

Dvoročni vadbeni sistem z robotom HapticMaster

Janez Podobnik, Anže Stražar, Marko Munih, Matjaž Mihelj

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani

E-pošta: janez.podobnik@fe.uni-lj.si

Abstract

This paper describes the development of a bilateral training device based on a HapticMaster robotic system. The system was evaluated with a study which involved fifteen healthy people and nine chronic stroke subjects whose movement were measured and analyzed. Paper presents the hardware and software used to implement and analyze the concept of bilateral training on a robotic system. Moreover, it explains the control of the robotic system and the tasks designed for bilateral robotic training and their connection to the virtual environment. Bilateral training with the presented system is intuitive, simple and suitable for persons with different types of nervous system disorders. The presented robotic training system allows an objective evaluation of the training of the motor abilities of the patient's affected limb based on the measured parameters.

1 Uvod

Možganska kap vsako leto v Sloveniji prizadene 4500 ljudi, na svetu pa kar 15 milijonov [1]. V povprečju na svetu letno beležimo okoli 5 milijonov smrtnih izidov, okoli 5 milijonov pa utrpi trajne posledice. Možganska kap se uvršča na drugo mesto med vzroki za smrt ter je pogost vzrok za zmanjšanje gibalnih zmožnosti med ljudmi.

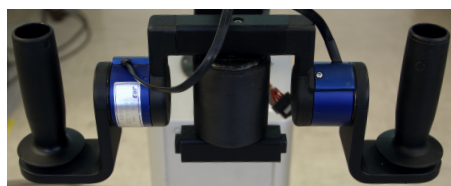
Osebe po kapi imajo zmanjšane motorične sposobnosti prizadete strani telesa, kar osebam po kapi omejuje zmožnosti opravljanja vsakodnevnih opravil. Mnoge od teh vsakodnevnih opravil zahtevajo koordinirano uporabo obeh zgornjih udov [2]. Z vadbo se izboljša tako koordinacija med udoma, kakor tudi moč prijema, spretnost, in funkcionalna sposobnost prizadetega uda [3, 4].

Poleg tradicionalne rehabilitacije, ki jo izvajajo terapevti, je napredek v robotiki omogočil vključitev robotov v programe rehabilitacije. V večji meri robotski rehabilitacijski sistem pri tem služi kot dodatek k rehabilitaciji, terapevtov pa popolnoma ne more nadomestiti [5].

V tem prispevku je predstavljen dvoročni vadbeni sistem z robotom HapticMaster. Sistem je bil razvit v Laboratoriju za robotiko Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Sistem je bil validiran na skupini zdravih oseb ter skupini oseb po kapi v kronični fazi.

2 Robotski sistem za dvoročno vadbo

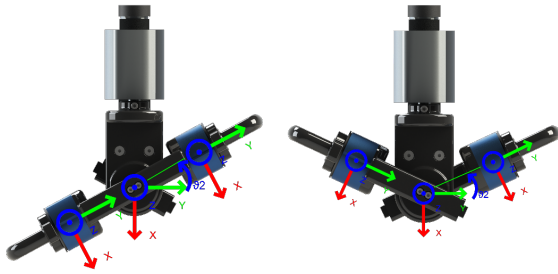
Rehabilitacijski roboti se uporabljajo kot vadbeni pripomočki, s katerimi lahko pacientu pomagamo hitreje doseči cilj fizikalne terapije. Robotski sistem za dvoročno vadbo je zgrajen na osnovi haptičnega robota HapticMaster. Robot HapticMaster je admitančno voden robot, delovni prostor je primeren za vadbo gibanja zgornjih udov. V osnovni konfiguraciji robota HapticMaster je na vrhu robota nameščen 3-osni senzor sil, ki je namenjen za admitančno vodenje in merjenje sil interakcije med robotom in uporabnikom. Robot je bil nadgrajen z aktivnim mehanizmom z dvema rotacijskima prostostnima stopnjama za dvoročno vadbo, ki je prikazan na slikah 1 do 3. Na mehanizmu za dvoročno vadbo se nahajata dva 6-osna senzorja sil in navorov, ki merita sile in navorove vsake od rok. Namesto prvotnega senzorja sil za vodenje robota se uporablja sila, ki je izračunana iz sil levega in desnega senzorja. To omogoča načrtanje poljubnega sistema vodenja, ki upošteva različno utežbo sil iz levega in desnega senzorja, ki jih izvajata levi in desni ud uporabnika. Na ta način lahko za vodenje robota bolj upoštevamo sile, ki jih izvaja prizadeti zgornji ud. S tem umetno zmanjšamo vpliv zdravega uda in povečamo vpliv prizadetega uda, kar je pomembno za vadbo prizadetega uda.



Slika 1: Dvoročni mehanizem pritrjen na vrh robota HapticMaster.

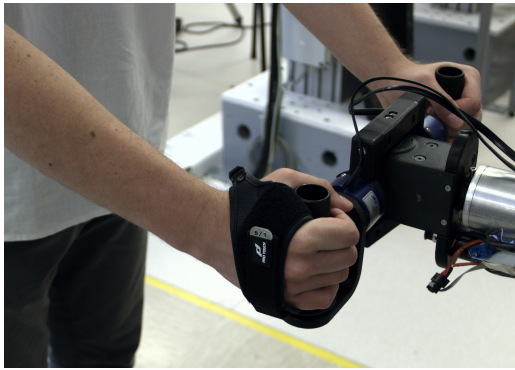
Držalo omogoča protifazno (roki se premikata v nasprotni smeri) in sofazno (roki se premikata v isti smeri) premikanje zgornjih udov (glej sliko 2). Senzorja, nameščena na dvoročnem držalu, merita sile in navorove v vseh treh koordinatnih smereh.

Uporabniki s prizadeto roko imajo težave pri držanju dvoročnega držala. V ta namen je bila razvita ročka z opornico, ki osebam po kapi omogoča dvoročno vadbo. Ročka ima zadosten premer z naslonom za roko in opornico. Opornica preprečuje zdrs prizadete roke. Omogoča hitro namestitev in odstranitev. Zasnova opornice je taka,



Slika 2: Protifazna in sofazna konfiguracija dvoročnega mehanizma. [6].

da ima čim manjši vpliv na izvedbo vaje. Ročka z opornico je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Prikaz namestitve okvarjene roke v opornico.

Koordinatni sistemi vrha robota ter senzorjev so različni, kar je vidno tudi na sliki 2. Za admitančno vodenje [7] je potrebno sile iz lokalnega koordinatnega sistema senzorja pretvoriti v koordinatni sistem robota.

$$\mathbf{F}_l = \mathbf{R}_h \mathbf{R}_{v_l} \mathbf{R}_{s_l}^r \mathbf{F}_l^{s_l}, \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_d = \mathbf{R}_h \mathbf{R}_{v_d} \mathbf{R}_{s_d}^r \mathbf{F}_d^{s_d}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_m = \frac{1}{2} (\mathbf{F}_l + \mathbf{F}_d). \quad (3)$$

Sila $\mathbf{F}_l^{s_l}$ je izmerjena sila na levem senzorju podana v lokalnem koordinatnem sistemu levega senzorja, sila $\mathbf{F}_d^{s_d}$ je izmerjena sila na desnem senzorju podana v lokalnem koordinatnem sistemu desnega senzorja. Sili $\mathbf{F}_l$ in $\mathbf{F}_d$ sta sili pretvorjeni v koordinatni sistem robota. Rotacijska matrika $\mathbf{R}_h$ podaja rotacijo prve rotacijske prostostne stopnje mehanizma v frontalni ravnini, rotacijski matriki $\mathbf{R}_{v_l}$ in $\mathbf{R}_{v_d}$ pa podajata rotacijski matriki za levo in desno ročko okoli vertikalne osi (2 prostostna stopnja mehanizma). Rotacijski matriki $\mathbf{R}_{s_l}$ in $\mathbf{R}_{s_d}$ podajata pretvorbo iz koordinatnega sistema senzorja v lokalni koordinatni sistem ročke. Sila $\mathbf{F}_m$ je izračunana iz sil $\mathbf{F}_l$ in $\mathbf{F}_d$ in predstavlja skupno silo interakcije med robotom in uporabnikom, ki je vhod v admitančno vodenje robota. Iz sile izračunamo želen premik robota. Ob poznani sili in masi določimo pospešek, ki ga integriramo da dobimo želeno hitrost. Dodano je tudi dušenje, ki v prikazovanje haptičnega okolja doda parameter dušenja prostora, v katerem se premikamo. Sila, ki jo povzroča dušenje je

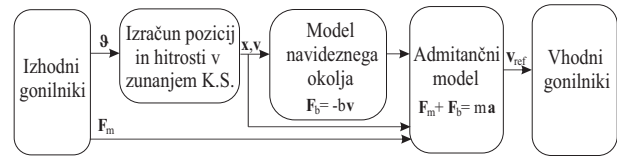
določena s koeficientom dušenja b pomnoženim s hitrostjo premikanja $\mathbf{v}$, $\mathbf{F}_b = -b\mathbf{v}$. Enačbo za izračun sile dušenja vključimo v izračun za pospešek $\mathbf{a}$:

$$\mathbf{a} = \frac{1}{m} (\mathbf{F}_m + \mathbf{F}_b). \quad (4)$$

Tako izračunan pospešek nadalje integriramo v hitrost, ki je uporabljena kot referenčna hitrost za vodenje robota HapticMaster.

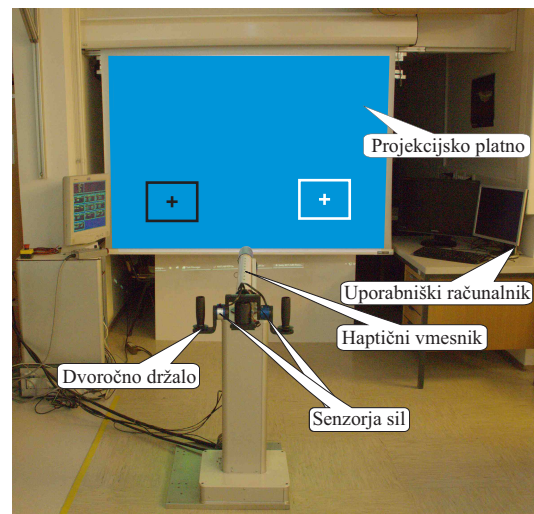
$$\mathbf{v}_{ref} = \int \mathbf{a} dt. \quad (5)$$

Slika 4 prikazuje shemo admitančnega vodenja robota.



Slika 4: Poenostavljena shema modela admitančnega vodenja robota.

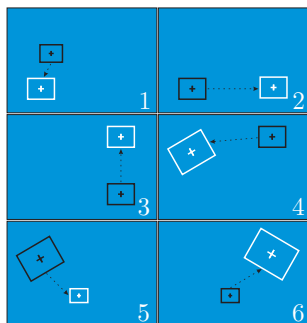
Vodenje robota se izvaja v realnem času z 2500 Hz na krmilnem računalniku na katerem je naložen xPC Target operacijski sistem, ki je namenjen za izvajanje Simulink modelov v realnem času. Simulink model vsebuje vhodne in izhodne bloke za strojno opremo robota, haptično navidezno okolje, admitančno vodenje ter bloka za komunikacijo z okoljem za grafično prikazovanje navidezne naloge. Grafično prikazovanje naloge je zasnovano s pomočjo programa Unity3D. Podatki z robota in senzorjev sil se shranjujejo v Matlab okolju. Slika 5 prikazuje celoten vadbeni in merilni sistem. Sestavljen je iz haptičnega robota HapticMaster, mehanizma za dvoročno vadbo, projekcijskega platna za prikazovanja naloge v navidezni resničnosti.



Slika 5: Sistem za dvoročno robotsko vadbo sestavljajo: haptični robot HapticMaster, dvoročno držalo, senzorja sil, računalnik za zajem podatkov in izrisovanje grafičnega okolja, projekcijsko platno.

3 Zasnova naloge v navideznem okolju

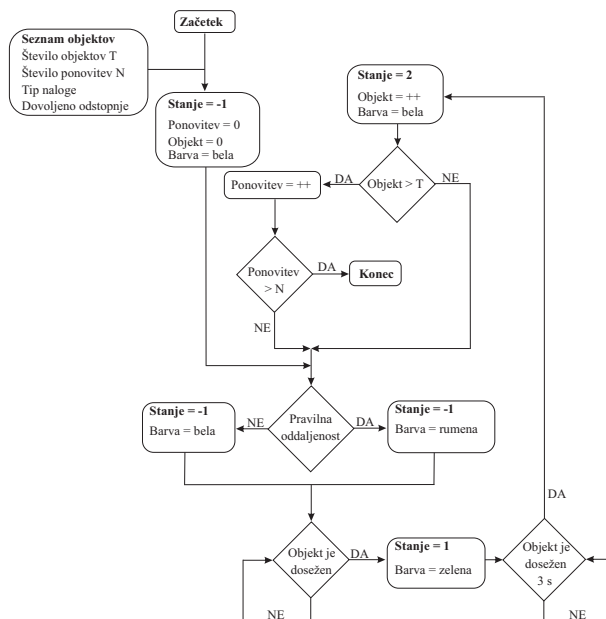
Na robotskem sistemu z dvoročnim držalom smo razvili nalogo za koordinirano gibanje obeh rok pri gibanju v prostoru. Naloga omogoča ponovljivost in primerljivost med posameznimi gibi. Vadba je zasnovana tako, da meri gibanje v 4 prostostnih stopnjah: translacijo v 3 smereh, ter rotacijo v frontalni projekcijski ravnini. Translacija v vertikalni in horizontalni smeri premika objekt v projekcijski ravnini, tretja translacija naprej-nazaj je prikazana s spreminjanjem velikosti objekta, rotacijska prostostna stopnja pa rotira objekt. Slika 6 prikazuje potek primera naloge za 6 objektov. Cilj naloge je s sledilnim objektom doseči referenčni objekt. Referenčni objekt je dosežen, ko ga sledilni objekt primerno pokrije. Stopnja pokritosti je določena z napaka pozicije in napaka rotacije. Ko vse napake padejo pod vnaprej določene pragove, je objekt dosežen. Ko je objekt dosežen 3 sekunde, dosežen objekt izgine in prikaže se naslednji objekt. Vsak trenutek je na zaslonu prikazan samo en objekt. Slika 6.1 prikazuje premik iz naključne lege v začetno stanje od koder se začne izvajati naloga. Sledijo si objekti za gib v desno (slika 6.2), gib navzgor (slika 6.3), gib v levo s spremembo velikosti in rotacijo 45° (slika 6.4), gib v desno navzdol s spremembo rotacije in odmikom objekta (slika 6.5) ter zadnji gib v desno navzgor s spremembo rotacije (slika 6.6). Celotna naloga se nato ponovi, ko se merjena oseba premakne v objekt na sliki 6.1. Na sliki 7 je prikazan diagram prehajanja stanj, ki podrobneje podaja logično zgradbo in potek izvajanja virtualnega simulatorja ciljanja tarč.



Slika 6: Potek naloge v navideznem okolju. Črni objekt je objekt, ki ga premika uporabnik, beli objekt pa objekt do katerega je potrebno premakniti črno tarčo.

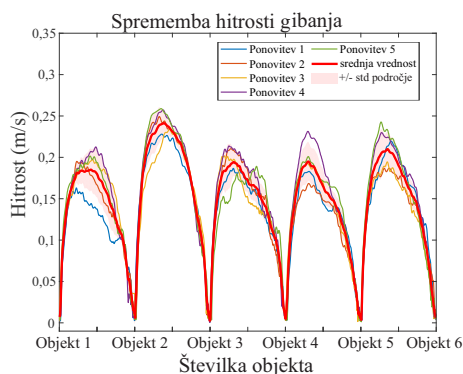
4 Rezultati

V raziskavi sta sodelovali dve skupini udeležencev: kontrolna skupina 15 zdravih in skupina 7 pacientov s hemiparezo na desni strani v kroničnem obdobju po možganski kapi. Študija je bila izvedena z nalogo opisano v prejšnjem podpoglavju pri različnih stopnjah dušenja: dušenje pri 10 Ns/m, 20 Ns/m in 30 Ns/m. Preiskovanci so izvajali 3 bloke meritev z eno stopnjo dušenja v vsakem bloku. Vsak blok meritev je vseboval 5 ponovitev. Da smo signale različnih ponovitev in preiskovancev lahko primerjali, smo zajete signale transformirali v nečasovni prostor, kjer je neodvisni parameter namesto časa normalizirana



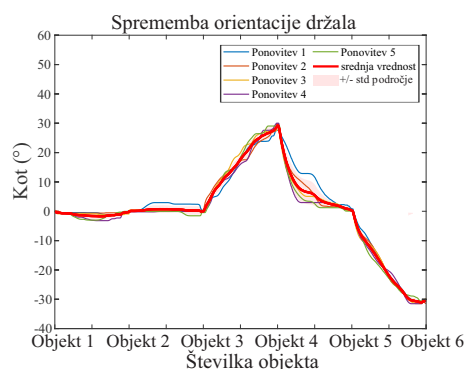
Slika 7: Diagram prehajanja stanj virtualnega simulatorja pokrivanja objektov.

pot. Signale smo razdelili na intervale med tarčami. Pridobili smo enako dolge vektorje, ki omogočajo enostavno primerjavo med različnimi ponovitvami in preiskovanci. Sliki 8 in 9 prikazujeta signala hitrosti in spremembe orientacije v odvisnosti od normalizirane poti.



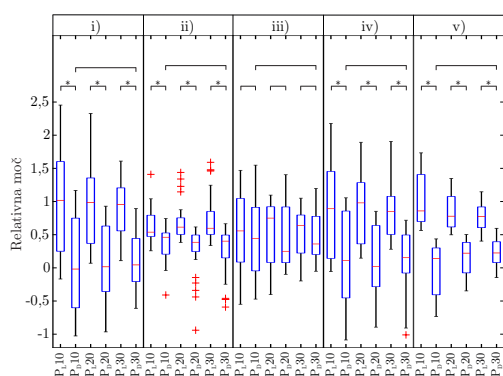
Slika 8: Velikost hitrosti premikanja robota v odvisnosti od normalizirane poti. Nalogo je izvedla zdrava oseba pri stopnji dušenja 10 Ns/m. Prikazanih je pet različnih gibov s srednjo vrednostjo in standardno deviacijo. Dosežena je dobra primerljivost različnih ponovitev naloge.

Slika 10 prikazuje relativno moč za posamezne gibe za celotno nalogo za 7 pacientov. V statistično analizo je za vsako stopnjo dušenja vključenih 35 meritev pacientov s prizadeto desno roko. Razviden je prispevek leve oziroma desne roke za posamezni gib za paciente s prizadeto desno roko. Slika 11 predstavlja rezultate pri zdravih osebah za isto nalogo. S parametrom relativna moč je izračunan prispevek vsake roke pri posameznem gibu. Pri zdravih osebah pri vodenju giba prevladuje roka, v smeri katere je izveden gib. Pri gibu v desno je relativna moč večja pri desni roki in obratno. Značilno je tudi koordinirano gibanje v drugem gibu naloge, ki od preiskovanca



Slika 9: Prikaz spremembe orientacije držala med izvajanje naloge v odvisnosti od normalizirane poti. Nalogo je izvedla zdrava oseba pri stopnji dušenja 10 Ns/m.

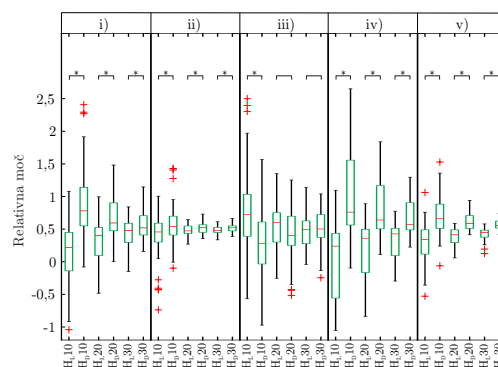
zahteva gib navzgor. Pri skupini pacientov s prizadeto desno roko ugotovimo, da prizadeta desna roka le sledi gibanju zdrave leve roke.



Slika 10: Relativna moč za posamezne gibe za celotno nalogo. P – skupina pacientov, L - leva roka, D - desna roka. Ob okrajšavi skupine je podana stopnja dušenja. Od leve proti desni si sledi pet gibov, od i) do v), ki so prikazani na slikah 6.2 do 6.6. Za vsak gib so podane tri stopnje dušenja. Povezave nad škatličnimi diagrami ponazarjajo izbrane skupine med katerimi smo računali statistične značilnosti. Statistično pomembna značilnost je označena z * za $p < 0,05$.

5 Zaključek

Razvit je bil celovit sistem za dvoročno vadbo oseb z različnimi vrstami okvar živčno-mišičnega sistema. Vadba s pripravljenim sistemom je intuitivna in preprosta. Sistem temelji na haptičnem robotu HapticMaster, ki je bil nadgrajen z dvoročnim aktivnim mehanizmom z dvema senzorjema sile s katerima je mogoče vrednotenje vadbe za vsako od rok. S sistemom smo izvedli različne meritve, pri čemer smo želeli preveriti različne vidike dvoročne vadbe. Zanimala nas je predvsem koordinacija rok med dvoročno vadbo. Posamezni preiskovanec je nalogo izvedel večkrat ob različnih stopnjah dušenja. Vadbo smo ovrednotili z različnimi parametri, ki podajajo informacijo o kinematiki gibanja. Pri parametru relativne moči smo ugotovili, da pri zdravih osebah prevladuje roka, v kateri smeri se izvaja gib. Pri skupini pacientov smo opazili, da gib vodi neprizadeta roka. Prizadeta roka le



Slika 11: Relativna moč za posamezne gibe za celotno nalogo. H predstavlja skupino zdravih.

sledi ali celo zavira gibanje. S povečevanjem dušenja se poveča sodelovanje prizadete roke in gibanje postane bolj koordinirano. Predstavljena navidezna naloga uspešno skrbi za povečanja motivacije oseb med izvajanjem meritev. Preiskovanci so se počutili vključene v nalogo, pri čemer osredotočenost s časoma ni upadla. Pacienti so hkrati v večini opazili, da se njihova prizadeta roka med izvajanjem vaje aktivno vključuje.

Zahvala

Študija je bila opravljena v sklopu raziskovalnega programa št. P2-0228, ki ga je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

Literatura

- [1] C. Cruz-Cruz, J. Kravzov-Jinich, J. M. Martínez-Núñez, C. Ríos-Castañeda, M. E. Perez in M. Altagracia-Martínez, "Cost-utility analysis in acute ischemic stroke survivors treated with dapsone in a public hospital in Mexico City," *Journal of Pharmaceutical Health Services Research*, vol. 5, št. 2, str. 95-102, 2014.
- [2] M. Trlep, M. Mihelj, U. Puh in M. Munič, "Rehabilitation robot with patient cooperative control for bimanual training of hemiparetic subjects," *Advanced Robotics*, vol. 25, št. 15, str. 1949-1968, 2011.
- [3] J. Summers, F. Kagerer, M. Garry, C. Hiraga, A. Loftus, J. Cauraugh, "Bilateral and unilateral movement training on upper limb function in chronic stroke patients: a TMS study," *Journal of the neurological sciences*, vol. 252, št. 1, str. 76-82, 2007.
- [4] J. Whittall, S. Waller, K. Silver, in R. Macko, "Repetitive bilateral arm training with rhythmic auditory cueing improves motor function in chronic hemiparetic stroke," *Stroke*, vol. 31, št. 10, str. 2390-2395, 2000.
- [5] P. Lum, D. Reinkensmeyer, R. Mahoney, W. Rymer, C. Burgar, "Robotic devices for movement therapy after stroke: current status and challenges to clinical acceptance," *Topics in stroke rehabilitation*, vol. 8, no. 4, str. 40-53, 2002.
- [6] S. Lokar, "Rehabilitacijski robot za dvoročno vadbo," *Diplomsko delo*, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, 2016.
- [7] M. Mihelj, "Haptični roboti," *Založba FE in FRI*, Ljubljana, 2007.