

Analiza in sinteza metod varne, senzorno podprte enoročne robotske vadbe

Blaž Jakopin, Marko Munih

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: blaz.jakopin@robo.fe.uni-lj.si

Povzetek. Doktorska tema sega na področje robotsko podprte motorične rehabilitacije bolnikov z motnjami gibanja zgornjih okončin. To je področje, ki temelji na dveh desetletjih intenzivnega razvoja. Doktorska tema se najprej poglobi na področje nemotečega merjenja fiziološkega odziva človeka, ki bi ga lahko pozneje skupaj z drugimi parametri uporabili v večmodalni aplikaciji, za zaprtozračno prilagajanje težavnosti rehabilitacijske naloge. Opisane so metode in način validacije predlaganega nizkocenovnega merilnega sistema, ki bi zadoščal uporabi za namene robotske rehabilitacije. Za varno interakcijo robota in človeka med robotsko vadbo je treba zagotoviti varnost kontakta med obema, zato se tema osredini na vodenje in razvoj nizkocenovnega linearnega haptičnega mehanizma, ki vsebuje sistem nelinearnih vzmeti za prilagajanje mehanske togosti. Skupaj z nalogo v virtualnem okolju lahko s pomočjo omenjenih sistemov načrtamo večmodalno rehabilitacijsko vadbo, ki bi lahko bila zaradi cenovne dostopnosti in varnosti primerna tudi v domačem okolju.

Ključne besede: rehabilitacija zgornjih okončin, fiziološki signali, večmodalni sistemi, združevanje senzornih informacij, interakcija robota s človekom

Analysis and synthesis of methods for safe, sensory-supported unimanual robot-based training

This doctoral thesis is mostly involved with robotic exercise for support in motor rehabilitation of patients with movement disorders of the upper extremities. This field is based on two decades of intensive research. The first part of the thesis is focused on an unobtrusive measurement of the persons' physiological response. Methods to analyse and validate the unobtrusive measurement system are described. For a safe human-robot interaction we need to provide a certain degree of compliance between the patient and the robot. A type of a variable-stiffness actuator is analysed and different control strategies are used to provide for decoupled stiffness and position control of the mechanism. With the addition of a virtual environment, multimodal robotic training can be produced by a system using physiological measurements, task performance and biomechanical measures and by using an inherently safe haptic interface.

Keywords: rehabilitation of upper extremities, physiological signals, multimodal systems, sensor fusion, human-robot interaction

1 UVOD

Predlog doktorske disertacije je razdeljen na pet poglavij. V uvodu je predstavljeno področje rehabilitacijske robotike s pregledom literature najnovejših pristopov senzorno in robotsko podprte enoročne vadbe. Predstavljene so metode enoročne rehabilitacije in aktualne raziskovalne smeri v rehabilitacijski robotiki. V drugem poglavju so podani cilji doktorske naloge, v tretjem pa

so predstavljene utemeljitve pristopa za izvedbo zastavljenih ciljev. Četrto poglavje je opis uporabljenih metod in postopkov za doseg ciljev, v petem pa so poudarjeni izvirni prispevki doktorske disertacije.

V preteklih desetletjih je rehabilitacija napredovala iz preprostih pasivnih mehanizmov za vadbo v obširno področje robotizirane aktivne vadbe, kjer se roboti uporabljajo kot vadbeni pripomočki, ki lahko pacientu pomagajo hitreje doseči cilj fizikalne terapije. Vadba s pomočjo robota je lahko ob uporabi virtualnega okolja zabavna in privlačna za pacienta [1], [2], hkrati pa lahko ob njej s haptičnimi roboti ti aktivno sodelujejo s pacientom pri izvajanju naloge. Haptični roboti lahko ob interakciji s pacientom prek senzorja sile zaznavajo namero premika pacienta in aktivno pomagajo pri motorični nalogi. Ob uporabi haptičnih robotov pri rehabilitaciji lahko terapevt torej pridobi objektivno informacijo o sili interakcije med robotom in pacientom ter premiki, ki nastajajo med opravljanjem naloge. S pomočjo teh informacij lahko terapevt sklepa o napredku in ustrezno prilagaja težavnost naloge [3].

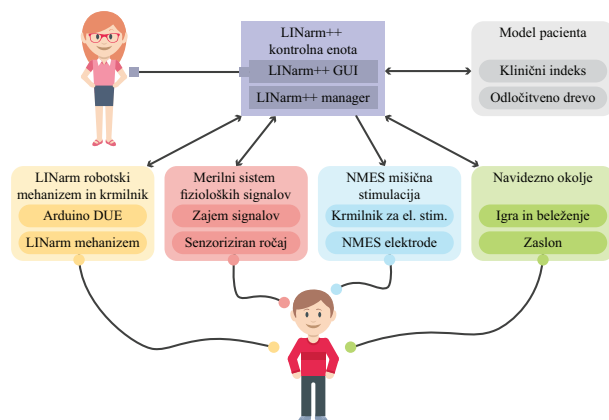
Ugotavljanje optimalnih parametrov mentalne in fizične težavnosti naloge pa je izziv, s katerim se ukvarja kooperativna robotika. Za motivacijsko vadbo je potrebna povratnozračna vezava med izmerjenim človeškim psihofiziološkim odzivom, biomehanskimi parametri, robotskim sistemom in nalogo v virtualnem okolju. Meritve biomehanike in psihofiziologije pacienta se ovrednotijo, na podlagi teh meritev pa se lahko oblikuje ocena težavnosti, ki služi kot vhod v regulator robota in naloge [4], [5]. Z združevanjem različnih

senzornih informacij so avtorji v [5] pokazali delovanje adaptivne metode, ki uravnava težavnost naloge v realnem času. Za merjenje psihofiziološkega odziva so uporabljali merilno opremo z visoko točnostjo, katere slabost sta bila visoka cena in dolg čas namestitve merilnega sistema. Avtorji so v prejšnjih študijah [5]–[8] za ocenjevanje psihološkega odziva med interakcijo z robotom uporabljali parametre, kot so: srčni utrip, variabilnost srčnega utripa, variabilnost ritma dihanja, prevodnost kože in temperatura kože perifernih delov telesa (tipično konice prstov). Poleg teh se uporabljajo tudi metode za prepoznavo obraznih izrazov, zeničnega odziva, možganske aktivnosti (*elektroencefalografija*) in mišičnega odziva obraznih mišic (*elektromiografija*) [9], [10].

Za merjenje biomehanskih parametrov med vadbo se uporabljajo optični ali inercialni merilni sistemi, informacijo o sili interakcije in premikih v sklepih robota pa lahko izmerimo kar iz robotskega sistema. Optični sistemi (Optotrak, Vicon, Codamotion, itd.) se uporabljajo v laboratorijskem okolju in jih odlikuje visoka točnost merjenja. Zaradi visoke cene in omejenega merilnega območja pa so se na tem področju začele uveljavljati *inercialne merilne enote (IME)*, ki so nizkocenovna alternativa merjenja biomehanskih parametrov. Senzorji so majhni in nosljivi, zato merjenja ne omejujejo z območjem merjenja. Za izračun sil in navorov v sklepih se med drugimi uporablja inverzna Newton-Eulerjeva metoda, kjer pri znanem gibanju segmentov mehanizma (roke) lahko na podlagi enačb inverzne dinamike izračunamo sile in napore v sklepih. Za izračun enačb inverzne dinamike moramo poznati geometrijo mehanizma, maso segmentov, vztrajnostne momente in parametre trenja oz. moramo poznati dinamični model mehanizma [11], [12]. Bertomeu in drugi [13] so uporabljali IME, nameščene na segmente roke, in planarnega robota za rehabilitacijo zgornjih okončin. Pokazali so, da lahko s pomočjo povratne informacije biomehanskih parametrov, izračunane iz IME senzorjev, vzpodbudimo različne tipe vadbe, pri katerih robotski sistem zaznava gibe v različnih sklepih roke in tako prilagaja vadbo za točno določen sklep.

Za varno vadbo ter interakcijo med robotom in človekom je treba zagotoviti mehanizme, ki so inherentno varni v svojem delovanju. Takšni mehanizmi morajo biti podajni (elastični), da ob morebitnem trku ob oviro shranjujejo energijo in ne poškodujejo uporabnika. Industrijski roboti so znani po svoji točnosti in veliki pasovni širini prav zaradi visoke mehanske impedance, iz istega razloga pa so tudi nevarni za interakcijo s človekom. S kombinacijo uporabe senzorjev sile in različnih algoritmov vodenja lahko dosežemo aktivno impedanco na podlagi programske kode in tako pretvorimo industrijskega robota v haptičnega z nastavljivo mehansko impedanco [14]. Zaradi omejene pasovne širine sistema tak način vodenja ne more absorbirati

mehanskih šokov in še vedno ne pomeni optimalne rešitve za varno interakcijo s človekom. Za ta namen so se začeli uveljavljati *pogonski sistemi z inherentno togostjo*, ki v svoji strukturi med motorjem in bremenom vsebujejo elastične elemente (vzmeti), ki lahko absorbirajo mehanske trke [15], [16]. Togost določa elastični element, obstajajo pa tudi konfiguracije, kjer lahko togost segmenta nastavljamo s pomočjo nelinearnih vzmeti in več motorjev [17], [18]. Metode pozicijskega vodenja omenjenih pogonskih sistemov temeljijo na poznavanju točnih modelov togosti elastičnih elementov in vztrajnostnih parametrov mehanizma [19]. Če točni modeli niso znani, pa uporabljamo adaptivne metode vodenja [20].



Slika 1: Blokovna shema zgradbe LINarm++ večmodalne rehabilitacijske platforme: haptični robot, merilni sistem fizioloških signalov, sistem za mišično stimulacijo in virtualno okolje so različne modalnosti vadbe

2 CILJI

Osnovni cilj doktorske disertacije bo sinteza in analiza novih pristopov za varno, prilagojeno in preprosto enoročno vadbo z združevanjem več senzornih informacij. Pristopi bodo temeljili na najnovjših spoznanjih s področja motorične rehabilitacije z uporabo naprednih metod senzorne integracije v kombinaciji z analizo naprednih modelov pogonskih sistemov in algoritmov vodenja.

V disertaciji bodo izvedeni naslednji vmesni cilji:

- 1) **Metodologija in validacija metodologije nemotečega in preprostega merjenja fizioloških parametrov človeka med enoročno vadbo.** Za ugotavljanje psihološkega stanja človeka bomo razvili sistem za preprosto merjenje fizioloških parametrov človeka. Na podlagi literature in izkušenj bodo izbrani ključni in zanesljivi fiziološki senzorji, ki bodo vgrajeni v dve različni obliki ročajev. Predlagan merilni sistem bo uporabljen in eksperimentalno validiran s pomočjo referenčnega merilnega sistema fizioloških signalov.
- 2) **Izračun kinematičnih in dinamičnih parametrov zgornje okončine med enoročno vadbo.** Ra-

zumevanje kinematičnih in dinamičnih parametrov med vadbo je pomemben prispevek pri snovanju algoritmov vodenja naprav za rehabilitacijo. Med enoročno robotsko vadbo bomo s spreminjanjem modela virtualnega okolja naloge analizirali sile in navore v sklepih aktivne okončine. Spreminjali bomo dinamiko dogajanja v nalogi in fizični napor, ki se bo odražal kot upor, katerega robot daje človeku.

- 3) **Teoretična analiza modela pogonskega sistema s spremenljivo impedanco.** Pogoni s spremenljivo impedanco spadajo v skupino pogonov z inherentno togostjo. Zgradba takih sistemov vsebuje elastične elemente, ki lahko ob nepoznavanju mehanskih parametrov vodijo do nestabilnosti. Analiziran bo matematični model pogona s spremenljivo impedanco za ugotavljanje primernosti takih pogonov za uporabo v rehabilitacijski robotiki.
- 4) **Zasnova in analiza algoritmov vodenja pogonskih sistemov s spremenljivo impedanco.** Spreminjanje impedance lahko dosežemo z različnimi konfiguracijami vzmeti in motorjev. Raziskali bomo različne algoritme vodenja motorjev za stabilno spreminjanje impedance z zadovoljivo pozicijsko točnostjo.

3 UTEMELJITEV

Na področju rehabilitacijske robotike vsi cilji težijo k preprosti, učinkoviti in dostopni vadbi pacientov s senzorno-motoričnimi okvarami. Oteženo ali prizadeto gibanje in kognicija pogosto izhaja iz možganskih poškodb po kapi, zato se je razvila posebna veja rehabilitacije, ki ji pravimo nevrorehabilitacija. Klinike in rehabilitacijski inštituti uporabljajo robotske naprave za nevrorehabilitacijo, saj omogočajo motivacijsko vadbo, vendar je po izteku časa, ki je predpisan za pacienta, ta odpušen v domačo oskrbo, kjer nima dostopa do podobne vadbe. Študije dokazujejo [18], da je aktivna motorična in kognitivna rehabilitacija pomembna tudi v domači oskrbi v kronični fazi prizadetosti po poškodbi. S tem namenom se razvijajo tudi nizkocenovne prenosne naprave, namenjene tudi vadbi v domači oskrbi. Prenosnost, cenovna dostopnost, preprosta uporaba in varnost so samo nekateri pogoji, ki jih rehabilitacijske naprave za domačo uporabo morajo vsebovati. Za optimalno vodenje in načrtovanje vadbe pa potrebujemo bogate informacije o biomehaniki, fiziologiji in uspešnosti pacienta, ki uporablja vadbene naprave.

Uspešnost okrevanja pacientov po kapi neposredno korelira z motivacijo za vadbo paretičnih udov ali kognitivnih sposobnosti. Izboljšanje motivacije lahko dosežemo s prilagajanjem robotske vadbe glede na fiziološko stanje pacienta, ki ga ocenimo s pomočjo meritev fiziološkega odziva pacienta. Fiziološke meritve pa ne omogočajo zgolj ocene stanja, temveč jih lahko uporabljamo tudi za diagnostiko in sledenje pacientovih

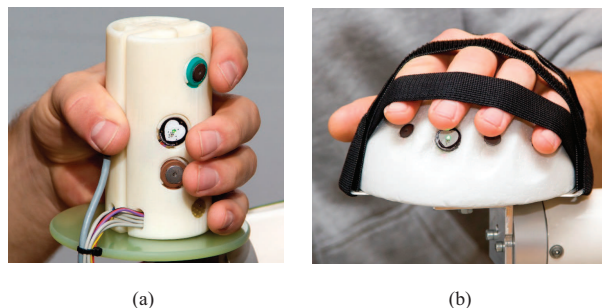
vitalnih znakov med redno vadbo. Sistemi za merjenje fizioloških parametrov so dragi in namestitev merilnih elektrod lahko traja tudi po več deset minut, zato smo v dosedanjem delu razvili merilni sistem za merjenje fiziološkega odziva, ki je integriran v ročaj (slika 2) rehabilitacijske naprave, in tak sistem tudi validirali.

Z izračunom kinematičnih in dinamičnih parametrov zgornjih okončin med enoročno vadbo lahko terapevt pridobi objektivne informacije o biomehaniki aktivne roke med vadbo, kar mu omogoča, da spremlja napredek pacienta skozi daljše časovno obdobje in optimalno načrtuje vadbo za izboljšanje simptomov. Dodatno so lahko kinematični in dinamični parametri, pridobljeni iz nosljivega senzornega sistema, nameščenega na zgornjih okončinah, zaprtozančna informacija, s katero prilagajamo vadbo glede na specifični sklep okončine ali mišično skupino.

Za uspešno komercializacijo in integracijo rehabilitacijskih naprav v množično uporabo je treba ugoditi pogoju varne vadbe. Načrtovati je torej treba mehanizme, ki so po svoji zgradbi inherentno varni za uporabo. Za ta namen bomo analizirali modele pogonskih sistemov z inherentno togostjo (slika 4), ki vsebujejo elastične elemente, in motorje, ki lahko z algoritmi vodenja aktivno spreminjajo mehansko togost.

4 METODOLOGIJA

Metodologija in validacija metodologije nemotečega in preprostega merjenja fizioloških parametrov človeka med enoročno vadbo: Za validacijo sistema za nemoteče merjenje fizioloških parametrov bomo na obstoječi robotski sistem HapticMaster (*FCS Control System*) namestili merilni sistem z integriranimi senzorji v ročaju. V eksperimentu bodo zdrave osebe v interakciji z robotom opravljale nalogo pod različnimi pogoji, v točki interakcije bodo na aktivni okončini merjene s predlaganim merilnim sistemom (slika 2), vzporedno pa bo potekala meritev z referenčnim sistemom na drugi (pasivni) okončini.

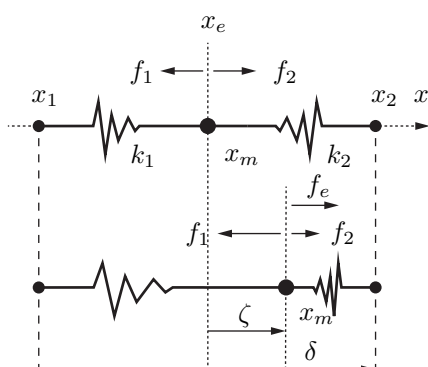


Slika 2: Senzorizirana ročaja v obliki cilindra (a) in hemisfere (b)

Izračun kinematičnih in dinamičnih parametrov zgornje okončine med enoročno vadbo: Izračun kinematičnih parametrov poteka z združevanjem senzornih

informacij iz nosljičnega senzornega sistema, ki sestoji iz IME senzorjev. Z vzorčenjem pospeškometra, žiroskopa in magnetometra lahko z naprednimi algoritmi zlivanja podatkov izračunamo orientacije posameznih segmentov. Z upoštevanjem kinematičnega modela roke lahko izračunamo kinematične spremenljivke roke. Na podlagi inverzne Newton-Eulerjeve dinamične analize, ki temelji na ravnotežju sil in momentov, bomo izračunali dinamične parametre roke s pomočjo statističnih antropometričnih podatkov merjencev in sile interakcije izmerjene na vrhu robota.

Teoretična analiza modela pogonskega sistema s spremenljivo impedanco: Zgrajen bo matematični model pogonskega sistema s spremenljivo impedanco, ki bi bil primeren za linearne premike. Model bo zasnovan kot dva vzporedno nameščena pogona s serijsko elastičnostjo, ki delujeta v nasprotni smeri (antagonistično). Z uporabo nelinearnih vzmeti kot elastičnih elementov pogonskega sistema lahko dosežemo spreminjanje mehanske togosti kot prikazuje slika 3.



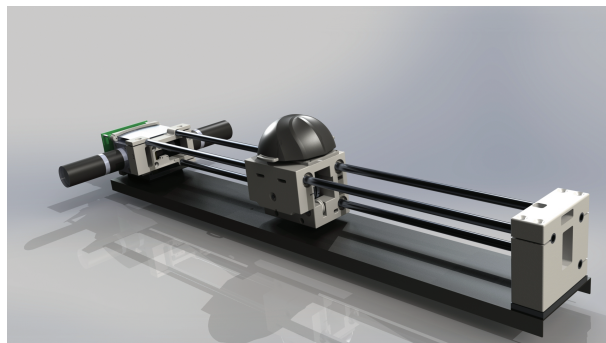
Slika 3: Poenostavljen model sistema dveh vzporednih vzmeti. x_1 in x_2 sta vira pozicije (motorja), x_e pa pozicija ravnovesja premičnega dela. Sili f_1 in f_2 sta sili, ki delujeta na premično telo zaradi elastičnih elementov k_1 in k_2 . Za izmik premičnega dela iz točke ravnovesja je potrebna zunanja sila f_e , ki povzroči izmik ζ . Parameter δ določa prednapetost vzmeti

Zasnova in analiza algoritmov vodenja pogonskih sistemov s spremenljivo impedanco: Na podlagi matematičnega modela pogonskega sistema bomo razvili algoritem vodenja elastičnega pogonskega sistema (slika 4), ki bo temeljil na izmeničnem napenjanju vzmeti mehanizma. Tako bomo skušali doseči stabilno spreminjanje in krmiljenje mehanske impedance sistema z zadostno pozicijsko in hitrostno točnostjo. Algoritem vodenja bomo analizirali v simulaciji in ga validirali na realnem pogonskem sistemu.

5 SKLEP

Načrtovani znanstveni prispevki doktorske disertacije so:

- validacija metodologije nemotečega in preprostega merjenja fizioloških parametrov človeka med robot-



Slika 4: CAD-model predlaganega haptičnega mehanizma. Premični del vsebuje sistem torzijskih vzmeti z nelinearno karakteristiko, uporaba dveh motorjev pa omogoča razsklopljeno vodenje po poziciji in togosti mehanizma.

sko vadbo,

- metoda ocenjevanja sil in navorov v sklepih roke z nosljivimi inercialnimi senzorji in merjenem sile interakcije med enoročno vadbo z robotom,
- teoretična analiza in metoda vodenja linearne pogonskega sistema s spremenljivo impedanco za varno enoročno vadbo zgornjih okončin.

ZAHVALA

Delo je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) v okviru programa (P2-0228) - Analiza in sinteza gibanja pri človeku in stroju. Raziskava je nastajala delno v sklopu evropskega projekta ECHORD++, pod številko 601116 za raziskavo LINarm++.

LITERATURA

- [1] N. Hocine, A. Gouaich, S. A. Cerri, D. Mottet, J. Froger, and I. Laffont, "Adaptation in serious games for upper-limb rehabilitation: an approach to improve training outcomes," *User Modeling and User-Adapted Interaction*, vol. 25, no. 1, pp. 65–98, 2015.
- [2] F. C. Huang, R. B. Gillespie, and A. D. Kuo, "Human adaptation to interaction forces in visuo-motor coordination," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 390–397, 2006.
- [3] P. Maciejasz, J. Eschweiler, K. Gerlach-Hahn, A. Jansen-Troy, and S. Leonhardt, "A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation," *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, vol. 11, no. 1, p. 1, 2014.
- [4] D. Novak, M. Mihelj, J. Zihlerl, A. Olenšek, and M. Munih, "Psychophysiological measurements in a biocooperative feedback loop for upper extremity rehabilitation," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, pp. 400–410, 2011.
- [5] D. Novak, M. Mihelj, J. Zihlerl, A. Olenšek, and M. Munih, "Psychophysiological measurements in a biocooperative feedback loop for upper extremity rehabilitation," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, pp. 400–410, 2011.
- [6] D. Novak, J. Zihlerl, A. Olenšek, M. Milavec, J. Podobnik, M. Mihelj, and M. Munih, "Psychophysiological responses to robotic rehabilitation tasks in stroke," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 4, pp. 351–361, 2010.

- [7] D. Novak, M. Mihelj, and M. Munih, "Psychophysiological responses to different levels of cognitive and physical workload in haptic interaction," *Robotica*, vol. 29, no. 03, pp. 367–374, 2011.
- [8] D. Kulic and E. A. Croft, "Affective state estimation for human–robot interaction," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 5, pp. 991–1000, 2007.
- [9] S. Balters and M. Steinert, "Capturing emotion reactivity through physiology measurement as a foundation for affective engineering in engineering design science and engineering practices," *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1–23, 2015.
- [10] G. M. Breakwell, J. A. Smith, and S. M. Hammond, *Research Methods in Psychology*, section 8, pp. 146–195. SAGE Publications Ltd., third ed., 2006. Psychophysiological methods.
- [11] J. Paul, "Paper 8: Forces transmitted by joints in the human body," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, vol. 181, pp. 8–15, SAGE Publications, 1966.
- [12] J. Apkarian, S. Naumann, and B. Cairns, "A three-dimensional kinematic and dynamic model of the lower limb," *Journal of biomechanics*, vol. 22, no. 2, pp. 143–155, 1989.
- [13] A. Bertomeu-Motos, L. D. Lledó, J. A. Díez, J. M. Catalan, S. Ezquerro, F. J. Badesa, and N. Garcia-Aracil, "Estimation of human arm joints using two wireless sensors in robotic rehabilitation tasks," *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 30571–30583, 2015.
- [14] M. Mihelj, T. Bajd, M. Munih, J. Lenarčič, and M. Žefran, *Vodenje robotov. Založba FE in FRI*, 2011.
- [15] G. A. Pratt and M. M. Williamson, "Series elastic actuators," in *Intelligent Robots and Systems 95. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, *Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1, pp. 399–406, IEEE, 1995.
- [16] N. Paine, S. Oh, and L. Sentis, "Design and control considerations for high-performance series elastic actuators," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp. 1080–1091, 2014.
- [17] B. Vanderborght, A. Albu-Schäffer, A. Bicchi, E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M. Catalano, O. Eiberger, W. Friedl, G. Ganesh, et al., "Variable impedance actuators: A review," *Robotics and autonomous systems*, vol. 61, no. 12, pp. 1601–1614, 2013.
- [18] M. Malosio, M. Caimmi, G. Legnani, and L. Tosatti, "Linarm: a low-cost variable stiffness device for upper-limb rehabilitation," in *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 3598–3603, Sept 2014.
- [19] A. De Luca and P. Lucibello, "A general algorithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints," in *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 504–510, IEEE, 1998.
- [20] F. Lange and G. Hirzinger, "Learning accurate path control of industrial robots with joint elasticity," in *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. 2084–2089, IEEE, 1999.

Blaž Jakopin je leta 2014 diplomiral s področja elektrotehnike na Univerzi v Ljubljani. Je mladi raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo področje raziskovanja obsega fiziološke meritve, interakcijo človek-robot in načrtovanje metod varne interakcije človeka z robotom.

Marko Munih je diplomiral (1986), magistriral (1989) in doktoriral (1993) s področja elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. V letih 1995 in 1996 je bil raziskovalec na Oddelku za medicinsko fiziko in bioinženiring na University College London, nakar je 1997 je postal izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Trenutno je redni profesor in vodja Laboratorija za robotiko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani kjer poučuje predmete Kinematika in dinamika robotov, Mikroročunalniški sistemi, Osnove robotike, Poglavlja iz robotike, Robotski mehanizmi, Seminar iz robotike in merjenj in Vrageni sistemi v avtomatiki.