

HENRIE – NAPRAVA ZA REHABILITACIJO ROKE IN PRIJEMANJA Z NJO

HENRIE – DEVICE FOR UPPER LIMBS AND GRASP REHABILITATION

as. Janez Podobnik, univ. dipl. inž. el., prof. dr. Marko Munih, univ. dipl. inž. el.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana

Izvleček

Izhodišča:

Robotsko podprta rehabilitacija je rehabilitacijska tehnika, pri kateri uporabljamo sodobne tehnologije haptičnih vmesnikov in navideznih okolij. Le-ti omogočajo ponavljajočo se vadbo, in sicer: z meritvami sil in položajev, s kvantitativnim ocenjevanjem gibalnih sposobnosti in napredovanja posameznika, z različno oblikovanimi nalogami v računalniško podprtih navideznih okoljih pa tudi z zanimivimi nalogami, ki jih mora uporabnik opraviti.

Metode:

V članku je predstavljena naprava HenRiE (Haptic environment for reaching and grasping exercises), ki je predvsem namenjena za uporabo v robotsko podprti rehabilitaciji ter za vadbo seganja, prijemanja in prenašanja navideznih predmetov v haptičnih navideznih okoljih. Naprava združuje haptični vmesnik in modul za prijemanje, ki je nameščen na koncu haptičnega vmesnika, in z njim uporabnik navidezne objekte prijema. Tako je hkrati omogočena vadba gibanja roke in prijemanja predmetov. Predstavljeni sta dve nalogi, ki združujeta vadbo gibanja roke in prijemanje z njo: naloga prijemanja in prestavljanja predmetov ter naloga »zavita cev«.

Rezultati: Predstavljeni so predhodni rezultati, izmerjeni pri poizkusu, v katerem so sodelovale zdrave osebe, ki so opravile obe nalogi. Narejena je primerjava izmerjenih rezultatov z rezultati primerljivih eksperimentov iz literature, ki so se ukvarjali s tematiko prijemanja in seganja. Pri nalogi prijemanja in prestavljanja zdrave osebe uporabljajo iste mehanizme kot jih uporabljajo pri podobnih nalogah v resničnem okolju. Pri nalogi »zavita cev« s haptičnimi dražljaji dosežemo, da je sila prijema pri osebi, ki nalogo izvaja, večja od referenčne sile prijema, kar je tudi naš cilj.

Abstract

Background:

Robot-assisted rehabilitation is a rehabilitation technique that uses new technologies from the field of haptic interfaces and virtual environments. It provides repetitive training and also new and interesting tasks in computer-generated virtual environments. Measurements of forces and positions acquired during the tasks allow quantitative assessment of neuro-motor state of the patients and their progress.

Methods:

This paper presents the HEnRiE device (Haptic environment for reaching and grasping exercises), which is primarily intended for use in robot-aided neurorehabilitation and for training of reaching, grasping and transporting virtual objects in haptic environments. The system combines haptic interface and module for grasping mounted on top of the haptic interface. With the module for grasping, subjects can grasp and manipulate virtual objects. This allows combined training of upper extremity movements and grasping. Two tasks that combine upper extremity movements and grasping are presented: a pick and place task, and a winded tube.

Results:

The paper presents preliminary results acquired in healthy subjects for two tasks. The results obtained with our device were compared to similar experiments from literature associated with studies of reaching and grasping. During the pick and place task, results show that healthy subjects adopt the same principles for reaching and grasping in virtual environments as in real situations. During the winded tube task, the haptic feedback is used to ensure that the user applies a sufficiently large force, which must not be lower than reference grasp force to successfully complete the task.

Zaključki:

Naprava HEnRiE omogoča hkratno vadbo gibanja zgornjega uda in prijemanja z njim. Z vizualnimi in haptičnimi navideznimi okolji sta doseženi visoki stopnji občutka resničnosti, kar poveča motiviranost uporabnikov za opravljanje nalog.

Ključne besede:

Robotsko podprta rehabilitacija, gibanje roke, sila prijema, haptični vmesnik, navidezna okolja

Conclusion:

The HEnRiE device allows combined therapy for upper extremities and grasp therapy. With the use of graphic and haptic visual environments, a high level of reality is achieved, which is beneficial for the motivation of the users.

Key words:

Robot-assisted rehabilitation, arm movement, grasp force, haptic interface, virtual environments

UVOD

Robotsko podprta rehabilitacija je senzorično-motorična rehabilitacijska tehnika, pri kateri uporabljamo razne mehatronične in robotske naprave, opremljene s senzorji za zaznavanje položajev in sil (1, 2). Razširja terapevtske možnosti in dopolnjuje tradicionalne terapevtske metode in tehnike za izboljšanje pacientovih motoričnih sposobnosti, za skrajšanje časa rehabilitacije ter za objektivno ocenjevanje pacientovih motoričnih sposobnosti (3, 4).

Evropski projekt Gentle/s je pokazal, da so bili posamezniki bolj motivirani za daljšo vadbo, če so uporabljali sistem za prikazovanje obogatenih navideznih sistemov, sestavljenih iz gradnikov za haptično in vizualno prikazovanje navideznih okolij. Posamezniki so lahko vadili gibe, kot sta "seganje in prijemanje", vendar niso imeli možnosti, da bi objekte v navideznih okoljih zares prijeli, kar se je izkazalo kot ena od glavnih pomanjkljivosti Gentle/s prototipa (1). Naloge in okolje za vadbo, ki so namenjeni izboljšanju motoričnih sposobnosti, uporabnika spodbudijo in pritegnejo ter z merjenjem veličin omogočajo objektivno ocenjevanje napredka njegovih sposobnosti ter tako tudi večjo kakovost pri njegovi rehabilitacijski obravnavi (5, 6).

V članku bomo predstavili napravo HEnRiE, ki združuje haptični vmesnik za zgornji ud, sistem za prijemanje, ki je nameščen na haptični vmesnik, ter računalniško podprta navidezna okolja, ki so namenjena za vadbo in izboljšanje motoričnih sposobnosti roke in prijemanja. Sistem je namenjen hkrati za vadbo gibanja roke in tudi prijemanja z njo, v članku bosta tako predstavljeni dve nalogi, ki prikazujeta primer take vadbe in rezultati, izmerjeni ob poizkusu, pri katerem so sodelovale zdrave osebe. Hkratna vadba je smiselna, saj pri večini opravil vsakdanjega življenja roko uporabljamo za različne gibe in za prijemanje predmetov (7). Haptični robot omogoča avtentično interakcijo z navideznimi okolji, kar je njihova najpomembnejša značilnost (8), in je nova terapevtska metoda, ki pacienta k vadbi spodbuja (3).

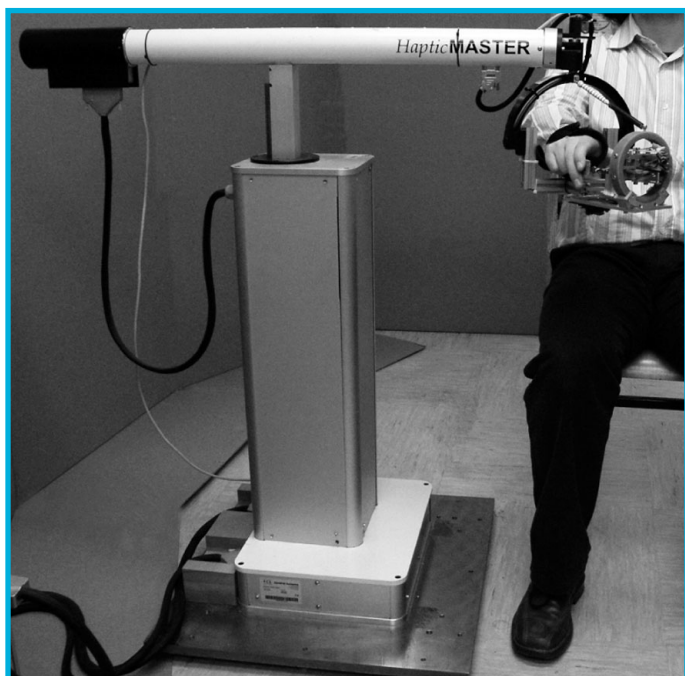
METODE

Meritve so bile opravljene s sodelovanjem petih zdravih oseb, starih od 26 do 29 let. Sliki 1 in 2 prikazujeta eksperimentalno okolje, sliki 3 in 4 pa nalogi, ki so ju morali prostovoljci opraviti v navideznih okoljih. Na vrhu robota je pritrjen senzor sile, ki meri kontaktne sile med robotom in zapestjem. Komponento kontaktne sile v z osi (smer, v kateri deluje teža navideznih objektov) imenujemo sila obremenitve. Robot omogoča tudi merjenje položaja zapestja v prostoru. Merilnik sile prijema omogoča merjenje sil prijema, ki ga med opravljanjem naloge uporabnik izvaja. Merjene veličine smo merili z vzorčno frekvenco 250 Hz.

Oprema

Osnova za napravo HEnRiE je haptični robot HapticMASTER, ki ga razvija podjetje FCS Control Systems (slika 1). Razvili so namenski krmilnik, ki teče v RTLinux okolju, s frekvenco vodenja 2,5 kHz (9). Le-ta omogoča uporabo in razvoj poljubnega načina vodenja in različnih navideznih okolij.

Modul za prijemanje (slika 2) je pasivna naprava, ki omogoča "pasivno haptičnost", za prijemanje navideznih objektov v navideznih okoljih. Ima dve pasivni prostostni stopnji, na vsako od njiju je pritrjen senzor za merjenje sile. Senzorja skupaj omogočata merjenje sile prijema, prvi meri sile, ki jih posameznik izvaja s palcem, drugi pa skupno silo, ki ju posameznik izvaja s kazalcem in sredincem. Občutek "pasivne haptičnosti" je dosežen prek dveh elastičnikov, ki sta dodani med premične dele modula in njegov okvir. Tako posameznik dobi občutek, da je objekt resnično prijel, poleg tega pa prek običajne haptičnosti, ki jo omogoča haptični robot HapticMASTER, tudi čuti njegovo težo, vse skupaj pa se zlije v občutek, da je prijel pravi predmet. Modul za prijemanje je mogoče prilagoditi različnim velikostim roke, različnim silam prijemanja ter za merjenje na desni ali levi roki.



Slika 1: Naprava HEnRiE: haptični robot HapticMASTER ima na vrhu pritrjen senzor sile in modul za prijemanje, ki ga prikazuje slika 2. Roka je vpeta v zapestju. Oseba ima pred sabo LCD zaslon, na katerem so prikazana navidezna okolja.

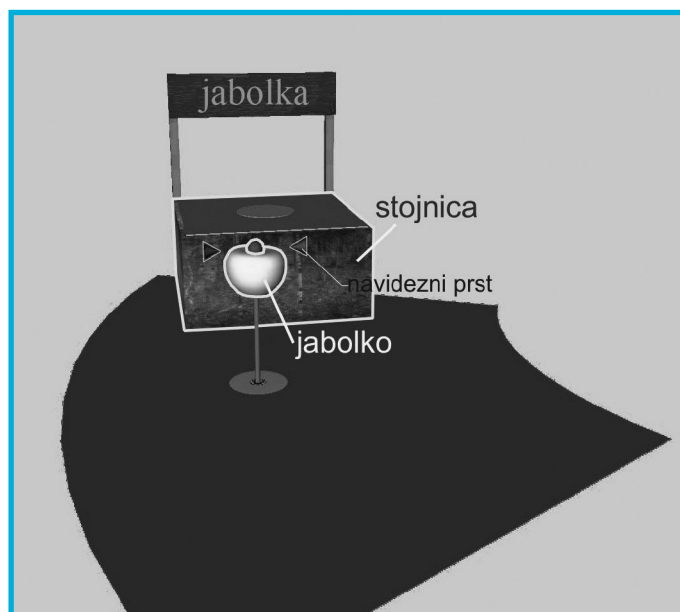


Slika 2: Modul za prijemanje: roka je vpeta v zapestju z opornico na gimbal. Gimbal je pasivna naprava z dvema prostostnima stopnjama, ki je pritrjena na vrh robota, na gimbal pa je pritrjen modul za prijemanje. Na vsaki od ročk se meri sila, ki jo oseba izvaja s prsti.

Naloga prijemanja in prestavljanja

Pri tej nalogi mora uporabnik roko premakniti do navideznega predmeta, ga prijeti, tako da stisne ročki modula za prijemanje, ter ga prenesti na drugo mesto. Uporabnik tako jabolka, ki padejo z drevesa, prestavlja na stojnico, kjer se vsako jabolko proda (slika 3). Če oseba jabolka ne prime dovolj močno, mu le-to iz roke pade in ga mora še enkrat pobrati. Naloga je uspešno izvedena, ko je na stojnico

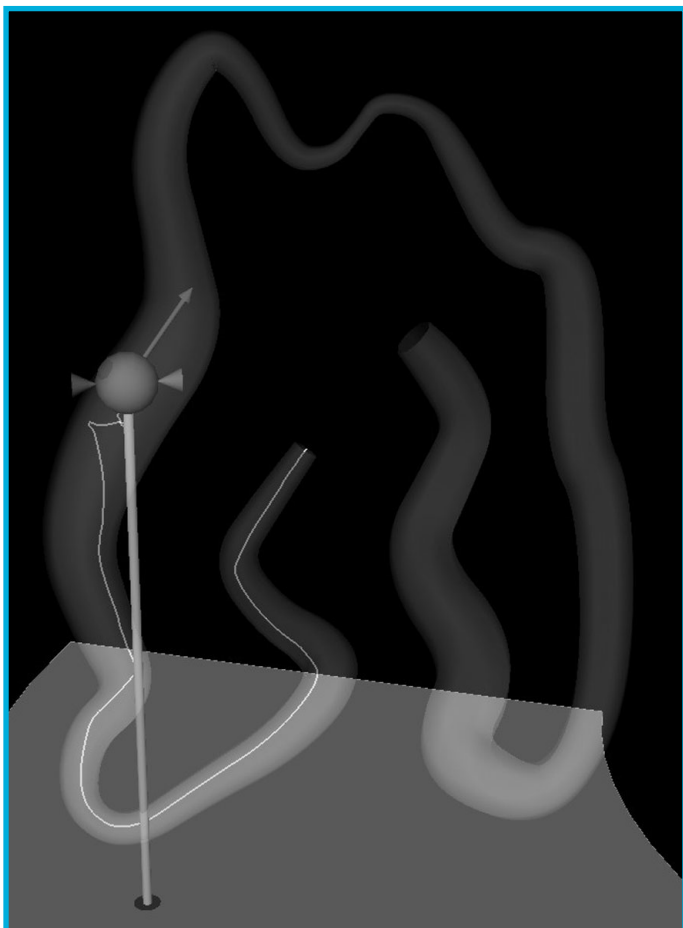
preneseno določeno število jabolk. Naloga poteka tako, da na naključno mesto v prostor pred stojnico pade jabolko, uporabnik ga mora prenesti na okroglo polje na stojnici, kjer ga spusti. Nato ponovno na naključno mesto pred stojnico pade novo jabolko. Naloga je uspešno končana, ko uporabnik pobere vsa jabolka, število jabolk je določeno vnaprej, preden uporabnik z izvajanjem naloge začne.



Slika 3: Naloga prijemanja in prestavljanja, ko oseba jabolko prestavlja na stojnico. Rdeča kroglica predstavlja položaj roke, stožci pa navidezne prste.

Naloga »zavita cev«

Cilj te naloge je z žogico prepotovati celotno cev in doseči njen konec. Cev je zavita in ima spreminjajoč se premer. Položaj zapestja označuje okrogla žoga, ki jo lahko stiskamo, tako da se njen premer spreminja s silo prijema. Pri majhnih silah ima velik premer, pri vse večji sili prijema pa je le-ta vedno manjši. Za pomikanje vzdolž cevi je treba žogico stisniti na ustrezno velikost, da bi lahko prišli do konca cevi. Če je premer žogice večji od premera cevi, se le-ta začne ob cev drgniti, kar upočasnjuje pomikanje, če pa je premer kroglice precej večji od premera cevi, se le-ta v cevi popolnoma zatakne. Če je premer žogice manjši od premera cevi, se lahko po cevi prosto giblje in ob njenem dotiku stene cevi to zaznamo. Žogica tako lahko drsi ob steni vzdolž cevi ali pa se po cevi pomika brez trkov ob steno.



Slika 4: Naloga »zavita cev«: uporabnik s silo prijema spreminja premer žogice, ki jo pomika skozi cev.

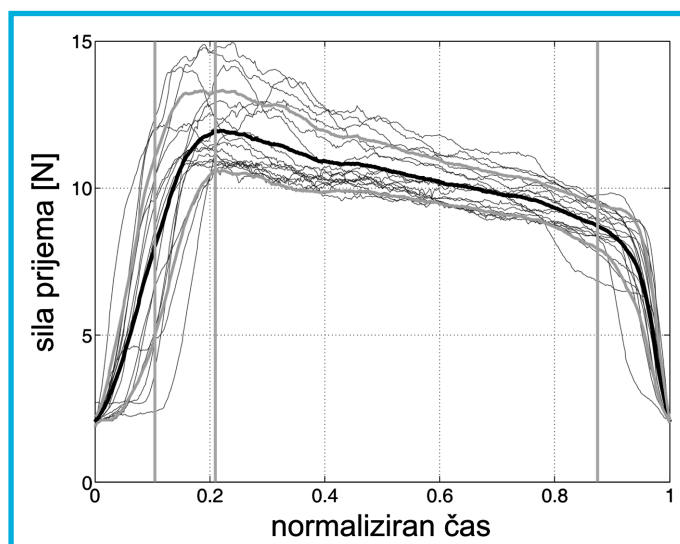
REZULTATI

Naloga prijemanja in prestavljanja

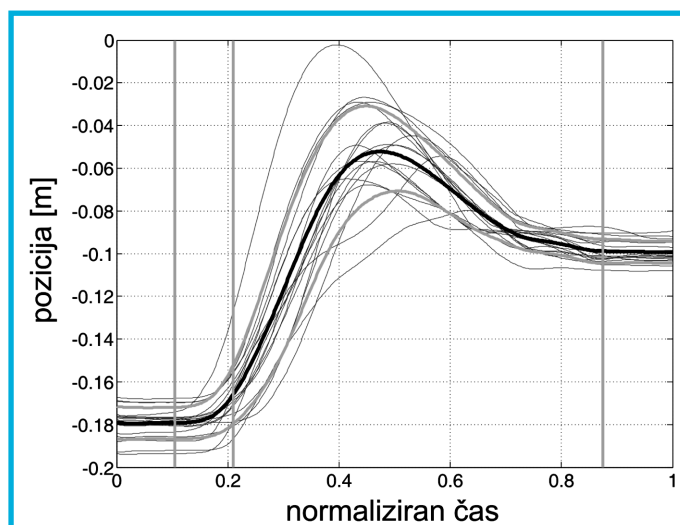
Slike 5, 6 in 7 prikazujejo potek sile prijema, položaj in sile obremenitve za 17 meritev, opravljenih z eno osebo. Slika 5 prikazuje silo prijema kot povprečne vrednosti, izmerjenih na obeh senzorjih sil. Slika 6 prikazuje položaj, in sicer izmerjeno vrednost položaja zapestja po višini. Tla so na z osi na višini -0.18 m od izhodišča koordinatnega sistema haptičnega vmesnika, stojnica pa na višini -0.10 m. Slika 7 prikazuje silo obremenitve. Sila obremenitve je tista sila, ki deluje na zapestje, oziroma sila, s katero uporabnik premika haptični vmesnik. K tej sili prispevata sila teže navideznega predmeta in sile zaradi njegove vztrajnosti. Na osi x je normaliziran čas. Prenašanje predmeta smo razdelili v različne faze s tremi časovnimi zaznamki:

- Faza pred dvigom: sila prijema se dvigne nad minimalno silo prijema in se naglo povečuje (slika 5), vendar je predmet še vedno na začetni višini (slika 6). V tej fazi je sila obremenitve rahlo negativna (slika 7).

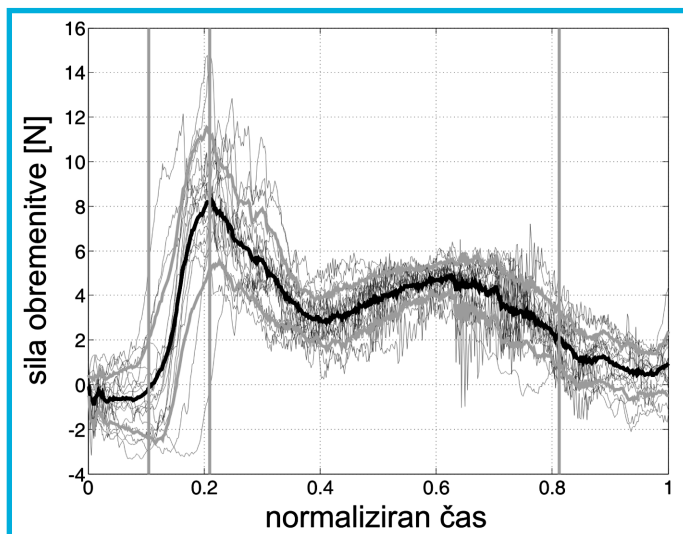
- Faza dvigovanja: tako sila prijema kot sila obremenitve se začeta povečevati do njihovih največjih vrednosti, ki nastopita pri 0.2 normaliziranega časa. V tistem trenutku uporabnik navidezni predmet tudi začne dvigovati.
- Faza prenašanja: v tej fazi oseba navidezni predmet dvigne in ga prenese na drugo mesto; sila prijema se postopoma zmanjšuje, vendar pa ne pade pod minimalno silo prijema, ki je potrebna, da bi navidezni predmet držali.



Slika 5: Sila prijema v odvisnosti od normaliziranega časa pri nalogi prijemanja in prestavljanja. Sive vertikalne črte predstavljajo časovne zaznamke: prvi zaznamek – konec faze pred dvigom in začetek faze dvigovanja, drugi zaznamek – začetek faze prenašanja, tretji zaznamek – začetek faze razbremenitve.



Slika 6: Položaj v odvisnosti od normaliziranega časa pri nalogi prijemanja in prestavljanja.



Slika 7: Sila obremenitve v odvisnosti od normaliziranega časa pri nalogi prijemanja in prestavljanja.

Pri normaliziranem času 0,42 lahko zasledimo minimalno silo obremenitve v tej fazi, pri normaliziranem času 0,65 pa zasledimo drugi vrh sile obremenitve v tej fazi (slika 7). Omenjena minimalna sila in drugi vrh se zgodita ob obratih spreminjanja smeri položaja, ki je prikazan na sliki 6. Ob koncu te faze je predmet postavljen na končno mesto.

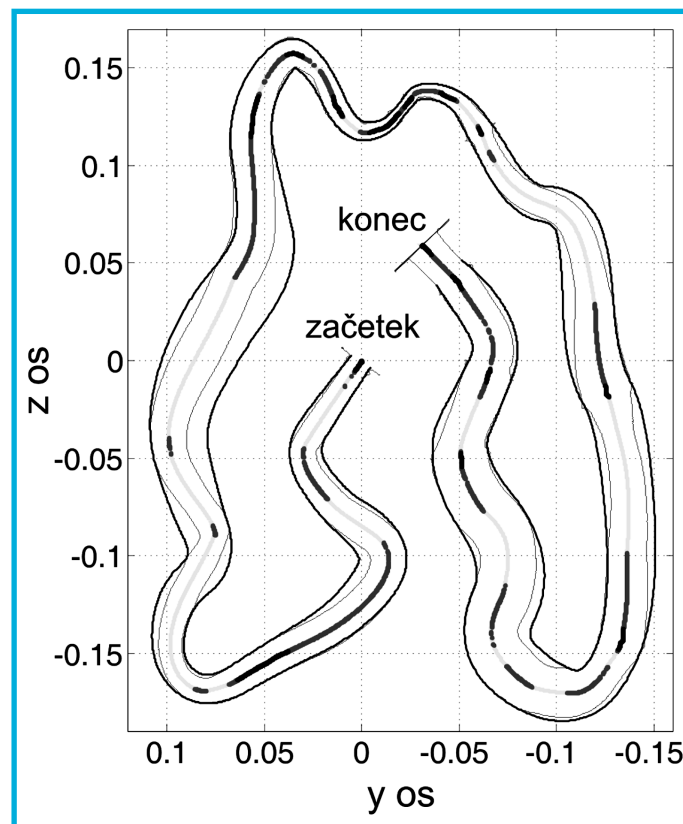
- Faza razbremenitve: sila prijema se naglo spusti in pade pod minimalno silo prijema.

Naloga »zavita cev«

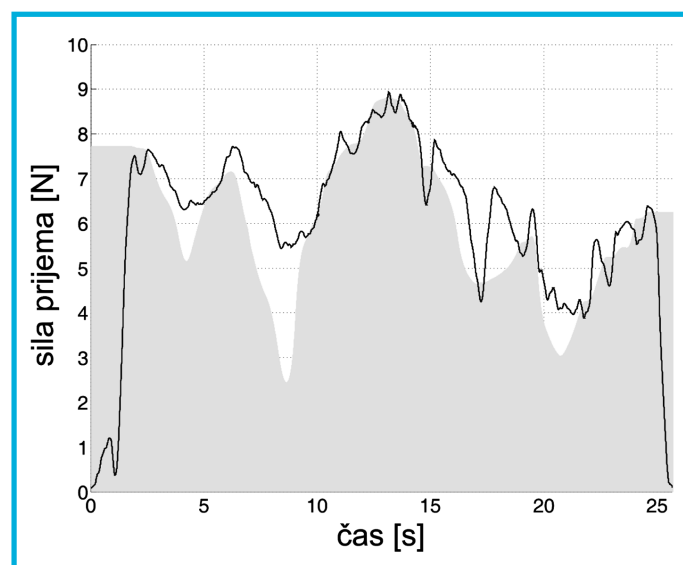
Slika 8 prikazuje potek poti pri nalogi »zavita cev«. Z debelo črto, označeno z različnimi odtenki sive barve, je označena pot žogice, njen radij pa je označen z tanko črno črto. Črna sredinska črta označuje mesta, kjer je premer žogice večji od premera cevi. Na teh mestih se je uporabnik v cevi »zataknil« in je bil prisiljen povečati silo prijema, da bi lahko pot nadaljeval. Če je bil premer žogice večji od premera cevi, je bila sila trenja, ki nasprotuje gibanju po cevi, odvisna od razlike med premeroma žogice in cevi, tako da je ob majhnih razlikah premerov oseba žogico še vedno lahko potiskala v smeri poti. Oseba je le kratek del poti premagala na tak način. Na sliki 9 je prikazan potek sile prijema. Svetlo sivo polje označuje minimalno silo prijema, ki je bila potrebna, da se žogica ne bi v cevi »zataknila«. Potek sile prijema je z odebeljeno črno črto prikazan na mestih, kjer je bila sila prijema pod minimalno silo, potrebno za prijem. Kadarkoli je uporabnik silo prijema zmanjšal pod minimalno silo, je silo prijema spet povečal, da bi žogico vzdolž cevi lahko prosto pomikal.

Temno siva barva pa označuje del poti, ko je bil premer žogice manjši od premera cevi, uporabnik je z žogico drsel ob steni. Z najsvetlejšo sivo pa je označen del poti, ko je bil premer žogice manjši od premera cevi in žogica ni bila v stiku s steno. S slike 8 vidimo, da je oseba precejšen del

poti z žogico prepotovala tako, da si je pomagala z drsenjem žogice ob steni cevi.



Slika 8: Prikaz poti skozi nalogo »zavita cev«. Svetlo siva sredinska črta prikazuje pot središča žogice, ko ta ni bila v stiku s steno, temnejša siva črta, ko je žogica bila v stiku s steno, črna pa, ko je bil premer žogice večji od premera cevi. Prav tako sta prikazani steni cevi in širina žogice.



Slika 9: Graf poteka sile prijema med nalogo »zavita cev«. Tam, kjer je sila prijema manjša od predpisane minimalne vrednosti, je vrednost sile prijema prikazana z odebeljeno črno črto. Svetlo sivo polje označuje minimalno silo, potrebno za prijem oziroma referenco sile prijema.

RAZPRAVLJANJE

Naloga prijemanja in prestavljanja

Prenašanje objekta smo razdelili v štiri faze:

- Faza pred dvigom: Forssberg et al. (10) so opisali osnovne mehanizme koordinacije sile prijema in sile obremenitve v fazi pred dvigom in v fazi dvigovanja pri odraslih osebah in pri otrocih. V tej fazi je sila obremenitve negativna (slika 7). Oseba predmet nežno pritisne k tlu in se pripravi za stabilen prijem. Negativno silo obremenitve so Forssberg et al. (10) opazili le pri otrocih, pri odraslih osebah pa je več ni. To bi lahko pomenilo, da v tej fazi pri eksperimentih, izvedenih v navideznem okolju, odrasla oseba uporablja mehanizme, ki so bolj značilni za zgodnja leta razvoja prijemanja pri človeku. Vendar pa je bolj verjetno, da je negativna sila posledica slabše senzorične informacije, ki jo posameznik dobi v navideznih okoljih, in jo nadomesti s tem, da se za stabilni prijem pripravi tako, da predmet pritisne ob tla.
- Faza dvigovanja: pri naših eksperimentih lahko opazimo iste sinergije med silo prijema in silo obremenitve kot pri dvigovanju pravih predmetov pri eksperimentih, ki so jih izvedli Forssberg et al. (10). To nakazuje, da odrasle zdrave osebe v fazi dvigovanja pri dvigovanju navideznih predmetov v navideznih okoljih uporabljajo iste mehanizme kot pri dvigovanju resničnih predmetov.
- Faza prenašanja: ko uporabnik predmet dvigne in ga drži pri miru, mora vzdrževati samo silo obremenitve, ki je enaka teži navideznega predmeta, zato je sila obremenitve konstantna.
Pri premikanju predmeta se pojavijo dodatne sile zaradi njegove vztrajnosti, kar povzroči dvig sile obremenitve. To povečanje zaradi vztrajnosti lahko vidimo na sliki 7 kot drugi manjši vrh sile obremenitve pri normaliziranem času 0,65. Flanagan et al. (11) poročajo, da se sila prijema povečuje hkrati z silo obremenitve. Na sliki 5 pa lahko vidimo, da pri naših eksperimentih ni prišlo do hkratnega dviga sile prijema, ko je pri sili obremenitve prišlo do drugega vrha. Pri eksperimentih, ki so jih izvedli Flanagan et al. (11) sta bili tako sila prijema kot sila obremenitve izvedeni s prsti, saj je oseba predmet držala s prsti. Pri naših eksperimentih je sila prijema tista sila, ki jo oseba izvaja s prsti, medtem ko je sila obremenitve tista sila, ki se meri pri zapestju. Sila obremenitve je izvajana z zapestjem oziroma s celotno roko, ki je vpeta v manšeto v zapestju. Uporabnik torej ne čuti sil obremenitve zaradi premikanja predmeta in njegove teže v prstih, temveč v zapestju. Tako sta sila prijema in sila obremenitve ločeni med sabo.
HENRiE podpira roko v zapestju, kar je za uspešno uporabo naprave HENRiE v robotsko podprti rehabilitaciji zgornjih udov in prijemanja potrebno. Glede na motorične sposobnosti lahko haptični vmesnik uporabniku pomaga pri premikanju in mu je pri opravljanju naloge v pomoč,

lahko pa se haptični vmesnik gibanju tudi upira, tako da uporabnik svojo moč pri opravljanju naloge krepi. Raven pomoči oziroma upiranja je lahko določena glede na motorične zmožnosti zgornjih udov uporabnika. Tudi del naloge, ki je povezan s prijemanjem, je posebej prilagojen motoričnim zmožnostim prijemanja posamezne osebe. Naprava HENRiE je torej razvita prav za uporabo v robotsko in računalniško podprti rehabilitaciji, poseben poudarek pa je na hkratni rehabilitaciji zgornjih udov in prijemanja in je lahko prilagojena potrebam vsakega uporabnika posebej.

Slika 6 prikazuje položaj vrha zapestja po višini, s slike je razvidno, da so gibi zvezni in gladki. Viau et al. (12) so pokazali, da so si gibi v navideznem okolju in gibi v resničnem okolju podobni, kar je nujno za zagotavljanje uspešnosti vadbe in za prenos vzorcev, naučenih v navideznih okoljih, v opravila, ki jih uporabnik kasneje izvaja pri svojih vsakdanjih življenjskih dejavnostih.

- Faza prenašanja se konča pri 0,9 normaliziranega časa, ko oseba navidezni predmet položi na drugo mesto.
- Faza razbremenitve je zadnja faza, v kateri oseba navidezni predmet izpusti.

Naloga »zavita cev«

Vaja združuje tako vadbo gibanja roke kot tudi prijemanja z njo, vendar pa je pri tej vaji treba silo prijema spreminjati in se po tem razlikuje od naloge prijemanja in prestavljanja, pri kateri je treba za stabilni prijem preseči le prag sile prijema. Pri tej vaji lahko določimo, kakšna naj bo minimalna sila prijema v posameznem delu poti (slika 9). Nalogo bi zato lahko uvrstili v skupino nalog sledenja referenci (13, 14), ki je pri tej nalogi minimalna sila prijema in je na sliki 9 označena s sivim poljem. Vendar pa je pri njej novo to, da uporabnik ne sledi zgolj vizualni referenci, temveč v primeru, ko je sila prijema pod minimalno vrednostjo, prek haptičnih dražljajev občuti tudi razliko med želeno in dejansko vrednostjo sile prijema. Poleg tega pa je vzpodbujen, da se potruži in sledi referenci, ki ni časovna funkcija, temveč je odvisna od položaja. To blagodejno vpliva predvsem na motivacijo uporabnika, saj ne zamudi referenčne vrednosti, kar bi bil lahko razlog za razočaranje nad lastno trenutno nezmožnostjo sledenja, temveč si lahko vzame čas, da poveča silo prijema nad minimalno potrebno vrednost in uspešno nadaljuje pot. Seveda mora biti minimalna vrednost sile naravnana na vrednost, ki jo uporabnik lahko izvede, sicer bo obtičal sredi naloge.

ZAKLJUČKI

HENRiE naprava je sodoben rehabilitacijski pripomoček, ki temelji na tehnologiji haptičnih vmesnikov in računalniško podprtih navideznih okolij. S hkratno vadbo gibanja roke in prijemanja z njo razširja terapevtske možnosti. Modul

za prijemanje se je pri izvajanju nalog v navideznih okoljih izkazal kot dobrodošla pridobitev. Možnost prijemanja navideznih predmetov v navideznih okoljih pripelje do bolj naravnega občutka interakcije z navideznimi okolji, hkrati pa je za uporabnika tudi bolj vzpodbudno, ker predmet "prime" in le-ta ni le prilepljen na njegovo zapestje oziroma roko. Pri nadaljnjem razvoju modula bo treba upoštevati potrebo po zmanjšanju mase in velikosti modula, saj lahko to vpliva na kakovost vodenja haptičnega robota. Dobrodošla bi bila tudi aktivna stopnja modula za prijemanje, ki bi po potrebi omogočala spreminjanje togosti ročk, z dodatno stopnjo pa bi lahko tudi simulirali različne stopnje elastičnosti navideznih predmetov. Posebna težava je tudi prikazovanje 3D navideznih okolij na navadnem LCD zaslonu, ko v dobršni meri izgubimo informacijo o globini, ki pa je za uspešno izvajanje nekaterih nalog pomembna. Zato načrtujemo uporabo sistema za pravo 3D prikazovanje, ki bo avtentično prikazal tudi globino. Sistem bo sestavljen iz posebnega projekcijskega platna ter dveh projektorjev, pravi 3D občutek pa bo dosežen z uporabo polarizacijskih očal. V prihodnje bomo v poizkuse vključili tudi osebe z zmanjšanimi motoričnimi sposobnostmi.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Slovenski agenciji za raziskovalno dejavnost za finančno podporo.

LITERATURA

1. Loureiro RCV, Collin CF, Harwin WS. Robot aided therapy: challenges ahead for upper limb stroke rehabilitation. In: 5th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies. Reading, UK: The University of Reading, 2004: 3-39.
2. Nef T, Mihelj M, Colombo G, Riener R. ARMIN - a robot for patient-cooperative arm therapy. *Med Biol Eng Comput* 2007; 45: 887-900.
3. Harwin WS, Patton JL, Edgerton VR. Challenges and opportunities for robot-mediated neurorehabilitation. *Proc I[5]* 2006; 94: 1717-1726.
4. Kahn LE, Zygmant ML, Rymer WZ, Reinkensmeyer DJ. Robot-assisted reaching exercise promotes arm movement recovery in chronic hemiparetic stroke: a randomized controlled pilot study. *J Neuroeng Rehabil* 2006 Jun 21; 3: 12.
5. Kurillo G, Mihelj M, Munih M, Bajd T. Multi-fingered grasping and manipulation in virtual environment using an isometric finger device. *Presence* 2007; 16: 239-306.
6. Luciani A, Urma D, Marliere S, Chevrier J. PRESENCE: the sense of believability of inaccessible worlds. *Comput Graph* 2004; 28: 509-517.
7. Fritz SL, Light KE, Patterson TS, Behrman AL, Davis SB. Active finger extension predicts outcomes after constraint-induced movement therapy for individuals with hemiparesis after stroke. *Stroke* 2005; 36: 1172-1177.
8. Mihelj M. Haptični roboti. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, 2007.
9. Činkelj J. Haptični vmesnik, zasnovan na RTLinux operacijskem sistemu: magistrsko delo. Ljubljana: [J. Činkelj], 2007. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.
10. Forssberg H, Eliasson AC, Kinoshita H, Johansson RS, Westling G. Development of human precision grip I: Basic coordination of force. *Exp Brain Res* 1991; 85: 451-457.
11. Flanagan JR, Wing AM. Modulation of grip force with load force during point-to-point arm movements. *Exp Brain Res* 1993; 95: 131-143.
12. Viau A, Feldman AG, McFadyen BJ, Levin MF. Reaching in reality and virtual reality: a comparison of movement kinematics in healthy subjects and in adults with hemiparesis. *J Neuroeng Rehabil* 2004 Dec 14; 1(1): 11.
13. Jones RD. Measurement of sensory-motor control performance capacities: tracking tasks. In: Bronzino JD, ed. *The biomedical engineering handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000: 2197-218.
14. Wetherell A. Performance tests. *Environ Health Perspect* 1996; 104: 247-273.