

Univerzitet u Beogradu  
FAKULTET ZA SPECIJALNU EDUKACIJU I REHABILITACIJU

**SMETNJE I POREMEĆAJI:  
FENOMENOLOGIJA,  
PREVENCIJA I TRETMAN**  
deo II

Priredile  
Jasmina Kovačević, Vesna Vučinić

BEOGRAD 2010

UNIVERZITET U BEOGRADU  
FAKULTET ZA SPECIJALNU EDUKACIJU I REHABILITACIJU  
UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF SPECIAL EDUCATION AND REHABILITATION

*Smetnje i poremećaji:  
fenomenologija, prevencija i  
tretman  
deo II*

*Disabilities and Disorders:  
Phenomenology, Prevention and Treatment  
Part II*

Priredile / Edited by  
*Jasmina Kovačević, Vesna Vučinić*

Beograd / Belgrade  
2010.

**EDICIJA:  
RADOVI I MONOGRAFIJE**

Izdavač:

Univerzitet u Beogradu,  
Fakultet za specijalnu edukaciju i rehabilitaciju

***Smetnje i poremećaji:  
fenomenologija, prevencija i tretman deo II***

**Za izdavača:** Prof. dr Jasmina Kovačević, dekan

**Urednici:** Prof. dr Jasmina Kovačević, doc. dr Vesna Vučinić

**Uređivački odbor:**

- Prof. dr Mile Vuković,
- Prof. dr Snežana Nikolić,
- Prof. dr Sanja Ostojić,
- Prof. dr Nenad Glumbić,
- Prof. dr Aleksandar Jugović,
- Prof. dr Branka Eškirović,
- Doc. dr Nada Dragojević,

Univerzitet u Beogradu, Fakultet za specijalnu  
edukaciju i rehabilitaciju

- Prof. dr Pejo Đurašinović, Fakultet političkih nauka,  
Univerzitet u Banja Luci
- Doc. dr Mira Cvetkova-Arsova, Sofia University "St. Kliment  
Ohridski", Faculty of Primary and Pre-School Education,  
Bulgaria
- Dr Zora Jačova, University "St. Cyril and Methodius",  
Faculty of Philosophy, Institute of Special Education and  
Rehabilitation, Republic of Macedonia
- Viviana Langher, University "La Sapienza", Rome, Italy
- Martina Ozbič, University of Ljubljana, Pedagogical Faculty,  
Slovenia
- Dr Isabel Maria Martin Monzón, University of Sevilla, Spain
- Dr Isabel Trujillo Pozo, University of Huelva, Spain
- Dr Philip Garner, The University of Northampton
- Dr Maria Elisabetta Ricci, Univerzitet "La Sapienza", Rim,  
Italija
- Dr Vlasta Zupanc Isoski, Univerziteti klinički centar, Ljubljana

**Recenzenti:**

Štampa:

„Akademija“, Beograd

Tiraž: 350

*Nastavno-naučno veće Univerziteta u Beogradu, Fakulteta za specijalnu edukaciju i  
rehabilitaciju donelo je Odluku 3/9 od 8.3.2008. godine o pokretanju  
edicije: Radovi i monografije.*

*Nastavno-naučno veće Fakulteta za specijalnu edukaciju i rehabilitaciju  
Univerziteta u Beogradu, na redovnoj sednici održanoj 29.6.2010. godine,  
Odlukom br. 3/59 od 2.7.2010. godine, odobrilo je štampu Tematskog zbornika  
"Smetnje i poremećaji: fenomenologija, prevencija i tretman", deo II.*

ISBN 978-86-80113-99-9

**EDITION:  
PAPERS AND MONOGRAPHS**

Publisher:  
University of Belgrade,  
Faculty of Special Education and Rehabilitation  
***Disabilities and Disorders:  
Phenomenology, Prevention and Treatment Part II***

**For the Publisher:**

Prof. Jasmina Kovačević, PhD, Dean

**Editors:**

Prof. Jasmina Kovačević, PhD

Asst Prof. Vesna Vučinić, PhD

**Editorial Board:**

- Prof. Mile Vuković, PhD
- Prof. Snežana Nikolić, PhD
- Prof. Sanja Ostojić, PhD
- Prof. Nenad Glumbić, PhD
- Prof. Aleksandar Jugović, PhD
- Prof. Branka Eškirović, PhD
- Asst Prof. Nada Dragojević, PhD

University of Belgrade, Faculty of Special Education and Rehabilitation

- Prof. Pejo Đurašinović, PhD, Faculty of Political Sciences, University of Banja Luka
- Asst Prof. Mira Cvetkova-Arsova, PhD, Sofia University "St. Kliment Ohridski", Faculty of Primary and Pre-School Education, Bulgaria
- Zora Jačova, PhD, University "St. Cyril and Methodius", Faculty of Philosophy, Institute of Special Education and Rehabilitation, Republic of Macedonia
- Viviana Langher, University "La Sapienza", Rome, Italy
- Martina Ozbič, University of Ljubljana, Pedagogical Faculty, Slovenia
- Isabel Maria Martin Monzon, PhD, University of Sevilla, Spain
- Isabel Trujillo Pozo, PhD, University of Huelva, Spain
- Philip Garner, PhD, The University of Northampton
- Maria Elisabetta Ricci, PhD, University "La Sapienza", Rome, Italy
- Vlasta Zupanc Isoski, PhD, University Medical Centre, Ljubljana

**Reviewers:**

Printed by:

"Akademija", Belgrade

Number of copies: 350

*Scientific Council of the University of Belgrade, Faculty of Special Education and Rehabilitation, decided to release the edition Papers and Monographs (Decision no 3/9 from 8th March 2008).*

*Scientific Council of the Faculty of Special Education and Rehabilitation, University of Belgrade, approved the printing of Thematic Collection of Papers: Disabilities and Disorders: Phenomenology, Prevention and Treatment, Part II at its regular session on 29th June 2010 (Decision no 3/59 from 2nd July 2010).*

ISBN 978-86-80113-99-9

## IZAZOVI U KONSTRUKCIJI I PRIMENI NOVE GENERACIJE BIONIČKE ŠAKE

*Dragan Marinković, Dragan Rapaić, Goran Nedović*  
Univerzitet u Beogradu, Fakultet za specijalnu edukaciju i rehabilitaciju

*Osobe koje su doživele traumatu amputacije često pate od teških depresija koje su posledica narušene predstave o sopstvenoj ličnosti i straha od društvenog odbacivanja. Dodatno, fantomski bol primorava takve osobe da uzimaju jake analgetike te ovo komplikuje mogućnost njihovog povratka na posao. Tokom poslednjih nekoliko godina samo nekoliko proteza za šaku bilo je dostupno na tržištu. Većina ovih proteza ima veoma jednostavne funkcije poput mogućnosti otvaranja i zatvaranja šake, a ni jedna od njih nema sistem za detekciju povratnih senzacija.*

*Poslednji razvoj u istraživanjima na polju nauke o materijalima, nanobiotehnologije, kognitivne neuronauke i informacionih tehnologija omogućava izradu inteligentne veštačke šake koja ima većinu osnovnih funkcija humane šake. Nova generacija bioničke šake imaće naprednije funkcije kao što su: nekoliko različitih funkcija hvatanja, mogućnost nezavisnog pokretanja pojedinih prstiju i senzorne funkcije koje će pomoći u regulaciji jačine hvatanja. Svesna kontrola ovakve šake biće moguća upotrebom elektromiografskih (EMG) signala koji se beleže površinskim elektrodama i transmituju do motora koji pokreće bioničku šaku. Šta više, skorija istraživanja na polju kognitivne neuronauke obećavaju izradu bioničke šake koja će od pacijenta biti doživljavana kao sopstveni deo tela zahvaljujući primeni efekta "iluzije gumene šake".*

*Ova nova generacija funkcionalne veštačke šake bila bi od velike važnosti u rehabilitaciji osoba koje su pretrpele amputaciju, pomažući im da ponovo izgrade pozitivnu sliku o sopstvenoj ličnosti i da lakše budu prihvaćene u društvu, pa čak i da se vrate na redovne radne aktivnosti.*

*Ključne reči: bionička šaka, proteza, iluzija gumene šake, osećaj pripadanja ruke, veštačke neuronske mreže*

### UVOD

**P**recizan podatak o broju osoba sa amputacijom ruke se ne može utvrditi, s obzirom da većina država ne vodi evidenciju o njihovom broju. Ipak neki podaci govore o izuzetno velikom broju ovakvih pacijenata. Prema nekim procenama, incidenca amputacije gornjih ekstremiteta se kreće oko 1,9 na 100.000 godišnje (Atroshi and Rosberg, 2001). Tako prema informacijama iz Nacionalnog centra

za zdravstvenu statistiku SAD, svake godine se u ovoj državi zabeleži oko 50.000 novih slučajeva (Statistics, 1994). Prema istoj statistici najčešći su slučajevi parcijalne amputacije šake sa gubitkom jednog ili više prstiju. Analiza registrovanih slučajeva amputacije, širom sveta, pokazala je četiri osnovna uzroka amputacije: akcidentne situacije, ratne povrede, bolest i kongenitalne uzroke (Esquenazi, 2004). Uzroci amputacije pokazuju varijaciju po državama, u zavisnosti od stepena ekonomskog razvitka i političke stabilnosti. Tako su glavni uzroci amputacija u zemljama u razvoju akcidentne situacije, dok su u razvijenom svetu osnovni uzroci kardiovaskularne bolesti, tumori, dijabetes i razvoj nekih drugih bolesti. Akcidentne situacije obično podrazumevaju povrede u saobraćaju i povrede na radu i u razvijenim zemljama čine oko 30% uzroka, dok je ostatak od oko 67% uzroka posledica razvoja bolesti (Esquenazi, 2004). Kongenitalni deformiteti čine samo oko 3% od svih uzroka (Esquenazi and Meier, 1996). Osobe koje su doživele amputaciju kao posledicu razvoja bolesti najčešće spadaju u kategoriju stanovništva sa preko 60 godina (Esquenazi, 2004). Muškarci spadaju u kategoriju stanovništva koja je podložnija amputaciji u odnosu na žene i to oko 3-6 puta, a kao najčešći razlozi spominju se akcidenti u saobraćaju i na radu ili razvoj bolesti (Atroshi and Rosberg, 2001). Amputacija noge mnogo je češća od amputacije ruke i stoji u odnosu 5:1, dok je amputacija desne ruke znatno češća, od amputacije leve ruke (Esquenazi, 2004).

Osnovna odgovornost i cilj hirurga je da sačuva što duži deo ruke, kako bi pacijent imao ostatak ruke sa velikim brojem očuvanih receptora na mekim tkivima i koži na koji će biti postavljena što jednostavnija estetska proteza. Nakon operacije, pacijent bi morao da bude u stanju da nosi protezu najveći deo dana i da mu ona omogućava što veći broj funkcija, neophodnih za ispunjenje svakodnevnih životnih aktivnosti.

Važan aspekt u rehabilitaciji pacijenata sa amputacijom predstavlja tretman bola. Postoje četiri kategorije bola koje se mogu javiti nakon primenjene amputacije: postoperativni bol, bol u ostatku ruke, bol koji dolazi od upotrebe proteze i fantomski bol. Takođe, može da dođe i do pojave bola i u drugim delovima tela, a da ga pacijent doživljava kao posledicu amputacije.

Amputacija čitave šake ili čak samo jednog delića prsta rezultira funkcionalnim gubicima kao što su smanjenje sposobnosti držanja predmeta ili oslanjanja, nemogućnost pisanja, nemogućnost otključavanja vrata ključem kao i drugih svakodnevnih aktivnosti, ali i psihološkim gubicima, kao što je nezadovoljstvo sopstvenim životom i samoizolacija (Burger et al., 2007). Iako se dobar deo pacijenata nakon amputacije i rehabilitacije vraća na posao, oko trećina njih mora da promeni vrstu delatnosti (Chow and Ng, 1993). Neke druge studije ukazale su da se nakon amputacije, na istu vrstu posla, može vratiti samo polovina pacijenata (Burger et al., 2007). Ista studija je pokazala da, manje od jedne trećine pacijenata, estetsku silikonsku protezu, nosi i na poslu. Upotreba proteze na radnim aktivnostima na poslu, zavisice od više faktora, kao što su tip posla (manuelni ili nemanuelni), nivo amputacije, pol, eventualni problemi sa ostatkom ruke (Hopper et al., 2000). Da bi proteza bila prihvaćena i korišćena od strane pacijenata, mora biti, pre svega, funkcionalna, ali i komforna za nošenje, i da zadovoljava kozmetičke i estetske kriterijume. Pokazalo se da pacijenti ne koriste proteze u slučajevima kada one imaju ograničenu upotrebnu vrednost, ukoliko su preteške ili nisu

dovoljno komforne (Davidson, 2002). Studija urađena u Australiji, pokazala je da upotreba današnjih standardnih proteza za ruku, kod pacijenata, ne dovodi do poboljšanja kvaliteta svakodnevnog života. Samo 44% ispitanih pacijenata u ovoj studiji nosilo je protezu barem 50% vremena (Davidson, 2002). Sve ovo ukazuje da, proteze za ruke koje se trenutno nalaze u upotrebi u praksi, ne zadovoljavaju zahteve modernog života.

Savremene proteze i uopšte veštački organi moraju ispuniti uslov biokompatibilnosti, moraju da se stope sa telom u jednu celinu, moraju biti napravljene od materijala sličnih humanim tkivima i moraju da poseduju inteligentne senzore, kako bi korisniku davale povratne informacije.

### *Istorijski modeli proteza za ruku*

U svojoj nameri da svaku bolest tretira odgovarajućim lekom i da za svaki anatomski i funkcionalni nedostatak ljudskog tela pronađe što adekvatnije rešenje, medicina je razvijala raznolika rešenja i metode. Jedan od najvećih izazova ostalo je do danas pitanje nadomeštavanja izgubljenih udova, ruku i nogu. Rešenje ovog problema zahtevalo je ne samo razvoj u domenu poznavanja medicinskih nauka, već i u oblasti nauke o materijalima, informacionih tehnologija i kognitivne neuronauke. Tako su proteze za ruke prešle dug put, od jednostavnih drvenih modela, do današnjih najnovijih tehnoloških rešenja, u koje spada i bionička ruka. Kao i pri razvoju nekih drugih disciplina, neke od ideja i patenata su dalje nadograđene i unapređene, dok su druge poput upotrebe gvožđa, kao materijala, danas napuštene.

Proteze za ruke iz najranijeg doba imale su samo estetsku funkciju i izrađivane su od jednostavnih materijala poput drveta, kože i gvožđa. Možda jedan od najstarijih primera izrade, donekle, funkcionalne proteze za ruku predstavlja primer iz Punskih ratova, kada je za rimskog generala Marka Sergiusa izlivena metalna ruka, kojom je mogao da pridržava štit i tako se vrati u borbu (Vitali, 1986). Naredni period, od preko hiljadu godina, nije doneo nista novo u izradi proteza za ruke i noge. U srednjem veku siromašniji sloj imao je obične drvene proteze, dok su bogatiji izrađivali proteze sa kukom na kraju, tako da su mogli da obavljaju najjednostavnije funkcije poput oslanjanja, privlačenja predmeta ili odbrane od napada. Tadašnje su se proteze razlikovale samo po kvalitetu materijala od kojeg su izrađivane, dok su funkcionalno bile na istom nivou. Metode izvođenja amputacije i tretman pacijenata, neposredno nakon intervencije, u ovom su periodu, bili na tako niskom nivou, da se procenjuje da preko 80% amputiranih pacijenata nije ni preživljavalo proceduru (Thurston, 2007).

Tek sa novim zamahom u razvoju medicine, u doba renesansnog perioda, proteze za ruke doživljavaju izvestan tehnički napredak. Francuski hirurg Ambroise Pare može se danas smatrati ocem modernih proteza. On je 1529. ustanovio amputaciju ruku i nogu, kao jednu od metoda u medicinskom tretmanu (Thurston, 2007). Njemu se pripisuje i primena veštačkog zgloba, u konstrukciji proteze od metala, koja je radila na principu federa i spojnica (Thurston, 2007). Dalji razvoj metoda anestezije, zaustavljanja krvavljenja i tretiranja infekcija, omogućio je da hirurške metode ugradnje proteza postanu kurativna metoda u tretiranju amputacije.

Sredinom XIX veka, kao materijal, u izradi proteza za ruku uvedena je guma. Ovaj materijal je, kao elastičniji od drveta i metala, nailazio na bolji prijem kod pacijenata. Proteze su livene od gume po modelu prirodne ruke, imale su sve prste, pa čak i izvesnu elastičnost, tako da je bilo moguće i držanje manjih predmeta u ruci. Pacijentu su davale prijatniji osećaj, a nije zanemarljivo ni to, što su po estetskim kriterijumima, bile mnogo bliže pravom prirodnom modelu ruke (Porter, 1996). Gustav Hermann predložio je 1868. upotrebu aluminijuma, umesto gvoždja, u izradi proteza, kako bi one bile lakše i time zahtevale manje snage za manipulaciju. Ipak, prva proteza od aluminijuma izrađena je tek 1912 godine, kada je Marcel Desoutter, poznati engleski avijatičar, izgubio nogu u avionskoj nesreći i uz pomoć svog brata inženjera napravio protezu za sebe (David Serlin 2002).

Nakon II svetskog rata, američka vlada je, na zahtev ratnih veterana, investirala novac u vojne kompanije, zadužene za izradu proteza. Ovaj je čin otvorio vrata za razvoj i proizvodnju modernih proteza. Došlo je do punog razvoja u konstrukciji i proizvodnji raznolikih proteza poput: SACH proteza za nogu, Mauch S-N-S sistema, mioelektrične proteze za ruku C-Leg™, Flex-Foot™ itd. Generalno uzevši, razvoj proteza za ruku kretao se nakon II svetskog rata u dva pravca: s jedne strane, to su pasivne estetske proteze, koje imaju jedinu ulogu da predstavljaju fizički entitet, koji je što verniji preostaloj ruci, a sa druge strane, reč je o protezi koju pokreću drugi delovi tela, preko kontrolnog kabla i na svom kraju ima kuku ili šaku koju kontroliše (Phillips, 1988). S obzirom da je većina amputacija ruku unilateralnog tipa, funkcionalna proteza najčešće ima na svom kraju kuku ili šaku, koja nije u stanju da obavlja najdelikatnije zadatke, poput držanja i prihvatanja malih predmeta, već to čini preostala zdrava ruka. Šaka na terminalnom delu proteze je najčešće takva da ima jedan do dva pokretljiva prsta (Olivett, 1990). Sa kozmetičkog aspekta, estetske proteze su superiorne u odnosu na proteze sa terminalnom kukom, ali sa stanovišta upotrebne vrednosti, ove druge su ubedljivo najčešće korišćene zbog svoje mehaničke jednostavnosti, efikasnosti i jednostavnosti u kontroli (Jones, 1997).

### *Specifični zahtevi u izradi proteza za ruke*

U konstrukciji modernih proteza za ruke, polazi se od zahteva da one po svojim motornim i senzornim kapacitetima moraju da budu što vernije svom originalu. Zato ne čudi činjenica da je, detaljna i precizna determinacija svih motornih i senzornih performansi humane ruke, osnovni preduslov za izradu modela proteza ili u konstrukciji robota, koji obavljaju precizne manipulacije, koje oponašaju humanu ruku. Mnogi zahtevi koji su se postavljali u konstrukciji robotskih ruku i antropomorfnih manipulatora, takodje, su postali značajni i u dizajniranju vrhunskih proteza za ruke, a u oba slučaja neophodno je znati performanse humane ruke, koju žele da po funkcijama dostignu (Jones, 1997). Još jedan dragocen izvor informacija predstavljaju istraživanja rađena na ljudima, koji su pretrpeli povrede ruke. Ona determinišu performanse ruku u situacijama kada imaju ograničenu sposobnost pokreta i detekcije senzornih informacija. Swanson je, još šesdesetih godina prošlog veka, odredio osnove za protokol kojim se mogu determinisati različiti aspekti fiziološke funkcije ruke, od motornih do senzornih (Swanson, 1964). Ovaj je protokol odobren i od strane Međunarodne federacije za



hirurgiju šake. Protokol definiše gubitak funkcionalnosti šake usled amputacije prstiju, gubitka senzitivnosti, definiše nepravilnosti u motorici šake, te predstavlja dobru osnovu za procenu funkcionalnosti nakon amputacije šake.

S obzirom na činjenicu da humana ruka ima sposobnost obavljanja raznovrsnih manipulativnih pokreta i da se dodatnim treningom može osposobiti da obavlja i najdelikatnije pokrete i radnje, postavlja se pitanje mogućnosti današnje tehnologije, da ovakve motorne performanse detektuje i dalje kvantifikuje. Ovaj tehnološki limit ograničava ne samo kvantifikaciju performansi ruke, već je takođe i prepreka u razvoju proteza za ruke i robotskih ruku. Nažalost, većina proteza za ruku koje se danas primenjuju, jesu jednostavni uređaji za hvatanje i pridržavanje sa veoma ograničenim motornim performansama, dok ne poseduju nikakve senzitivne performanse (Jones, 1997).

Već je odavno poznato da senzorne i motorne karakteristike humane ruke predstavljaju jedinstven kvalitet i visok nivo specijalizacije, koji nije prisutan u drugim anatomskim strukturama ljudskog tela (Bell, 1833, Jones, 1994). Evaluacija performansi humane ruke najčešće obuhvata tri domena (Jones, 1989):

1. Integritet mišićno-skeletnog sistema se meri u pogledu mišićne snage, koja se definiše kao maksimalna sila različitih mišićnih grupa, i opseg pokreta pojedinačnih zglobova.
2. Taktilne, toplotne i proprioceptivne senzacije.
3. Mogućnost izvođenja preciznih pokreta.

Ukoliko se uporede performanse humane ruke i do danas postojećih proteza šake i ruke, jasno je da i dalje ne postoji proteza koja u potpunosti odgovara u motoričkim funkcijama, senzibilnim funkcijama i estetskim kriterijuma (Olivett, 1990). Većina proteza konstruisano je tako da mogu da se otvaraju i zatvaraju u jednom zglobu i ne omogućavaju pokretanje pojedinačnih prstiju. Danas, postoji veliki zahtev da se konstruišu proteze šake sa mogućnošću pokretanja pojedinačnih prstiju. Na žalost, sve dosadašnje proteze nemaju nikakvu mogućnost za dobijanje povratnih informacija o pokretanju njenih pojedinih delova. Tako je jedini način da pacijent detektuje pokrete proteze da ih prati vizuelno ili da čulom sluha registruje pokretanje motora proteze (Mason, 1985).

Najveći nedostatak proteza za ruku je nesumnjivo odsustvo čula dodira. Više istraživača je razvilo različite sisteme za detekciju taktilnih i proprioceptivnih povratnih signala, međutim do sada ni jedan od ovih sistema nije i klinički odobren (Harrington et al., 1995, Scott et al., 1980). Jedno od ograničenja je i nemogućnost da se razvijeni senzori jednostavno fiksiraju na već postojeće proteze, kao i činjenica da su materijali korišćeni za površinu takvih proteza osetljivi i zahtevaju zamenu svakih nekoliko meseci (Scott and Parker, 1988). Iako je poslednjih nekoliko godina napravljen veliki napredak u oblasti hirurške implantacije telemetrijskih sistema, problem vezivanja elektroda za preostale mišiće i nerve ruke nije još uvek rešen (Scott and Parker, 1988).

Nikako ne treba smetnuti sa uma ni tržišne zahteve, jer oni utiču na količinu novca koja će biti investirana u razvoj novih proteza za ruku. Potencijalno tržište za ovakve vrste sistema je ograničeno, s obzirom da od ukupne populacije pacijenata sa amputacijom, po slobodnim procenama, samo 10-30% predstavljaju osobe sa amputiranim gornjim ekstremitetima. Ova je populacija dodatno podeljena na one kojima je amputirana ruka iznad ili ispod podlaktice. Cena proizvoda je

još jedan ograničavajući faktor. Sama izrada proteze je skupa, a pacijent zahteva i određeni trening za upotrebu.

Savremeni zahtevi u konstrukciji bioničke šake jesu dobra mehanička čvrstina, masa približna masi prave ruke, dovoljna snaga stezanja šake, niska potrošnja, kompjuterska kontrola pokreta i brzine (Ryait et al., 2009). Kako bi se postigla konačna tražena forma proteze, svakoj pojedinačnoj komponenti mora se posvetiti posebna pažnja. Pravilan izbor materijala za izradu uticaće na čvrstinu, ali i na masu proteze. Izbor motora određiće jačinu stezanja šake i određiće potrošnju energije. Elektronske komponente i mikrokompjuter definišaću putanje pokreta i brzinu njihovog izvođenja. I konačno izbor materijala, kojim će proteza biti pokrivena, uticaće na spoljašnji dizajn i njenu vernost originalnoj zdravoj ruci.

### *Savremeni koncept bioničke ruke*

U modernom konceptu bioničke ruke, verovatno najperspektivniju tačku predstavlja primena elektromiografskog (EMG) signala. Elektromiografski signal, poznat takodje kao i motorni akcioni potencijal, je električni impuls koji dovodi do kontrakcije mišićnih vlakana (Ryait et al., 2009). EMG signal može se detektovati postavljanjem elektroda na kožu, pri čemu dve elektrode služe za beleženje električnog napona između njih, a treća za otklanjanje smetnji od drugih signala. Kako bi EMG signali bili upotrebljeni za komandu ili kontrolu pokreta bioničke ruke, potrebno je obraditi ih kako bi se iz njih izvukle neophodne informacije.

Kod proteza koje kontrolišu i izvršavaju pokrete pomoću spoljašnjeg motora, mioelektrična kontrola je najčešće upotrebljen sistem. Ovakve proteze koriste električne impulse generisane kontrakcijom preostalih mišića na zaostalom patrljku amputirane osobe, kako bi upravljale motorom u mehaničkoj šaci, kuki ili zglobu. Prednost ovakvih sistema je u tome što omogućavaju proporcionalnu kontrolu brzine i jačine stezanja šake ili drugih terminalnih uređaja poput kuke, na osnovu jačine mišićne kontrakcije korisnika (Ryait et al., 2009). Moguća je primena ovakvih proteza i kod pacijenata kojima je ruka amputirana iznad nivoa lakta (Graupe D., 1978).

Fermo i saradnici (2000) su najavili izradu senzora za detektovanje mišićne kontrakcije, koji registracijom EMG signala kontroliše mioelektričnu protezu ruke. Analiza EMG signala se vrši softverom u ugrađenom mikrokontrolnom uređaju koji donosi odluku na koji način da otvori ili zatvori šaku. Nove funkcije veštačke šake mogu se u ovom sistemu nadograditi jednostavnim promenama u softveru, bez ikakve promene u samoj protezi. Godinu dana kasnije, Morita (2001) je predstavio novi pristup u kontroli bioničke šake, uvodeći veštačku mrežu neurona u procesor. Tako je čitav softverski sistem u mogućnosti da u kratkom vremenskom periodu izvrši fino podešavanje pokreta na osnovu povratnih informacija o počinjenim greškama. Konačno uveden je i prvi prototip šake sa pet prstiju i prvi sistem za njenu preciznu kontrolu (Zajdlík, 2006). Ispunjenjem svih prethodnih principa, stižu se uslovi za konstrukciju bioničke šake.

Rad prototipa bioničke ruke zasnovan je na postojanju dva fenomena. Prvi je postojanje motornog centra u mozgu koji uvek šalje kontrolne signale, pa i u slučaju kada kod amputirane ruke ne postoje mišići, koji bi izvršavali voljne pokre-

te. Drugi fenomen je da se prilikom amputacije ne odstranjuju svi nervi koji su kontrolisali pokrete ruke. Tako i kada je došlo do amputacije ruke, pacijent ima određeni broj nervnih završetaka, koji nemaju gde da pošalju informacije. Ovi nervni završeci mogu se preusmeriti na alternativne aktivne mišićne grupe. Postupak preusmeravanja se radi procedurom koja se zove ciljane mišićna reinervacija (targeted muscle reinnervation - TMR) (Kuiken, 2006). Metodom ciljane mišićne reinervacije nakon preusmeravanja nerava na aktivnim mišićima se dobijaju EMG signali. Elektrodamama zabeleženi EMG signali sada mogu poslužiti za kontrolu pokreta simultanih operacija, kod proteza koje imaju složene pokrete, verne pokretima prave ruke.

Primenom opisane metode, američki Institut za rehabilitaciju iz Čikaga, konstruisao je protezu za ruku sa 6 motora, koji su kontrolisani EMG signalima i mogu se pokretati istovremeno (Kuiken et al., 2009). To praktično znači da pacijent može da izvodi i složene pokrete, poput istovremenog pokretanja lakta gore-dole i stezanja šake, a same pokrete kontroliše svojim mislima. Ipak i ovakva proteza ima ograničen broj pokreta, koji zavisi od broja motora u protezi, a svaki je motor kontrolisan EMG signalom, sa jednog alternativnog mišića. Sama proteza je prilično teška, a ugradnja svakog novog motora za novi sistem pokreta, povećava njenu masu. Od posebne je važnosti činjenica da, ciljane mišićna inervacija, ima potencijal da obezbedi senzornu povratnu informaciju pacijentu, koji stiče utisak da je proteza njegov sastavni deo tela (Kuiken, 2006). Dodir jednog od alternativnih aktivnih mišića, pacijent stoga oseća kao dodir sopstvenog dela ruke.

Američka agencija za napredne odbrambene istraživačke projekte (DARPA), najavila je projekat pod nazivom „revolucionarni projekat za proteze 2009“. Oni su proizveli prvu integrisanu protezu za ruku, koja se može kontrolisati na prirodan način, koja daje senzorsku povratnu spregu i koja obezbeđuje osam stepena slobode. Pomenuta agencija je u projekat uključila i rešenje za obuku pacijenata koji koriste veštačku ruku (tzv. virtualna okolina), kao i sistem beleženja pokreta i kontrolnih signala za vreme kliničkih ispitivanja. Zahvaljujući ovom rešenju, moguće je poboljšanje sistema prilikom funkcionalnih provera, kao što je mogućnost repozicioniranja prstiju prilikom raznih zahvata - na primer, uzimanja kreditne kartice iz džepa i slično.

U okviru „Smart Hand“ projekta podržanog od evropskog FP6 okvirnog poziva, najavljen je novi napredni prototip bioničke šake (Dewez, 2010). Ovaj prototip će imati 16 elektroda na podlaktici. Mozak izdaje komandu za određeni voljni pokret ruke i bez obzira na amputaciju, cerebralni nervni impulsi se prenose do preostalih mišića na podlaktici. Elektrode beleže EMG signale sa svih pozicija i šalju ih na dalju analizu. Upotrebom veštačke neuronske mreže, sistem će biti u mogućnosti da uči da prepozna različite kombinacije EMG signala, koje prima. Dok korisnik izvodi različite pokrete, poput savijanja prstiju jednog po jednog, zatim svih zajedno, pokazivanje palcem i slično, sistem vrši algoritamsku analizu pokreta i kalibriše se na osnovu tačno i netačno izvedenih pokreta, za čitavu seriju vežbi (Dewez, 2010). Pretpostavlja se da će oko dva sata vežbanja biti dovoljno za potpunu kalibraciju, što je neuporedivo manje od svih ostalih dosadašnjih sistema.

Dalji napredak u konstrukciji bioničke šake mogao bi biti podstaknut i primenom tehnike sa „ubrizgavajućim mišićno-električnim senzorom“ (Injectable MyoElectric Sensor - IMES) (Troyk PR, 2007). U pitanju su hirurški ugrađeni senzori za merenje mišićne aktivnosti, na samom izvoru njihovog nastanka. Ovim se beleži čistiji signal, bez mešanja sa signalima koji dolaze sa okolnih mišića, a time će se nakon analize signala postići preciznija kontrola motora kojim se pokreću pojedini delovi ruke (Troyk PR, 2007).

Institut za rehabilitaciju u Čikagu, koji je, zahvaljujući ogromnom napretku ostvarenom na polju medicinske rehabilitacije, ove godine, rangiran i za najbolju bolnicu na teritoriji SAD, najavljuje sledeću generaciju bioničke ruke. Prototip bioničke ruke nazvan PROTO2, imaće više od 27 stepena slobode, uključujući i mogućnost pojedinačnog savijanja svakog prsta i jačinu i brzinu pokreta, koji su jednaki onim kod zdrave ljudske ruke. U prototip će biti integrisano i preko 80 pojedinačnih senzorskih elemenata koji će služiti kao povratna sprega za dodir, položaj ruke i temperaturu (Chicago, 2010).

U evropskim okvirima, najuspešnije modele bioničke ruke, dala je britanska kompanija Touch Bionics. Njihov model i-Limb Hand je prva komercijalna i na svetskom tržištu dostupna veštačka šaka, koja ima mogućnost nezavisnog pokretanja svih prstiju. I-Limb ruka je kontrolisana od strane visoko intuitivnog sistema, koji koristi klasične dve elektrode da zabeleži kontrolni EMG signal. Svaki pojedinačni prst može biti razmontiran pomoću jednog šrafa i eventualno poslat na servis, bez prethodnog skidanja čitave šake. Palac na šaci je u mogućnosti da se rotira, a prsti pomoću senzora detektuju snagu stezanja oko objekta, te komanduju koliko je snage dovoljno, da bi objekat bio pridržan. Čitava šaka može biti obložena posebnim materijalom, koji joj daje prirodni izgled i izvesnu elastičnost.

Od fantomskog bola i fenomena „iluzije gumene ruke“ do osećaja pripadnosti bioničke ruke

Funkcionalnost, odnosno mogućnost izvođenja što većeg broja složenih pokreta, brzina njihovog izvođenja i preciznost s kojom ruka može da prihvata i manipuliše različitim predmetima, jesu visoki zahtevi koje bionička ruka mora da ispunjava. Međutim, ruka nije samo organ sa motornom funkcijom. Ona je i deo identiteta svake osobe i organ kojim istražujemo najbližu okolinu, svet koji nas okružuje i druge osobe sa kojima komuniciramo. Na kraju, svi pacijenti želeli bi da imaju ruku, koju će doživeti kao svoj sopstveni deo tela, kojim osećaju dodir i toplotu. U principu, moguće je ovom problemu prići na više načina i trenutno su svi oni opcija u razvoju nove generacije bioničke ruke.

Jedan od prvih pristupa u postizanju senzitivnosti bioničke ruke je aplikacija veštačke kože. Po površini ovakve strukture nalazi se veliki broj senzora, koji detektuju promene pritiska u svojim regionima, a zatim ovu informaciju prenose preko provodnika. Negativnu stranu ovog rešenja predstavlja činjenica da je, za što precizniju senzitivnost, neophodan što veći broj senzora, a time i veći broj kablova. Na kraju nastaje kompleksan sistem sklon čestim kvarovima (Dewez, 2010). Drugi pristup baziran je na merenju tenzije svakog od kablova, koji se nalazi unutar prstiju i povezuje ih sa odgovarajućim motorom (Dewez, 2010). Ovim

kablom vrši se upravljanje prstima i oni se savijaju svaki put kada korisnik šakom pokuša da obuhvati kakav predmet. Korisnik je u stanju da oseti pritisak sa skale od 1 do 10, u zavisnosti od izmerene tenzije i da identifikuje na kom od prstiju se desila senzacija. Opisani sistem je trenutno na kliničkom ispitivanju u okviru projekta Smart Hand iz evropskog FP6 poziva (Dewez, 2010).

Čikaški Institut za rehabilitaciju delimično je sproveo u delo treći princip po kome se senzitivnost veštačke ruke može postići, tako što se senzor lociran na nekom delu proteze, povezuje sa elektrodom implantiranom direktno u semato-senzorni korteks (London et al., 2008) ili sa perifernim nervnim sistemom (Kuiken et al., 2007). Glavni nedostaci ovakvog pristupa su u tome što je reč o invazivnoj tehnici, sa raznolikim hirurškim i tehničkim izazovima.

Četvrti, možda najperspektivniji pristup baziran je na fenomenu, koji je opisan još 1552. od strane Ambrose Parre, kao percepcija izgubljenog dela tela (Keines, 1952). Skoro dvesta godina ovaj je fenomen smatran ludilom, da bi se tek sredinom 18. veka o fantomskom bolu počelo razmišljati kao o posledici povrede nervnog sistema. Danas, definicija ovog fenomena obuhvata sve negativne i pozitivne senzacije, koje osoba sa amputacijom oseća na mestu nedostalog dela tela (Casale et al., 2009). Amputacija ruke dovodi do funkcionalne reorganizacije u senzornom korteksu, a kao njena posledica nastaje senzorna mapa izgubljene ruke na površini patrljka. Stimulacija na određenom mestu ove mape, izaziva kod pacijenta osećaj dodira na delu izgubljene ruke.

Ehrsson i saradnici su 2008. godine opisali jednostavnu proceduru za izazivanje taktilne senzacije, kod pacijenata sa veštačkom rukom, baziranu na fenomenu iluzije gumene ruke (rubbe hand ilusion), koja je prethodno opisana kod zdravih osoba (Botvinick and Cohen, 1998). U ovom eksperimentu sinhroni dodiri primenjeni su pomoću četkice, kod više osoba sa amputacijom na gumenu ruku, postavljenu na sto ispred ispitanika i patrljak njihove sopstvene ruke, sakrivene iza paravana. Nakon primene sinhrona simulacije u određenom vremenu, ispitanici su se izjašnjavali o sopstvenim doživljajima, tvrdeći da su imali osećaj da registruju dodir na gumenoj ruci, te da su je doživljavali, kao sopstveni deo tela (Ehrsson et al., 2008, Petkova and Ehrsson, 2009). Ova se iluzija ostvaruje pošto mozak pokušava da razreši konfliktni doživljaj vizuelne, taktilne i proprioceptivne informacije. S toga, oni predlažu ovaj model za prenos taktilne senzacije sa patrljka amputirane osobe na njegovu veštačku ruku. Isti fenomen potvrđen je u eksperimentu, koji je druga grupa izvela stimulacijom sakrivene ruke ispitanika, pri čemu su ispitanici imali utisak da se stimulacija vrši na virtualnoj ruci projektovanoj iz njihovog ramena (Slater et al., 2009, Slater et al., 2008). U principu bilo bi moguće napraviti bioničku ruku, koja će na prstima imati taktilne senzore, koji će biti povezani sa taktilnim simulatorima na patrljku. Svaki put kada prst proteze dodirne nekakav predmet, senzacija bi bila prenošena na patrljak, a odatle i do mozga. Ova vrsta bioničke ruke bila bi od pacijenta lako doživljena, kao njegov sopstveni deo tela.

## LITERATURA

1. Atroshi, I. & Rosberg, H. E. (2001): Epidemiology of amputations and severe injuries of the hand. *Hand Clin*, 17, 343-50, VII.
2. Bell, C. (1833): *The hand: Its mechanism and vital endowments as evincing design*, London, London : W. Pickering.
3. Botvinick, M. & Cohen, J. (1998): Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391, 756.
4. Burger, H., Maver, T. & Marincek, C. (2007): Partial hand amputation and work. *Disabil Rehabil*, 29, 1317-21.
5. Casale, R., Alaa, L., Mallick, M. & Ring, H. (2009): Phantom limb related phenomena and their rehabilitation after lower limb amputation. *Eur J Phys Rehabil Med*.
6. Chicago, R. I. O. (2010): Searle Rehabilitation Research Center. Chicago, 2010 Rehabilitation Institute of Chicago.
7. Chow, S. P. & Ng, C. (1993): Hand function after digital amputation. *J Hand Surg Br*, 18, 125-8.
8. David Serlin , S. M. (2002): *Artificial Parts, Practical Lives: Modern Histories of Prosthetics*, New York, NYU Press.
9. Davidson, J. (2002): A survey of the satisfaction of upper limb amputees with their prostheses, their lifestyles, and their abilities. *J Hand Ther*, 15, 62-70.
10. Dewez, S. (2010): The sensorial awakening of the bionic hand. *Research EU*, 14-15.
11. Ehrsson, H. H., Rosen, B., Stockselius, A., Ragnö, C., Kohler, P. & Lundborg, G. (2008): Upper limb amputees can be induced to experience a rubber hand as their own. *Brain*, 131, 3443-52.
12. Esquenazi, A. (2004): Amputation rehabilitation and prosthetic restoration. From surgery to community reintegration. *Disabil Rehabil*, 26, 831-6.
13. Esquenazi, A. & Meier, R. H., 3rd (1996): Rehabilitation in limb deficiency. 4. Limb amputation. *Arch Phys Med Rehabil*, 77, S18-28.
14. Fermo C.P., V. C. V., Bastos-Filho T.F., Dymnikov V.I., (2000): Development of an adaptive framework for the control of upper limb myoelectric prosthesis. *Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society*.
15. Graupe D. , M. J., Beex A. (1978): A microprocessor system for multifunctional control of upper-limb prostheses via myoelectric signal identification. *IEEE Trans. Automat. Contr*, 23, 538-544.
16. Harrington, M. E., Daniel, R. W. & Kyberd, P. J. (1995): A measurement system for the recognition of arm gestures using accelerometers. *Proc Inst Mech Eng H*, 209, 129-34.

17. Hopper, R. A., Griffiths, S., Murray, J. & Manktelow, R. T. (2000): Factors influencing use of digital prostheses in workers' compensation recipients. *J Hand Surg Am*, 25, 80-5.
18. Jones, L. (1997): Dextrous hands: human, prosthetic, and robotic. *Presence (Camb)*, 6, 29-56.
19. Jones, L. A. (1989): The assessment of hand function: a critical review of techniques. *J Hand Surg Am*, 14, 221-8.
20. Jones, L. A. (1994): Peripheral mechanisms of touch and proprioception. *Can J Physiol Pharmacol*, 72, 484-7.
21. Keines, G. (1952): *The apology and treatise of Ambroise Parre*, Chicago, University of Chicago Press.
22. Kuiken, T. (2006): Targeted reinnervation for improved prosthetic function. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 17, 1-13.
23. Kuiken, T. A., Li, G., Lock, B. A., Lipschutz, R. D., Miller, L. A., Stubblefield, K. A. & Englehart, K. B. (2009): Targeted muscle reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artificial arms. *JAMA*, 301, 619-28.
24. Kuiken, T. A., Miller, L. A., Lipschutz, R. D., Lock, B. A., Stubblefield, K., Marasco, P. D., Zhou, P. & Dumanian, G. A. (2007): Targeted reinnervation for enhanced prosthetic arm function in a woman with a proximal amputation: a case study. *Lancet*, 369, 371-80.
25. London, B. M., Jordan, L. R., Jackson, C. R. & Miller, L. E. (2008): Electrical stimulation of the proprioceptive cortex (area 3a) used to instruct a behaving monkey. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 16, 32-6.
26. Mason, M. T., & Salisbury, J. K. (1985): *Robot hands and the mechanics of manipulation*, Cambridge, MA, MIT Press.
27. Morita S., K. T., Ito K. (2001): Estimation of forearm movement from EMG signal and application to prosthetic hand control. *2001 IEEE International Conference on robotics and Automation*. Seoul, Korea.
28. Olivett, B. L. (1990): *Adult amputee management and conventional prosthetic training*, St. Louis, CV Mosby.
29. Petkova, V. I. & Ehrsson, H. H. (2009): When right feels left: referral of touch and ownership between the hands. *PLoS One*, 4, e6933.
30. Phillips, C. A. (1988): Sensory feedback control of upper- and lower-extremity motor prostheses. *Crit Rev Biomed Eng*, 16, 105-40.
31. Porter, R. (1996): *The Cambridge Illustrated History of Medicine*, Cambridge University Press
32. Ryaıt, H. S., Arora, A. S. & Agarwal, R. (2009): Study of issues in the development of surface EMG controlled human hand. *J Mater Sci Mater Med*, 20 Suppl 1, S107-14.

33. Scott, R. N., Brittain, R. H., Caldwell, R. R., Cameron, A. B. & Dunfield, V. A. (1980): Sensory-feedback system compatible with myoelectric control. *Med Biol Eng Comput*, 18, 65-9.
34. Scott, R. N. & Parker, P. A. (1988): Myoelectric prostheses: state of the art. *J Med Eng Technol*, 12, 143-51.
35. Slater, M., Perez-Marcos, D., Ehrsson, H. H. & Sanchez-Vives, M. V. (2008): Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Front Hum Neurosci*, 2, 6.
36. Slater, M., Perez-Marcos, D., Ehrsson, H. H. & Sanchez-Vives, M. V. (2009): Inducing illusory ownership of a virtual body. *Front Neurosci*, 3, 214-20.
37. Statistics, N. C. F. H. (1994): Current Estimates From the National Health Interview Survey.
38. Swanson, A. B. (1964): Evaluation of Impairment of Function in the Hand. *Surg Clin North Am*, 44, 925-40.
39. Thurston, A. J. (2007): Pare and prosthetics: the early history of artificial limbs. *ANZ J Surg*, 77, 1114-9.
40. Troyk Pr, D. G., Kerns Da, Weir Rf (2007): IMES: an implantable myoelectric sensor. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2007, 1730-3.
41. Vitali, M., Robinson, K. P., Andrews, B. G., Harris, E. E (1986): *Amputations and prostheses* London, Brailliere, Tindall.
42. Zajdlik, J. (2006): The preliminary design and motion control of a five fingered prosthetic hand. *10th International Conference on Intelligent engineering System*.



# CHALLENGES IN MODELING AND APPLICATION OF NEW GENERATION OF BIONIC HAND

*Dragan Marinković, Dragan Rapačić, Goran Nedović*  
University of Belgrade, Faculty of Special Education and Rehabilitation

## *Summary*

People that have lived through a traumatic amputation often encounter severe depression as a result of a distorted self-image and fear for social rejection. Additionally, phantom pains force the amputee to take strong painkillers and thus complicate a return to the labour market. Over the last few years there were just a few types of hand prostheses on the market. Most of these prostheses have very simple functions like opening and closing the hand, and none of them possess a system for conscious sensory feedback.

Recent development in the field of material sciences, nanobiotechnologies, cognitive neuroscience and information technologies makes possible an intelligent artificial hand displaying most of the basic features of a real human hand. The new generation of bionic hand will have more advanced functions like: several various grip functions, separate finger movements and sensory functions which will help to regulate the grip power. In addition, thought control would be possible using ElectroMyoGraphic (EMG) signals that are recorded by surface electrodes of prosthesis and transmitted to the motor in the artificial hand. Furthermore, the latest research in the field of cognitive neuroscience promises a bionic hand that will be perceived as a true part of the body by simply tricking the brain using so-called “rubber hand illusion”.

The functional new generation of artificial hand could be of great importance in rehabilitation of disabled amputees, helping them to restore self-image and social acceptance or even to bring them back to work.

Key words: bionic hand, prosthesis, rubber hand illusion, limb ownership, artificial neuron network