

Tadej Bajd<sup>1</sup>, Gregorij Kurillo<sup>2</sup>, Tamara Šupuk<sup>3</sup>, Mitja Veber<sup>4</sup>, Anton Zupan<sup>5</sup>, Marko Munih<sup>6</sup>

## Merjenje in vrednotenje prijemanja v rehabilitaciji

*Measurement and Evaluation of Grasping in Rehabilitation*

---

### IZVLEČEK

---

**KLJUČNE BESEDE:** prijem moč, hemiplegija, mišična distrofija

V članku predlagamo metode in naprave za merjenje in vrednotenje prijemanja v rehabilitacijskem okolju. Študij prijemanja smo razdelili v tri faze: faza približevanja predmetu, faza izvajanja sile na predmet in faza spreminjanja orientacije prijetega predmeta. Vse izvirne metode so osnovane na računalniškem merjenju in omogočajo kvantitativno vrednotenje prijemanja. Z meritvami zdravih oseb smo pridobili referenčni primerjalni vzorec. Merjenje sile prijema in urjenje prijema smo preizkusili tudi pri skupinah bolnikov z mišično distrofijo in hemiplegijo.

---

### ABSTRACT

---

**KEY WORDS:** hand strength, hemiplegia, muscular dystrophy

In the paper methods and devices for measurement and evaluation of grasping in the rehabilitation environment are proposed. Investigation of grasping was divided into three phases: reaching to grasp an object, exerting force on the object, and changing the orientation of the grasped object. The original methods are computer based and provide quantitative evaluation of grasping. Reference pattern of grasping was obtained by measurements performed in healthy persons. Assessment of grasping force and training of grasping was performed in groups of patients with muscular dystrophy and hemiplegia.

---

<sup>1</sup> Prof. dr. Tadej Bajd, univ. dipl. inž. el., Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana.

<sup>2</sup> Dr. Gregorij Kurillo, univ. dipl. inž. el., Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana.

<sup>3</sup> Mag. Tamara Šupuk, univ. dipl. inž. el., Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, Ruđera Boškovića bb, 21000 Split.

<sup>4</sup> Mag. Mitja Veber, univ. dipl. inž. el., Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana.

<sup>5</sup> Prof. dr. Anton Zupan, dr. med., Inštitut RS za rehabilitacijo, Linhartova 51, 1000 Ljubljana.

<sup>6</sup> Prof. dr. Marko Munih, univ. dipl. inž. el., Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana.

## UVOD

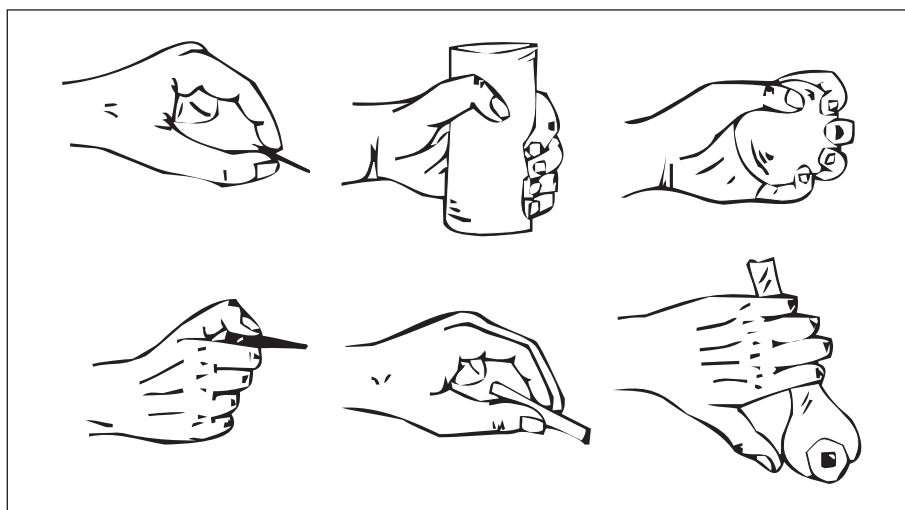
Prijemanje je tako vsakdanja dejavnost, da si na prvi pogled težko predstavljamo, da je prijemanje lahko tudi zanimiv predmet raziskav. Po drugi strani pa smemo trditi, da je prijemanje najpomembnejša človekova gibalna dejavnost. V to nas prepriča že samo prinašanje hrane k ustom. Notranje obračanje palca, ki se je razvijalo skozi milijone let evolucije, omogoča človeku izjemno spretnost pri opravljanju dela s predmeti in orodji. Roke pa ne uporabljamo samo za opravljanje dela. Naša roka v ožjem smislu je tudi odličen senzor dotika. Ne nazadnje pa je roka namenjena tudi komunikaciji, bodisi da z njo pišemo, tipkamo po računalniški tipkovnici, ali pa se s kretnjami pogovarjamo z domorodci.

Zakaj je prijemanje zanimiv predmet raziskav na področju biomedicinske tehnike? Prvi razlog tiči v vse bolj zapletenih sistemih človek-stroj. Teh ne najdemo samo v kabini pilota, ampak tudi v vsakdanjem življenju, ko imamo opravka z računalniško miško ali igralno palico. Drugi razlog so proteze in robotska prijemala z več prsti. V današnji industrijski robotiki srečujemo predvsem preprosta prijemala z dvema prstoma. Nagel razvoj humanoidne robotike pa ima za posledico razvoj zapletenih robotskih rok in posledično tudi protez s petimi prsti, kjer ima vsak prst po tri segmente. Takšne robotske roke imajo

več stopenj prostosti gibanja kot sami roboti in zahtevajo izvirne sisteme vodenja, ki jih gradimo na osnovi poznavanja prijemanja pri človeku.

V Laboratoriju za robotiko in biomedicinsko tehniko na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani nas prijemanje zanima predvsem z vidika potreb na področju rehabilitacije. Danes ima vsak sodobnejši rehabilitacijski center dobro opremljen laboratorij za merjenje in študij patoloških vzorcev hoje. Nič kaj takega pa ne moremo trditi za področje zgornjih udov. Še posebej pa je dosegljivih malo naprav, ki bi bile namenjene merjenju in vrednotenju prijemanja. Naš cilj je torej graditi vmesnike človek-stroj za ljudi s posebnimi potrebami in razvijati naprave in metode, ki omogočajo ocenjevanje kakovosti prijemanja pred in po različnih zdravljenih ali terapevtskih posegih.

Prijeme moremo razvrstiti glede na obliko predmeta, ki ga roka prijemlje (1). Tako nam zgornja vrsta slike 1 prikazuje z leve proti desni pincetni, valjni in krogelni prijem, v spodnji vrsti pa vidimo stranski in triprstni prijem ter prijem kljuge. Posamezne prijeme moremo učinkovito opisati, tako da uvedemo pojem navideznega prsta (2). Navidezni prst je lahko eden ali več prstov hkrati ali dlan, ki vsi delujejo v isti smeri in proizvajajo silo opozicije. Običajno pri posameznem prijemu



Slika 1. Razvrstitev prijemov: pincetni, valjni, krogelni, stranski, triprstni in prijem kljuge.



Slika 2. Eksperimentalno okolje za merjenje gibanja prstov v fazi približevanja predmetu. Poskusna oseba prijemlje predmet, ki ga robot naključno postavlja v različne lege v prostoru.

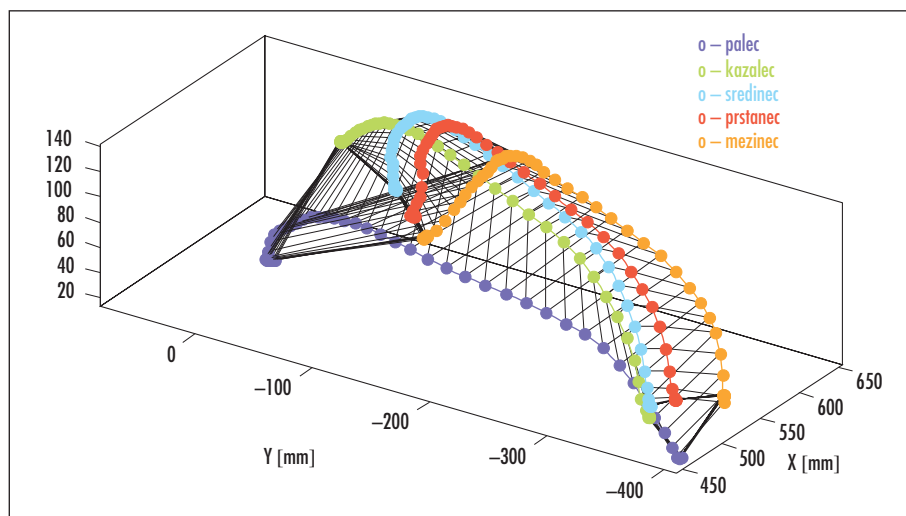
nastopata dva navidezna prsta. V grobem delimo prijeme na močnostne in precizijske. Za močnostne prijeme so značilne velike sile, velika stabilnost prijema in velika površina dotika med roko in predmetom. Valjni prijem je značilen predstavnik močnostnih prijemov. Uporabljamo ga pri prijemanju različnih orodij, kozarca ali steklenice. Pri valjnem prijemu vseh pet prstov predstavlja prvi navidezni prst, drugi navidezni prst pa je dlan. Pri precizijskih prijemih se srečamo z majhnimi silami, veliko priročnostjo prijema in majhnimi površinami dotika. Značilen predstavnik precizijskih prijemov je stranski prijem. Na tak način prijemljemo ključ in tanke ploščate predmete, kot je na primer list papirja. V primeru stranskega prijema je prvi navidezni prst palec, drugi navidezni prst pa predstavlja stranska stran kazalca.

V pričujočem članku predlagamo metode in naprave, ki so primerne za merjenje in vrednotenje prijemanja v rehabilitacijskem okolju. Študij prijemanja smo razdelili v tri dele. Najprej nastopi faza, ko se roka približuje predmetu. Sledi faza, ko predmet primemo in s prsti nanj izvajamo silo. V zadnji fazi pa

spreminjamo položaj in orientacijo že prijete predmeta.

## PRIBLIŽEVANJE ROKE PREDMETU

Za fazo, v kateri se roka približuje predmetu, je značilno, da se prsti oblikujejo glede na obliko predmeta, ki ga želimo prijeti. V tej začetni fazi lahko ocenjujemo sposobnost odpiranja roke, ki je še posebej pomembna za bolnike z izraženo spastičnostjo mišic roke, kar se pogosto kaže pri bolnikih po kapi. Slika 2 prikazuje eksperimentalno okolje za merjenje gibanja prstov v fazi približevanja predmetu (3). Izbrali smo tri različne predmete: tanko ploščo, kvader in valj. Posamezen predmet je bil preko magneta pričvrščen na vrh robota. Robot je predmete naključno postavljal v različne točke delovnega prostora, ki so bile vse dosegljive merjeni osebi, ki je sedela ob mizi pred robotom. Robot je naključno spreminjal tudi orientacijo predmetov. Poskusna oseba je s pritiskom na gumb sprožila gibanje robota, ki je postavil predmet



Slika 3. Prostorsko gibanje pentagona, ki ga predstavljajo vrhovi prstov. Ploščina pentagona se v začetku veča, doseže maksimum in se manjša do prijema.

v naključno izbrano pozicijo in orientacijo in oddal zvočni signal, ki je bil ukaz poskusni osebi, da seže po predmetu in ga postavi na mizo pred seboj. V naključno izbranih poskusih je robot po oddanem zvočnem signalu izvedel motnjo, tako da je nekoliko spremenil položaj ali orientacijo predmeta. Na vrhove prstov smo postavili pet infrardečih značk, tri značke pa na hrbtno stran roke. S sistemom šestih kamer OPTOTRAK smo merili gibanje vseh osmih značk v prostoru.

Oblikovanje prstov v fazi približevanja ocenjujemo s pomočjo pentagona, katerega prostorsko gibanje prikazuje slika 3. Ploškev pentagona določajo vrhovi palca, kazalca in prstanca. Vrhova sredinca in mezinca pa sta preslikana v ravnino, ki jo določajo ostali trije prsti. Na sliki je lepo razvidno, da se površina pentagona v začetku približevanja veča, doseže maksimum v drugi polovici giba in se zatem manjša. Kot zanimiv parameter za ocenjevanje faze približevanja se je izkazal kot med pravokotnico na pentagon in pravokotnico na predmet, ki ga želimo prijeti. Časovni potek kota med fazo približevanja ima sedlasto obliko in ga lahko razdelimo v tri dele: hiter zasuk zapestja, gibanje roke pri bolj ali manj stalnem kotu in šele na koncu oblikovanje prstov. Ugotovili smo tudi, da imajo motnje, ki jih je izvajal robot, le manjši vpliv na obliko krivulje. V opisanem poskusu smo

na več zdravih poskusnih osebah merili tudi hitrost gibanja zapestja. Hitrostni profil ima trikotno obliko, pri čemer je naraščanje hitrosti v prvem delu večje kot upadanje hitrosti v drugem delu. Zanimivo je tudi, da maksimalna hitrost nastopi za vse predmete v zelo ozkem časovnem intervalu.

## SILA PRIJEMA

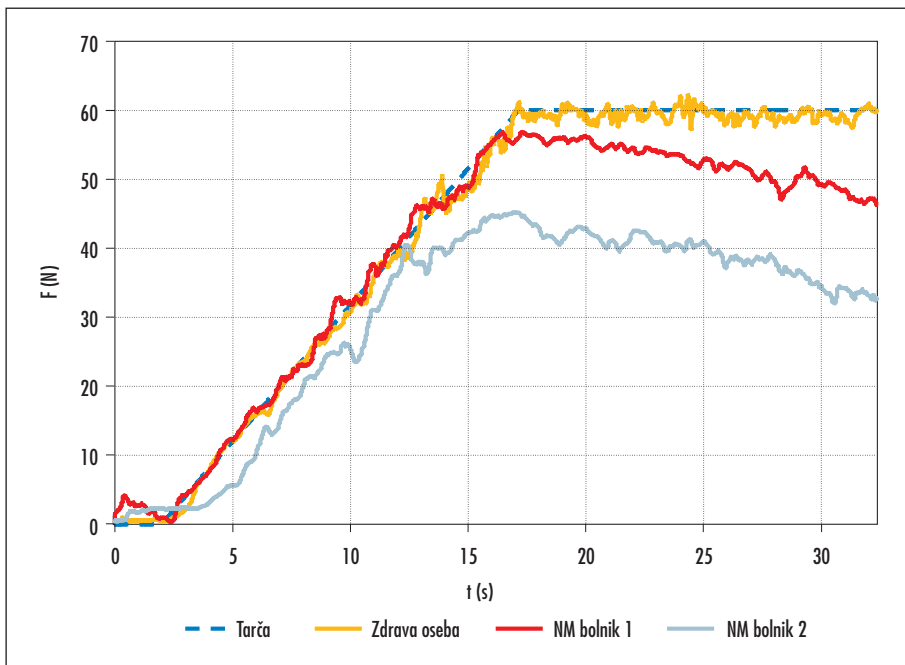
Razvili smo izvorno napravo za merjenje sile valjnega in stranskega prijema (slika 4). Vsakega od obeh prijemov merimo s posebnim merilnim telesom. Kovinsko merilno telo je razdeljeno v dva simetrična dela, med katera je vstavljen senzorska celica z merilnimi lističi. Signale izmerjene sile prijema pošiljamo preko ojačevalnika in analogno digitalnega pretvornika v osebni računalnik. Primerljive rezultate pri merjenju različnih oseb dobimo z uporabo metode sledenja (4). Merjena oseba sedi pred računalniškim zaslonom. Na zaslonu se pokaže tako zeleni potek sile kakor tudi izmerjena sila prijema. Zelena sila je na zaslonu prikazana kot moder prstan, izmerjena sila pa kot rdeča pika. Naloga poskusne osebe je, da silo prijema povečuje ali zmanjšuje tako, da je rdeča pika v modrem prstanu. Pri večanju sile prijema rdeča pika potuje po zaslonu navzgor. Ko silo prijema manjšamo, se rdeča pika spušča. Izbrali smo tri različne



Slika 4. Naprava za merjenje sile prijema, ki jo priključimo na osebni računalnik. Omoogoča merjenje valjnega in stranskega prijema.

časovne poteke želene sile: sinus, trikotni in pravokotni signal. Sledenje sinusnemu signalu opisuje natančnost in vzdržljivost prijemanja, trikotni signal nam lepo pokaže največjo možno silo in utrujanje, pri pravokotnih signalih pa predvsem opazujemo reakcijske čase in hitrost odzivov. Na sliki 5 vidimo časovne poteke želene sile v obliki trikotnega

signala in odzive izmerjene za stranski prijem pri zdravi poskusni osebi in dveh osebah z mišično distrofijo. Pri bolnikih z mišično distrofijo smo prepoznali dve funkcionalno različni skupini bolnikov (5). Pri prvi skupini smo izmerili zadovoljivo silo prijema in razmeroma veliko napako sledenja. Pri drugi skupini pa smo opazili hitro utrujanje in



Slika 5. Naloga sledenja rampi pri zdravi poskusni osebi in dveh osebah z mišično distrofijo. Zdrava oseba in prvi bolnik dobro sledita referenčnemu signalu. Pri drugem bolniku opazimo večjo napako sledenja in hitro utrujanje.

majhno napako sledenja želeni sili. Vrednost tovrstnih meritev je predvsem pri izbiri ustreznih vmesnikov, ki jih bolniki uporabljajo za upravljanje vozička, računalnika in drugih naprav v vsakdanjem okolju.

Merjenje sile prijema in metodo sledenja smo preizkusili tudi pri zdravih poskusnih osebah. Poskusne osebe smo razdelili v tri skupine glede na starost. V prvi skupini so bili otroci stari med 9 in 11 let, v drugi skupini mlajši odrasli med 25 in 35 let in v zadnji skupini starejši odrasli med 50 in 60 let. Na osnovi relativne srednje kvadratične napake med želenim in izmerjenim potekom sile smo ugotovili, da je pri otrocih kontrola prijemanja slabše razvita. Najboljše rezultate smo dobili pri skupini mlajših odraslih, s starostjo pa se sposobnost kontrole prijema slabša. Med rezultati izmerjenimi pri dominantni in nedominantni roki ni bilo pomembnih razlik.

Opisana naprava pa ni namenjena samo merjenju in vrednotenju sile prijema, ampak jo lahko učinkovito uporabimo tudi za urjenje prijemanja. Program urjenja prijemanja smo izvedli preko sledenja pravokotnemu signalu različnih amplitud in sinusnemu signalu različnih frekvenc. Urjenje je potekalo pri skupini bolnikov po kapi (6). Program urjenja je trajal 20 dni samo 10 minut na dan. Po končanem urjenju smo izmerili opazno zmanjšanje napake sledenja, večjo jakost prijema ter izboljšanje stabilnosti prijema pri višjih silah.

## SPRETNOST PRIJEMA

Zadnje izmed treh merilnih metod smo razvili s ciljem, da vrednotimo spretnost prijema. V tem primeru poskusna oseba že drži predmet s konicami prstov in spreminja orientacijo prijetelega predmeta. Opazovali smo gibanje prstov, zapestja in podlahti. Roka je močno redundanten sistem. Spremembo orientacije prijetelega predmeta lahko dosežemo s sukanjem podlahti, zasukom zapestja ali gibanjem prstov. Postavili smo delovno domnevo, da pri spreminjanju orientacije predmeta najprej nastopijo grobi premiki podlahti in zapestja, zatem pa fini gibi prstov. Takšna strategija bi bila v skladu s kontrolo gibanja roke v fazi približevanja.

Eksperimentalno okolje za merjenje in vrednotenje spretnosti prijema kaže slika 6. Oseba sedi pred računalniškim zaslonom. Komolec je preko preproste opornice naslonjen na mizo. Vrhovi treh prstov držijo predmet oblike kvadra. Na predmet je pritrjenih 6 infrardečih značk, katerih položaj merimo s šestimi kamerami sistema OPTOTRAK. V navideznem okolju, ki ga prikazuje računalniški zaslon, se pokaže predmet v enaki orientaciji kot v resničnem okolju. Hkrati pa se s transparentnim prikazom na zaslonu prikaže še referenčni predmet enake oblike, vendar v drugi orientaciji. Naloga merjene osebe je, da poravna oba predmeta. Predmet, ki ga merimo, se v navi-



Slika 6. Eksperimentalno okolje za vrednotenje spretnosti prijema. Poskusna oseba hkrati opazuje resnični in navidezni predmet, ki ga mora zavrteti v želeno lego.

dezmem okolju premika na enak način kakor prijeti predmet v resničnem okolju. Poskusna oseba lahko hkrati gleda tako resnično kakor tudi navidezno okolje. V poskusu smo opazovali predvsem zasuk roke navznoter in navzven, torej gib, ki je podoben privijanju in odvijanju žarnice.

Poskuse smo opravili na skupini zdravih oseb. Orientacijo predmeta smo izrazili s pomočjo prostorskih kotov. Spretnost pa smo ovrednotili preko časovnega poteka napake med referenčno in doseženo orientacijo predmeta. Pri merjenju gibanja roke smo postavili še 8 značk na komolec, podlaht in hrbet roke. Postavljena domneva se ni izkazala za pravilno. Kadar sta komolec in zapestje bolj ali manj v sredini obsega giba, se pri spremembi orientacije predmeta začnejo giba prstov, zapestja in podlahti odvijati istočasno. Prispevek prstov, zapestja in podlahti k spremembi orientacije prijetelega predmeta je približno enak. V primeru, ko pa je bodisi zapestje ali podlaht v bližini meje gibanja, potem začnejo predmet sukati prsti, ki opravijo tudi večji del zasuka. Opazili smo veliko ponovljivost gibov izmerjenih pri različnih poskusnih osebah.

## ZAKLJUČEK

V članku smo predlagali tri pristope k merjenju in vrednotenju funkcionalnosti roke v ožjem smislu. Študij prijemanja smo razdelili v tri faze. Najprej smo opazovali, kako se oblikujejo prsti, še preden se roka dotakne predmeta, ki ga želimo prijeti. Opazili smo, da največje odprtje roke nastopi v drugi polovici faze približevanja. Tedaj oblikovanje prstov še ni odvisno od oblike predmeta. Šele v končni fazi približevanja se prsti prilagodijo obliki predmeta, ki ga prijemljemo. Prsti se oblikujejo tako, da je ploskev pentagona, ki povezuje vrhove vseh prstov, bolj ali manj vzporedna s ploskvijo predmeta, kateremu se roka približuje.

Druga faza predstavlja merjenje sile prijema. Razvili smo preprosto napravo za merjenje sile natančnih in močnostnih prijemov, za katero se je hitro pokazalo zanimanje

v kliničnem okolju. Izdelali smo več prototipnih naprav, ki se uporabljajo doma in v tujini. Prototipno napravo pa razvijamo tudi za slovenskega proizvajalca medicinske opreme. Povratna zanka preko računalniškega zaslonu in metoda sledenja sta bili dobro sprejeti s strani bolnikov z mišično distrofijo in hemiplegijo.

Tretja faza predstavlja merjenje in ocenjevanje spretnosti prijema. Naloga spreminjanja orientacije prijetelega predmeta je potekala ob pomoči prikaza v navidezni resničnosti. Proučevali smo, kako se giblje prijeti predmet glede na dlan, dlan glede na podlaht in podlaht glede na mirujoče okolje. V razliko od faze približevanja, kjer se najprej giblje zapestje in šele zatem oblikujejo prsti, se v tretji fazi prijemanja gibanje podlahti, zapestja in prstov dogaja istočasno.

V vseh treh metodah smo uporabili računalniška merjenja, ki nam nudijo kvantitativne rezultate. To pa ne pomeni, da v bodočih raziskavah ni potrebno opraviti študij, ki bi primerjale predlagane metode z obstoječimi kvalitativnimi testi, ki se že uporabljajo v kliničnem okolju. V opisanih raziskavah smo predvsem merili zdrave osebe in tako pridobili normativni vzorec, ki ga potrebujemo pri ocenjevanju prijemanja pri bolnikih po poškodbi osrednjega živčnega sistema ali pa mišično skeletnega sistema roke. Pri zadnji metodi smo uporabili navidezno resničnost, ki se vse bolj uveljavlja na področju rehabilitacije. Urjenje v navidezni resničnosti omogoča terapijo v najzgodnejši fazi rehabilitacije, saj moremo težavnost naloge vselej prilagoditi trenutnim sposobnostim bolnika. Računalniška merjenja pa omogočajo tudi korak v telerehabilitacijo, kjer bolnik vadi doma in je preko spleta povezan s terapevtom, ki urjenje nadzira.

## ZAHVALA

Opisano raziskovalno delo financira Agencija za raziskovalno dejavnost RS v obliki programske skupine Analiza in sinteza gibanja pri človeku in stroju ter štipendiranja mladih raziskovalcev.

## LITERATURA

1. Napier JR. The prehensile movements of the hand. *J Bone Joint Surg Br* 1956; 38-B (4): 902-13.
2. Iberall T. Human prehension and dexterous robot hands. *Int J Rob Res* 1997; 16 (3): 285-99.
3. Šupuk T, Kodek T, Bajd T. Estimation of hand preshaping during human grasping. *Medical Engineering & Physics* 2005; 27: 790-7.
4. Kurillo G, Gregorič M, Goljar N, et al. Grip force tracking system for assessment and rehabilitation of hand function. *Technology and Health Care* 2005; 13: 137-49.
5. Kurillo G, Zupan A, Bajd T. Force tracking system for assessment of grip force control in patients with neuromuscular diseases. *Clin Biomech* 2004; 19 (10): 1014-21.
6. Kurillo G, Goljar N, Bajd T. Cognitive-feedback training of hand function in patients after stroke: a preliminary study. *Zdrav vest* 2005; 74: 509-14.
7. Veber M, Bajd T. Manipulation strategy of a dexterous hand. *EMBECE '05*; 2005; Prague, Czech Republic.

Prispelo 14.2.2006