

# Robotika u neurorehabilitaciji: jučer, danas, sutra

**Tea SCHNURRER-LUKE-VRBANIĆ**

*Klinički bolnički centar Rijeka*

*Dopisivanje s:  
prof. dr. sc. Tea Schnurrer-Luke-Vrbanić  
Zavod za fizikalnu i rehabilitacijsku medicinu  
Klinički bolnički centar Rijeka  
Tome Strižića 3  
51000 Rijeka  
E-mail: fizikalna@kbc-rijeka.hr*

## **Sažetak**

Robotika u neurorehabilitaciji osoba nakon moždanog udara ima svoje mjesto u rehabilitacijskom protokolu. Iako postoje različiti dizajni i vrste robota, dvije su osnovne grupe: egzoskeletni roboti, te roboti koji aktiviraju distalni, krajnji dio uda (od engl. end-effector robot). Obje vrste robota koriste se za rehabilitaciju hemiparetične ruke, te za rehabilitaciju hoda kod hemiparetične noge i oštećenja ravnoteže. Glavni cilj je robotom usmjerena vježba dostizanja zadataka sa stalnim povećanjem intenziteta i broja ponavljanja. Bolesnici koji provode terapiju robotom u kombinaciji s fizioterapijom imaju bolji motorički i funkcijski ishod nego bolesnici koji provode samo fizioterapiju.

Nadalje, bolesnici u subakutnoj fazi imaju veću korist od bolesnika u kroničnoj fazi neurološkog oštećenja, kao što i bolesnici koji imaju težu hemiparezu imaju bolje krajnje rezultate terapije robotom nego bolesnici koji imaju blažu hemiparezu. Usporedbom egzoskeletnog i end-efektornog robota nisu se pronašle razlike u krajnjoj učinkovitosti.

**Ključne riječi:** hemipareza, moždani udar, neurorehabilitacija, robotika.

## **Neurorehabilitation robotics: past, present, future**

### **Summary**

Robotics in brain stroke neurorehabilitation is used as a constituent part of rehabilitation protocols. The diverse robotic devices can be parsed into two broad categories: the „exoskeletal“ and „end-effector“ robotic design. Both robotic devices can be used in hemiparetic hand rehabilitation, as well as in hemiparetic gait rehabilitation and balance impairment. The main rehabilitation goal is task-oriented accompanied by the intensify-matched exercise. Patients who conduct robotics therapy, in combination with physiotherapy, have a significant increase in motoric and functional outcome as compared to the patients who undergo conventional physiotherapy alone.

Furthermore, the patients in subacute phase have greater benefit from robotics than chronic brain stroke patients. In addition, patients who are non-ambulatory at intervention onset may benefit more, but ambulatory patients may not benefit from this type of training.

The role of the type of device (exoskeletal vs. end-effector) is still not clear.

**Key words:** hemiparesis, brain stroke, neurorehabilitation, robotics

### **Uvod**

Robotika u neurorehabilitaciji može se podijeliti u četiri glavne grupe: robotski pomoćnici, proteze, ortoze i terapijski roboti. Robotski pomoćnici su naprave koje pomažu bolesnicima u aktivnostima svakodnevnog života. Proteze su sprave koje nadomještaju funkciju uda. Ortoze pomažu ili sprečavaju pokret u slabim ili paraliziranim udovima. Na kraju, u četvrtoj grupi terapijski roboti pomažu i unapređuju pokret u bolesnika facilitirajući na taj način oporavak, sudjeluju u terapiji i evaluiraju bolesnikov napredak. Prve tri grupe spadaju u tzv. pomoćnu tehnologiju (od engl. assistive technology), a posljednja grupa spada u tzv. terapijsku tehnologiju (od engl. therapeutic technology). U posljednje vrijeme istraživači dijele robotiku po miješanom klasifikacijskom modelu, od kojih je jedan neurorobotika i tu spadaju naprave koje pomažu oporavak neurološkog sustava i pomažu ponovnom uspostavljanju neuronskih putova (1).

S obzirom na to da je pregledom literature zamijećen optimistički stav glede primjene neurorobotike, postavlja se pitanje postoji li za to dovoljno značajan razlog. Naime, prema bazi podataka Svjetske zdravstvene organizacije svake godine 15 milijuna osoba doživi moždani udar, a trećina od njih ostane trajno

onesposobljena (2). Naravno da navedeni podaci ovise o lokalnoj zemljopisnoj varijabilnosti i statistici, ali se ne može zanemariti činjenica za potrebom neurorehabilitacije, te za potrebom razvoja tehnologije kao što su roboti koji pomažu u oporavku, ali i pomažu osobi u svakodnevnom životu suočiti se sa zaostalim oštećenjem i onesposobljenošću.

Dakle, smatra se da roboti predstavljaju revoluciju u rehabilitacijskoj medicini, kao predstavnici tehnologije koja pomaže, unapređuje i kvantificira oporavak, te poboljšava kvalitetu života i samostalnost bolesnika.

U posljednjih dvadesetak godina, područje robotike u rehabilitaciji doživjelo je nagli rast i pri pregledu literature svake godine sve je više istraživanja na tu temu.

U ovom preglednom članku obradit će se osnovne razlike u robotima, te će se prikazati prednosti i nedostaci robota za donji i gornji ud.

Roboti za rehabilitaciju gornjeg i donjeg uda su brojni, različitih dizajna i svrhe, ali se mogu podijeliti u dvije velike grupe. To su egzoskeletni roboti i roboti koji aktiviraju distalni, krajnji dio uda (od engl. end-effector robot). Pomoću egzoskeletnih robota prati se kinematika zglobova, ali glavni nedostatak je vrijeme potrebno za namještanje bolesnika da bi terapija počela, odnosno prilagođavanje duljina poluga i centra vrtnje u zglobovima bolesnikovom udu. Roboti koji aktiviraju krajnji dio uda pokreću nogu ili ruku bolesnika preko aktivacije stopala ili šake. Kao opće pravilo, smatra se korištenje egzoskeletnog robota kada zglob mora izvoditi pokret preko 60 stupnjeva opsega pokreta u zglobu. Ako pokret ne zahtijeva toliki opseg, koristi se robot koji aktivira krajnji dio uda (1).

Egzoskeletne i end-efektorne robote pokreću motori koji imaju svoju težinu i trenje, a sve to se mora uklopiti u dizajn i učinkovitost aparata. Također, jedno od pitanja u dizajnu robota su i stupnjevi slobode koji se mogu izvesti po zglobu, odnosno koliki je optimalni broj stupnjeva slobode po pojedinom zglobu. Stupnjevi slobode odgovarali bi kretnjama u pojedinim ravninama po vrsti zglobnih tijela. Ne postoji robot koji može proizvoditi stupnjeve slobode kao ljudsko tijelo. Stoga se postavlja pitanje koliko stupnjeva slobode je potrebno imati po pojedinom zglobu a da bi se kretnja mogla proizvesti u kontroliranom obliku. Navedeno vrijedi i za gornje i za donje ekstremitete. Za donje ekstremitete gležanj je zglob koji je kritičan zglob za hod, a za gornji ekstremitet izazov je rehabilitacija šake. Iz spomenutog proizlazi pitanje koliko stupnjeva slobode npr. u gležnju ili šaci je potrebno omogućiti

tijekom rehabilitacije. Odgovor možemo dobiti jedino u rezultatima provedenih studija koje se baziraju na biomehanici ljudskog hoda u usporedbi s hodom pod utjecajem robota, te u biomehanici ramena, lakta i šake u usporedbi s funkcijom navedenih zglobova uz pomoć robota (1).

## **Rehabilitacija gornjeg uda s elektromehaničkim robotom nakon moždanog udara**

Veliki izazov u terapiji s robotima nije u njihovoj konstrukciji nego u kliničkoj primjeni. Kako se u svakom izazovu otvaraju daljnje mogućnosti, tako se i ovdje vidjelo da su roboti idealni za objektivizaciju i produciranje stalnog mjerenja i praćenja te kontrole terapije. Klinička primjena se prati kroz rezultate metaanaliza.

Postoji veliki broj robota koji se koriste u rehabilitaciji ruke u bolesnika nakon moždanog udara. Roboti su različito dizajnirani, s glavnim ciljem unaprjeđenja funkcije ruke, uključujući unilateralno nasuprot bilateralnom vježbanju i vježbanje proksimalnog segmenta ruke nasuprot distalnom pristupu (3).

Volpe i suradnici prikazali su rezultate terapije robotom u 96 bolesnika s hemiparezom ruke. Terapija je počela nakon dva tjedna od nastupa prvog akutnog moždanog udara. Provedene su senzomotorne vježbe robotom, 5 puta tjedno, u trajanju 1 sat dnevno, te su izvedene ukupno 25 puta. Vježbe su bile dizajnirane tako da bolesnik mora postići zadani cilj, uključujući kretnje u ramenu i laktu, a robot vodi pokret i uključuje se kada je snaga mišića preslaba da izvede pokret. Kontrolna grupa je uz konvencionalnu terapiju također vježbala s robotom, ali kada je snaga mišića bila preslaba da se izvede pokret, bolesnik bi pokret završio uz pomoć zdrave ruke (bez pomoći robota). Navedena vježba je trajala 1 sat, jednom tjedno. Rezultati su pokazali bolji napredak u motoričkoj procjeni ramenog zgloba i zgloba lakta u grupi koja je imala senzomotorne vježbe uz pomoć robota, nego u kontrolnoj grupi (4).

Ovi rezultati su potvrdili hipotezu da korektna sekvenca pokreta stimulira oporavak, djelujući preko neuroplastičnosti mozga, koja se bazira na činjenici da se neuroni koji se zajedno aktiviraju zajedno i umreže.

Od ukupnog broja 96 bolesnika, isti autori su evaluirali 31 bolesnika, 3 godine nakon pretrpljenog moždanog udara. Cilj je bio procijeniti je li grupa bolesnika koja je imala senzomotorne vježbe uz pomoć robota i dalje motorički bolja od kontrolne grupe, s obzirom na hipotezu da su bolji rezultati mogli biti privremeni i da obje grupe dostižu u kroničnoj fazi isti krajnji motorički ishod. No, krajnji

rezultati su pokazali da je grupa bolesnika koja je imala sensorimotorne vježbe uz pomoć robota zadržala bolji motorički ishod nego kontrolna grupa, iako su bolesnici u obje grupe imali bolje motoričke rezultate nego pri otpustu iz bolnice nakon subakutne faze rehabilitacije. Ovi rezultati također ne potvrđuju rezultate epidemioloških studija po kojima nakon 12 tjedana od moždanog udara postoji mala mogućnost daljnjeg oporavka (5,6). Navedeno pokazuje da prostor za daljnje djelovanje i napredovanje postoji i u kroničnoj fazi onesposobljenja.

Nadalje, poznato je da je neurorehabilitacija dugotrajan proces primjenjivanja terapije i evaluacija postignutog. Opće je prihvaćena forma individualne kineziterapije „jedan na jedan“, dakle jedan fizioterapeut na jednog bolesnika. Vježbanje ponavljajućih zadataka zaslužno je za registrirani napredak u bolesnika. Kahn i suradnici su istraživali intenzitet rehabilitacije, te su evidentirali da u jednoj vježbi „jedan na jedan“ bolesnik učini zadanu vježbu 60-80 puta, a u vježbama pod vodstvom robota bolesnik izvede istu vježbu i preko 1000 puta (7). Da bi se potvrdila važnost intenziteta treninga i treninga po izvršavanju zadataka (od engl. task-oriented training), Volpe i suradnici bolesnike su podijelili u tri grupe. Jedna grupa imala je konvencionalnu terapiju, druga grupa je imala sensorimotorne vježbe uz pomoć robota (ponavljanje vježbe preko 1000 puta), a treća grupa intenzivnu vježbu izvršavanja zadataka po principu „jedan na jedan“ terapije s fizioterapeutom uz pokušaj izvođenja ponavljanja preko 1000 puta. Potrebno je napomenuti da je način vježbanja u trećoj grupi bio izuzetno naporan i zahtijevao je puno vremena te je korišten samo za potrebe studije. Navedeni način vježbanja nije moguće organizirati u svakodnevnom radu. Druga i treća grupa su imale iste rezultate, bez statistički značajne razlike, a obje grupe su imale bolje rezultate od prve grupe (8). Navedene rezultate također potvrđuje i studija Kwakkela (9) i suradnika, koji su naglasili važnost intenzivnog rehabilitacijskog programa po principu izvršavanja zadataka visokog intenziteta (s velikim brojem ponavljanja). Nadalje, Lo i suradnici demonstrirali su robotski sistem za rehabilitaciju ramena i lakta također u kroničnih bolesnika s hemiparezom, no bez statistički značajne promjene u motoričkoj aktivnosti nakon 12 tjedana vježbanja, u usporedbi s intenzivnom terapijom konvencionalnim vježbanjem. No, rezultati su postali statistički značajni nakon vježbanja od 36 tjedana (10).

Dakle, u primjeni robota u neurorehabilitaciji primijenjen je model za motorički oporavak kroz motoričko učenje i ponavljanje zadataka. Prednost pred pasivnim pokretom koji vrši robot, daje se bolesniku, a robot preuzima pokret kada je

mišićna snaga bolesnika preslaba. Također, tijekom cijelog perioda vježbanja bolesnikov napredak se stalno mjeri i prati, što može biti vidljivo i samom bolesniku preko grafikona na zaslonu računara.

U sistematičnoj reviji Prangea i suradnika pregledana je literatura u kojoj su predstavljeni rezultati učinkovitosti raznih dizajna robota za rehabilitaciju ruke u bolesnika s kroničnom hemiparezom ruke, a nakon moždanog udara. Od ukupno 17 kliničkih istraživanja, njih 4 je podvrgnuto krajnjoj analizi. Glavni zaključak je donesen na ukupnom broju od 178 bolesnika, u usporedbi s kontrolnom skupinom od 50 bolesnika. Temeljem navedenog pregleda literature navedena grupa autora zaključila je da korištenje robota u rehabilitaciji ruke poboljšava kratkoročnu i dugoročnu motoričku kontrolu ekstremiteta kod paretičnog ramena i lakta, te daje potvrdu da je motorički oporavak u bolesnika moguć nakon terapije robotom u kroničnoj fazi rehabilitacije (11).

Druga sistematična revija Kwakkela i suradnika u pregledu literature obuhvatila je 218 bolesnika s glavnim zaključkom da postoji statistički značajno poboljšanje motorne funkcije ruke nakon moždanog udara ako se koristi terapija robotom, no bez statistički značajnog poboljšanja u aktivnostima svakodnevnog života. Međutim, glavni nedostatak je što korištene skale mjerenja aktivnosti svakodnevnog života ne mjere adekvatno oporavak paretičnog gornjeg uda (12).

Zaključno, u revijalnom članku Bishop i Stein navode da postojeća literatura podržava integraciju elektromehaničkog robota za rehabilitaciju ruke u postojeće rehabilitacijske protokole, te da s boljom metodologijom istraživanja i uz daljnji tehnološki napredak ima kliničku perspektivu i predstavlja platformu koja se dalje razvija (13).

Rehabilitacija donjeg uda s elektromehaničkim robotom nakon moždanog udara Oporavak hoda je glavni cilj rehabilitacije bolesnika nakon moždanog udara. Tri mjeseca nakon moždanog udara 25% bolesnika vezano je uz invalidska kolica, a 50% bolesnika ima smanjenu brzinu hoda i smanjenu duljinu hodne pruge (smanjena je izdržljivost) (14). Razni koncepti konvencionalne rehabilitacije bazirani su na smanjenju spazma, te fokusirani na izvođenje transfera i izvođenje priprema za hod. Hod se prakticira nedovoljno, obično oko 50 do 100 koraka po vježbi. Moderni koncept rehabilitacije bazira se na postulatu „tko želi hodati, mora hodati“, što znači da se u rehabilitaciji hoda također primjenjuje princip dostizanja zadataka (cilj je hodanje), uz brojna ponavljanja (cilj je što veći broj koraka).

Hod na traci s djelomičnim rasterećenjem tjelesne težine postao je popularan još devedesetih godina prošlog stoljeća (15, 16). Djelomično rasterećenje je potrebno da nadomjesti oštećenu ravnotežu, te da rastereti paretičnu nogu. Hodanje uz brojna ponavljanja u novije vrijeme se zamjenjuje robotom. I tu se koriste dvije vrste robota, egzoskeletni i end-efektni. Cochraneova revija iz 2013. godine kroz pregled literature objavila je rezultate učinkovitosti elektromehaničkog i robotski asistiranog hoda kod bolesnika nakon moždanog udara. U istraživanje su uključene 23 revije, koje su obuhvatile 999 bolesnika. Dakle, elektromehanički i robotski asistirani hod u kombinaciji s fizioterapijom povećava samostalnost u hodu, ali statistički ne povećava brzinu hoda kao niti duljinu hoda (ne povećava kapacitet izdržljivosti). Nadalje, bolesnici u subakutnoj fazi imaju veću korist od robotom asistiranog hoda nego bolesnici u kroničnoj fazi, kao što i bolesnici koji imaju težu hemiparezu i ne hodaju imaju bolje krajnje rezultate terapije robotom, nego bolesnici koji imaju blažu hemiparezu i hodaju uz pomoć pomagala ili treće osobe. Usporedbom egzoskeletnog i end-efektnog robota nisu se pronašle razlike u krajnjoj učinkovitosti (17).

## **Zaključak**

S obzirom na to da se broj bolesnika koji dožive moždani udar povećava, neophodna je organizacija kontinuirane i bolje rehabilitacije. S napretkom tehnologije, integracija robotike u rehabilitacijske protokole ostvariva je više nego ikad prije. Korištenje robota kao dodatne terapije konvencionalnim konceptima obećavajuće je i ima pozitivne dokaze u malim kliničkim studijama. Nadalje, ne postoje studije koje dokazuju prednosti terapije robotom nad tradicionalnim rehabilitacijskim protokolima. Stoga kroz pregled literature možemo zaključiti da bolesnici koji provode terapiju robotom u neurorehabilitaciji nakon moždanog udara, u kombinaciji s fizioterapijom, imaju bolji motorički i funkcijski ishod nego bolesnici koji provode samo fizioterapiju.

No, osim što primjena elektromehaničkih robota ima svakako svojih prednosti, postoje i nedostaci. Naime, poznato je da je dizajn većine robotskih mehanizama, ma koliko sofisticiran bio, glomazan, aparati su većinom statični i teški. Također, čak i najsoficiraniji roboti imaju ograničenje u stupnjevima slobode po pojedinom zglobu, tako da se ne mogu usporediti s pokretom koji može pružiti fizioterapeut u vježbanju „jedan na jedan“, uz napomenu da se s fizioterapeutom ne može osigurati veliki broj ponavljanja kao s robotom. Većina robota ne može se koristiti u prirodnom okolišu, nego je vježbanje ograničeno

na jednu prostoriju. S obzirom na to da je vježbanje ograničeno na stacionarne uvjete, preko ekrana računala bolesnik rješava zadatke i vježba kroz igrice u virtualnoj stvarnosti, te se postavlja pitanje koliko se od navedenog učenja može transferirati u stvarne aktivnosti svakodnevnog života. S druge strane, vježbanje kroz igrice dobra je motivacija za bolesnika, bilježenje rezultata i evaluacija napretka pruža bolesniku osjećaj zadovoljstva, te daje raznolikost u svakodnevnom ritmu rehabilitacije (18).

Nadalje, uloga različitih tipova i dizajna uređaja još uvijek nije u potpunosti jasna i kroz istraživanja nisu rađene usporedne studije učinkovitosti pojedinih tipova aparata. Također nije u potpunosti jasna učinkovita frekvencija vježbanja, te trajanje vježbi na robotu, kao niti koliko dugo traje postignuti učinak.

S daljnjim razvojem tehnologije i s novim dizajnima elektromehaničkih robota navedeni nedostaci će biti umanjeni ili otklonjeni (19), a provođenjem multicentričnih studija doći će se i do rezultata s određenom snagom preporuke u korištenju.

Na kraju i ne manje važno, poznata je činjenica da je elektromehanički robot skupa tehnologija, te stoga u nekim zdravstvenim sustavima postaje izazov uključiti terapiju robotom u rehabilitacijske protokole uz tradicionalne konvencionalne programe. No, unatoč navedenom većina renomiranih rehabilitacijskih ustanova uključila jaelektromehaničke robote u rehabilitacijske protokole kao dodatak konvencionalnoj fizioterapiji, a taj iskorak prepoznat je i od strane bolesnika koji traže takav način rehabilitacije.

## Izjava o sukobu interesa

Autori izjavljuju da nemaju sukob interesa.

## Literatura:

1. Krebs HI, Volpe BT, Hesse S, Lo AC, Stein J, Hogan N. Rehabilitation robotics. U: Frontera WR, urednik. DeLisa' Physical Medicine & Rehabilitation. Philadelphia:Lippincott Williams & Wilkins; 2010. str. 2187-200.
2. World Health Organisation. Dostupno na: <http://www.who.int>.
3. Sale P, Franceschini M, Mazzoleni S, Palma E, Agosti M, Posteraro F. Effects of upper limb robot-assisted therapy on motor recovery in subacute stroke patients. J Neuro-eng Rehabil. 2014;19;11:104-25.
4. Volpe BT, Krebs HI, Hogan N. Is robot-aided sensorimotor training in stroke rehabilitation a realistic option? Curr Opin Neurol. 2001;14(6):745-52.



5. Nakayama H, Jørgensen HS, Raaschou HO, Olsen TS. Recovery of upper extremity function in stroke patients: the Copenhagen Stroke Study. *Arch Phys Med Rehabil.* 1994;75(4):394-8.
6. Jørgensen HS, Nakayama H, Raaschou HO, Larsen K, Hübbe P, Olsen TS The effect of a stroke unit: reductions in mortality, discharge rate to nursing home, length of hospital stay, and cost. A community-based study. *Stroke.* 1995;26(7):1178-82.
7. Kahn LE, Lum PS, Rymer WZ, Reinkensmeyer DJ. Robot-assisted movement training for the stroke-impaired arm: Does it matter what the robot does? *J Rehabil Res Dev.* 2006;43(5):619-30.
8. Volpe BT, Lynch D, Rykman-Berland A, Ferraro M, Galgano M, Hogan N, Krebs HI. Intensive sensorimotor arm training mediated by therapist or robot improves hemiparesis in patients with chronic stroke. *Neurorehabil Neural Repair.* 2008;22(3):305-10.
9. Kwakkel G, Wagenaar RC, Koelman TW, Lankhorst GJ, Koetsier JC. Effects of intensity of rehabilitation after stroke. A research synthesis. *Stroke.* 1997;28(8):1550-6.
10. Lo AC, Guarino PD, Richards LG, Haselkorn JK, Wittenberg GF, Federman DG et al. Robot-assisted therapy for long-term upper-limb impairment after stroke. *N Engl J Med.* 2010;13;362(19):1772-83.
11. Prange GB, Jannink MJ, Groothuis-Oudshoorn CG, Hermens HJ, Ijzerman MJ Systematic review of the effect of robot-aided therapy on recovery of the hemiparetic arm after stroke. *J Rehabil Res Dev.* 2006;43(2):171-84.
12. Kwakkel G, Kollen BJ, Krebs HI. Effects of robot-assisted therapy on upper limb recovery after stroke: a systematic review. *Neurorehabil Neural Repair.* 2008;22(2):111-21.
13. Bishop L, Stein J. Three upper limb robotic devices for stroke rehabilitation: a review and clinical perspective. *NeuroRehabilitation.* 2013;33(1):3-11.
14. Wade DT, Wood VA, Heller A, Maggs J, Langton Hewer R. Walking after stroke. Measurement and recovery over the first 3 months. *Scand J Rehabil Med.* 1987;19(1):25-30.
15. Hesse S, Bertelt C, Schaffrin A, Malezic M, Mauritz KH. Restoration of gait in nonambulatory hemiparetic patients by treadmill training with partial body-weight support. *Arch Phys Med Rehabil.* 1994;75(10):1087-93.
16. Visintin M, Barbeau H, Korner-Bitensky N, Mayo NE. A new approach to retrain gait in stroke patients through body weight support and treadmill stimulation. *Stroke.* 1998;29(6):1122-8.
17. Mehrholz J, Elsner B, Werner C, Kugler J, Pohl M. Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2013;25;7.
18. Blank AA, French JA, Pehlivan AU, O'Malley MK. Current Trends in Robot-Assisted Upper-Limb Stroke Rehabilitation: Promoting Patient Engagement in Therapy. *Curr*

Phys Med Rehabil Rep. 2014;2(3):184-95.

19. 19. Poli P, Morone G, Rosati G, Masiero S. Robotic technologies and rehabilitation: new tools for stroke patients' therapy. Biomed Res Int. 2013;2:1-8.