

# BIO-KOOPERATIVNA VLOGA REHABILITACIJSKE ROBOTIKE *BIOCOOPERATIVE ROLE OF REHABILITATION ROBOTICS*

Prof. dr. Marko Munih, univ. dipl. inž. el., prof. dr. Tadej Bajd, univ. dipl. inž. el.,  
doc. dr. Matjaž Mihelj, univ. dipl. inž. el.  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

## Povzetek

Napredek na področju rehabilitacijske robotike je bil v zadnjih 15 letih znatno, kar se še naprej kaže za bližnjo prihodnost. Prispevek najprej na kratko prikazuje trenutno stanje, nato pa v nadaljevanju predstavlja glavne zanimivosti na novo financiranega evropskega projekta MIMICS. Osnovna hipoteza temelji na dejstvu, da je mogoče vadbo gibanja pri nevrološki rehabilitaciji bistveno izboljšati s pomočjo več modalnosti, s spreminjanjem in prilagajanjem okolja. Največ je mogoče trenutno pričakovati od sprotnega merjenja vedenja in fizioloških podatkov na osebi ter na osnovi tega adaptivno in dinamično spreminjati sceno na zaslonu, haptične informacije in zvok, vse v namen visoke motivacije pacienta. Projekt poteka sočasno na dveh sistemih, za spodnje in za zgornje ude. Sistema omogočata zapisovanje podatkov iz številnih senzorjev (gibanja, sil, zvoka, mišične in srčne aktivnosti, prevodnosti in temperature kože ter dihanja) ter sprotno oceno splošnega psiho-fiziološkega stanja pacienta. Tako pridobljene informacije bodo uporabljene za spreminjanje scene na 3D zaslonu, za 3D zvok in haptiko. Potekajo poskusi, da bi ugotovili splošne zakonitosti občutka prisotnosti v navideznem okolju pri človeku. MIMICS tehnologija tudi vstopa s testnimi sistemi v rehabilitacijsko klinično okolje (osebe po možganski kapi in poškodbi hrbtenjače).

## Ključne besede:

večmodalnost, robot, haptični vmesnik, navidezna resničnost, merjenje

## Summary

*Rehabilitation robotics has advanced significantly in the last 15 years and seems to continue in that manner in the close future. The article first gives an outline of the current state in the field and then presents the main features of the newly financed European project MIMICS. The main hypothesis is based on the fact that motor training in neurological rehabilitation can be enhanced significantly by means of multiple modality, changes to and adaptations of the environment. At present, the most can be expected from constant measuring of behavior and physiological data, which then serves as the basis for adaptive and dynamic changes of the scene on the screen, of haptic information and sound – all for the purpose of the patient's strong motivation. The project is carried out on two systems at the same time; for lower and upper limbs. The two systems enable data gathering by means of numerous sensors (of movement, forces, sound, muscular and cardiac activity, skin conductance and temperature as well as breathing) and constant evaluation of the general psycho-physiological condition of the patient. The collected data is then used for changes of the scene on a 3D screen, for the 3D sound and haptics. There have been experiments conducted to identify general characteristics of an individual's feeling of presence in virtual environment. Through its test systems, MIMICS technology has entered rehabilitation clinical environment (persons after stroke and spinal cord lesions).*

## Key words:

*multiple modality, robot, haptic interface, virtual reality, measurement*

## HIPOTEZA IN KONCEPT

Glavni motiv za prihodnje raziskave temelji na dejstvu, da je mogoče nevrološko rehabilitacijo gibanja bistveno izboljšati z uporabo navidezne resničnosti in večmodalne senzorične povratne informacije, tako pri spodnjih kot zgornjih udih.

V večmodalni sistem je lahko sestavljen iz treh modalnosti: haptična zagotavlja občutke dotika z navideznim okoljem, vizualne za posredovanje realističnega 3D vidnega učinka ter kvalitetnega 3D zvočnega sistema. Običajno povratna zanka detektira pacientovo aktivnost v navideznem okolju in nastavlja mehanske parametre vadbe. Drugi pomemben

vidik povratne zanke je merjenje pacientovega telesnega in duševnega stanja in njegovega vpliva na večmodalno okolje. Obe zanki skupaj predstavljata principe bio-sodelovanja med strojem in človekom. Tak tehnični sistem bi se bil sposoben prilagajati trenutnemu stanju pacienta glede na smiselni namen vadbe in glede na specifično trenutno stanje oz. motorični primankljaj, kar pomeni bolj naravno in varno interakcijo med človekom in robotom.

Pričakovati je modularno zgradbo sistema, s posameznimi moduli za snemanje, procesiranje in posredovanje večmodalnih informacij na takšen način, da bo pacient bolj motiviran za gibalno vadbo in to z največjo prizadevnostjo. Zajemanje biomehanskih in psiholoških parametrov preko senzorjev za različne modalnosti bo omogočilo interpretacijo fiziološkega stanja in vsaj približen vpogled v pacientovo duševno stanje ter s tem ugotavljanje stopnje njegove motivacije. Nadalje, zanka od tako zajetih informacij do večmodalnega navideznega okolja, ki osebi omogoča gibanje znotraj navideznega okolja, manipulacijo navideznih objektov, opazovanje posledic gibanja in telesne aktivnosti je pričakovati, da pacienta ne bo samo potopila v navidezno okolje, ampak ga bo tudi znatno motivirala za vadbo z največjim navdušenjem, prizadevanjem in to na zabaven način. Takšno večmodalno okolje omogoča zaposlitev velikega števila človekovih motoričnih in senzoričnih poti in na ta način povzroči znatne pozitivne spremembe v pacientovem centralnem živčnem sistemu.

### Trenutno stanje in razvoj v prihodnje

Trenutni terapevtski pristopi pri pacientih s težjimi poškodbami možganov ali po možganski kapi so zasnovani na tehnikah spodbujanja senzorične, nadzorovanju mišičnega tonusa v skladu s tehniko Bobath, postopnim ojačevanjem, na biološki povratni zanki ali električni stimulaciji (1, 2). Več študij je prikazalo boljši uspeh rehabilitacije pri uporabi nalog iz vsakdanjega življenja, pri intenzivni terapiji in močni motivaciji (3-6).

Čeprav je bilo pokazano, da zgodnja in intenzivna terapija izboljša funkcionalno stanje po kapi in drugih nevroloških boleznih, so trenutni rehabilitacijski programi običajno krajši in manj intenzivni kot bi bilo potrebno za optimalen terapevtski rezultat. Znana je pomembnost motivacije za uspeh rehabilitacije (7, 8).

Razvitih je bilo večje števil robotskih platform za namen rehabilitacije spodnjih (9-11) in zgornjih udov (12-15). Dostopnost teh različnih platform zahteva ustrezne načine računalniškega vodenja in uporabniške aplikacije. Trenutno doseženi učinki navidezne resničnosti niso prepričljivi, saj sposobnosti pacientov očitno niso ustrezno izkoriščene, npr. stopnja vključenosti v navidezno okolje ni merjena ali ocenjena.

Neizogibno je in praktično vse raziskovalne skupine vključujejo navidezno resničnost (VR) kot orodje v rehabilitaciji

funkcij rok ali nog in na ta način povečujejo motivacijo. Pogosto stopnjo kompleksnosti za posamezno osebo ročno prilagodijo ali se izognejo nalogam, ki bi jih oseba le s težavo naredila. Nastavitev stopnje kompleksnosti, prilagojene posameznemu pacientu znotraj naloge v VR, je kritičnega pomena za obnovitev sposobnosti zaznavanja in motorike. Navidezna okolja povzročijo občutek prisotnosti (16-19). Vzpostavljeni občutek prisotnosti bi bilo mogoče uporabiti za motivacijo in ustrezno zaposlitev pacienta v rehabilitaciji.

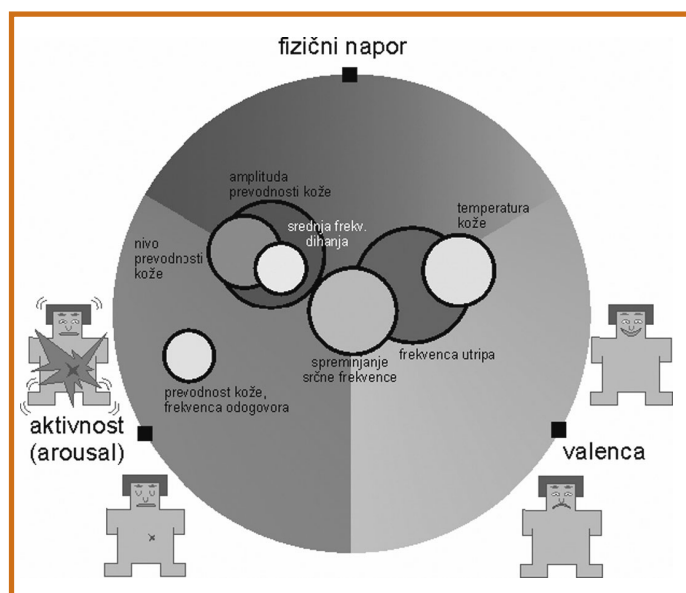
Da bi ustrezno združili različne modalnosti (vidno, zvočno, haptično) ter pravilno nastavljali dozo občutka prisotnosti senzoričnemu sistemu pacienta, je potreben senzorični sistem za vsaj posredno meritev prisotnosti v VR. To informacija bi bilo mogoče naprej spremeniti v ustrezne spremembe različnih primitivov v haptični, zvočni in vidni modalnosti. V praksi lahko občutek prisotnosti razumemo kot stopnjo, do katere se udeleženci odzivajo in delujejo realistično v navideznem okolju, torej podobno, kot če bi senzorične informacije iz navideznega sveta predstavljale resnične situacije in dogodke (20). Odziv na takšne situacije je lahko raznolik, od nezavednih psihičnih reakcij (npr. v prevodnosti kože, frekvenci utripa srca in spremembi hitrosti utripanja srca), do tipskih odzivov, hotenih vedenjskih odzivov, preko čustvenih in zavestnih odzivov, vključno z občutkom prisotnosti v scenariju, ki je predstavljen v navideznem okolju.

Občutek prisotnosti je bil prvotno definiran kot občutek "biti tam" v scenariju, predstavljenem v navideznem okolju, prikazanem na zaslonu (17, 21). To je mogoče definirati na bolj praktičen način kot dejanski, konkreten odziv na dražljaj v navideznem okolju, kjer je odziv mišljen kot odziv v večmodalnem okolju, torej vključujoč najprej psihične, vedenjske, čustvene in odzive na nivoju zaznavanja. Spremenljivke je mogoče spremljati sproti, tudi take, povezane z občutkom prisotnosti, prebujenosti oz. aktivnosti in tudi stresa, vpletenosti ter tudi četrte spremenljivke poimenovane kot "pavze v prisotnosti".

### MIMICS pristop

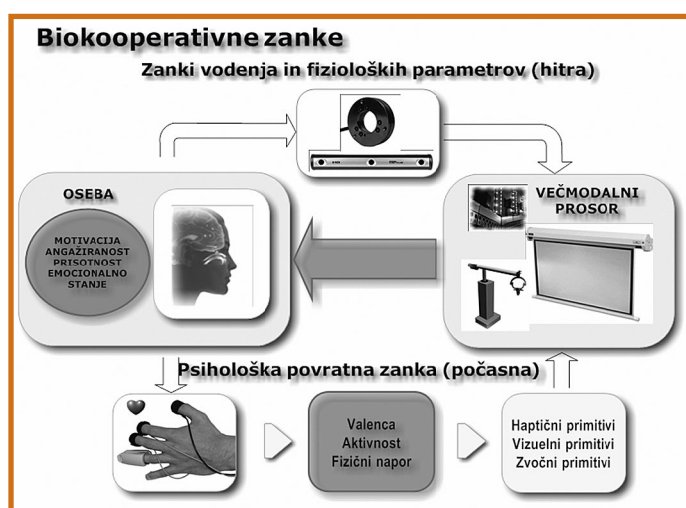
Ta projekt gradi, vključuje in izkorišča velik napredek na področju povezave med človekom in strojem, zasnovane na mehanskem dotiku ter direktni komunikaciji med človekom in strojem. Ta direktna komunikacija je definirana kot komunikacija, kjer je telesno in duševno stanje osebe interpretirano na stroju. Stanja, kot so stres, zaskrbljenost, zaposlenost in mišični napor so vključena v fizio-psihološki prostor, ki ga je mogoče predstaviti vzdolž osi, poimenovanih kot valenca, aktivnost in telesna aktivnost (22-27).

Na človeka vpliva večmodalno okolje preko haptike, videa in zvoka, kar povzroči biomehanske in psihološke učinke na človeka. Duševno stanje osebe je zajeto preko bioloških signalov, vključujoč EKG preko R-valov, časov med dve-



**Slika 1:** Vpliv valence (počutja), aktivnosti in telesne aktivnosti na različne psihične parametre. Razdalja kroga od črnega kvadrata predstavlja vpliv, privlačnost, ki ga ima ta kvadrata na obravnavano spremenljivko. Krajša razdalja pomeni močnejši vpliv. Premer krogca predstavlja večjo razpršenost med subjekti. Čustveno stanje (aktivnost, valenca) je mogoče ugotoviti z merjenjem in analizo psihičnih parametrov (meritev MIMICS).

ma normalnima utripoma srca (NN intervali), standardno deviacijo NN intervalov kot kazalcem spreminjanja srčnega utripa (heart rate variability, HRV), signal prevodnosti kože je pravzaprav razdeljen v dve komponenti, samo prevodnost kože (skin conductance level, SCL) in spreminjanja vrednosti prevodnosti (skin conductance responses, SCR). Merjena je tudi absolutna in sprememba telesne temperature, kot tudi parametri, povezani z dihanjem osebe. Vse izmerjene



**Slika 2:** Robot je nadgrajen z večmodalnim okoljem. Različni senzorji so uporabljeni za merjenje uporabnikove motorične aktivnosti, kot tudi čustvenega, duševnega stanja. Izmerjeni podatki se sproti preračunavajo in preko povratne zanke lahko vplivajo na spreminjajočo se stopnjo kompleksnosti naloge, s čimer bi optimirali pacientov občutek prisotnosti.

vrednosti se odrazijo, preslikajo v valenco, aktivnost in telesni napor. Na osnovi teh informacij je potrebno zagotoviti ustrezno spreminjanje haptičnih, vidnih in zvočnih primitivov. S tem novim načinom se človek znajde v povratni zanki (slika 2).

V tem pristopu so kot haptične naprave uporabljeni obstoječi rehabilitacijski roboti (Lokomat in HapticMaster). Te naprave so izpopolnjene, tako da nadzirajo silo med robotom in človekom (impedančne in admitančne sheme), tako da so bolj voljni, z visoko stopnjo kooperativnosti in lahko reagirajo na pacientovo mišično aktivnost. Na ta način bo pacient hkrati zaposlen in tudi motiviran, da bi vidne in zvočne spodbude pretvoril v sile in gibanje, torej haptično delovanje robotske naprave. Haptična povezava je nadvse pomembna za uspešno motorično učenje in rehabilitacijo pacienta.

## METODOLOGIJA

### Lokomat za spodnje ude

Eden od dveh robotskih platform je Lokomat, namenjen za pomoč in podporo pri vadbi hoje na tekočem traku (slika 3). Lokomat je obojestranski robotski pripomoček, uporabljen v kombinaciji s podpornim sistemom za razbremenitev telesne teže in zagotavljanje gibanja pacientovih nog v sagitalni ravnini. Lokomatove sklepe za kolko in koleno poganjajo linearni pogoni, integrirani v ohišje segmentov robota (28). Pasivni mehanizem dviganja zagotavlja dorzifleksijo gležnja med fazo zamaha. Noge pacienta se s pomočjo robota premikajo po zelo ponovljivih trajektorijah v kolku in kolenu, kar v tem primeru temelji v osnovi na pozicijskem vodenju. Navore v kolku in kolenu je mogoče določiti preko senzorjev sil, integriranih v mehanizem Lokomata.



**Slika 3:** Robotska naprava Lokomat za vadbo hoje skupaj z vidnim zaslonom in zvočnim sistemom

## HENRiE za zgornje ude

Rahabilitacijski sistem za zgornje ude je sestavljen iz haptičnega vmesnika HapticMaster (Moog FCS Inc.), naprave za prijemanje, dveh kompenzatorjev gravitacije in manšete za pritrditev zapestja (slika 4). Haptični vmesnik zagotavlja ustrezno velik delovni prostor in ima tri aktivne prostostne stopnje. Na vrhu je pritrjen pasivni mehanizem z dvema rotacijskima stopnjama, kar omogoča reorientacijo subjektove roke (pronacija, supinacija roke je omejena). Takšen osnovni sistem je nadgrajen z mehanizmom, ki ima eno prostostno stopnjo, namenjeno vadbi prijemanja s prsti. Tako je omogočeno približevanje, prijemanje in premikanje predmetov. Vsi sestavni deli skupaj predstavljajo rehabilitacijski sistem za zgornje ude, ki omogoča preproste naloge prijemanja in prenašanja predmetov, kot tudi vadbo bolj kompleksnih aktivnosti iz vsakdanjega življenja in seveda sprotno spreminjanje v navideznem okolju.

Oseba sedi na stolu, brez rotacije okrog vertikalne osi, in je na ustrezen način povezana na naslon, da bi preprečili večje gibe trupa telesa. Dve manjši manšeti sta povezani vertikalno proti stropu z dvema vrvicama na dve aktivni stopnji, namenjeni za kompenzacijo teže roke zaradi gravitacije. Zapestje je nameščeno v tretjo manšeto, pritrjeno v mehanizmu na vrhu haptičnega vmesnika. Prste namestimo v manjšo manšeto, palec posebej in druge štiri prste skupaj.



*Slika 4: Oseba med vadbo s HENRiE sistemom: mehanizem za prijemanje je nameščen na vrh HapticMaster haptičnega vmesnika, 3D projekcijski sistem je nameščen pred osebo, dve manšeti za roko povezujeta z dvema motorjema kompenzatorjev gravitacije, nameščenima na stropu nad osebo.*

## Sistem za merjenje psihičnih odzivov

Za snemanje EKG so uporabljene vnaprej pripravljene standardne elektrode, pokrite z želatino, namenjene za enkratno uporabo. Namestimo jih na standardne točke. Za merjenje prevodnosti kože je uporabljen senzor g.GSR (g.tec Medical

Engineering GmbH). Elektrode so nameščene na srednji člen drugega in tretjega prsta nedominantne roke s pomočjo Velcro™ trakov. Hitrost dihanja je zajeta preko senzorja SleepSense, katerega glavni del je termistor. Namesti se pod nos in je občutljiv na dihanje tako skozi nos kot tudi skozi usta. Periferna temperatura kože je merjena s pomočjo senzorja g.TEMP (g.tec Medical Engineering GmbH), nameščenega z medicinskim lepilnim trakom na distalni členek petega prsta.

## VZORCI SCENARIJEV

### Scenarij pri spodnjih udih: hoja skozi mesto

Tipični dogodek v takem okolju za pacienta po možganski kapi bi bila hoja skozi mesto s pomočjo Lokomata in tekočega traku. Koti, sile, EMG signali in drugi bio signali, povezani s psihičnimi parametri se merijo in posredujejo krmilniku Lokomata. 3D računalniški model okolja se spreminja glede na prej omenjene signale, ustrezne vidne in zvočne informacije so posredovane na zaslon in v zvočnike. Oseba vidi svojo hojo na 3D zaslonu. Medtem ko hodi skozi mestno okolje, se sooča z različnimi situacijami, npr. stopiti mora preko ovir, brcniti žogo, prečkati ozek mostiček nad globokim kanjonom, prečkati križišče s semaforjem, težje hodi (sila dušenja je večja) skozi globoko vodo ali sneg, mora se povzpeti po klančini navgor ali spustiti navzdol. Druge efekte, kot je npr. veter, je mogoče dodati za čim bolj realistično predstavo in večji občutek resničnosti.

Oseba je lahko narisana in vidna informacija, podana v prvi perspektivi, kot to običajno gledamo, lahko pa je podana na način, kot ga vidi zunanja kamera, oz. tudi lastne dele telesa v vsakdanjem življenju. Pacient lahko uporabi zvočna navodila za prilagajanje parametrov na vrednosti, usklajene z osebniimi željami ali na optimalne vrednosti glede na status terapije. Zvočni signal je uporabljen v primeru ustrezne hitrosti hoje s fiziološko pravilnim vzorcem. Zvok je mogoče modulirati



*Slika 5: Primer scenarija med hojo osebe po mestu.*

glede na želeno smer gibanja. Okolje je mogoče prilagajati glede na splošno stanje pacienta (npr. stopnja stresa), kot je to ocenjeno iz izmerjenih psihičnih podatkov. V primeru, ko se oseba počuti neprijetno, je mogoče scenarij spremeniti, tako da ponovno postane bolj sproščena. Motivacijski cilji za subjekt so socialni, npr. izkoristiti radovednost, kaj opazuje ali počne množica čez cesto ali na koncu ulice. Ali morebiti želja po ponovnem klepetu z zanimivo osebo na koncu ulice.

### Scenarij pri zgornjih udih: navidezni terapevt (Virtual Therapist, VPT)

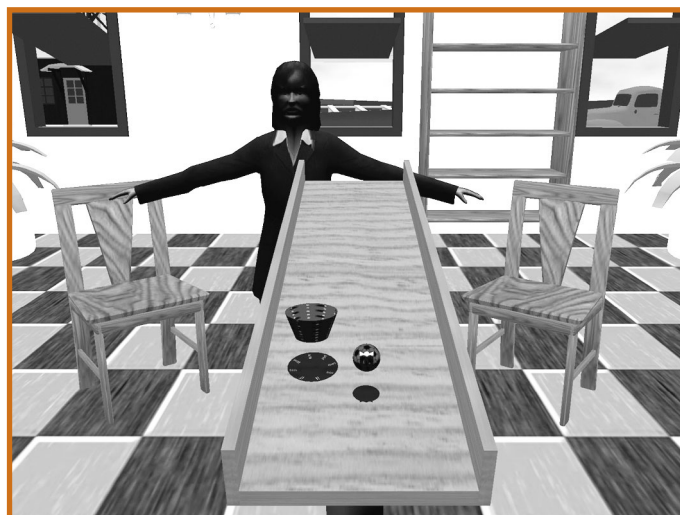
Ta scenarij za vadbo vključuje med drugim navideznega terapevta. Predstavljajmo si pacienta, sedečega na stolu, z roko nameščeno v HENRiE napravi. Teža roke je delno kompenzirana s pomočjo aktivnega sistema za kompenzacijo gravitacije. Naprava za prijemanje je pritrjena na vrh robota, oseba lahko preko nje posebej aktivira palec na eni strani, potem še vse druge štiri prste skupaj. 3D projekcijski zaslon je postavljen približno 1 m pred osebo, med pacientom in zaslonom je še robot. Zvočniki so nameščeni v okolici kot 5.1 ali 7.1 sistem.

Na zaslonu je prikazana v 3D načinu med drugim tudi oseba, fizioterapevt. Zaradi 3D vidnega načina prikaza je videti, kot da je roka te osebe pravzaprav na vrhu robota, ker pa je roka pacienta tudi na vrhu robota, ima pacient občutek, da je roka navideznega terapevta v vidnem stiku z roko pacienta. Pri tem pa občutek sile med njima zagotavlja robot (haptičnost). VPT lahko navidezno vodi vadbo, pri čemer so uporabljene ustrezne grafične tehnike za kvaliteten prikaz grafike.

VPT, pravzaprav robot, lahko pasivno premika roko pacienta, torej opravi vse delo in vodi roko na pozicijski način, brez pacientovega aktivnega sodelovanja. Nasprotno temu je lahko medsebojni vpliv zelo majhen ali ga sploh ni, robot (VPT) enostavno sledi gibom pacienta. Med tema skrajnostima lahko robot zagotavlja le delno pomoč, ali generira sile nasprotne gibanju, lahko vnaša motnje pri gibanju ali nakazuje smeri gibanja. Pacient lahko navidezno prime roko VPT (taktilna povratna zveza), med tem lahko občuti težo roke ali predmeta. Mogoči so scenariji raznih iger med tema dvema osebama. V vseh primerih je mogoče trajektorije, sile, smer, gibanje in časovno koordinacijo dobro nadzorovati. Omenjeni haptični odzivi so del algoritmov vodenja, vključujoč predprogramirane trajektorije, navidezne tunele z nastavljivi impedačnimi parametri, tudi polj ali gradientov sil ter impulzov sil in motenj.

VPT se lahko odziva ne le preko haptike, ampak tudi vidno (kretnje, mimika, obleka) ter z zvokom (ukazi, komentarji, spodbudni komentarji). Vse to pacientu omogoča tudi nekakšen socialen stik, VPT lahko deluje spodbudno (nasmeh, spodbude pri dogajanju) ali se odziva bolj brezbržno. Dodatno so za spodbujanje v prizorišče lahko

vključene še druge osebe. Če pravkar opisana socialna komponenta ni uporabljena v scenariju, so v isti nalogi še vedno lahko prisotni, npr. navidezni tuneli in druge metode, ki osebi nakažejo predvideno aktivnost. Haptične informacije, torej dotik, ostanejo enake kot ob prisotnosti VPT. Doseženi učinek opisanih metod je mogoče izmeriti z biomehanskimi in fiziološkimi odzivi (hitrosti gibov, območja gibanja, usmerjenost sil in velikost, prijemanje in natančnost ter koordinacijo prijemanja), kognitivne odzive (koordinacijo in natančnost gibanja, načrtovanje gibanja) in duševnih reakcij (veselje, sprostitvev po dobro opravljeni nalogi, neprijetnost v neprijetnih, težkih situacijah, navdušenje ob pohvalah in spodbudah VPT, razočaranje in jeza v primerih brezbržnosti VPT).



*Slika 6: Eksperimentalno okolje z navideznim fizioterapevtom (VPT) – 3D projekcijski zaslon (bele barve) z VPT projekcijo v 3D, HapticMaster robot z modulom za prijemanje ter oseba med vadbo z navideznim fizioterapevtom.*

### ZAKLJUČEK

Tudi na področje rehabilitacije nezadržno prodirajo ugotovitve in sistemi z drugih področij življenja. Najmodernejši sistemi so načrtovani z namenom, da bi dosegli pozitiven učinek v času rehabilitacije, še posebej in dodatno s povečano motivacijo pacienta, kar bi dosegli z uporabo več modalnosti, vključujoč haptiko, dobre vidne učinke in s kakovostno reprodukcijo zvoka ter seveda zaradi tega s pacientovo večjo aktivnostjo med terapijo.

Lokomat dovoljuje kompleksne vzorce in režime hoje, medtem ko HENRiE dovoljuje prijemanje in manipulacijo s predmeti, VPT pa zanimivo stimulatívno platformo. Sprotno zajemanje biomehanskih odzivov ter fizioloških signalov z osebe omogoča adaptívno in dinamično spreminjanje preko vida z namenom čim večje motivacije pacienta. Predlagani avtomatizirani rehabilitacijski sistem poleg izboljšane rehabilitacije omogoča tudi ocenjevanje napredka rehabilitacije z objektivnimi indeksi v numerični in grafični obliki, hitro

razumljivi strokovnjakom, ki delajo na področju rehabilitacije. Podatki o silah/navorih, kot tudi o pozicijah/hitrostih so dostopni za analizo.

## Zahvala

Delo je financirano iz EU ICT Collaborative Project MIMICS, projekt 215756, kot tudi s sredstvi Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Moog FCS je za projekt prijazno posodil enega od dveh HapticMaster robotov.

Avtorji se zahvaljujejo kolegom v projektu MIMICS: Robert Riener, Gery Colombo, Lars Lünenburger, Friedman Müller, Mel Slater, Martin Simnacher, Marc Bolliger, Lukas Zimmerli, Alexander Koenig, Marc Sapa, Domen Novak, Andrej Olenšek, Jaka Zuherl, Jason Kastanis, Anna Bellindo in Pere Brunet.

## Literatura:

- Bobath B. Adult hemiplegia: evaluation and treatment. 2nd ed. London: Heinemann, 1978.
- Langhammer B, Stanghelle JK. Bobath or motor re-learning programme? A comparison of two different approaches of physiotherapy in stroke rehabilitation: a randomized controlled study. *Clin Rehabil* 2000; 14(4): 361-369.
- Langhorne P, Wagenaar R, Partridge C. Physiotherapy after stroke: more is better? *Physiother Res Int* 1996; 1(2): 75-88.
- Platz T. Evidenzbasierte Armrehabilitation: Eine systematische Literaturübersicht. *Nervenarzt* 2003; 74: 841-849.
- Kwakkel G, Kollen BJ, Wagenaar RC. Long term effects of intensity of upper and lower limb training after stroke: a randomised trial. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2002; 72(4): 473-479.
- Kwakkel G. Impact of intensity of practice after stroke: issues for consideration. *Disabil Rehabil* 2006; 28(13-14): 823-830.
- Robertson I, Murre J. Rehabilitation of brain damage: brain plasticity and principles of guided recovery. *Psychol Bull* 1999; 125(5): 544-575.
- Liebermann DG, Buchman AS, Franks IM. Enhancement of motor rehabilitation through the use of information technologies. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2006; 21(1): 8-20.
- Hesse S, Uhlenbrock D. A mechanized gait trainer for restoration of gait. *J Rehabil Res Dev* 2000; 37(6): 701-708.
- Reinkensmeyer DJ, Aoyagi D, Emken J, Galvez J, Ichinose W, Kerdanyan G, et al. Robotic gait training: toward more natural movements and optimal training algorithms. *Proc. IEEE Eng Med Biol Soc Conference, San Francisco, Sept. 2005*: 4818-4821.
- 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): 380-394.
- Krebs HI, Hogan N, Aisen ML, Volpe BT. Robot-aided neurorehabilitation. *IEEE Trans Rehabil Eng* 1998; 6(1): 75-87.
- Harwin W, Loureiro R, Amirabdollahian F, Taylor M, Johnson G, Stokes E, et al. The Gentle/s project: a new method for delivering neuro-rehabilitation. In: Marinček C, et al., eds. *Assistive technology-added value to the quality of life: AAATE'01*. Amsterdam: ISO Press, 2001: 36-41.
- Lum PS, Burgar CG, Shor PC, Majmundar M, Van der Loos M. Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2002; 83(7): 952-959.
- Riener R, Nef T, Colombo G. Robot-aided neurorehabilitation for the upper extremities. *Med Biol Eng Comput* 2005; 43(1): 2-10.
- Ellis SR. Nature and origin of virtual environments: a bibliographic essay. *Comput Syst Eng* 1991; 2(4): 321-347.
- Sheridan TB. Further musings on the psychophysics of presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 1996; 5(2): 241-246.
- Slater M, Wilbur S. A framework for immersive virtual environments (FIVE): speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 1997; 6(6): 603-616.
- Draper JV, Kaber DB, Usher JM. Telepresence. *Hum Factors* 1998; 40(3): 354-375.
- Sanchez-Vives MV, Slater M. From presence to consciousness through virtual reality. *Nat Rev Neurosci* 2005; 6(4): 332-339.

21. Held RM, Durlach NI. Telepresence. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 1992; 1(1): 109-112.
22. Wiederhold BK, Wiederhold MD. Lessons learned from 600 virtual reality sessions. Cyberpsychol Behav 2000; 3: 393-400.
23. Mandryk R, Inkpen M, Calvert T. Using psychophysiological techniques to measure user experience with entertainment technologies. Behav Inf Technol 2006; 25: 141-158.
24. Boucsein W, Haarmann A, Schaefer F. Combining skin conductance and heart rate variability for adaptive automation during simulated IFR flight. In: Engineering psychology and cognitive ergonomics. Heidelberg: Springer, 2007: 639-647.
25. Russell JA. A circumplex model of affect. J Pers Soc Psychol 1980; 39: 1161-1178.
26. Peter C, Herbon A. Emotion representation and physiology assignments in digital systems. Interact Comput 2006; 18: 139-170.
27. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and physical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Eur Heart J 1996; 17(3): 354-381.
28. Colombo G, Jörg M, Schreier R, Dietz V. Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis. J Rehabil Res Dev 2000; 37(6): 693-700.