

# URJENJE ČLOVEKOVIH SPODNJIH UDOV V OKOLJU NAVIDEZNE PRISOTNOSTI *LOWER-EXTREMITIES TRAINING IN TELEPRESENCE ENVIRONMENT*

dr. Tomaž Koritnik, univ. dipl. inž. el. \*, dr. Gregorij Kurillo, univ. dipl. inž. el. \*\*, akad. prof. dr. Tadej Bajd, univ. dipl. inž. el. \*, prof. dr. Ruzena Bajcsy \*\*, prof. dr. Marko Munih, univ. dipl. inž. el. \*

\* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za robotiko in biomedicinsko tehniko, Ljubljana, Slovenija

\*\* University of California at Berkeley, Department of Computer Science and Electrical Engineering, Teleimmersion Lab, Berkeley, California, USA

## Izvleček

### Izhodišča:

Napredek v razvoju navidezne resničnosti uporabnikom omogoča občutek navidezne prisotnosti. V navideznem prostoru je lahko hkrati navidezno prisotnih več ljudi z različnih, med seboj oddaljenih lokacij. S sistemom videokamer in hitrega mrežnega prenosa podatkov lahko le-ti v tem prostoru med seboj sodelujejo v realnem času. Tak pristop je lahko osnova za postopke rehabilitacije na daljavo.

### Metode:

Omogočili smo prikazovanje dveh oseb hkrati v istem trirazsežnem video okolju. Ena oseba je imela vlogo navideznega učitelja, druga pa je sledila gibom prve osebe z opazovanjem gibanja učitelja na zaslonu. Naloga je bila preprosta – sledenje korakanju na mestu. Poleg video prikaza obeh oseb smo v okolje vključili še navidezne predmete, ki so predstavljali tarče za sledenje, da bi tako poudarili jasnost vidne povratne zveze.

### Rezultati:

Namen študije je bil prikazati smiselnost uporabe sistema, ki ustvarja okolje navidezne prisotnosti za rehabilitacijo na daljavo. Skupina zdravih ljudi je uspešno izvedla nalogo sledenja korakanju na mestu. Primerjali smo kakovost sledenja med dvema načinoma – z dodatnimi navideznimi predmeti in brez njih. Prikaz dodatnih tarč za sledenje je omogočil boljše prostorsko in časovno prilagoditev navideznemu učitelju.

### Zaključki:

Pokazali smo, da tehnologija z uporabo komponent, ki so razmeroma poceni, omogoča občutek navidezne prisot-

Prispelo: 12. 2. 2010

Sprejeto: 29. 3. 2010

## Abstract

### Background:

*Progress in virtual reality technologies provides the users with a feeling of telepresence. A shared virtual environment can host several individuals from mutually distant locations and enable them to interact with each other in real time via a system of video cameras and fast network-based data transmission. Such approach can represent a basis for telerehabilitation practices.*

### Methods:

*We enabled visualization of two persons at the same time in the same 3D video environment. One person represented a virtual teacher, the movements of whom the other person was instructed to track by observing the motion on-screen. The tracking task was simple – stepping in place. Later we included additional virtual objects as tracking targets to enhance visual feedback.*

### Results:

*The focus of our investigation was to demonstrate the feasibility of the telepresence system for use in telerehabilitation. A group of healthy individuals successfully performed the tracking task of stepping in place. We compared the tracking results of video only with video enhanced by virtual targets, and concluded that better spatial and temporal adaptation was achieved when additional tracking targets were displayed.*

### Conclusions:

*We showed that current technology provides the user with a feeling of telepresence suitable for practices in telerehabilitation, using relatively affordable equipment. In this way, the patients can participate in the rehabilitation process from home. Regarding motivation, economic and*

nosti, ki je ustrezna za izvajanje nalog pri rehabilitaciji na daljavo. Na ta način so bolniki v proces rehabilitacije lahko vključeni tudi doma. Z vidika poenostavljanja in ekonomičnosti procesa rehabilitacije bolnikov, katerih gibanje je omejeno zaradi bolezni in poškodb, in je zanje obiskovanje klinike težko izvedljivo, pomeni tak sistem rehabilitacije na daljavo dobrodošel napredek pri uvajanju novih tehnologij v terapijo.

### **Ključne besede:**

okolje navidezne prisotnosti, vidna povratna zveza, obogatena resničnost, urjenje spodnjih udov

*organizational aspects, such a system is a welcome addition for patients with impaired motion who experience difficulties leaving home.*

### **Key words:**

*telepresence, visual feedback, virtual environment, augmented reality, lower-extremities training*

## **UVOD**

Okolje navidezne prisotnosti je razvijajoča se tehnologija, ki omogoča razvoj telerehabilitacije – rehabilitacije na daljavo. Uporabnikom na različnih lokacijah omogoča navidezno prisotnost in sodelovanje v skupnem navideznem okolju. Združuje okolje navidezne resničnosti, ki omogoča vključevanje dodatnih navidezni predmetov in informacij, računalniški vid za zajem in trirazsežni (3D) prikaz telesa uporabnika ter mrežne tehnologije za prenos podatkov med porazdeljenimi lokacijami v realnem času s kar najmanjšim zamikom. Od obstoječih telekonferenčnih sistemov se tak pristop razlikuje v tem, da uporabnikom omogoča občutek prisotnosti v skupnem navideznem 3D okolju in ne zgolj povezave med različnimi lokacijami z video sliko in zvokom. Občutek prisotnosti lahko še dodatno poudarimo z navideznimi predmeti, s katerimi lahko hkrati ravna več uporabnikov, ali pa predmete uporabimo kot pomoč pri izvajanju vaj s sledenjem.

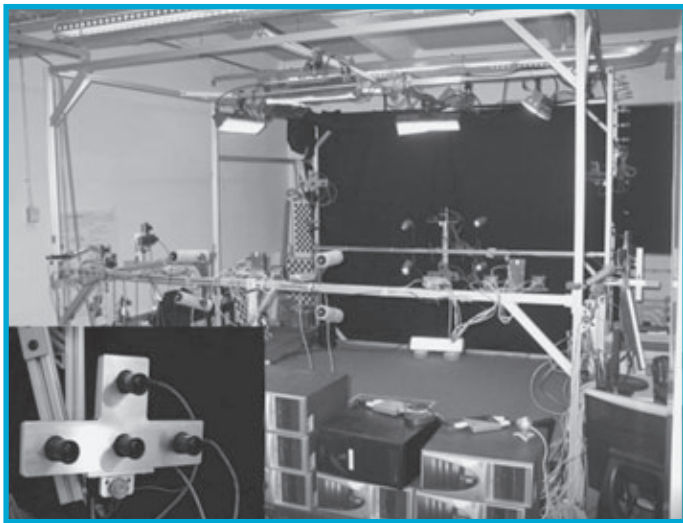
Realističnost prikazovanja uporabnika je bistvena lastnost pri vzpostavljanju občutka prisotnosti v navideznem okolju. Običajno prikazovanje osebe v računalniško generiranem navideznem okolju poteka z navidezno podobo, ki je bolj ali manj poenostavljeno prikazovanje fizikalnih značilnosti z omejenim številom parametrov (16). Za prikazovanje gibanja podobe je potrebno sledenje in ocenjevanje gibov osebe v resničnem okolju. V nasprotju s takim prikazovanjem 3D video rekonstrukcija omogoča realističen prikaz s polno dinamiko in nezmanjšano kompleksnostjo gibanja. Vključevanje navidezne resničnosti in računalniško generiranih predmetov ustvarja hibridno navidezno okolje in oba pristopa poveže v koncept obogatene resničnosti.

V takem hibridnem okolju so že bili uspešno izvedeni poskusi izvajanja skupinskega plesa na oddaljenih lokacijah (1), učenja večšine Tai-Či (2, 3) ter ravnanje z navideznimi predmeti dveh uporabnikov na različnih lokacijah (4). V

tej raziskavi smo preučili uporabnost okolja navidezne prisotnosti za namen rehabilitacije na daljavo, tako da je na eni strani oseba, ki predstavlja terapevta, na drugi strani pa oseba, ki predstavlja bolnika. Terapevt kot navidezni učitelj izvaja gibe, druga oseba pa ga mora v realnem času kar najbolje posnemati. Osredotočili smo se na izvajanje naloge sledenja za spodnje ude. Uporabnost sistema za ta namen smo ocenili s sposobnostjo prilagajanja zdravih oseb referenčnim gibom učitelja pri nalogi korakanja na mestu. Korakanje na mestu ima v kliničnem okolju že dolgo zgodovino. Prvič se je pojavilo pred več kot 50 leti za zaznavanje periferne vestibularne disfunkcije (5), v zadnjem desetletju pa vstopa tudi v rehabilitacijsko okolje. Uporabljeno je bilo pri bolnikih po možganski kapi (6) ter s Parkinsonovo boleznijo (7). Korakanje na mestu ne more nadomestiti vadbe in analize hoje, a ima z mehanizmi hoje dovolj podobnosti, ki utemeljujejo primerjavo: gre za usklajeno periodično gibanje spodnjih udov z izmeničnim dostopanjem in dviganjem nog od tal, pri čemer je vedno vsaj ena od nog v stiku s podlago. Tako kot pri hoji lahko tudi pri korakanju na mestu govorimo o fazi enojne in dvojne opore ter fazi zamaha. Časi trajanja navedenih faz so uveljavljeni parametri za časovni opis hoje (8, 9). Sledenje osebe navideznemu učitelju smo ocenili s parametri prostorske in časovne prilagoditve, zaradi lažje primerjave pa navidezni učitelj ni bila slika osebe v realnem času, pač pa posnetek gibanja osebe, ki je bil isti za vse poizkusne osebe.

## **METODE**

Za zajem podatkov smo uporabili sistem video kamer (slika 1), ki ga razvijajo v laboratoriju Teleimmersion Lab – UC Berkeley (10, 11) za študije navidezne prisotnosti uporabnikov, ki so na različnih lokacijah v skupnem hibridnem navideznem okolju, pri čemer pojem hibridno označuje združitev 3D videa z navideznimi 3D predmeti in modeli navidezne resničnosti.



**Slika 1:** Sistem videokamer za zajem 3D videa in stereogrozd štirih video kamer. [v ločeni datoteki]

Sistem sestavlja 48 video kamer, združenih v 12 samostojnih stereogrozdih s po 4 kamerami (slika 1, pomanjšani del), ter 14 zmogljivih računalnikov, ki skrbijo za zajem, sinhronizacijo in povezavo. Gruče so enakomerno porazdeljene okrog prostora približno kockaste oblike, tako da tvorijo delovni prostor s stranico, dolgo približno 2,5 m. Vsaka gruča zajema podatke o barvi in oddaljenosti površine predmeta v manjšem delu območja, nadzorni računalnik pa skrbi za medsebojno kalibracijo in podatke združuje v homogeno celoto (12), tako da so predmeti, ki so v vidnem območju, opisani kot oblak točk v prostoru glede na določen izhodiščni koordinatni sistem. Na ta način pridobimo podatke samo o površini predmetov v okolju, ne pa tudi o njihovi notranjosti. Vsako točko definirajo tri koordinate položaja v prostoru in štirje parametri barve (rdeča, zelena in modra v standardnem RGB spektru ter prosojnost). Ko so podatki o točkah iz posameznih gruč združeni v enoten oblak, algoritem za stiskanje podatkov (10) prilagodi zapis tako, da po tri točke nastopajo kot oglišča trikotnika z definirano smerjo normale. Barva tega dela površine je določena kot barva trikotnika in ne več z barvami posameznih točk. Velikost trikotnikov ni konstantna, pač pa je odvisna od teksture in upognjenosti površine predmeta – nerazgibani in barvno homogeni predeli so opisani z manj trikotniki kot teksturno in topografsko bolj razgibane površine. Pred začetkom zajemanja podatkov mora biti prostor med kamerami prazen, da lahko zajamemo ozadje, ki ga nato odštevamo od zajetih podatkov.

V okviru te študije je bila v prostoru med kamerami vsakokrat samo ena oseba hkrati, njen položaj v prostoru je bil razmeroma nespremenljiv, gibanje pa omejeno na izvedbo naloge sledenja, zato za zajem ni bilo treba uporabiti vseh kamer v sistemu. Izkazalo se je, da je za zajem podatkov dovolj že ena stereokamera, in sicer tista, ki je snemala osebo hkrati od spredaj in od strani (pogled, podoben perspektivi na slikah 3 in 4), zato smo za izvedbo študije uporabili le to stereokamero.

## Ocenjevanje kinematičnih parametrov

Iz podatkov, zajetih s sistemom na opisani način, smo izluščili parametre, ki nas zanimajo pri izvajanju nalog sledenja v navideznem okolju. V našem primeru nas neposredno zanimata kota v kolkih v sagitalni ravnini, posredno pa za to potrebujemo še lego središča telesa poizkusne osebe, ki je definirano glede na potrebe naloge. Najprej smo vpeljali določene omejitve, da bi zagotovili robustnejše in hitrejše ocenjevanje parametrov. Zahtevali in privzeli smo, da oseba stoji približno na sredini prostora med kamerami, s prednjim delom telesa in z obrazom je obrnjena v predpisano smer, oblečena v oblačila, ki niso črna ali zelo temne barve (zaradi stereosegmentacije), zgornji del telesa od pasu navzgor je vzravn, roke so prekržane na prsih.

Prvi korak je bila segmentacija 3D podatkov telesa na zgornji in spodnji del ter levo in desno polovico. Središčno točko smo definirali kot središče daljice, ki povezuje središči obeh kolčnih sklepov. Višina te točke kot tudi višina pasu pri vzravnem telesu sta odvisni od telesne višine osebe in smo ju določili po parametrih Zatsiorskega (13). Telo smo od pasu razdelili na zgornji in spodnji del. Položaj telesa v vodoravni ravnini smo izračunali kot težišče točk projekcije površine zgornjega dela telesa na tla. Orientacije telesa nismo izračunavali, saj je bila določena s pogojem, da je bila oseba ves čas obrnjena v isto predpisano smer. Sagitalna ravnina, ki je telo razdelila na levo in desno polovico, je bila tako popolnoma določena že s položajem središča telesa v lateralni smeri. S tako delitvijo telesa smo dobili štiri ločene dele, od katerih smo zgornja dva obravnavali skupaj kot homogeno celoto. Spodnji levi del je predstavljal levi spodnji ud, spodnji desni del pa spodnji desni ud. Zaradi boljšega ločevanja sta bila uda med prikazovanjem obarvana v različnih barvah. Kota v kolku smo izračunali ločeno samo iz točk v prostoru, ki pripadajo ustreznemu udu in položaju kolkov, glede na opisano segmentacijo. Točke v 3D prostoru, ki so predstavljale posamezni spodnji ud, smo najprej poenostavili v dve dimenziji v sagitalni ravnini, saj nas je zanimal le kot v tej ravnini.

Kot v kolku smo izračunali iz točk, ki pripadajo stegnu in smo jih dobili iz lege stegenice. Iz segmentacije je bil znan položaj središča kolčnega sklepa, poznati pa smo morali še dolžino stegenice, zato da bi lahko ocenili, katere točke v prostoru, ki ga zavzema spodnji ud, pripadajo stegnu oz. stegenici ter katere pripadajo golenu in stopalu, ki nas pri ocenjevanju kota v kolku ne zanimata. Dolžina stegenice je tako kot položaj sklepov odvisna od parametrov Zatsiorskega in od telesne višine osebe. Upoštevamo lahko torej vse točke, ki so znotraj radija z dimenzijo, ki ustreza dolžini stegenice, s središčem v položaju kolčnega sklepa. Točke zunaj radija pripadajo nogi od kolena navzdol in jih pri izračunu nismo upoštevali. V zadnjem koraku smo čez točke stegna potegnili premico po metodi najmanjših kvadratov in izračunali njen nagib glede na vertikalo, ki predstavlja kot v kolku (eden od zahtevanih in privzetih pogojev je bil ta, da je zgornji del telesa osebe med merjenjem vzravn,

zato je bila vrednost kota med stegnenico in zgornjim delom telesa enaka kot med stegnenico in vertikalo). Vrednost  $0^\circ$  ustreza kotu v kolku med vzravnano stoji, vrednost  $90^\circ$  pa kotu v kolku, ko je noga dvignjena od tal, tako da je koleno v višini kolka. Opisana metoda za izračun kota je dovolj robustna, zanesljiva in enostavna, da je izvedljiva na obstoječem sistemu v realnem času, kar je eden od predpogojev za izvedbo vidne povratne zveze med vadbo.

### Vključitev navideznih predmetov

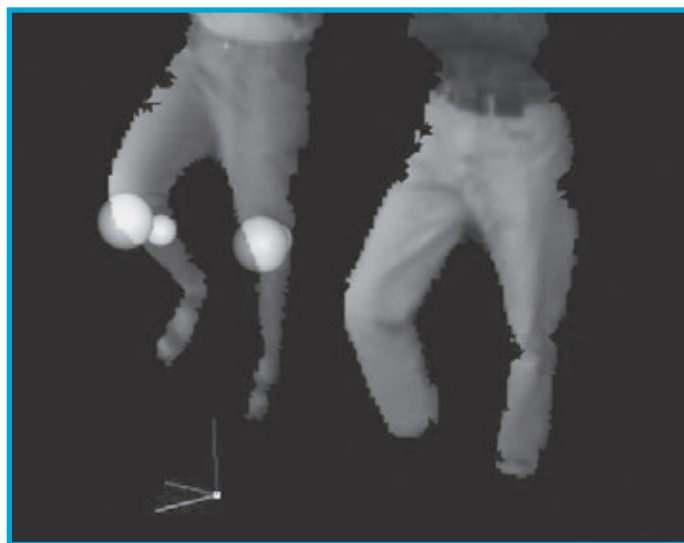
Sistem že brez ocenjevanja in prikazovanja parametrov med opazovanjem na zaslonu omogoča vidno povratno zvezo, vendar (če izključimo dejstvo, da gre za 3D prikazovanje oz. možnost opazovanja iz različnih zornih kotov navidezne kamere ter možnost prenosa podatkov na daljavo) ni ta informacija iz takšnega 3D video navideznega ogledala nič bogatejša kot npr. opazovanje samega sebe in vizualno ocenjevanje kotov v sklepih v običajnem ogledalu. Vidno povratno zvezo smo izvedli v bolj strogem smislu. Vpeljali smo povratno zvezo za vodenje z neposrednim primerjanjem (odštevanjem) vhodne veličine v proces (reference) ter izhoda iz procesa (dejanske izmerjene veličine), katere vrednost želimo regulirati.



**Slika 2:** Navidezni učitelj (levo) in oseba, ki sledi njegovim gibom (desno) v istem okolju. [v ločeni datoteki]

V 3D video okolje smo vključili navideznega učitelja (na sliki 2 levo) kot posnetek prave osebe na zaslonu, ki izvaja nalogo v navideznem okolju in poizkusni osebi predstavlja referenčno gibanje, ki mu le-ta mora slediti (na sliki 2 desno). Podobo učitelja in podobo osebe smo v realnem času prikazali drugo ob drugo, vidno povratno zvezo pa poudarili z vpeljavo enostavnih 3D predmetov – tarč za sledenje (slika 3). Na podobo navideznega učitelja smo superponirali polprosojni krogli, ki sta bili ves čas pripeti na levo in desno koleno. Ustrezni položaj krogel smo izračunali iz položaja središča telesa učitelja, od katerega sta bila neposredno, preko konstantne translacije odvisna položaja kolčnih sklepov. Položaja kolenskih sklepov sta potem odvisna le od kota v kolku in dolžine stegnenice.

Poleg referenčnih krogel smo pri prikazovanju dodali še krogli, ki sta predstavljali položaja obeh kolen osebe, ki je sledila učitelju v realnem času. Tudi ti krogli smo pripeli na navideznega učitelja, edini parameter, ki smo ga pri tem spremenili, je bil kot v kolku, ki je tokrat ustrezal osebi v realnem času. Na ta način je bila vzpostavljena jasno vidna razlika med kotom v kolku osebe in navideznega učitelja, na katerega se je oseba lahko osredotočila, hkrati pa je lahko na zaslonu pred sabo opazovala obe celotni podobi v istem okolju (slika 4). Krogli pri osebi sta bili nekoliko manjši od krogel pri učitelju, tako da smo lahko razlikovali med referenčno kroglo ter tarčo. Ko je bila manjša krogla znotraj večje krogle, je slednja zažarela v svetlejši barvi. Tako je tudi daljši čas žarenja leve in desne krogle pomenil sorazmerno boljše sledenje osebe. Leva in desna krogla sta bili prikazani v različnih barvah, da bi ju lažje razlikovali. Edini parameter, od katerega sta bila neposredno odvisna položaja obeh krogel, je bil kot v kolku osebe, zato smo lahko na ta način izvajali naloge sledenja spreminjanju kota v kolku. Poudarjanje 3D video informacije z ustreznimi navideznimi predmeti smo poimenovali hibridno 3D video/ navidezno okolje oz. krajše, hibridno okolje.



**Slika 3:** Navidezni učitelj s superponiranimi navideznimi tarčami za sledenje. [v ločeni datoteki]



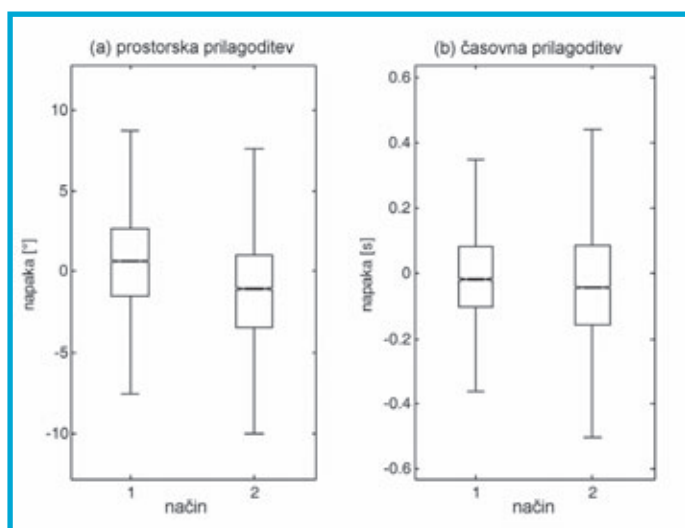
**Slika 4:** Sledenje osebe navideznemu učitelju in tarčam. [v ločeni datoteki]

## Naloga v hibridnem okolju

Prilagoditev oseb na sledenje v hibridnem okolju smo ocenjevali z izvajanjem naloge korakanja na mestu, ki je trajalo približno eno minuto, doseženi kot v kolku pa je znašal v vsakem koraku približno  $45^\circ$ , pri čemer je bila ponovljivost kota in kadence pogojena z izvajanjem gibov osebe, ki je bila posneta kot navidezni učitelj. Nalogo smo izvedli na dva načina. Pri prvem sta bili v prikazovanje vključeni podobi učitelja in osebe v realnem času z navideznimi tarčami – kroglami, ki so bile namenjene bolj jasnemu dojetju in ocenjevanju razlik med učiteljem in preizkusno osebo. Pri drugem načinu pa smo krogle izključili iz prikazovanja, prikazovanje obeh podob pa je ostalo nespremenjeno. Vrstni red načinov izvajanja naloge je bil naključen. V testni skupini za izvajanje nalog je bilo 12 zdravih oseb (njihova starost je bila 20-37 let; povprečna starost 26.7 let, standardni odklon 5.7 let). Nobena od oseb poprej ni imela težjih poškodb spodnjih udov ali kakršnih koli zdravstvenih težav, ki otežujejo gibanje. Vsi sodelujoči so s sodelovanjem v študiji soglašali.

## REZULTATI

Razlike med načinoma prikazovanja, z navideznimi tarčami in brez njih, smo analizirali z metodo avtorjev Giese in Poggio (14) ter izvedli analizo variance (ANOVA) prostorske in časovne prilagoditve med obema načinoma. Na sliki 5(a) prvi škatlični diagram ponazarja prostorsko prilagoditev – amplitudno napako sledenja z navideznimi tarčami, drugi diagram pa sledenje v načinu brez navideznih tarč. Na sliki 5(b) je prikazana časovna prilagoditev – časovna napaka sledenja. Škatlični diagrami prikazujejo 5., 25., 50., 75. ter 95. percentil v razporeditvi napake sledenja. Razlika med sledenjem referenci v prvem in drugem načinu je statistično značilna ( $p < 0.001$ ), kar kaže na to, da vključitev navideznih tarč omogoča boljše



**Slika 5:** Prostorska (a) in časovna (b) prilagoditev pri sledenju navideznemu učitelju v načinih z navideznimi tarčami (1. način) ter brez tarč (2. način). [v ločeni datoteki]

prilagoditev kot samo prikazovanje obeh podob, saj sta manjši tako napaka sledenja kot tudi varianca napake. Tudi časovna prilagoditev je bila v načinu s tarčami statistično značilno boljše kot v načinu brez tarč ( $p < 0.001$ ).

## RAZPRAVLJANJE

Predstavili smo izvedbo naloge sledenja gibanju spodnjih udov v hibridnem okolju s 3D videom in obogateno resničnostjo, pri kateri smo za zajem podatkov uporabili običajne videokamere. Pokazali smo, da poudarjanje vidne povratne zveze z navideznimi predmeti lahko pripomore k izboljšanju rezultatov izvajanja nalog v navideznem okolju. Takšen pristop je aktualen za rehabilitacijo na daljavo, saj komponente sistema v primerjavi s posebno laboratorijsko opremo niso drage in bi jih bilo možno namestiti tudi pri bolniku doma. Sistem tudi že v zasnovi predvideva integracijo krajevno ločenih okolij in prenos stisnjenih podatkov po medmrežju. Možna bi bila tudi izvedba urjenja, pri katerem navidezni učitelj ni posnet vnaprej, pač pa je to oseba – terapevt v realnem času. Tako je omogočena komunikacija med bolnikom in terapevtom v realnem času ter dvosmerna vidna povratna zveza, pri kateri tudi terapevt prilagaja svoje referenčne gibe, ki jim mora bolnik slediti, zmožnostim bolnika, pri tem pa bolniku ni treba obiskati klinike.

## ZAKLJUČKI

Z vidika poenostavljanja in ekonomičnosti procesa rehabilitacije bolnikov, katerih gibanje je zaradi bolezni in poškodb omejeno, in je zanje obiskovanje klinike težko izvedljivo, pomeni predstavljeni sistem za rehabilitacijo na daljavo dobrodošel napredek v uvajanju novih tehnologij v terapijo, tudi zaradi povečanja motivacije bolnikov (15), ki je v procesu rehabilitacije pomemben dejavnik.

## Zahvala

Raziskavo je finančno omogočila Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

## Literatura:

1. Nahrstedt K, Bajcsy R, Wymore L, Kurillo G, Mezur K, Sheppard R, et al. Symbiosis of teleimmersive environments with creative choreography. ACM Workshop on Supporting Creative Acts Beyond Dissemination, with 6th ACM Creativity and Cognition Conference, Washington D.C., USA; 13.-15. junij 2007.
2. Bailenson JN, Patel K, Nielsen A, Bajcsy R, Jung S, Kurillo G. The effect of interactivity on learning physical actions in virtual reality. Media Psychol 2008; 11(3): 354-376.

3. Patel K, Bailenson JN, Hack-Jung S, Diankov R, Bajcsy R. The effects of fully immersive virtual reality on the learning of physical tasks. In: Proceedings of the 9th Annual International Workshop on Presence, Ohio, USA, 2006: 87-94.
4. Kurillo G, Bajcsy R, Nahrsted K, Kreylos O. Immersive 3D environment for remote collaboration and training of physical activities. In: Proceedings of 2008 IEEE Virtual Reality Conference, Reno, NV, USA; 8.-12. marec, 2008: 269-270.
5. Fukuda T. The stepping test: two phases of the labyrinthine reflex. *Acta Otolaryngol* 1959; 50(2): 95-108.
6. Garcia RK, Nelson AJ, Ling W, Van Olden C. Comparing stepping-in-place and gait ability in adults with and without hemiplegia. *Arch Phys Med Rehabil* 2001; 82(1): 36-42.
7. Sasaki O, Taguchi K, Kikukawa M, Ogiba T. Stepping analysis in patients with spinocerebellar degeneration and Parkinson's disease. *Acta Otolaryngol* 1993; 113(4): 466-470.
8. Perry J. *Gait Analysis: normal and pathological function*. Thorofare : Slack Inc., 1992.
9. Inman VT, Ralston HJ, Todd F. *Human walking*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1981.
10. Kurillo G, Li Z, Bajcsy R. Framework for hierarchical calibration of multi-camera systems for teleimmersion. In: Proceedings of IMMERSCOM '09; 2009, Berkeley, CA, USA.
11. Lien JM, Kurillo G, Bajcsy R. Multi-camera tele-immersion system with real-time model driven data compression. *Visual Comput* 2010; 26: 3-15.
12. VRUI Toolkit. <http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/Res-Dev/Vrui/index.html>
13. De Leva P. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *J Biomech* 1995; 29(9): 1223-1230.
14. Giese MA and Poggio T. Synthesis and recognition of biological motion patterns based on linear superposition of prototypical motion sequences. In: Proceedings of the 1999 IEEE Workshop on multi-view modeling and analysis of visual scene, Fort Collins, CO, USA; 21.-23. junij 1999: 73-80.
15. Tomaž Koritnik, Tadej Bajd, Pavla Obreza, Zlatko Matjačić, Marko Munih. Lower extremities training by the use of virtual environment and functional electrical stimulation. In: Bijak M, ed. Proceedings of the 9th Vienna International Workshop on Functional Electrical Stimulation: basics, technology, application, Krems/Danube, Austria, Sept. 19th-22nd, 2007. Vienna: Medical University of Vienna, Vienna Medical School, Center for Biomedical Engineering and Physics, 2007: 147-150.
16. Koritnik T, Bajd T, Munih M. Virtual environment for lower-extremities training. *Gait Posture* 2008; 27(2): 323-330.