

# Primena neuralnih mreža u prepoznavanju faza hoda pomoću akcelometara i senzora sile

Nikola Mijailović, Marijana Gavrilović, Stefan Rafajlović

(mentor dipl. inž. Milica Đurić-Jovičić, prof. dr Dejan B. Popović)

*Sadržaj* — U ovom radu prikazan je postupak određivanja faza hoda na osnovu signala dobijenih sa senzora sile i ubrzanja. Prepoznavanje faza vršeno je primenom neuralnih mreža. Izlazna promenljiva pri obučavanju je opis faza hoda. Analizirane su tri ulazne promenljive pri obučavanju: 1) signali sa 4 senzora sile postavljenih na stopalo, 2) signal sa jednog senzora ubrzanja, i 3) filtrirani signal sa senzora ubrzanja. Rezultati klasifikacije upoređeni su, i prosečne greške u kašnjenju prepoznatog u odnosu na ciljni signal su 30 ms (2.7%), 150 ms (13.6%), i 120 ms (11%) respektivno. Cilj ovog rada je razvoj praktičnog senzorskog sistema namenjenog rehabilitaciji hodanja.

**Ključne reči** — prepoznavanje faza hoda, neuralne mreže, senzori sile, akcelometri.

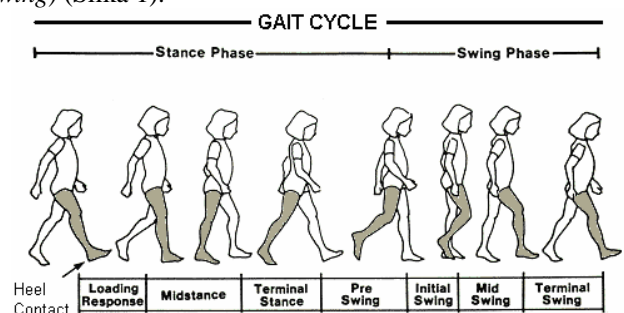
## I. UVOD

Analiza ljudskog hoda bitna je u dijagnostici različitih poremećaja koji nastaju kao posledica povreda senzorno-motorno-skeletnog sistema. Prepoznavanje faza hoda od posebnog je interesa jer je neophodna kako za procenu kvaliteta hoda, tako i za upravljanje asistivnim sistemima u rehabilitaciji. Rezultati dobijeni proučavanjem ljudskog hoda našli su svoju primenu u korekciji padajućeg stopala, terapiji lečenja Parkinsonove bolesti, rekonstrukciji hoda kod ljudi sa povredama kičme ili hemiplegičara, itd. Jedan od ključnih problema je prepoznavanje faza hoda praktičnim sistemom koji ne zahteva posebnu kalibraciju, jednostavno se postavlja na ispitanika i robusan je.

Ciklus hoda (*Gait Cycle*) definiše se kao period koji počinje inicijalnim kontaktom stopala sa podlogom i traje do trenutka kada se kontakt ponovi istim stopalom. Ciklus hoda delimo na dve faze: oslonac (*Stance*) i zamah (*Swing*). Faza oslonca počinje kontaktom petom (*Heel Contact*) i nastavlja se kroz podfaze odgovor na opterećenje (*Loading Responce*), ravno stopalo (*Mid Stance*), kraj faze oslonca (*Terminal Stance*) i faza odraza (*Preswing*).

Nikola Mijailović, Marijana Gavrilović, Stefan Rafajlović, studenti diplomskih akademskih studija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu; e-mail [yonim12@yahoo.com](mailto:yonim12@yahoo.com), [marijana.gavrilovic@yahoo.com](mailto:marijana.gavrilovic@yahoo.com), [srafajlovic@yahoo.com](mailto:srafajlovic@yahoo.com)

Odvajanjem prstiju od podloge počinje faza zamaha koja uključuje podfaze inicijalni zamah (*Initial Swing*), kraj faze savijanja (*Midswing*) i kraj zamaha (*Terminal Swing*) (Slika 1).



Slika 1. Faze hoda

Danas postoji veliki broj sistema za analizu hoda, koji se razlikuju po vrsti senzora, ceni, mogućnosti primene, jednostavnosti rukovanja, robusnosti. Često se koriste optički sistemi zasnovani na upotrebi kamera i markera [1]. Infra-crvene kamere snimaju položaje markera postavljenih na telo subjekta i na osnovu njih kasnije je moguće rekonstruisati kretanje ili odrediti željene parametre npr. faze hoda, uglove, brzinu hoda, dužinu koraka, ubrzanje stopala i drugih segmenata.

Drugi način je korišćenje različitih sistema koji koriste goniometre, magnetne senzore, akcelometre, žiroskope i senzore sile. Razlozi zbog kojih se teži upotrebi ovih sistema jesu njihova niska cena, kao i mogućnost da se sa njima vrše klinička merenja. Postoje različite realizacije sa navedenim elementima. Jedna od njih je i sistem koji je integrisan u cipeli [2], [3] kojim se obezbeđuje pouzdana informacija o tačnom trenutku kontakta petom i odvajanja stopala od podloge. Podaci koji su dobijani sa multisenzorske aparature koja je sadržala i žiroskope [4], [5], korišćeni su za automatsko trigerovanje peronealnog nerva kod SCI osoba (pacijenti sa povredama kičme). Snimanje karakteristika hoda kod PD pacijenata (osobe koje boluju od Parkinsonove bolesti) vršeno je pomoću troosnih akcelometara [6]. Merena su ubrzanja oba skočna zgloba pri hodu, a kao referenca korišćen je video sistem. Postoje primeri eksperimenata gde su senzori ubrzanja u potpunosti zamenili senzore sile sa pete i pokazali se kao podjednako uspešni u detekciji faze zamaha [7] što je iskorišćeno za funkcionalnu stimulaciju kod osoba koje su doživele šlog. Senzori ubrzanja u kombinaciji sa sensorima sile uz korišćenje neuralnih mreža takođe su primenjeni i za FES (funkcionalna

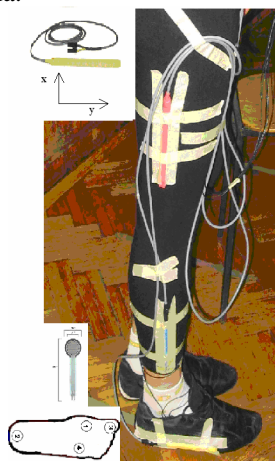
električna stimulacija) kod hemiplegičara [8]. Postoji i sistem koji se sastoji od tri kapacitivna senzora i koji se takođe koristi za funkcionalnu stimulaciju kod paraplegičara. [9] Ovim su uspešno prepoznavane faze oslonca i zamaha.

Za većinu potreba i medicinskih primena pokazalo se da je dovoljno prepoznati početak i kraj faza oslonca i zamaha, pa je to i bio predmet našeg istraživanja. Prepoznavanje ovih faza hoda zasnovano je na korišćenju jednostavne neuralne mreže i senzora pogodnih za primenu na osobama sa invalidnošću u kliničkom okruženju. Metod je testiran na signalima dobijenim sa senzora sila, koji se i najčešće koriste za ovu primenu, kao i na signalima sa senzora ubrzanja čija je upotreba trenutno u ekspanziji zbog niske cene i jednostavnosti montiranja.

## II. EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimenti su vršeni u laboratorijskim uslovima. Snimljeno je 5 mladih, zdravih subjekata starosti  $22 \pm 2$  god. Subjekti su hodali pravom putanjom, na ravnoj podlozi dugačkoj 6 m, njihovom uobičajenom brzinom hoda. Istovremeno beleženi su signali sa senzora sila (FSR) i akcelometara. Za svakog subjekta snimljeno je 10 prolazaka putanjom.

Sistem za snimanje sastojao se iz troosnih akcelometara (ADXL330, Analogue Device), senzora sila (firme Interlink) i sistema za snimanje <sup>TM</sup>BUDA [10]. Uređaj za merenje baterijski je napajan, portabilan i bežičnim putem povezan sa računarnom na kome se vrši akvizicija signala.

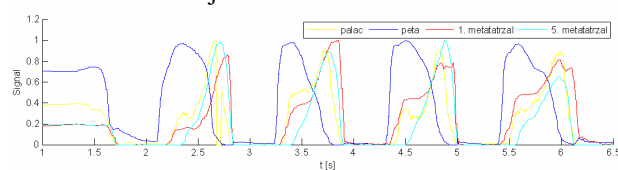


Slika 2 Postavljeni senzori na ispitaniku

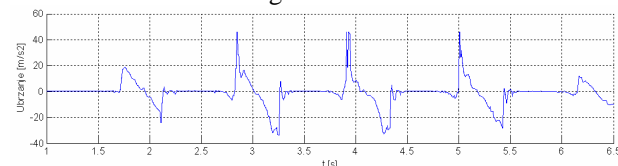
Senzori ubrzanja montirani su po dva na štapu (Slika 2). Korišćeno je tri štapa sa ukupno šest akcelometara, ose x i y. Štapovi su postavljeni po jedan na svaki segment noge (Slika 2). Senzori sila postavljeni su na stopalu na prvu metatarzalnu kost, petu, palac i petu metatarzalnu kost. Signali sa senzora sila normalizovani su na vrednost 1. Primer snimljenih signala sa ovih senzora prikazan je na slici 3.

Analizirani su originalni i obrađeni signali sa akcelometara. Za obradu signala primenjena je jednostavna tehnika usrednjavanja pomičnim prozorom koji uključuje pet susednih tačaka (*moving average*). Nakon analize akcelometarskih signala, odlučeno je da

se za prepoznavanje faza hoda posmatra samo jedan akcelometarski signal. Odabran je signal sa senzora koji je bio postavljen na stopalu, i to osa u sagitalnoj ravni upravna na pravac stopala. Primer snimljenih signala sa akcelometra dat je na slici 4.



Slika 3 Signali sa senzora sila



Slika 4 Signal sa akcelometra, y osa štapa na stopalu

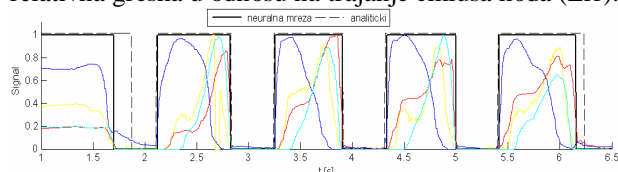
Nakon snimanja signala sa senzora, podaci su propuštani kroz neuralnu mrežu. Korišćen je višeslojni perceptron. Za prepoznavanje faza na osnovu senzora sila korišćena je mreža sa četiri ulazna, jednim izlaznim neuronom i sa po petnaest neurona u dva skrivena sloja. Neuralna mreža koja je obučavana signalima sa senzora ubrzanja sastoji se od jednog ulaznog, jednog izlaznog i petnaest neurona u skrivenom sloju. Kao aktivaciona funkcija korišćena je tansig funkcija, izuzev izlaznog neurona gde je korišćena linearna. Mreža je obučavana backpropagation algoritmom. Prvo obučavanje mreže izvršeno je na osnovu FSR-ova sa 350 epoha i pokazalo se da je taj oblik signala pogodovao obučavanju mreže. Broj epoha obučavanja kod druge mreže je iznosio 200. Kao trening podaci korišćeni su signali samo jednog subjekta.

## III. REZULTATI

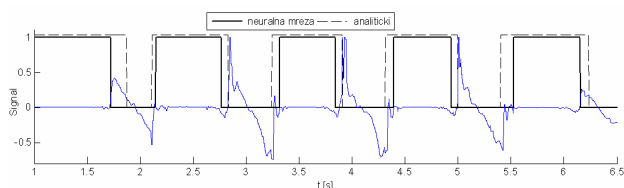
Senzori sila često se koriste za prepoznavanje faza hoda jer je analiza jednostavna. Kada su senzori pažljivo postavljeni tako da nema savijanja ili konstantnog pritiska na neku tačku u toku celog ciklusa hoda, smatra se da je faza zamah ako je zbir signala sa FSR blizu nule, inače je oslonac. Signali sa senzora sila korišćeni su kao referentni sistem u odnosu na koji smo računali odstupanje.

Dobijeni rezultati prepoznavanja faza sa neuralnih mreža poređeni su sa analitički dobijenim rezultatima sa senzora sila, kao što je opisano u prethodnom pasusu. Ova poređenja prikazana su na slikama 5, 6 i 7.

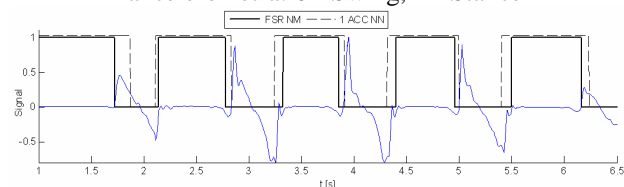
Kao kriterijum za meru uspeha mreže, analizirano je odstupanje vremena početka i kraja faza između analitički dobijenih rezultata i izlaza mreže. U tabeli 1 nalaze se rezultati testiranja mreže za subjekte čiji je hod korišćen za treniranje mreže (A), i subjekte na čijem hodu nije trenirana mreža (B). Prikazano je prosečno vremensko odstupanje prepoznavanja početka tj. kraja faze ( $T_s$ ), kao i relativna greška u odnosu na trajanje ciklusa hoda ( $Err$ ).



Slika 5 - Prepoznavanje faza na osnovu senzora sila: 0 - Swing, 1 - Stance



Slika 6 - Prepoznavanje faza na osnovu signala sa akcelerometra: 0 - Swing, 1 - Stance

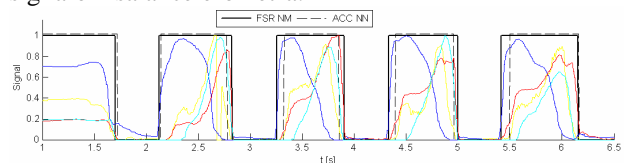


Slika 7 - Prepoznavanje faza na osnovu filtriranog signala sa akcelerometra: 0 - Swing, 1 - Stance

TABELA I

SIGNAL	A		B	
	Ts[ms]	Err [%]	Ts[ms]	Err[%]
FSR	14	1.27	31	2.8
ACC	120	11	154	14
fACC	90	8.2	127	11.5

Na slici 8 prikazano je poređenje rezultata neuralne mreže obučavane signalima sila i mreže obučavane signalom sa akcelerometra.



Slika 8 - Poređenje rezultata između dve mreže

#### IV. ZAKLJUČAK

Rezultati su pokazali da je mreža koja koristi senzore sila dovoljno precizna za prepoznavanje faza, čak i za subjekte na kojima nije obučavana mreža. Međutim, naš cilj bio je da utvrdimo koliko su senzori ubrzanja zaista lošiji za prepoznavanje faza od senzora sile. Senzori sila su daleko nezgodniji za upotrebu, teže se postavljaju i lakše kvare. S obzirom na to da je jedna od glavnih primena prepoznavanja faza hoda zapravo u rehabilitaciji pacijenata, izuzetno je bitno obezbediti brzo i jednostavno montiranje senzora, kao i udobno korišćenje. Tipičan problem koji nastaje kod upotrebe senzora sile je to što se lako deformišu u toku hoda, a pri jačim silama mogu da odu u zasićenje nakon čega više nisu upotrebljivi, dok se kod akcelerometara ne javljaju ovi nedostaci.

Kod prepoznavanja faza sa akcelerometarskog signala, broj senzora je smanjen na minimum korišćenjem samo jednog senzora koji može brzo i jednostavno da se postavi na subjekta tj. u budućnosti – pacijenta. Prepoznavanje pomoću akcelerometara stvara veću grešku, ali su i ti rezultati zadovoljavajući sa praktičnog stanovišta. Pokazalo se da je greška manja kada se koriste filtrirani signali, i to je jedan od sledećih koraka u ovom istraživanju. Iako filtriranje smanjuje grešku, ono takođe unosi i kašnjenje, koje je bitan faktor za kvalitet metoda ako ovakvu mrežu želimo da koristimo u realnom vremenu.

Važna prednost akcelerometara je to što omogućavaju određivanje podfaza *Swing*-a i *Stance*-a (11). Ukoliko bi se povećao broj signala sa senzora ubrzanja na ulazu mreže, mogla bi se koristiti mreža za detaljnije prepoznavanje faza tj. podfaza tokom hoda što može biti predmet nekih budućih razmatranja.

#### LITERATURA

- [1] <http://www.vicon.com/>.
- [2] Stacy J. Moriss, Joseph A. Paradiso, "Shoe-integrated sensor system for wireless gait analysis and real-time feedback".
- [3] Jan M. Jasiewicz, John H. J. Allum, James W. Middleton, A. Barriskill, P. Condie, B. Purcell, Raymond Che Tin Li, "Gait event detection using linear accelerometers or angular velocity transducers in able-bodied and spinal-cord injured individuals", IEEE Gait&Posture, vol. 24, no. 4, pp. 502-509, 2006.
- [4] I. Cikailo, Z. Matjacie, T. Bajd, R. Futami, "Sensory supported fcs control in gait training of incomplete sci persons", Artificial organs, vol. 29, no. 6, pp. 459-461, 2005.
- [5] I. Pappas, T. Keller, S. Mangold, M. Popovic, V. Dietz, M. Morari, "A reliable gyroscope-based gait-phase detection sensor embedded in a shoe insole", IEEE Sensors journal, vol. 4, no. 2, pp. 268-274, April 2004.
- [6] Jonghee Han, Hyo Sun Jeon, Beom Suk Jeon, Kwang Suk Park, "Gait detection from three dimensional acceleration signals of ankles for the patient with Parkinson's disease", jun 2006.
- [7] Yoichi Shimada, Shigeru Ando, Toshiki Matsunaga, Akiko Misawa, Toshiaki Aizawa, Tsuyoshi Shirahata, Eiji Itoi, "Clinical application of acceleration sensor to detect the swing phase of stroke gait in functional electrical stimulation", Tohoku journal of experimental medicine, vol. 207, no. 3, pp. 197-202, August 2005.
- [8] Strahinja Došen, Student Member, IEEE, and Dejan Popović, Member IEEE, "Accelerometers and force sensing resistors for optimal control of walking of a hemiplegic", Biomed. Eng., IEEE Transaction on, vol. 55, no.8, pp. 1973-1984, Aug. 2008.
- [9] D'Attanasio Honiger S., Micallef J.P., Peruchon E., Guiraud D., Rabischong P., "A robust, economic, and ergonomic sensor device for gate phase detection for an implanted fcs system".
- [10] Nenad S. Jovičić, Milica D. Đurić, Dejan B. Popović, Member IEEE, "Prenosni sistem za snimanje kinematike i dinamike hoda zasnovan na bluetooth komunikaciji", 15th Telecommunications Forum, Telfor 2007, Belgrade, Serbia.
- [11] Milica Djurić, "Automatic Recognition of Gait Phases from Accelerations of Leg Segments", Ninth Symposium on Neural network Applications in Electrical Engineering, Neurel 2008, 25-27 September, Belgrade, Serbia

#### ABSTRACT

In this paper we present one method for determining gait phases by using signals from force sensors and accelerometer. The gait-phase recognition was performed by applying three neural networks. One neural network used as inputs the signals from force sensing resistors positioned at the sole of the foot, the second network used original data from one accelerometer measuring acceleration perpendicular to the direction of the foot in the sagittal plane, and the third one the same acceleration data that was processed (moving average, 5 points). The results show that the errors were in the ranges: 30 ms (2.7%) – force sensors; 150 ms (13.6%) – original signals from the accelerometer, and 120 ms (11%) – processed acceleration data. This data suggests that it is possible to use the accelerometer as the gait phases detection component; however, knowing that a delay of about 10% will be consistent.

#### NEURAL NETWORKS FOR GAIT PHASES RECOGNITION BASED ON ACCELEROMETERS AND FORCE SENSING RESISTORS

Nikola Mijailović, Marijana Gavrilović, Stefan Rafajlović