

# Robotic system for rehabilitation of upper extremities

Janez Podobnik, Marko Munih

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija

E-pošta: janezp@robo.fe.uni-lj.si, marko.munih@robo.fe.uni-lj.si,

## Abstract

*This paper presents the HenRiE (Haptic environment for reaching and grasping exercises) device, 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 a haptic interface with a grasping module that is mounted on the end-effector of the haptic interface. This allows combined training of the upper extremity movements and grasping. High level of reality is achieved with use of the graphic and haptic visual environments, which is beneficial for the motivation of the patients.*

## 1 Uvod

Robotsko podprta rehabilitacija je rehabilitacijska tehnika, pri kateri uporabljamo robotske naprave, opremljene s senzorji za zaznavanje pozicij in sil [1, 2]. Razširja terapevtske možnosti in dopolnjuje tradicionalne terapevtske metode za izboljšanje pacientovih motoričnih sposobnosti [3]. 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 [4]. Evropski projekt Gentle/S je pokazal, da so bili posamezniki bolj motivirani za daljšo vadbo, če so uporabljali sistem za prikazovanje navidezne resničnosti, sestavljenih iz haptičnih in vizualnih 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 sistema [1]. V prispevku bomo predstavili napravo HEnRiE (Haptično okolje za vadbo seganja in prijemanja), ki združuje haptični vmesnik za roko, sistem za prijemanje, ki je nameščen na haptični vmesnik, ter računalniško podprta navidezna okolja, ki so namenjena za vadbo motoričnih sposobnosti roke in prijemanja. Sistem je namenjen hkrati za vadbo gibanja roke in prijemanja z njo. V prispevku bo predstavljena naloga, ki prikazujeta primer take vadbe. Hkratna vadba je smiselna, saj pri večini opravil vsakdanjega življenja roko uporabljamo za različne gibe in za prijemanje predmetov [5].

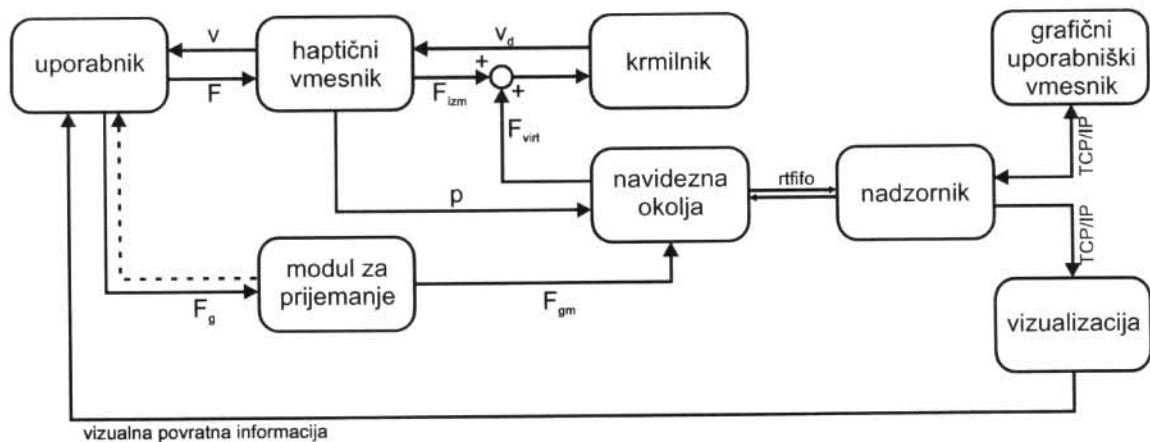
## 2 Arhitektura sistema

Slika 1 prikazuje shemo sistema HEnRiE, namenjenega za prijemanje in seganje v haptičnih navideznih okoljih. Gradniki sistema so sledeči:

- Haptični vmesnik HapticMaster. Na vrhu haptičnega vmesnika se nahaja merilnik sile  $F$ , ki jo izvaja uporabnik s svojo roko. Haptični vmesnik je prav tako opremljen z enkoderskimi merilniki pomika, s pomočjo katerih se določi položaj vrha robota  $p$ .
- Sistem vodenja.
- Modul za prijemanje, ki se nahaja na vrhu haptičnega vmesnika in omogoča merjenje sile prijema.
- Sistem za 3D grafično prikazovanje
- Sistem za kompenzacijo teže roke
- Haptična navidezna okolja
- Nadzorniški program
- Grafični uporabniški vmesnik
- Vizualizacija

Uporabnik izvaja na haptični vmesnik HapticMaster silo  $F$ , ki se meri s senzorjem sile (izmerjeno silo smo na sliki 1 označili s  $F_{izm}$ ), haptični vmesnik HapticMaster pa se giblje oziroma prikazuje hitrost  $v$ . Uporabnik prav tako izvaja silo prijema  $F_g$  na modul za prijemanje.

Izmerjena sila prijema  $F_{gm}$  je eden od vhodov v navidezna okolja (uporabnik dobi kot povratno informacijo ob izvajanju sile prijema tudi informacijo o pomiku nalonov za prste, v katere so nameščeni prsti). Vhod v navidezna okolja je tudi pozicija vrha  $p$  haptičnega vmesnika. Izhod iz navideznega okolja je sila  $F_{virt}$ , ki je vsota vseh sil predmetov v navideznem okolju, ki delujejo na vrh haptičnega vmesnika. Vsota sil  $F_{virt}$  in  $F_{izm}$  je vhod v regulator, izhod iz regulatorja pa je željena hitrost gibanja vrha haptičnega vmesnika  $v_d$ . Hitrost  $v$  je dejanska hitrost gibanja vrha haptičnega vmesnika. Podatki iz navideznega okolja se prenašajo prek komunikacijskih kanalov rtfifo v nadzorniški program, ki jih posreduje prek TCP/IP komunikacijskega protokola programu za



Slika 1: Arhitektura HEnRiE sistema.

vizualizacijo, hkrati pa jih tudi shranjuje na trdi disk. Nadzorniški program prek TCP/IP komunikacijskega protokola sprejema ukaze iz grafičnega uporabniškega vmesnika. Vizualizacija in grafični uporabniški vmesnik se zato lahko izvajata na drugem računalniku kot nadzorniški program.

## 2.1 HapticMaster in sistem vodenja

V tem delu bomo podali opis haptičnega vmesnika HapticMaster in delovanja regulatorja za haptični vmesnik [6, 7]. Strojno opremo haptičnega vmesnika sestavljajo robotska roka, krmilni računalnik z vhodnimi in izhodnimi računalniškimi karticami, izhodne stopnje ter varnostno stikalo. Robotska roka ima tri prostostne stopnje. Prvi sklep omogoča translacijo v navpični smeri, drugi rotacijo okoli navpične osi, tretji pa translacijo v vodoravni ravnini. Delovno področje robota se okvirno sklada z delovnim področjem roke [8]. Vsak sklep je opremljen z inkrementalnimi enkoderji za določanje lege sklepa. Na vrhu robota se nahaja senzor za merjenje sile. Senzor vsebuje tri merilne celice z uporabnimi lističi, za merjenje sile v treh oseh kartezičnega koordinatnega sistema senzorja sile. Nazivno merilno območje za posamezno os je od  $-100\text{ N}$  do  $100\text{ N}$ .

Slika 2 prikazuje shemo vodenja haptičnega vmesnika HapticMaster. Referenca za gibanje haptičnega robota je gibanje navidezne masne točke z maso  $m$ . Na masno točko delujejo izmerjena sila  $F_{izm}$ , ki jo izvaja uporabnik, ter sile navideznega okolja  $F_{virt}$ . Vsota vseh teh sil, deljena z maso  $m$  masne točke, je pospešek  $a_{virt}$ , iz katerega se določi hitrost  $v_{virt}$  masne točke. Prek inverzne Jacobijeve matrike se določi še hitrost  $\dot{q}$  in pozicijo  $q$  v sklepni koordinatah, iz katerih se določi referenčna hitrost  $\dot{q}_{ref}$  za analogni PD regulator. Analogni PD regulator je del strojne opreme haptičnega vmesnika HapticMaster. Vhod v regulator je izmerjena hitrost  $\dot{q}_{tah}$ , izhod pa so tokovi  $I_{reg}$  za poganjanje motorjev haptičnega vmesnika.

Krmilniški računalnik je industrijski računalnik, na katerem se izvaja vodenje v realnem času s frekvenco vzorčenja  $2.5\text{ kHz}$ . Delovanje v realnem času zagotavlja operacijski sistem RTLinux (Real-Time Linux). Program-

ska oprema, ki se izvaja na krmilniškem računalniku, je izvedena v treh nivojih. Prvi nivo je nizkonivojski jedrni modul, ki se izvaja v realnem času. Nizkonivojski jedrni modul skrbi za varno vodenje robota, vključuje kinematični model robota, branje iz vhodnih kartic, pisanje na izhodne kartice. Nizkonivojski jedrni modul poskrbi za ustrezno vodenje robota v referenčno pozicijo. Naslednji nivo predstavlja visokonivojski jedrni modul, ki prav tako teče v realnem času. V tem modulu se izvajajo haptična navidezna okolja. Izhod iz visokonivojskega jedrnega modula je sila, ki deluje na vrh robota. Na zadnjem nivoju teče nadzorniški program, ki prek **rtfifo** komunikacijskih linij komunicira z visokonivojskim jedrnim modulom. Zadnji nivo ne poteka v realnem času, temveč ima normalno prioriteto in se izvaja kot navaden program, nizkonivojski in visokonivojski jedrni modul pa se nahajata v Linux jedru. Tako iz visokonivojskega jedrnega modula bere podatke o legi vrha robota, o silah, o položajih predmetov v navideznih okoljih, itd. Te podatke shranjuje na trdi disk in jih posreduje prek TCP/IP komunikacijskega protokola programu za vizualizacijo in grafičnemu uporabniškemu vmesniku. V nasprotni smeri pa posreduje ukaze iz grafičnega uporabniškega vmesnika v visokonivojski jedrni modul.

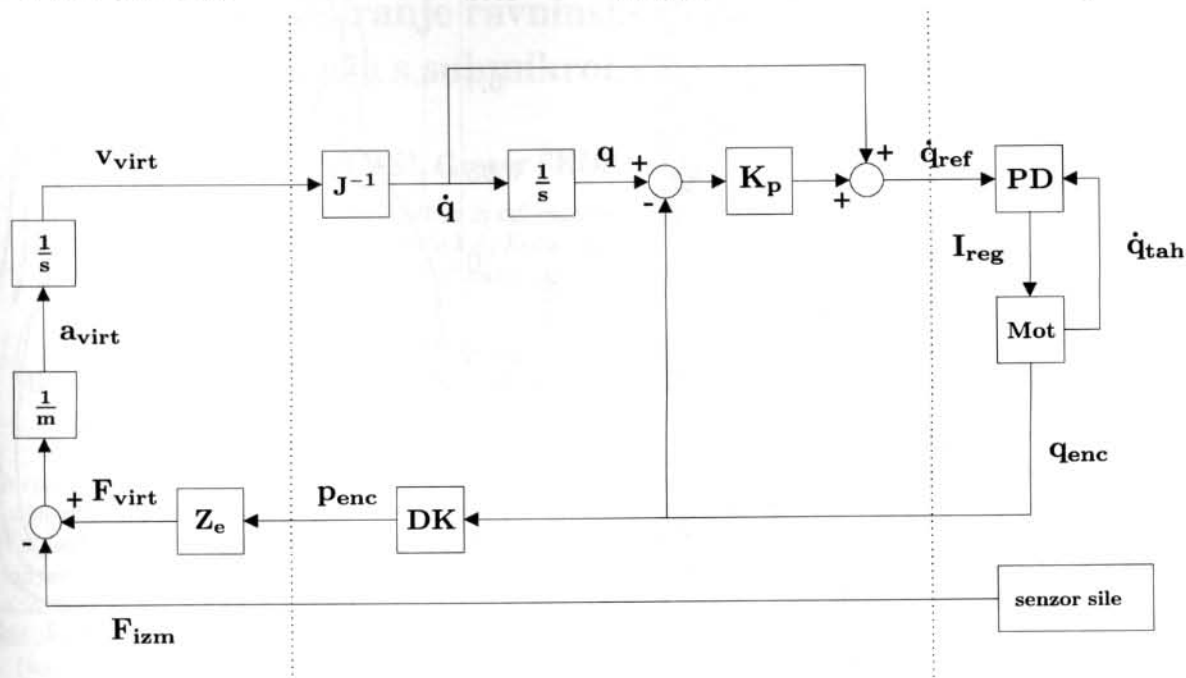
## 2.2 Naprava za prijemanje

Modul za prijemanje, ki je prikazana na sliki 3, 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 elastič, 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 (resnični) predmet. Modul za prijemanje je mogoče prilagoditi različnim velikostim roke, različnim silam prijemanja ter za merjenje na desni

model masne točke  
v navideznom okolju

diskretni del  
vodenja

analogni del  
vodenja



Slika 2: Slika prikazuje regulacijsko shemo haptičnega vmesnika HapticMaster.

ali levi roki.

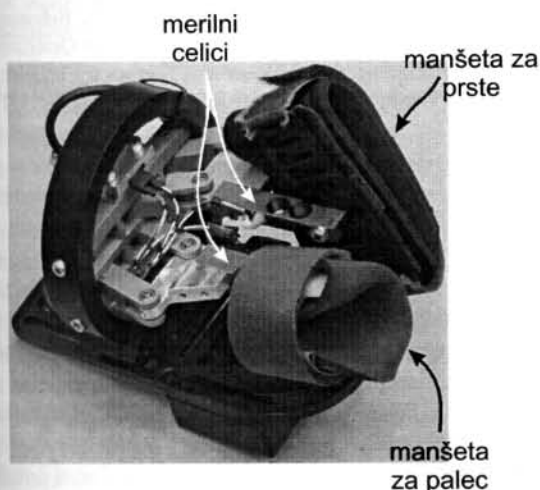
### 3 Naloga zavita cev

Cilj te naloge je celotno cev prepotovati in doseči njen konec. Cev ima spreminjajoč se premer. Položaj zapetja 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

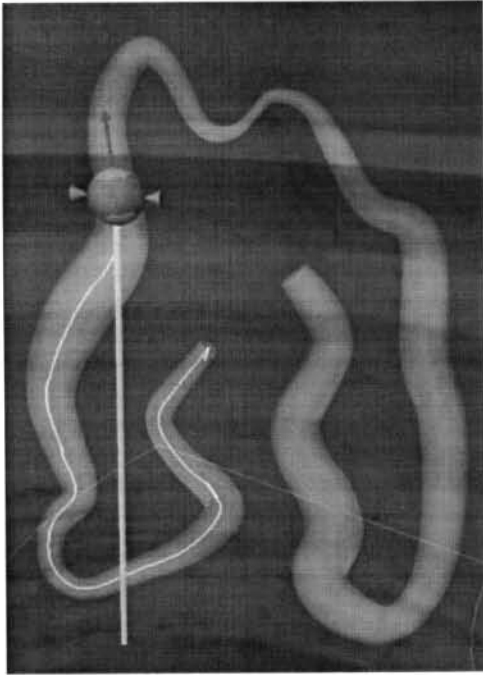
vedno manjši. Za pomikanje vzdolž cevi je treba žogico stisniti na ustrezno velikost, da bi lahko prišli do konca cevi. Če je premer žogice večji od premera cevi, se le-ta začne ob cev drgniti, kar upočasnjuje pomikanje, če pa je premer kroglice precej večji od premera cevi, se le-ta v cevi popolnoma 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.

### 4 Rezultati in diskusija

Slika 5 prikazuje potek poti pri nalogi zavita cev. Z debelo črto, označeno z različnimi odtenki sive barve, je označena pot žogice, njen premer pa je označen z tanko črno barvo. Črna sredinska črta označuje mesta, kjer je premer žogice večji od premera cevi. Na teh mestih se uporabnik zatakne v cevi in je prisiljen povečati silo prijema, da lahko nadaljuje pot. Oseba le kratek del poti premaga na tak način. Kadarkoli uporabnik zmanjša silo prijema pod minimalno silo, silo prijema ponovno poveča, da se lahko prosto pomika vzdolž cevi. Temno siva barva označuje del poti, ko je premer žogice manjši od premera cevi, uporabnik pa drsi po steni z žogico. Z najsvetlejšo sivo pa je označen del poti, ko je premer žogice manjši od premera cevi in žogica ni v kontaktu s steno. S slike 5 vidimo, da oseba precejšen del poti prepotuje tako, da si pomaga z drsenjem ob steni cevi. Vaja torej združuje tako gibanje roke, kot tudi prijem. Pri tej vaji lahko določimo kakšna naj bo minimalna sila prijema v določenem delu poti. Naloga bi lahko zato uvrstili v skupino nalog sle-



Slika 3: Slika prikazuje modul za prijemanje. Modul je prilagojen za vadbo in meritve z osebami z zmanjšanimi motoričnimi sposobnostmi, na merilni celici sta namreč dodani manšeta za palec na levi celici in manšeta za ostale štiri prste na desni celici.



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

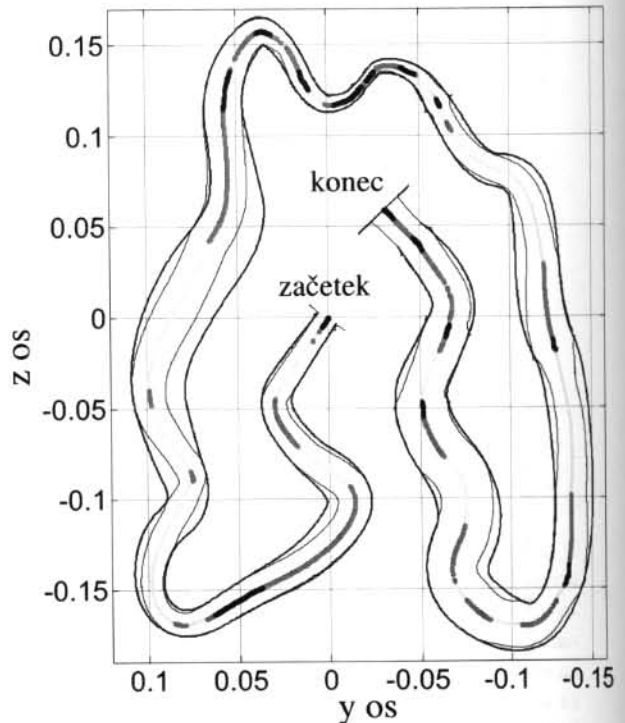
denja referenci [9, 10], ki je pri tej nalogi minimalna sila prijema. Vendar pa je pri tej nalogi novo to, da uporabnik ne sledi zgolj vizualni referenci, temveč v primeru ko je sila prijema pod minimalno vrednostjo, občuti prek haptičnih dražljajev tudi razliko med želeno in dejansko vrednostjo sile prijema. Poleg tega pa je vzpodbujen, da se potruji in sledi referenci, ki ni časovna funkcija, temveč je odvisna od pozicije.

## 5 Zaključek

Sistem HEnRiE opisan v tem članku omogoča razširitev terapije za zgornjo ekstremiteto na terapijo prijema za hkratno izvajanje obeh terapij. Modul za prijemanje se je izkazal kot dobrodošla pridobitev pri izvajanju nalog v navideznih okoljih. Možnost prijemanja navideznih objektov v navideznih okoljih pripelje do bolj naravnega občutka interakcije z navideznimi okolji, hkrati tudi bolj motivira, ker uporabnik predmet "prime", in se ne zgolj prilepi na zapestje oziroma roko. Za nadaljnji razvoj modula se nakazuje potreba po zmanjšanju mase in velikosti modula, saj lahko ta vpliva na kvaliteto vodenja haptičnega robota.

## Literatura

- [1] R. C. V. Loureiro, C. F. Collin, W. S. Harwin. Robot Aided Therapy: Challenges Ahead for Upper Limb Stroke Rehabilitation. V: 5th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies, Reading, UK, The University of Reading, 2004: 3-39.
- [2] T. Nef, M. Mihelj, G. Colombo, R. Riener. ARMIN - A Robot for Patient-Cooperative Arm Therapy. *Med Biol Eng Comput* 2007; 45: 887-900.



Slika 5: 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.

- [3] W. S. Harwin, J. L. Patton, V. R. Edgerton. Challenges and Opportunities for Robot-Mediated Neurorehabilitation. *Proc IEEE* 2006; 94:1717-1726.
- [4] G. Kurillo, M. Mihelj, M. Munih, T. Bajd. Multi-Fingered Grasping and Manipulation in Virtual Environment Using an Isometric Finger Device. *Presence* 2007;16: 239-306.
- [5] S. L. Fritz, K. E. Light, T. S. Patterson, A. L. Behrman, S. B. Davis. Active Finger Extension Predicts Outcomes After Constraint-Induced Movement Therapy for Individuals With Hemiparesis After Stroke. *Stroke*. 2005;36:1172-1177.
- [6] R. Q. van der Linde, P. Lammertse. HapticMaster - a generic force controlled robot for human interaction. *Ind Rob*. 2003;30(6):515-524.
- [7] Justin Činkelj. Haptični vmesnik, zasnovan na RTLinux operacijskem sistemu. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. 2007. Magistrsko delo.
- [8] Nives Klopčar. Kinematični model ramenskega sklopa in dosegljivi delovni prostor roke pri človeku. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko. 2005. Doktorska disertacija.
- [9] R. D. Jones. Measurement of sensory-motor control performance capacities: tracking tasks. In: Bronzino JD, ed. *The Biomedical Engineering Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL; 2000. p. 2197-218.
- [10] A. Wetherell. Performance tests. *Environ Health Perspect*. 1996;104:247-273.