

## Sistem za robotsko podprto rehabilitacijo seganja in prijemanja

Janez Podobnik, Justin Činkelj, Marko Munih

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: janez.podobnik@robo.fe.uni-lj.si

**Povzetek.** V prispevku je opisan sistem za robotsko podprto rehabilitacijo seganja in prijemanja HEnRiE. Cilj je bilo razviti enovit sistem, ki omogoča vadbo prijemanja in gibanja roke z eno samo napravo. Sistem združuje haptični vmesnik in napravo za prijemanje, ki je nameščena na vrhu haptičnega vmesnika. V tem prispevku bomo natančno opisali posamezne gradnike sistema.

**Ključne besede:** haptični vmesnik, navidezna okolja, zgornji ud, prijemanje, rehabilitacija roke

## System for robot-aided rehabilitation of reaching and grasping

**Extended abstract.** The paper presents a robot-aided neurorehabilitation device to be used in training of reaching, grasping and arm movements in haptic environments. Robot-aided neurorehabilitation is a sensory-motor rehabilitation technique based on the use of robots and mechatronic devices [9]. The aim is to aid and augment the traditional therapy in patients with motor disabilities to improve their motor performance, shorten the rehabilitation time, and provide objective parameters for their state evaluation [10]. The motivation was to develop a single system that retrains both hand grasping and releasing movements (which are essential for performing activities of daily living) and arm movements. The system combines a haptic interface and a grasping device mounted on the end-point of the haptic interface. Such multimodal interface allows employment of a larger number of human motor and sensory channels, thus maximizing the plastic changes in the patient's central nervous system. The focus of the paper is on providing a thorough description of the HenRiE device.

**Key words:** Haptic interface, virtual environment, upper limb, grasping, arm and grasp rehabilitation

### 1 Uvod

Raziskave in izkušnje z uporabo navidezne resničnosti so pokazale, da navidezna resničnost omogoča občutek prisotnosti v računalniško ustvarjenih navideznih okoljih [1]. Ta so bila v preteklosti omejena na grafična navidezna okolja, razvoj haptičnih vmesnikov pa je omogočil uporabo haptičnih navideznih okolij, ki so korak naprej v stopnji občutka prisotnosti v navideznih okoljih [2]. Združevanje enomodalnih navideznih okolij v večmodalna okolja (združitev haptičnega in grafičnega navideznega okolja) privede do vključevanja več različnih

kognitivnih procesov in s tem večji občutek prisotnosti v navideznih okoljih [3]. Zato je smiselno uporabljati sisteme, ki omogočajo večmodalna navidezna okolja, tudi za študij in ocenjevanje funkcionalnih sposobnosti tako pri zdravih osebah kot tudi osebah z zmanjšanimi funkcionalnimi sposobnostmi ter za rehabilitacijo in izboljšanje funkcionalnih sposobnosti pri teh osebah [4, 5]. Uporaba navideznih okolij namreč omogoča oblikovanje nalog z dobro definiranimi lastnostmi okolja in natančno merjenje kinematičnih parametrov [5]. Tak večmodalni sistem torej presega zgolj področje haptičnih vmesnikov, saj združuje haptični vmesnik z grafičnimi navideznimi okolji in dodatnimi senzori za merjenje fizikalnih veličin, ki jih vključujemo v interakcijo z navideznimi okolji. Ker je mogoče lastnosti navideznih okolij natančno določati, je mogoče naloge prilagoditi funkcionalnim sposobnostim osebe, ki je v interakciji z navideznimi okolji [6]. Pri raziskavah funkcionalnih sposobnosti se pogosto uporabljajo merilni sistemi in metodologije, ki jih je težko prilagoditi za druge naloge in teste, zato so haptični sistemi zaradi svoje programabilnosti bolj prilagodljivi in omogočajo večji obseg različnih eksperimentalnih pogojev [4]. Tak sistem torej omogoča prikazovanje velikega števila različnih navideznih okolij kot tudi merjenje pozicij in sil, ki nastopajo pri haptični interakciji.

Pogosto se za merjenje gibanja roke od točke do točke uporabljajo haptični vmesniki, še zlasti ko gre za hkratno gibanje roke in premagovanje sil, saj tako nismo omejeni le na izometrične in izotonične pogoje meritev [6]. Večina raziskav se osredotoča samo na kinematiko gibanja, ki jo merijo z markerji in kamerami [7] ali merilno rokavico [8], ne pa tudi na sile.

Robotsko podprta rehabilitacija je senzorično-motorična rehabilitacijska tehnika, pri kateri uporabljamo

razne mehatronske in robotske naprave, opremljene s senzorji za zaznavanje pozicij in sil [9]. Razširja terapevtske možnosti in dopolnjuje tradicionalne terapevtske metode in tehnike za izboljšanje pacientovih senzorično-motoričnih sposobnosti [4], skrajša čas rehabilitacije ter omogoča objektivno ocenjevanje pacientovih motoričnih sposobnosti [10]. Robotsko podprta rehabilitacija je tesno povezana s tehnologijo navidezne resničnosti, ki se je prav tako izkazala kot uporabno orodje pri rehabilitaciji [11]. Skupaj z merilniki sil prijema in navideznimi okolji haptični vmesnik omogoča izgradnjo celovitega sistema za merjenje hkratnega gibanja roke ter sil interakcije in sil prijema. Hkratna vadba je smiselna, saj pri večini opravil vsakdanjega življenja roko uporabljamo za različne gibe in za prijemanje predmetov [12]. Tako je smiselno opravljati same dejavnosti vsakodnevnega življenja ali njihove specifične komponente, ki so vključene v vadbo z nalogami opravil (ang. task-specific training) [13].

V nadaljevanju bomo predstavili sistem HEnRiE (Haptično okolje za vadbo seganja in prijemanja, ang. Haptic Environment for Reaching and Grasping Exercise), ki omogoča študij, vadbo in rehabilitacijo seganja in prijemanja v haptičnih navideznih okoljih. Predstavili bomo gradnike in arhitekturo sistema.

## 2 Sistem za prijemanje in seganje v haptičnih navideznih okoljih HEnRiE

### 2.1 Arhitektura sistema

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

- 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 trodimenzionalno grafično prikazovanje
- Sistem za kompenzacijo teže roke
- Haptična navidezna okolja
- Nadzorniški program
- Grafični uporabniški vmesnik in vizualizacija

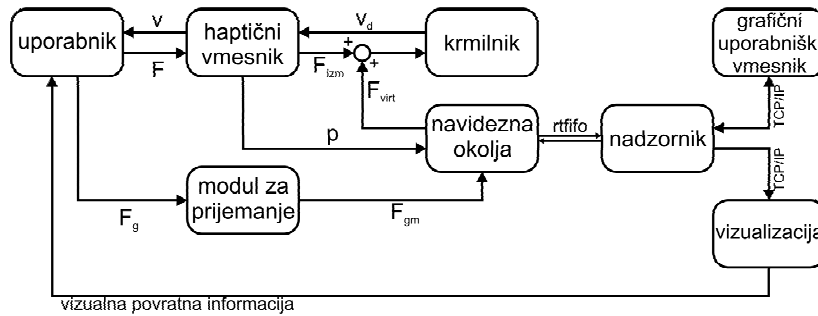
Uporabnik izvaja na haptični vmesnik HapticMaster silo  $F$ , ki se meri s senzorjem sile (izmerjeno silo smo

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. Ta se meri in izmerjena sila prijema  $F_{gm}$  je eden od vhodov v navidezna okolja. 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 (real-time fifo medpomnilnik) v nadzorniški program, ki jih posreduje prek komunikacijskega protokola TCP/IP programu za vizualizacijo, hkrati pa jih tudi shranjuje na trdi disk. Nadzorniški program prek komunikacijskega protokola TCP/IP sprejema ukaze iz grafičnega uporabniškega vmesnika. Vizualizacija in grafični uporabniški vmesnik se zato lahko izvajata na drugem računalniku kot nadzorniški program.

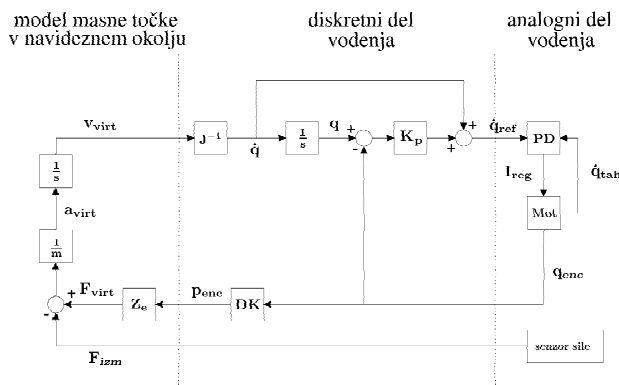
### 2.2 HapticMaster in sistem vodenja

V nadaljevanju bomo podali opis haptičnega vmesnika HapticMaster in delovanja regulatorja za haptični vmesnik HapticMaster [14]. 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 (os  $z$ ), drugi rotacijo okoli navpične osi, tretji pa translacijo v vodoravni ravnini. Vsak sklep je opremljen z inkrementalnimi enkoderji za določanje lege sklepa. Na vrhu robota je senzor za merjenje sile. Senzor vsebuje tri merilne celice z uporovnimi lističi za merjenje sile v treh oseh kartezičnega koordinatnega sistema senzorja sile. Nazivno merilno območje za posamezno os je 100  $N$ .

Slika 2 prikazuje shemo vodenja haptičnega vmesnika HapticMaster. Referenca za gibanje haptičnega robota je gibanje navideznega masnega delca z maso  $m$ . Na masno točko delujejo izmerjena sila  $F_{izm}$ , ki jo izvaja uporabnik, ter sile navideznega okolja  $F_{virt}$ . Sile navideznega okolja  $F_{virt}$  se določijo glede na položaj vrha robota  $p_{enc}$ , ki se določi s pomočjo direktne kinematike  $DK$  iz enkoderskih signalov  $q_{enc}$ . 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 Jacobi-jeve matrike se določita še hitrost  $\dot{q}$  in pozicija  $q$  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.



Slika 1. Arhitektura sistema HEnRiE



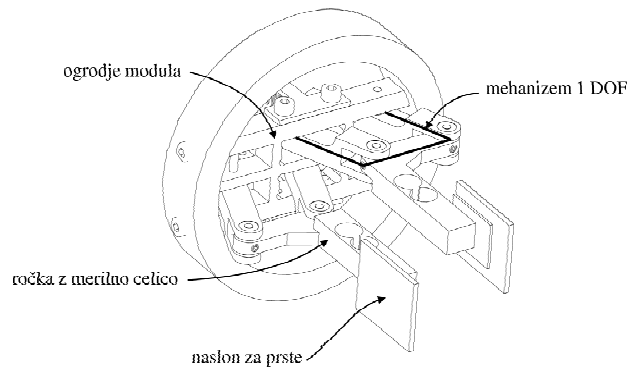
Slika 2. Slika prikazuje regulacijsko shemo haptičnega vmesnika HapticMaster

Krmilniški računalnik je industrijski računalnik, na katerem se izvaja vodenje v realnem času s frekvenco regulacijske zanke  $2.5\text{ kHz}$ . Delovanje v realnem času zagotavlja operacijski sistem RTLinux (Real-Time Linux). Programska 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 vodenje robota, vključuje kinematični model robota, branje z vhodnih kartic, pisanje na izhodne kartice ter skrbi za varno vodenje robota. Naslednji nivo je 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. Sila je vhod v nizkonivojski jedrni modul, kjer je vrh robota ponazorjen kot masna točka. Iz sile se določi pospešek, z integracijami pa pozicija masne točke, ki je referenčna pozicija za vrh robota. Nizkonivojski jedrni modul poskrbi za ustrezno vodenje robota v referenčno pozicijo. 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 jedru Linux. Tako iz visokonivojskega jedrnega modula bere podatke o legi vrha robota, o silah, o položajih predmetov v navideznih okoljih itd. Te po-

datke shranjuje na trdi disk in jih posreduje prek protokola TCP/IP programu za vizualizacijo in grafičnemu uporabniškemu vmesniku. V nasprotni smeri pa posreduje ukaze iz grafičnega uporabniškega vmesnika v visokonivojski jedrni modul.

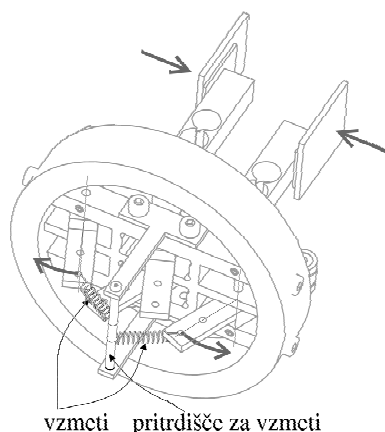
### 2.3 Naprava za prijemanje

Naprava za prijemanje je pasivni mehanizem z dvema prostostnima stopnjama, ki je nameščen na vrhu haptičnega vmesnika in omogoča prijemanje v navideznih okoljih. Sliki 3 in 4 prikazujeta modul za prijemanje.

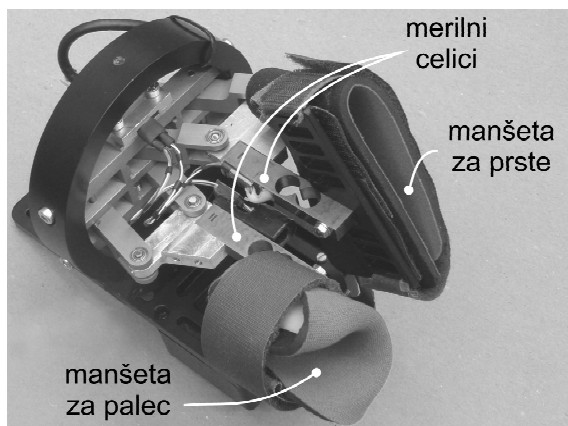


Slika 3. Slika prikazuje modul za prijemanje. Na vsaki od ročk se nahaja senzor sile. Vsaka od ročk je pritrjena na ogrodje modula prek mehanizma z eno prostostno stopnjo. Na drugi strani modula so ročke vezane na vzmeti (glej sliko 4).

Na ogrodje sta nameščena dva paralelogramska mehanizma, vsak s po eno prostostno stopnjo (na sliki 3 označen en mehanizem z odebeljeno črto). Na vsakem od mehanizmov se nahaja po ena merilna celica za merjenje sile, na katero je nameščen naslon za prste. Na ročki, na katero je pritrjen naslon za prste, je merilna celica z uporabnimi lističi S230 proizvajalca SMD. Merilna celica omogoča merjenje sile v območju  $[-100, 100]\text{ N}$ . Izhodni napetosti merilnih celic sta ojačeni in pretvorjeni v digitalno obliko z zunanjim A/D-pretvornikom. Programska oprema za zajemanje digitalnih vrednosti izhodne napetosti se izvaja v realnem času s frekvenco vodenja  $2500\text{ Hz}$ .



Slika 4. Slika prikazuje modul za prijemanje z zadnje strani, kjer sta pritrjeni dve vzmeti, vsaka za eno ročko. S puščico je prikazana smer gibanja ročke, ko povečujemo silo prijema (zapiranje dlani).



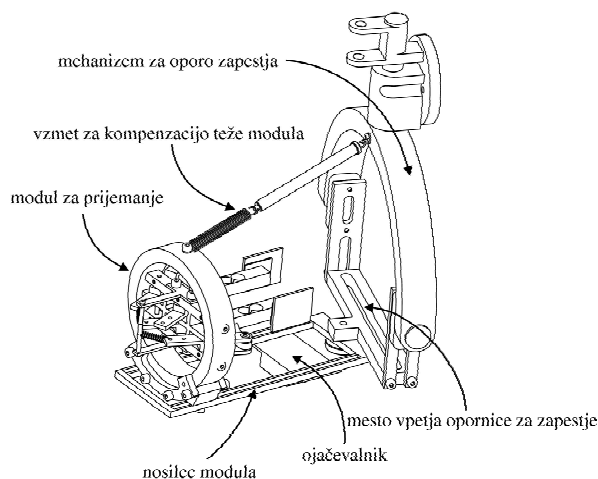
Slika 5. Slika prikazuje modul za prijemanje. Modul je prilagojen za vadbo in meritve z osebami z zmanjšanimi motoričnimi sposobnostimi, na merilni celici sta namreč dodani manšeta za palec na levi celici in manšeta za preostale štiri prste na desni celici.

Ker je izbran paralelogramski mehanizem, ostajata naslona za prste vzporedna ne glede na razdaljo med njima. Uporabnik izvaja na eno ročko silo s palcem, na drugo ročko pa s preostalimi prsti. Slika 4 prikazuje modul za prijemanje z druge strani. Vsak od mehanizmov je prek vzmeti pripet prek pritrdišča za vzmeti na ogrodje modula. Zato modul za prijemanje lahko opišemo kot elastično pasivno haptično napravo. Lindeman et al. [15] so pasivno haptično napravo opisali kot fizični objekt, ki uporabniku prek oblike, teksture površine in drugih lastnosti naprave podaja povratno haptično informacijo. Povratna haptična informacija, ki jo podaja pasivna haptična naprava, ni določena oziroma vodena s strani računalnika. Objekti so lahko bodisi togi bodisi se jim lahko spreminja oblika zaradi elastičnih lastnosti objekta.

Zhai [16] je razdelil vhodne naprave na izotonične in izometrične ter elastične kot vmesno možnost. Haptično

informacijo podajajo štirje tipi človekovih somatosenzornih receptorjev: mehanoreceptorji v sklepkih, Golgi-jev tetivni organ, mišično vreteno ter mehanoreceptorji v koži. Pri izometričnih napravah so koti v sklepkih konstantni, zato uporabna informacija prihaja le iz treh zgoraj opisanih tipov receptorjev. Pri elastičnih napravah pa uporabna informacija prihaja iz vseh štirih tipov receptorjev. V tem se modul za prijemanje razlikuje od togih pasivnih haptičnih naprav, ki temeljijo na psevdohaptičnem principu [17].

Modul za prijemanje je nameščen na mehanizem za oporo zapestja, kot kaže slika 6. Na mehanizem za oporo zapestja je nameščena opornica, v katero namestimo zapestje uporabnika. Opornica omeji gibanje roke v zapestju, gibljivost prstov pa ostane neomejena. Mehanizem za oporo zapestja ima dve prostostni stopnji, tako da omogoča prosto gibljivost roke v komolcu in rami. Zapestje je vpeto na mestu presečišča osi mehanizma za oporo zapestja.



Slika 6. Mehanizem za oporo zapestja z modulom za merjenje sile prijema

S tem se uporabniku omogoči svoboda gibanja roke v komolcu in rami. Modul za prijemanje je zato zamaknjen in se nahaja na nosilcu modula, kot je to prikazano na sliki 6. Med vrhom modula za prijemanje in mehanizma za oporo zapestja je vzmet, ki skrbi za kompenzacijo teže modula. Zato teža modula ne obremenjuje uporabnikove roke. Slika 7 prikazuje sistem HEnRiE z vsemi gradniki med izvajanjem vadbe gibanja roke in izvajanje sile prijema.

## 2.4 Dodatna strojna oprema

Dodatno strojno opremo sestavljajo še:

- Sistem za 3D grafično prikazovanje, ki ga sestavljata dva projektorja s krožnima polarizacijskima filtroma, platno, ki ohranja polarizacijo, ter polarizacijska očala.



Slika 7. Merilno okolje naprave HEnRiE

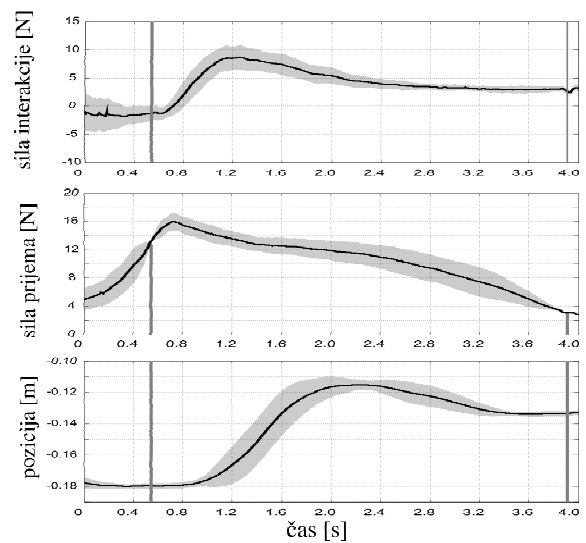
- Sistem za kompenzacijo teže roke, ki je namenjen podpori roke uporabnika z zmanjšanimi motoričnimi sposobnostimi. Sistemi za podporo roke so se izkazali za koristne pripomočke pri rehabilitaciji zgornjih ekstremitet, saj uporabnikom ni treba samim zagotavljati dodatne mišične moči za vzdrževanje teže roke [12]. Sistem za kompenzacijo teže roke je sestavljen iz dveh motorjev in manšet, namenjenih za kompenzacijo teže zgornjega in spodnjega dela roke. Sistem za kompenzacijo teže roke omogoča nastavljanje in spreminjanje sile, s katero sistem podpira roko.

## 2.5 Programska oprema

Programsko opremo poleg zgoraj opisanega sistema vodenja za haptični vmesnik sestavljajo še:

- Grafični uporabniški vmesnik. Grafični uporabniški vmesnik je namenjen osebi, ki vodi in nadzoruje vadbo. Organiziran je kot samostojen program. Omogoča izbiranje različnih vaj ter nadzor nad haptičnim vmesnikom HapticMaster. Ukaze osebe, ki nadzira vadbo, posreduje prek TCP/IP povezave nadzorniškemu programu, ki se izvaja na krmilniškem računalniku. Nadzorniški program ukaz posreduje visokonivojskemu jedrnemu modulu, ki izbere ustrezen način vodenja haptičnega vmesnika ali prikazovanja haptičnih navideznih okolij.
- Vizualizacija 3D grafičnih okolij. Program za vizualizacijo se izvaja na osebem računalniku v okolju Windows in je organiziran v dveh nitih, ena nit skrbi za izvajanje izrisovanja scene, druga pa za TCP/IP-komunikacijo z nadzorniškimi programom, ki se izvaja na krmilniškem računalniku.

- Haptična navidezna okolja. Haptična navidezna okolja se izvajajo s frekvenco vodenja, saj določajo silo  $F_{virt}$ , ki deluje na navidezno masno točko. Programska koda za haptična navidezna okolja se nahaja v visokonivojskem jedrnem modulu, ki se izvaja na krmilnem računalniku. Vhodni signali v haptična navidezna okolja so sila prijema ter hitrost in pozicija vrha haptičnega vmesnika oziroma navidezne masne točke, izhod pa je sila  $F_{virt}$ , ki deluje na navidezno masno točko.



Slika 8. Slika prikazuje potek sile interakcije, sile prijema in pozicije pri nalogi pobiranja in prenašanja navideznega predmeta. Sive navpične črte predstavljajo trenutek, ko je bil predmet najprej prijeto in nato izpuščen. Sivo območje pomeni odklon ene standardne deviacije za 20 potekov pobiranja in prenašanja navideznega predmeta.

## 3 Primer meritev z napravo HEnRiE

Slika 8 prikazuje primer meritev hemiparetične osebe po kapi med izvajanjem naloge pobiranja in prenašanja navideznega predmeta v navideznem okolju. Uporabnik se mora v navideznem okolju pomakniti do navideznega predmeta tako, da z roko izvaja gib seganja. Ko se pomakne do navideznega predmeta, izvede silo prijema in ko doseže prag sile prijema, potrebne za prijem, je predmet prijeto. Tedaj lahko predmet prenese z gibom roke na novo mesto, kjer ga izpusti. Sistem HEnRiE je bil ovrednoten na skupini zdravih oseb, nato pa na dveh osehah po kapi v obdobju enega meseca. Rezultati, pridobljeni na zdravih osehah, so bili uporabljeni kot primerjalni rezultati k rezultatom, pridobljenim z vadbo dveh oseh po kapi. Rezultati so pokazali pozitiven vpliv na sposobnost odpiranja in zapiranja dlani.

## 4 Sklep

Glavni cilj opravljenega dela, ki ga predstavlja prispevek, je bilo oblikovati in razviti celovito metodologijo in merilni sistem, ki bi bil primeren za meritve, vadbo in rehabilitacijo gibanja roke in prijemanja. Sistem vključuje haptični vmesnik, napravo za merjenje sile prijema in naloge v haptičnih in grafičnih navidezni okoljih. Vadba na osebah po kapi je potrdila, da je sistem primeren za uporabo pri rehabilitaciji oseb po kapi.

## 5 Literatura

- [1] A. Luciani, D. Urma, S. Marliere, J. Chevrier, PRES-ENCE: the sense of believability of inaccessible worlds, *Comput Graph* 28(4), 2004, pp. 509–517.
- [2] G. C. Burdea, Invited review: the synergy between virtual reality and robotics, *IEEE Trans Rob Autom* 15(3), 1999, pp. 400–410.
- [3] D. Hecht, M. Reiner, G. Halevz G, Multimodal virtual environments: response times, attention, and presence, *Presence* 15(5), 2006, pp. 515–523.
- [4] H. I. Krebs, N. Hogan, M. L. Aisen, B. T. Volpe, Robot-Aided Neuro-Rehabilitation, *IEEE Trans Rehabil Eng* 6(1), 1998, pp. 75–87.
- [5] B. T. Volpe, H. I. Krebs, N. Hogan, Is robot-aided sensorimotor training in stroke rehabilitation a realistic option?, *Curr Opin Neurol* 14(6), 2001, pp. 745–752.
- [6] R. Colombo, F. Pisano, S. Micera, A. Mazzone, C. Delconte, M. C. Carrozza, P. Dario, G. Minuco, Robotic techniques for upper limb evaluation and rehabilitation of stroke patients, *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 13(3), 2005, pp. 311–324.
- [7] N. Yang, M. Zhang, C. Huang, D. Jin, Synergic analysis of upper limb target-reaching movements, *J Biomech* 35(6), 2002, pp. 739–746.
- [8] A. Viau, A. G. Feldman, B. J. McFadyen, M. F. Levin-corresponding, Reaching in reality and virtual reality: a comparison of movement kinematics in healthy subjects and in adults with hemiparesis, *J Neuroeng Rehabil* 1(11), 2004.
- [9] T. Nef, M. Mihelj, G. Colombo, R. Riener, ARMin - A Robot for Patient-Cooperative Arm Therapy, *Med Biol Eng Compu* 45, 2007, pp. 887–900.
- [10] W. S. Harwin, J. L. Patton, V. R. Edgerton, Challenges and Opportunities for Robot-Mediated Neurorehabilitation, *Proceedings of the IEEE* 94(9), 2006, pp. 1717–1726.
- [11] H. Svcestrup, Motor rehabilitation using virtual reality, *J Neuroeng Rehabil* 1(1), 2004
- [12] C. Winstein, A.M. Wing, J. Whitall, *Motor control and learning principles for rehabilitation of upper limb movements after brain injury*, Handbook of Neuropsychology (J. Grafman and I.H. Robertson, eds.), vol. 9, pp. 77–137, Elsevier Science B.V., 2003.
- [13] R. F. Beer, J. D. Given, J. P. Dewald, Task-dependent weakness at the elbow in patients with hemiparesis, *Arch Phys Med Rehabil* 80(7), 1999, pp. 766–772.
- [14] R. Q. van der Linde, P. Lammertse, HapticMaster – a generic force controlled robot for human interaction, *Ind Rob* 30(6), 2003, pp. 515–524.
- [15] R. W. Lindeman, J. L. Sibert, J. K. Hahn, Hand-held windows: towards effective 2D interaction in immersive virtual environments, *IEEE Proceedings on Virtual Reality*, Houston, TX, USA, 1999, pp. 205–212.
- [16] S. Zhai, Investigation Of Feel For 6dof Inputs: Isometric And Elastic Rate Control For Manipulation In 3d Environments, *Proceedings of The Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting*, Seattle, WA, USA, 1993.
- [17] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, P. Coiffet, Pseudo-Haptic Feedback : Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?, *IEEE International Conference on Virtual Reality*, New Brunswick, USA, 2000, pp. 83–90.

**Janez Podobnik** je diplomiral leta 2004 in doktoriral leta 2009 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je zaposlen kot asistent. Je član Laboratorija za robotiko in biomedicinsko tehniko. Glavno področje raziskovanja obsega razvoj in raziskave iz vodenja haptičnih vmesnikov in robotov za interakcijo s človekom s poudarkom na sistemih za uporabo v robotsko podprti rehabilitaciji.

**Justin Činkelj** je diplomiral leta 2004 in magistriral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je zaposlen kot raziskovalec. Glavno področje njegovega dela je razvoj sistemov za vodenje v realnem času. Tako je razvil okolje za vodenje robotov po sili, v zadnjem času pa razvija sistem za avtomatsko vodenje delovanja hidravličnega dvigala.

**Marko Munih** je diplomiral leta 1986, magistriral leta 1989 in doktoriral leta 1993, vse na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je zdaj redni profesor. Odmevno je raziskoval na University College London. Usmerjenost Laboratorija za robotiko in biomedicinsko tehniko na Fakulteti za elektrotehniko je s področja FES privedel na področje rehabilitacijske robotike oz. haptičnih robotov.