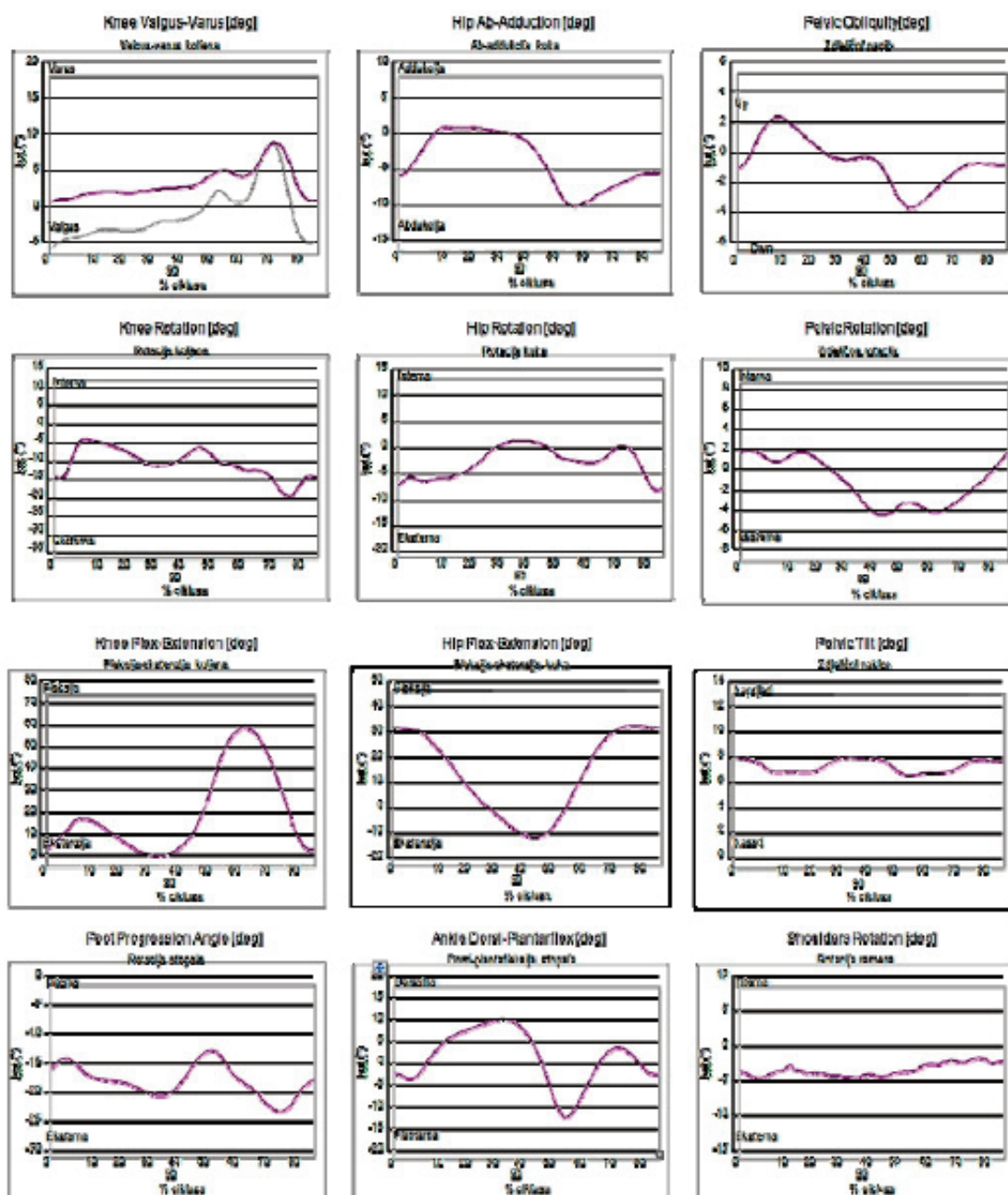
Nakon toga, pristupa se izvođenju odabranih kretnih struktura (hoda, skokova i sl.) uz sprovođenje merenja. Uzmemo li primer hoda, ispitanici treba da izvode pokušaje hoda spontanom brzinom uz registraciju sile reakcije podloge prilikom oslanjanja.

REZULTATI ISTRAŽIVANJA

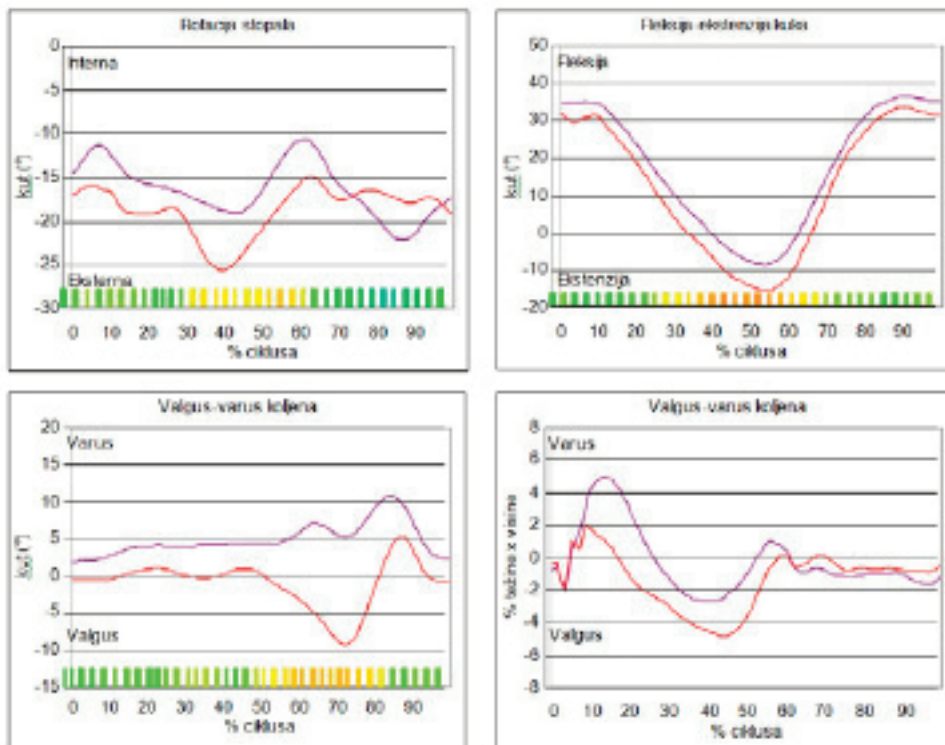
Eksperimentalni rezultati

Sportske aktivnosti su karakterisane specifičnom traumatologijom, na primer kolena. Povrede kolnog zgloba čine 25-30% svih povreda u sportu, a oko 75% svih povreda kolnog zgloba odnosi se na fudbal i skijanje (11). Kod fudbalera, na primer, kolni zglob trpi najčešće povrede jer je koleno dodatno opterećeno načinom izrade sportske cipele. S druge strane, prisutni su i nagli, snažni pokreti u igri, uz promenu pravca kretanja, kao i kontakt sa drugim igračima.

Čuvaju se samo zapisi ostvareni neinvazivnim merenjem, a obično se ponavljaju najmanje tri uspešna pokušaja za svaku oslonisku nogu. Izmerene veličine računarski se obrađuju, te se sprovodi inverzni dinamički postupak, za što je operaterima potrebno oko 90 min. Izmerene kinematičke veličine, procenjene kinetičke veličine i izmerena sila reakcije podloge mogu se prikazati u vidu krivulja u funkciji vremena. Površinski EMG signali upotpunjuju celovitu meru hoda. Celi je postupak u velikoj meri automatizovan zahvaljujući u prvom redu automatskom prepoznavanju sukcesivnih prostornih položaja praćenih telesnih oznaka, što se ostvaruje ostvaruje primenom jedne metode prepoznavanja oblika, implementirane kao deo programske podrške sistema ELITE.



Slika 3. Primer kinematičkog mernog zapisa zdravog hoda, muški ispitanik. Puna tanka krivulja prikazuje uglove u zglobovima kuka, kolena i gležnja, prosečnu vrednost za levu i desnu stranu. Puna debela krivulja prikazuje prosečnu vrednost merenog uzorka ispitanika. Isprekidana krivulja označava opseg od jedne standardne devijacije oko prosečne vrednosti. Krivulja rotacije ramena nije prikazana.



Slika 4. Dopuna kinematičkih krivulja Manal-Stanhopeovim prikazom u boji. Ljubičasto je označena prosečna krivulja dobijena merenjem na uzorku, a crveno je izmerena vrednost za jednog ispitanika.



Slika 5. Ispitanik opremljen oznakama za kinematičko merenje, elektrodama i ostalom opremom za telemetrijsko površinsko EMG merenje, spreman za izvođenje testa saskok na mernu platformu.

Kod borilačkih sportova, pogotovo onih u kojima dominiraju nožne tehnike (tae-kvon-do), rotacione sile, takođe, najviše pogađaju koleno. Tome treba pridodati direktne udarce u koleno, veliku snagu i brzinu izvođenja rizičnih pokreta i

skokova. Kod skijaša, međutim, tri su osnovne sile koje izazivaju povrede: spoljna rotacija i abdukcija, pad unapred i unutrašnja rotacija. To je motivacija za pokušaj biomehaničke procene stanja i dijagnostike kolennog zgloba kakva bi bila primenjiva u lečenju, rehabilitaciji, pa i tokom procesa povratka sportista u trening (10).

Osvrnucemo se na primer biomehaničke analize ostvarene u sklopu metode kompleksnog biomehaničkog testiranja kolennog zgloba. Složeni merni protokol obuhvata: stajanje u mestu, hod prirodnom brzinom, vertikalne skokove u mestu i saskok s visine. Merenje hoda prirodnom brzinom standardni je postupak evaluacije lokomocija pojedinog ispitanika. Slika 3 prikazuje kinematičke veličine dobijene merenjem u toku normalnog hoda. Kompanija BTS poseduje i svoje normative za odraslu i dečju populaciju koji su, međutim, korisniku dostupni jedino u grafičkom obliku prilikom iscertavanja mernih krivulja.

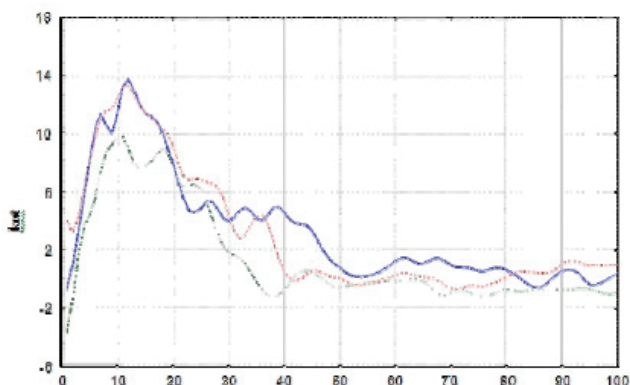
Mereni prikazi se mogu dodatno dopuniti prikazom u boji po Manal i Stanhopeu, slika 4. Na taj se način korisniku, u ovom slučaju lekaru, posredno bolje ukazuje na ona mesta u mernim (odnosno procenjenim, ako se radi o kinetičkim veličinama) krivama gde su najveća odstupanja od normale i gde, hipotetski, treba tražiti uzroke patologije.

Kompletni merni nalaz hoda sadrži vrlo veliki broj podataka, numeričkih i u vidu krivulja, kinematičkih, kinetičkih i elektromiografskih varijabli. To je svakako pogodno u naučnoistraživačkim primenama i za kliničku upotrebu.

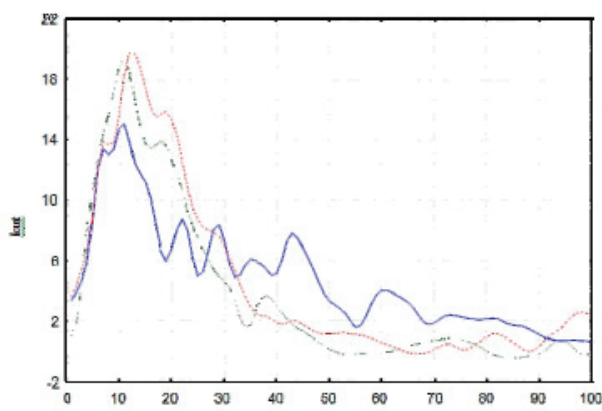
Na slici 5 prikazan je saskok test s visine od 40 cm., a na slici

6. prikazuje primer kinematičkih rezultata izraženih uglom valgus varus u kolenoj zgloboj pri izvođenju doskoka levom nogom u odmornom stanju, a slika 7 nakon umaranja.

Korelacijska analiza kao metoda može ukazati da li je ispitanik usled pojave umora u mogućnosti da izvede pravilnu dinamičku stabilizaciju kolenoj zgloboj i kolika je njegova ponovljivost kod pravilnog doskoka. U slučaju da mišićnina ne može na vreme stabilizovati kolenoj zgloboj, očekuje se vremensko kašnjenje akcije stabilizacije i povećane amplitude pokreta kao direktne posledice, a u najgorem slučaju i narušavanje cele dinamičke ravnoteže.

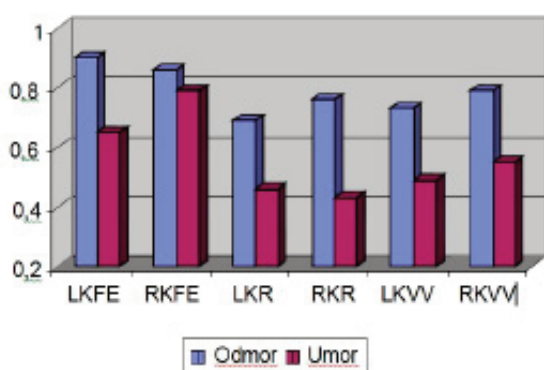


Slika 6. Ugao valgus varus u kolenoj zgloboj pri doskoku levom nogom pre umaranja: tri pokušaja (10)



Slika 7. Ugao valgus varus u kolenoj zgloboj pri doskoku levom nogom nakon umaranja: tri pokušaja

Grafikon 1. Srednje vrednosti korelacije eksperimentalne grupe



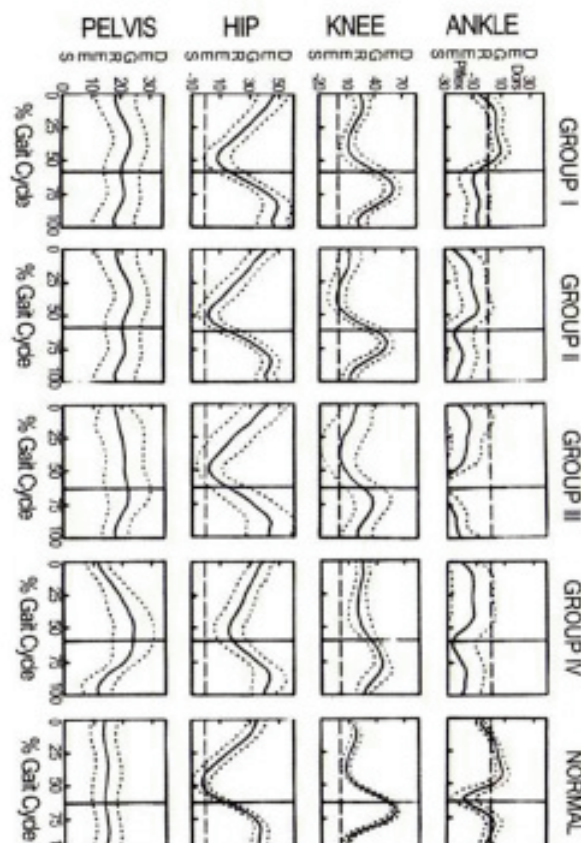
DISKUSIJA

Kliničko-dijagnostička interpretacija rezultata

U domenu interpretacije nalaza merenja hoda, mereni rezultati mogu pružiti nove informacije o dinamičkoj funkciji lokomotornog sistema ispitanika. Brand je svojevremeno utvrdio da bi biomehanički klinički test trebalo da ispunjava sledeće kriterijume:

- utvrđivanje dijagnoze između raznih mogućnosti (Diferencijalna dijagnostika)
- procena stepena bolesti ili povrede,
- izbor između mogućnosti lečenja i
- predviđanje prognoze.

Baker je unekoliko modifikovao navedene poslednje dve teze, no, u suštini, one i danas stoje. U Stout i saradnicima, doduše na drugoj patologiji - hemiplegiji, pokazuje se mogućnost diferencijalne dijagnostike u 4 podtipa, pomoću kinematičkih mera u sagitalnoj ravni (Slika 8). Na osnovu takve diferencijalne dijagnostike omogućen je, posledično, razvoj specifičnih postupaka lečenja.



Slika 8. Kinematika u sagitalnoj ravni četiri podtipa hemiplegije. Puna linija na svakom grafikonu predstavlja srednju vrednost svake grupe, dok isprekidana linija predstavlja jednu standardnu devijaciju. Grafik sa desne strane prikazuje normalne vrednosti kinematike u sagitalnoj ravni skočnog zgloboj, kolenoj zgloboj, kuka i karlice. Opis podtipova hemiplegije omogućava razvijanje specifičnih protokola lečenja.

ZAKLJUČAK

U ovome području razvijaju se različiti eksperimentalni sistemi. Jedno od težišta budućeg razvoja područja je, svakako, primena vernijih biomehaničkih modela ljudskog tela u kliničke svrhe, kao što je, pre svega, pogodan poznati Delpov model, koji se danas primenjuje i klinički evaluira u oko 300 centara u svetu.

Taj model omogućava računarske simulacije promena individualnog stanja neuro-muskularno-skeletnog sistema pojedinca i time naučno utemeljeni uvid u njegovo kliničko stanje pod uticajem određene intervencije (operativnog zahvata, medicinske rehabilitacije, farmakološkog lečenja). Radi se, dakle, o kvalitativno sasvim novom pristupu, gde se verno biomehanička modeliranja direktno rade u kliničke svrhe.

U kontekstu sportske traumatologije ovakva i slična biomehanička testiranja mogu doprineti bitno potpunijem utvrđivanju stanja lokomotornog sistema. Pored klasičnih postupaka, kao što su opservacijske analize, testiranje opsega pokretljivosti zglobova goniometrima i srodnim uređajima, radiološko snimanje, palpacija muskulature, celokupni se pristup obogaćuje novom dijagnostičkom metodologijom pomoću koje se lokomotorna funkcija može egzaktno dinamički.

Razvojem merne tehnike obrade signala, uz u velikoj meri automatizaciju postupaka, navedenu je metodologiju moguće je primenjivati u kliničke svrhe. Tako dobijeni nalazi doprinose objektivizaciji utvrđivanja stanja bolesnika, što je primenjivo u svim fazama procesa lečenja.

LITERATURA

- [1] Baker R. Gait analysis methods in rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 2006; 3:4.
- [2] Brand R. Can biomechanics contribute to clinical orthopaedic assessments. *Iowa Orthop J* 1987; 9:61-4.
- [3] Brand R, Crowninshield R. Comment on criteria for patient evaluation tools. *J Biomech* 1981; 14:655.
- [4] Davis RB, Ounpuu S, Tyburski DJ, Gage JR. A gait analysis data collection and reduction technique. *Hum Mov Sci* 1991; 10:575-87.
- [5] Gage JR, ed. *The Treatment of Gait Problems in Cerebral Palsy*. Mac Keith Press. 2004.
- [6] Goldberg SR, Ounpuu S, Arnold AS, Gage JR, Delp LS. Kinematic and kinetic factors that correlate with improved knee flexion following treatment for stiff- knee gait. *J Biomech* 2006; 39:689-98.
- [7] Heimer Ž. Automatizirano kliničko mjerenje biomehanike i kineziologije hoda. Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva. 2005; 162. Magistarski rad.
- [8] Hermens H, Freriks B, Merletti R, Stegman D, Blok J, Rau G, Disselhorst-Klug C, Hagg G. *European recommendations for surface electromyography*. Roessingh Research and Development, Enschede, Netherlands, 1999.
- [9] Kadaba MP, Ramakrishnan HK, Wooten ME. Measurement of lower extremity kinematics during level walking. *J Orthop Res* 1990; 8:383-92.
- [10] Kasović M. Nova metoda biomehaničkog testiranja dinamičke stabilnosti koljenog zgloba. Zagreb: Kineziološki fakultet. 2004; 120. Magistarski rad.
- [11] Kasović M, Pribanić T, Medved V. Take-off and landing properties in top-level football players: a ground reaction force study. *Kinesiology* 2002; 34,2:182-91.
- [12] Manal K, Stanhope SJ. A novel method for displaying gait and clinical movement analysis data. *Gait & Posture* 2004; 20,2:222-6.
- [13] Medved V. *Measurement of Human Locomotion*. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [14] Rose J, Gamble JG (ur.). *Human Walking*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2006.
- [15] Simon RS. Quantification of human motion: gait analysis - benefits and limitations to its application to clinical problems. *J Biomech* 2004, 37; 1869-80.
- [16] Stout J, Gage JR, Van Heest AE. Hemiplegia: pathology and treatment. U: Gage JR, ed. *The Treatment of Gait Problems in Cerebral Palsy*, Mac Keith Press, 2004; 314-44

BIOMECHANICAL ANALYSIS OF HUMAN MOVEMENT

WORK SPORTS TRAUMATOLOGY

Slobodan Milošević

Modern approach to the diagnosis of human movement, for medical purposes, as well as various sports applications, based on laboratory measurements and biomechanical analysis. The experimental data include spatial kinematic size, ground reaction force and multichannel surface electromyograph (EMG). Inverse dynamic approach achieves the mathematical estimation of internal forces and moments of force in the imaginary joint centers.

Procedure is shown in the modern equipped laboratories, which can be measured and analyzed from various biomechanical movement. The procedure is illustrated in sports traumatology. In the first place, the purpose was to assess the function of the knee joint for improved diagnosis and treatment. Measurements that combine walking with specially designed tests.

This approach (along with the lack of some other method, such as, first of all, the measurement of oxygen consumption) is the "state - of - the - art" methodology for the analysis of human movement whose efficient use of interdisciplinary cooperation is essential to biomehaničarima specialists, kinesiologists and technical experts.

Key words: biomechanics, gait analysis, sports traumatology, stifles