

# MERJENJE PSIHOFIZIOLOŠKIH ODZIVOV PRI BOLNIKIH PO PREBOLELI MOŽGANSKI KAPI MED VADBO Z ROBOTSKO NAPRAVO HAPTICMASTER *MEASUREMENT OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL RESPONSES IN PATIENTS AFTER STROKE DURING EXERCISE USING THE HAPTICMASTER ROBOT*

Metka Javh, dipl. del. ter., Domen Novak, univ. dipl. inž. el. \*, dr. Nika Goljar, dr. med.,  
prof. dr. Marko Munih, univ. dipl. inž. el. \*

Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije – Soča, Ljubljana

\*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za robotiko

## Izvleček

### Izhodišča:

V predstavljeni študiji smo želeli ugotoviti značilnosti psihofizioloških odzivov bolnikov po preboleli možganski kapi pri izvajanju nalog z okvarjenim zgornjim udom s pomočjo robotske naprave HapticMaster v navideznem okolju.

### Metode:

Triindvajsetim bolnikom po preboleli možganski kapi smo med mirovanjem in izvajanjem nalog s pomočjo haptične robotske naprave (miselno nezahtevno izvajanje nekoordiniranih gibov in miselno zahtevnejša naloga z žogo v navidezni resničnosti) merili štiri različne fiziološke odzive: frekvenco dihanja, elektrokardiogram, prevodnost in temperaturo kože.

### Rezultati:

Psihofiziološki odzivi, izmerjeni pri bolnikih med mirovanjem, so se razlikovali od odzivov, izmerjenih med opravljanjem nalog s pomočjo haptičnega robota. Prevodnost kože se je pri bolnikih med opravljanjem nekoordiniranih gibov zvišala za (povprečje  $\pm$  SD)  $10,0 \mu\text{S} \pm 21,8$ , med opravljanjem naloge z žogo pa za  $20,0 \mu\text{S} \pm 21,8$ . Temperatura kože bolnikov se je med opravljanjem nekoordiniranih gibov zvišala za  $0,2 \text{ K} \pm 0,6$  ( $p < 0,01$ ), med mirovanjem in opravljanjem naloge z žogo pa se

## Abstract

### Background:

The goal of our study was to evaluate psychophysiological responses of stroke patients during upper extremity exercise using the HapticMaster robot and a virtual environment.

### Methods:

Four different psychophysiological responses (electrocardiogram, skin conductance, skin temperature and respiration rate) were measured in twenty-three stroke patients during rest and two different tasks performed with a haptic robot (cognitively undemanding uncoordinated movement and a cognitively demanding ball-catching game played in the virtual environment).

### Results:

Psychophysiological measurements taken during rest were significantly different from measurements taken during tasks performed with the haptic robot. Skin conductance increased by (mean  $\pm$  SD)  $10.0 \mu\text{S} \pm 21.8$  during uncoordinated movement and by  $20.0 \mu\text{S} \pm 21.8$  during the ball-catching game. Skin temperature increased by  $0.2 \text{ K} \pm 0.6$  ( $p < 0.01$ ) during uncoordinated movement and decreased by  $0.3 \text{ K} \pm 0.6$  ( $p = 0.24$ ) during the ball-catching task. Changes in heart rate and respiration rate were small and not statistically significant.

je znižala v povprečju za  $0,3 \text{ K} \pm 0,6$  ( $p = 0,24$ ). Spremembe srčne frekvence in frekvence dihanja bolnikov so bile majhne in statistično neznačilne.

### Zaključki:

Za oceno duševnega stanja bolnikov po možganski kapi so bili pri vadbi na robotski napravi v navideznem okolju najbolj značilni rezultati merjenja prevodnosti in temperature kože bolnikov, medtem ko so spremembe v bitju srca odražale predvsem telesni napor, spremembe dihanja pa so bile majhne in nezanesljive.

### Ključne besede:

haptični robot, možganska kap, psihofiziološki odzivi, navidezna resničnost

### Conclusions:

Skin conductance and skin temperature proved to be the most useful for psychological state estimation in stroke patients during robot-aided training in virtual reality. Changes in heart rate primarily reflected physical activity while changes in respiration rate were small and unreliable.

### Key words:

haptic robot, stroke, psychophysiological responses, virtual reality

## UVOD

Z razvojem visoke tehnologije se v medicinski rehabilitaciji pojavljajo številni novi terapevtski pristopi, med katere prav gotovo sodijo robotske naprave. V sodobnih pristopih k rehabilitaciji nevrološkega bolnika je poudarjeno intenzivno ponavljanje določenih funkcijskih aktivnosti, kar naj bi vplivalo na reorganizacijo centralnega živčevja in izboljšalo bolnikove motorične sposobnosti (1). Sodobni pristopi temeljijo na kognitivno-motoričnem učnem modelu. Študije potrjujejo, da je funkcionalno okrevanje bolnikov večje, če le-ti uporabljajo okvarjene ude in intenzivno vadijo z večkratnimi ponovitvami (2). Za take programe so primerne robotske naprave, saj je vadba z njimi preprosta, ponovljiva, merljiva, omogoča večje obsege gibov ter bolj intenzivno terapijo in nudi objektivno oceno motoričnih spretnosti bolnikov in njihovega napredovanja (3).

Pri rehabilitaciji bolnikov vse bolj uporabljajo robotske naprave, ki so povezane z navidezno resničnostjo, saj uporaba le-teh povečuje bolnikovo motivacijo za vadbo. Vadba v različnih navideznih okoljih je bolj zanimiva, pridobljene izkušnje pa bolniki lahko uporabijo tudi pri vsakodnevnih opravilih (4). Navidezna okolja so lahko zelo različna in omogočajo nešteto nalog, prilagojenih bolnikovim sposobnostim. V navideznem okolju oseba vadi prijeme, različne obsege gibov in grobo moč.

Na začetku so robotske naprave bolnikom omogočale le aktivno pomoč pri vnaprej določenem gibanju, niso pa prilagajale premikanja pri posamezni aktivnosti. Bolnik tudi ni bil sproti seznanjen s svojim sodelovanjem pri gibanju. Zato so v nadaljnjem razvoju robotskih naprav vključili bolnikovo sodelovanje s pomočjo t. i. za pacienta prijaznih metod (patient-cooperative techniques) (5). S pomočjo povratne zveze in s prepoznavanjem bolnikovih gibalnih sposobnosti lahko take naprave prilagodijo robotsko pomoč natančno določeni

aktivnosti (5). V rehabilitacijskih okoljih jih že uporabljajo za vadbo spodnjih (6) in zgornjih udov (7, 8).

Nedavno se je zamisel o bolnikovem sodelovanju pri vadbi na robotskih napravah razširila na t. i. biokooperativne metode (biocooperative techniques) (9), ki poleg posameznikovih gibalnih sposobnosti upoštevajo tudi duševne dejavnike). V robotovo povratno zanko so tako biomehanskim dodane še psihofiziološke meritve. Osnovna domneva psihofiziologije je, da vedenjske, spoznavne, čustvene in socialne pojave spremljajo tudi fiziološki (10). Z merjenjem fizioloških procesov je možno objektivno oceniti bolnikovo duševno stanje (npr. povečano potenje in sprememba srčnega ritma lahko nakazujeta stres) (10).

V Laboratoriju za robotiko na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani razvijajo sistem za rehabilitacijo zgornjih udov. Sistem temelji na haptičnem robotu HapticMaster, ki je povezan z navideznim okoljem, v katerem lahko uporabnik vadi gibanje roke in prijemanje predmetov. Senzorji na robotu merijo gibe, sile in navore, poleg tega pa psihofiziološki senzorji merijo prevodnost kože, temperaturo kože, elektrokardiogram in dihanje uporabnika (11).

Namen naše študije je bil ugotoviti značilnosti psihofizioloških odzivov bolnikov po preboleli možganski kapi pri izvajanju nalog z okvarjenim zgornjim udom s pomočjo robotske naprave HapticMaster v navideznem okolju.

## METODE

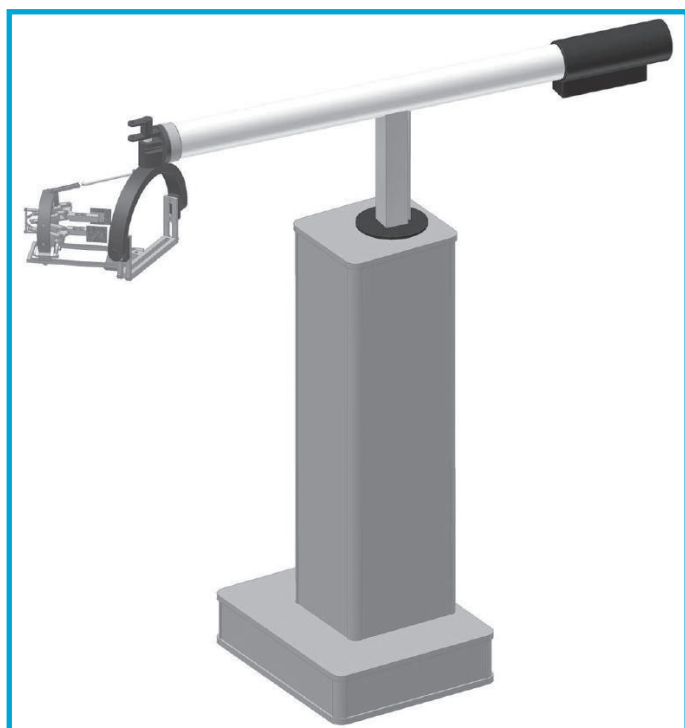
### Bolniki

V študijo smo vključili bolnike, ki so doživeli prvo možganska kap, katere posledica je bila hemipareza, pri čemer so imeli vsaj delno ohranjeno hoteno aktivnost v rami, komolcu

in zapestju okvarjenega zgornjega uda, bili so sposobni slediti navodilom, si jih zapomniti in aktivno sodelovati (pri ocenjevanju s Kratkim preskusom spoznavnih sposobnosti (13) so dosegli več kot 26 točk).

### Robotska naprava HapticMaster

Sistem je sestavljen iz treh delov: haptičnega vmesnika, navideznega okolja in psihofiziološkega merilnega sistema. Haptični robot HapticMaster ima tri prostostne stopnje (tj. tri sklepe, ki se lahko medsebojno neodvisno premikajo) (14). Senzorji na robotu merijo gibe, navore ter sile med robotom in človekom. Slika 1 prikazuje robot HapticMaster.

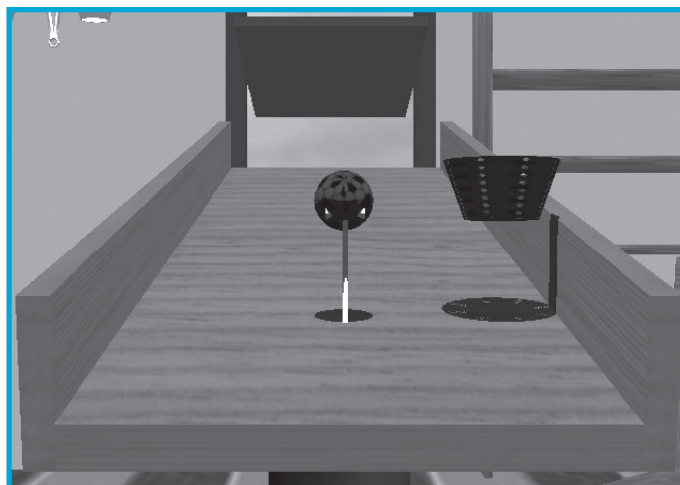


Slika 1: Robot HapticMaster.

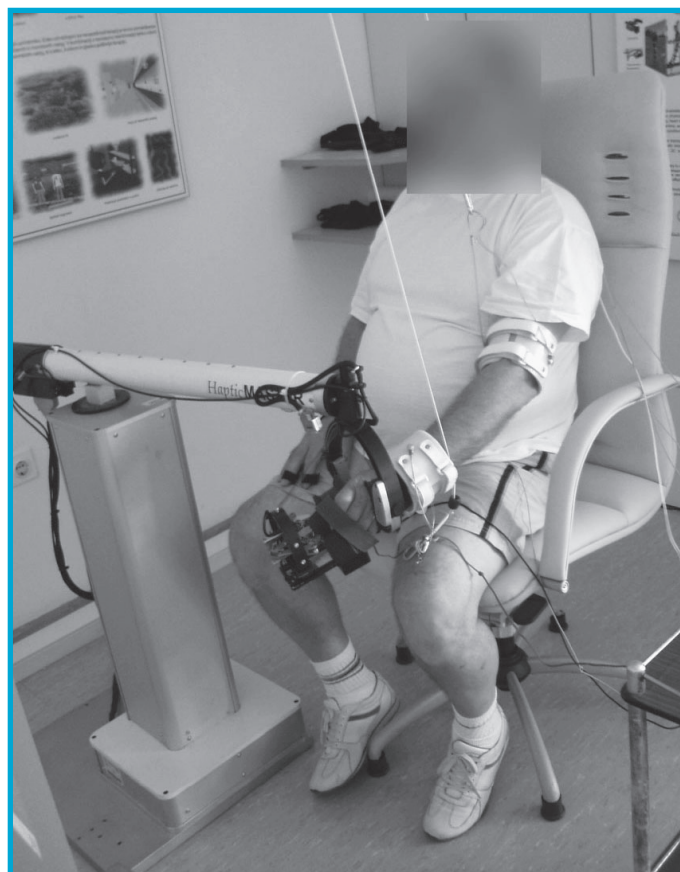
Modul za prijemanje omogoča prijemanje navideznih predmetov v navideznem okolju. V tem modulu sta dva senzorja za merjenje sil. Eden meri silo, ki jo uporabnik izvaja s palcem, drugi pa silo, ki jo uporabnik izvaja s kazalcem in sredincem (15). Robotska naprava nudi tudi različne vrste pomoči. Če oseba sama pri izvajanju naloge ni sposobna premikati ali prijemat, ji pri izvedbi pomaga naprava. Robotska naprava je opremljena še s sistemom za kompenzacijo sile teže zgornjega uda.

Slika 2 prikazuje navidezno okolje, ki je bilo uporabljeno v raziskavi. Sredi zaslona je miza, ki je nagnjena navzdol. Z vrha zaslona se prikotali žoga. Z modulom za prijemanje je treba žogo ujeti. Ko uporabnik žogo prime, se ob robu mize pojavi koš, v katerega je treba žogo položiti. Nato se z vrha zaslona spet prikotali druga žoga in naloga se nadaljuje. Vrh robota (roka) je na zaslonu prikazan s tremi rumenimi oznakami, tako da ga uporabnik med opravljanjem naloge

lahko ves čas vidi in spremlja. Uporabnik samostojno opravlja nalogo in izvaja gibanje. Če tega ne zmore, mu robotska naprava nudi pomoč. Haptično podporo lahko uporabimo pri prijemanju, prenašanju žoge v koš ali pri premikanju v horizontalni ravnini. Raven haptične podpore je odvisna od uporabnikovih sposobnosti.



Slika 2: Navidezno okolje – naloga z žogo.



Slika 3: Bolnik pri opravljanju naloge na robotski napravi.

### Potek izvajanja nalog in meritve

Vsak bolnik je najprej opravil kratko vajo z napravo in potem 3 minute počival. Izmerili smo psihofiziološke signale pri

bolniku v mirovanju, nato pa je bolnik tri minute opravljal nekoordinirane gibe (desno, levo, občasno stisk prstov), tri minute miroval in slednjič tri minute izvajal naloge z žogo.

Ves čas bolnikovega mirovanja in izvajanja nalog smo merili štiri različne fiziološke odzive, ki odražajo duševne spremembe: frekvenco dihanja, elektrokardiogram, prevodnost kože in temperaturo kože. Senzor za dihanje je bil nameščen pod bolnikov nos, štiri elektrode za elektrokardiogram so bile nameščene na sprednji del njegovega prsnega koša, elektrodi senzorja za prevodnost kože na kazalec in sredinec bolnikovega zdravega zgornjega uda, senzor za merjenje temperature kože pa na mezinec njegovega zdravega zgornjega uda.

Med bolnikovim opravljanjem naloge smo zapisovali: število ujetih žog, število žog, položenih v koš, čas dvigovanja žoge, opravljeno vertikalno delo, opravljeno horizontalno delo, povprečno frekvenco srčnega utripa, variabilnost srčnega utripa, povprečno raven prevodnosti kože, frekvenco odzivov prevodnosti kože, amplitudo odzivov prevodnosti kože, povprečno frekvenco dihanja, standardno deviacijo frekvence dihanja in temperaturo kože.

### Statistična analiza

Za statistično primerjavo parametrov, ki smo jih izmerili med mirovanjem bolnikov in njihovim opravljanjem nekoordiniranih gibov, med mirovanjem in opravljanjem naloge z žogo, ter nekoordiniranimi gibi in izvajanjem naloge z žogo smo uporabili parni test *t*.

Raziskavo je odobrila Komisija Republike Slovenije za medicinsko etiko (126/12/08) in Komisija za medicinsko etiko na URI-Soča. Bolniki so sodelovali prostovoljno in podpisali soglasje o sodelovanju v raziskavi.

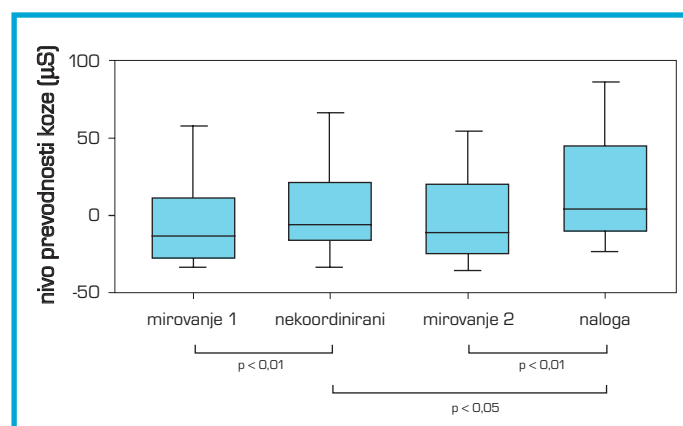
## REZULTATI

V raziskavo smo vključili 23 bolnikov po preboleli možganski kapi (16 moških, 7 žensk, povprečno starih 51.0 let (SD13,5)), ki so bili na rehabilitaciji v URI-Soča. Trinajst jih je imelo hemiparezo po levi strani, deset po desni. Ishemično možgansko kap je prebolelo deset bolnikov, znotrajmožgansko krvavitev devet, subarahnoidno krvavitev pa štirje bolniki. Pred boleznijo so bili vsi desničarji. Čas od začetka bolezni do merjenja je bil povprečno 154 dni (SD 79). Povprečna ocena po Lestvici funkcionalne neodvisnosti (FIM) (12) v času prve meritve je bila 99,5 (motorični FIM 82,7). Štirje bolniki so potrebovali haptično pomoč pri gibanju v horizontalni ravnini, sedem jih je potrebovalo pomoč pri prijemanju žoge, osem pa pri dvigovanju žoge v koš. Nekateri med njimi so potrebovali vse tri ravni haptične pomoči.

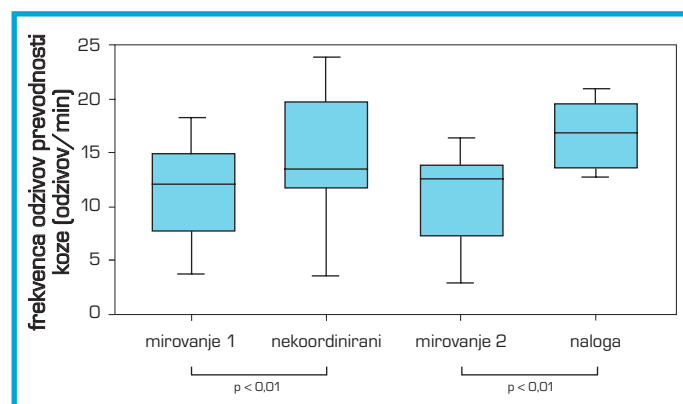
Pri obravnavani skupini bolnikov po preboleli možganski kapi so se v mirovanju izmerjeni psihofiziološki odzivi razlikovali od odzivov, izmerjenih med opravljanjem naloge s pomočjo haptičnega robota.

Prevodnost kože, ki je sicer s časom v povprečju padala, se je pri bolnikih med opravljanjem nekoordiniranih gibov zvišala za 10,0  $\mu$ S (SD 21,8) v primerjavi s tisto, izmerjeno med mirovanjem bolnikov, med opravljanjem naloge z žogo pa se je zvišala za 20,0  $\mu$ S (SD 21,8) (slika 4). Razlike v prevodnosti kože med bolnikovim mirovanjem in med njegovim izvajanjem nekoordiniranih gibov ter mirovanjem in izvajanjem naloge z žogo so bile statistično značilne ( $p < 0,001$ ).

Statistično značilne spremembe med bolnikovim mirovanjem in gibanjem smo ugotovili tudi pri pogostnosti odzivov prevodnosti kože (slika 5).



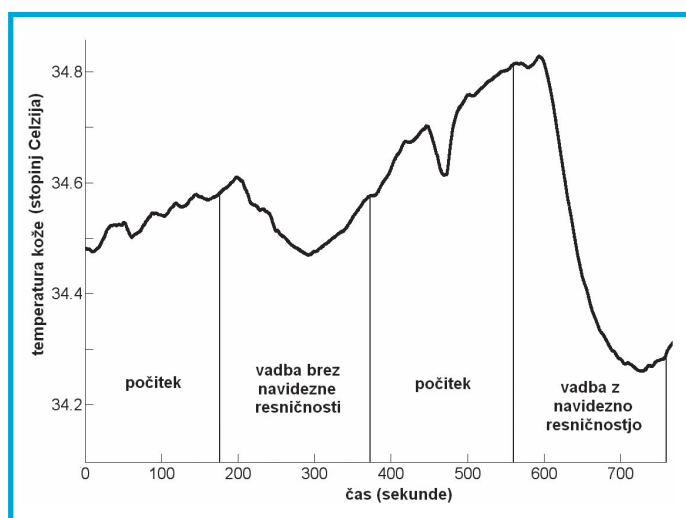
Slika 4: Spremembe v prevodnosti kože med bolnikovim mirovanjem in opravljanjem nekoordiniranih gibov, med mirovanjem in opravljanjem naloge z žogo ter med opravljanjem nekoordiniranih gibov in naloge z žogo.



Slika 5: Spremembe v frekvenci odzivov prevodnosti kože med bolnikovim mirovanjem in opravljanjem nekoordiniranih gibov, med mirovanjem in opravljanjem naloge z žogo.

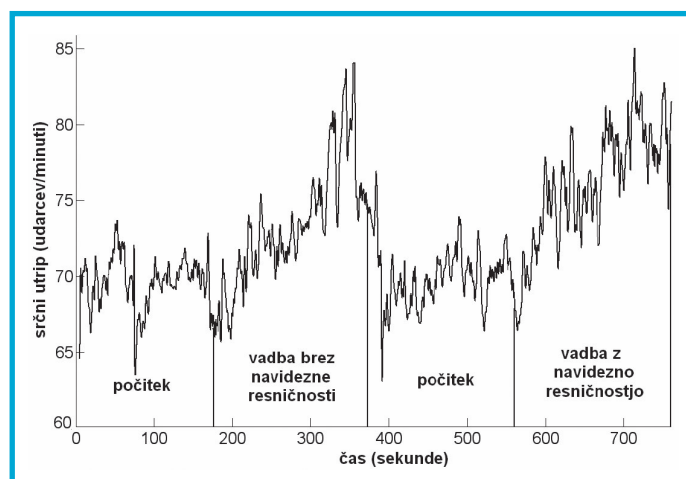
Temperatura kože se je pri bolnikih med opravljanjem nekoordiniranih gibov zvišala za 0,2 K (SD 0,6) ( $p < 0,01$ )

v primerjavi s temperaturo, izmerjeno med mirovanjem bolnikov, med opravljanjem naloge z žogo pa se je znižala v povprečju za 0,3 K (SD 0,6) ( $p = 0,24$ ) (slika 6).



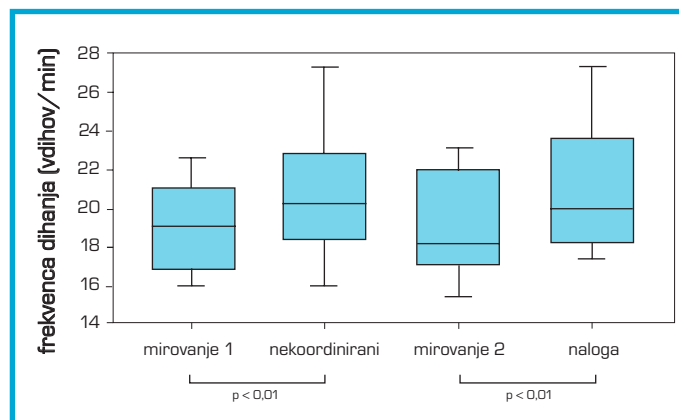
**Slika 6:** Spreminjanje temperature kože pri bolnikih med mirovanjem, opravljanjem nekoordiniranih gibov in izvajanjem naloge z žogo.

Spremljali smo tudi spremembe v bitju srca (slika 7), vendar niso bile statistično značilne. Frekvenca bitja srca pri bolnikih se je med opravljanjem nekoordiniranih gibov in naloge z žogo v povprečju povečala za štiri udarce na minuto v primerjavi z bitjem srca v mirovanju.



**Slika 7:** Spremembe frekvence srčnega utripa pri bolnikih med izvajanjem nekoordiniranih gibov in opravljanjem naloge z žogo.

Frekvenca dihanja pri bolnikih je bila med opravljanjem obeh nalog višja kot v mirovanju. Med opravljanjem naloge z žogo je bila višja kot pri opravljanju nekoordiniranih gibov ( $p = 0,046$ ), a so bile razlike majhne. Frekvenca dihanja se je pri nekaterih bolnikih med opravljanjem nalog kljub telesnemu naporu celo znižala.



**Slika 8:** Spremembe frekvence dihanja pri bolnikih med mirovanjem in izvajanjem nekoordiniranih gibov ter med mirovanjem in opravljanjem naloge z žogo.

## RAZPRAVA

V raziskavah o medsebojnem vplivanju med človekom in računalnikom se psihofiziološki odzivi uporabljajo za objektivno ocenjevanje uporabnikovega duševnega stanja (16-19). Kot pokazatelj duševne aktivnosti se na splošno najbolj uporabljajo srčna frekvenca, prevodnost in temperatura kože prstov ter dihanje (20). Vse to so odzivi avtonomnega živčevja. Seveda na tovrstne odzive ne vpliva samo človekovo duševno stanje, pač pa tudi vsaka telesna aktivnost. Zato poskušajo telesno aktivnost pri psihofizioloških meritvah čim bolj omejiti. Če pa bi psihofiziološke meritve želeli uporabljati v robotskih napravah za rehabilitacijo, bi jih bilo treba izvajati med telesno aktivnostjo. Pri zdravih prostovoljcih so ugotovili, da je to do neke mere mogoče (21).

Pri bolnikih po preboleli možganski kapi je lahko spremenjeno tudi delovanje avtonomnega živčevja (22). Pomembno vprašanje je, ali bi psihofiziološke meritve tudi pri bolnikih v zadostni meri odražale duševno aktivnost pri telesni vadbi na robotski napravi in v navideznem okolju.

Po naših ugotovitvah so sicer psihofiziološki odzivi bolnikov po preboleli možganski kapi šibkejši kot pri zdravih prostovoljcih (21), vendar se razlikujejo pri bolnikih v mirovanju in med izvajanjem različnih nalog na robotski napravi.

Spremembe prevodnosti kože, ki odražajo stopnjo duševnega odziva na določen dražljaj (23), so bile pri bolnikih po preboleli možganski kapi bolj izrazite med miselno zahtevno nalogo kot med miselno nezahtevno. Še bolj so se med miselno nezahtevno in miselno zahtevno nalogo razlikovale spremembe temperature kože, saj se je le-ta v prvem primeru zvišala, v drugem pa znižala. To potrjujejo tudi izidi predhodnih psihofizioloških študij, v katerih so ugotovili, da se temperatura kože pri ljudeh med telesno obremenitvijo zviša (24), med čustveno obremenitvijo in delom z računalnikom pa zniža (25).

Srčno frekvenco lahko uporabljamo kot kazalec telesne in miselne obremenitve (26). Menimo, da so spremembe bitja srca pri naših bolnikih odražale predvsem telesni napor, saj se je srčna frekvenca v povprečju povečala za 4 udarce na minuto. Veltman poroča, da se pri miselnem delu, potrebnem pri reševanju sestavljenih nalog, srčna frekvenca zniža (27).

Frekvenca dihanja je povezana s čustveno vznemirjenostjo (28). Pri naši skupini bolnikov je bila med opravljanjem obeh nalog višja kot v mirovanju, med nalogo z žogo pa je bila višja kot pri opravljanju nekoordiniranih gibov. Razlike so bile relativno majhne in kot pokazatelj miselnega napora nezanesljive, saj se je pri nekaterih bolnikih frekvenca dihanja med opravljanjem nalog celo znižala.

Psihofiziološke meritve nam nudijo vpogled v subjektivno počutje bolnika. Tako lahko dopolnijo podatke, ki jih dobimo s pomočjo senzorjev sil in navorov med bolnikovim gibanjem na robotski napravi. Za najbolj uporabne so se izkazale meritve prevodnosti in temperature kože. Senzorja za prevodnost in temperaturo kože bolnikov nista ovirala in motila. Tudi meritve elektrokardiograma jih niso motile, vendar je bilo za nameščanje elektrod potrebno več časa. Najbolj jih je motil senzor za dihanje. Pogosto so ga premikali s prsti, kar je pri meritvah povzročalo motnje. Merjenje sprememb pri dihanju je motilo tudi bolnikovo govorjenje.

Ker imajo mnogi bolniki po preboleli možganski kapi težave pri dvigovanju roke, se je sistem, ki pomaga pri gibanju zgornjega uda, izkazal kot zelo uporaben.

Po sodobnih spoznanjih je pri rehabilitaciji bolnikov z okvaro centralnega živčevja za boljše pomnjenje in s tem boljši izid vadbe, poleg intenzivne vadbe z veliko ponovitvami, izredno pomembno stalno usmerjanje bolnikove pozornosti (29). V klinični praksi si zato v bodoče veliko obetamo od tehnološko naprednih rehabilitacijskih robotskih sistemov. Če bi med vadbo pri bolnikih sproti ugotavljali psihofiziološke odzive, bi lahko vadbo prilagodili bolnikovim trenutnim sposobnostim. Ugotovili bi, ali se pacient dolgočasi ali je preobremenjen, in temu prilagodili težavnost naloge ali kompleksnost navideznega okolja ter lažje ohranili bolnikovo pozornost in motivacijo.

Zaradi pozitivnih izkušenj pri merjenju psihofizioloških odzivov pri bolnikih, ki vadijo na robotski napravi, pričakujemo, da bodo biokooperativne robotske sisteme še naprej razvijali in da se bodo le-ti uveljavili tudi v klinični praksi.

## ZAKLJUČEK

Od psihofizioloških meritev, ki smo jih opravili pri bolnikih po preboleli možganski kapi med njihovim izvajanjem nalog

z okvarjenim zgornjim udom s pomočjo robotske naprave HapticMaster, sta se za oceno duševnega stanja bolnikov najbolj izkazali merjenje prevodnosti in temperature kože. Spremembe bitja srca pri bolnikih so odražale predvsem telesni napor, spremembe dihanja pa so bile majhne in nezanesljive.

## Literatura:

1. Goljar N, Kurillo G, Poje J, Bajd T. Metoda sledenja za izboljšanje funkcije roke po možganski kapi. In: Burger H, Damjan H, Grabljevec K, ur. III. slovenski kongres fizikalne in rehabilitacijske medicine: zbornik predavanj, Kranjska Gora, 5.-7. oktober 2006. Ljubljana: Inštitut Republike Slovenije za rehabilitacijo, 2006: 68-70.
2. Goljar N. Rehabilitacija bolnikov po preboleli možganski kapi v bodočnosti. In: Marinček Č, Burger H, ur. Rehabilitacija v prihodnosti. 20. jubilejni dnevi rehabilitacijske medicine: zbornik predavanj, Ljubljana, 3. in 4. april 2009. Ljubljana: Inštitut Republike Slovenije za rehabilitacijo, 2009: 10-3. [http://ibmi.mf.uni-lj.si/rehabilitacija/vsebina/Rehabilitacija\\_2009\\_S1\\_p010-013.pdf](http://ibmi.mf.uni-lj.si/rehabilitacija/vsebina/Rehabilitacija_2009_S1_p010-013.pdf)
3. Harwin WS, Patton JL, Edgerton VR. Challenges and opportunities for robot-mediated neurorehabilitation. *Proc. IEEE* 2006; 94(9): 1717-26.
4. Marchal-Crespo L, Reinkensmeyer DJ. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury. *J Neuroeng Rehabil* 2009 Jun 16; 6: 20. [http://www.smpp.northwestern.edu/~smpp\\_pub/HarwinEtAl\(2006\)ProceedingsOfTheIEEE94.pdf](http://www.smpp.northwestern.edu/~smpp_pub/HarwinEtAl(2006)ProceedingsOfTheIEEE94.pdf)
5. Riener R, Lünenburger L, Jezernik S, Anderschitz M, Colombo G, Dietz V. Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2005; 13(3): 380-94.
6. Emken JL, Benitez R, Reinkensmeyer DJ. Human-robot cooperative movement training: learning a novel sensory motor transformation during walking with robotic assistance-as-needed. *J Neuroeng Rehabil* 2007 Mar 28; 4: 8. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1847825/?tool=pubmed>
7. Wolbrecht ET, Chan V, Reinkensmeyer DJ, Bobrow JE. Optimizing compliant, model-based robotic assistance to promote neurorehabilitation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2008; 16(3): 286-97.
8. Barkana DE, Sarkar N. Towards a smooth human-robot interaction for rehabilitation robotic systems. *Adv Robot* 2009; 23(12-13): 1641-62.

9. Munih M, Riener R, Colombo G, Lünenburger L, Müller F, Slater M, Mihelj M. MIMICS: Multimodal immersive motion rehabilitation of upper and lower extremities by exploiting bio cooperation principles. In: IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics, Kyoto, 23-26 June 2009. IEEE, 2009: 127-32.
10. Hugdahl K. Psychophysiology: the mind-body perspective. Cambridge: Harvard University Press, 1998.
11. Muhih M, Bajd T, Mihelj M. Bio-kooperativna vloga rehabilitacijske robotike . In: Marinček Č, Burger H, ur. Rehabilitacija v prihodnosti. 20. jubilejni dnevi rehabilitacijske medicine: zbornik predavanj, Ljubljana, 3. in 4. april 2009. Ljubljana: Inštitut Republike Slovenije za rehabilitacijo, 2009: 27-33. [http://ibmi.mf.uni-lj.si/rehabilitacija/vsebina/Rehabilitacija\\_2009\\_S1\\_p027-033.pdf](http://ibmi.mf.uni-lj.si/rehabilitacija/vsebina/Rehabilitacija_2009_S1_p027-033.pdf)
12. Grabljevec K. Lestvica funkcijske neodvisnosti (FIM). In: Burger H, Goljar N, ur. Ocenjevanje izida v medicinski rehabilitaciji. 14. dnevi rehabilitacijske medicine: zbornik predavanj, Ljubljana, 4. in 5. april 2003. Ljubljana: Inštitut Republike Slovenije za rehabilitacijo, 2003: 59-65.
13. Brejc T. Kratek preizkus spoznavnih sposobnosti (KPSS) oziroma Mini Mental State Examination (MMSE) pri napovedovanju in ocenjevanju izida medicinske rehabilitacije. In: Burger H, Goljar N, ur. Ocenjevanje izida v medicinski rehabilitaciji. 14. dnevi rehabilitacijske medicine: zbornik predavanj, Ljubljana, 4. in 5. april 2003. Ljubljana: Inštitut Republike Slovenije za rehabilitacijo, 2003: 67-74.
14. Van der Linde RQ, Lammertse P. HapticMaster – a generic force controlled robot for human interaction. *Ind Rob* 2003; 30(6): 515-24. <http://www.student-life.pl/Sztuczna%20inteligencja/Sztuczna%20Inteligencja%20HapticMaster.pdf>
15. Podobnik J, Mihelj M, Munih M. Upper limb and grasp rehabilitation and evaluation of stroke patients using HenRiE device. In: *Virtual Rehabilitation 2009. International Conference, Haifa, Israel, June 29 - July 2, 2009*, IEEE, 2009:173-178. [http://robo.fe.uni-lj.si/pdf\\_avi/Podobnik\\_VR2009.pdf](http://robo.fe.uni-lj.si/pdf_avi/Podobnik_VR2009.pdf)
16. Meehan M, Insko B, Whitton M, Brooks FP. Physiological measures of presence in stressful virtual environments. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002*; 21(3): 645-653. [http://physiologicalcomputing.net/CHI2002/chi\\_papers/Meehan\\_PhysiologicalPresence.pdf](http://physiologicalcomputing.net/CHI2002/chi_papers/Meehan_PhysiologicalPresence.pdf)
17. Slater M, Guger C, Edlinger G, Leeb R, Pfurtscheller G, Antley A, et al. Analysis of physiological responses to a social situation in an immersive virtual environment. *Teleoper Virtual Environ* 2006; 15(5): 553-69. <http://www.cs.ucl.ac.uk/research/vr/Projects/Presencia/PRES-ENCE/paper-submitted.pdf>
18. Rani P, Sarkar N, Smith CA, Kirby LD. Anxiety detecting robotic system – towards implicit human-robot collaboration. *Robotica* 2004; 22(1): 85-95.
19. Kulić D, Croft E. Physiological and subjective responses to articulated robot motion. *Robotica* 2007; 25(1): 13-27.
20. Andreassi JL. Psychophysiology: human behavior and physiological response. 4th ed. Psychology Press, 2000.
21. Novak D, Mihelj M, Munih M. Psychophysiological responses to different levels of cognitive and physical workload in haptic interaction. *Robotica* 2010. doi: 10.1017/S0263574710000184, [v tisku].
22. Korpelainen JT, Sotaniemi KA, Myllyla VV. Autonomic nervous system disorders in stroke. *Clin Auton Res* 1999; 9(6): 325-33.
23. Duffy DG, ed. Handbook of digital human modeling. Boca Raton: Taylor & Francis; CRC Press, 2008.
24. Romet TT, Frim J. Physiological responses to fire fighting activities. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1987; 56(6): 633-8.
25. Ohsuga M, Shimono F, Genno H. Assessment of phasic work stress using autonomic indices. *Int J Psychophysiol* 2001; 40(3): 211-20.
26. Mulder G, Mulder LJM, Meijman TF, Veldman JPB, van Roon, AM. A psychophysiological approach to working conditions. In: Backs RW, Bouscein W, eds. *Engineering psychophysiology: issues and applications*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2000: 139-59.
27. Veltman JA, Gaillard AW. Physiological workload reactions to increasing levels of task difficulty. *Ergonomics* 1998; 41(5): 656-69.
28. Mandryk RL, Inkpen KM, Calvert TW. Using psychophysiological techniques to measure user experience with entertainment technologies. *Behav Inf Technol* 2006; 25(2): 141-58.
29. Dombovy ML. Understanding stroke recovery and rehabilitation: current and emerging approaches. *Curr Neurol Neurosci Rep* 2004; 4(1): 31-5.