

Trk robota s človekom: zveza med energijsko gostoto trka in občuteno bolečino

Borut Povše¹, Darko Koritnik¹, Tadej Bajd², Marko Munih²

¹ Dax, d.o.o., Vreskovo 68, 1420 Trbovlje

² Laboratorij za robotiko in biomedicinsko tehniko, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: borut.dax@siol.net

Povzetek. V delu je predstavljena raziskava, ki obravnava sodelovanje majhnega industrijskega robota in človeka. Med sodelovanjem lahko pride v skupnem delovnem prostoru do trka robotskega orodja in človekove roke. Treba je poskrbeti, da pri trku ne pride do poškodb človeka in da trk ne povzroči znatne bolečine. Trk robotskega orodja s človeško podlaktjo smo proučevali pri poskusih na prostovoljcih. Varen niz eksperimentov, ki vključujejo sodelovanje prostovoljcev, smo določili s preliminarnimi poskusi na enem od avtorjev tega prispevka. Prostovoljci so po vsakem udarcu določili stopnjo občutene bolečine prek grafičnega vmesnika. Eksperimente smo izvedli z različnimi oblikami robotskih orodij pri različnih hitrostih in pojemkih vrha robota. Trk med vrhom robota in podlaktjo smo ovrednotili z merilnim sistemom, sestavljenim iz senzorja sil in navorov ter optičnega merilnega sistema. V raziskavi smo določili korelacijo med stopnjo občutene bolečine in gostoto energije udarca.

Gljučne besede: sodelovanje robota in človeka, trk med robotom in človekom, določanje stopnje bolečine trka

Collision of the Industrial Robot and Human Operator: correlation between the impact-energy density and pain intensity

Extended abstract. Introduction of new technologies and optimization of production performance in industry require cooperation of humans and robotic systems. Future robots will not work behind safety guards; they will be working in close cooperation with humans. This leads to a fundamental concern of how to ensure safe physical human-robot interaction. Different approaches have been proposed to study human-robot interaction safety [2-4]. However, human-robot collisions and resulting injuries have been, to the best of our knowledge, mainly investigated by the Institute of Robotics and Mechatronics, DLR – German Aerospace Center [5, 6].

The research described in this paper was focused on cooperation of a small industrial robot and a human operator where collision is expected only between the robot end-effector and the lower arm of the human worker (Fig. 1). Our goal was to determine the correlation between the pain intensity felt during the impact and the impact energy density. To study the impact between the robot and the man, an investigation with human volunteers was performed. To determine a safe range of the impact intensity with human subjects, a preliminary investigation was performed on one of the authors of this paper. During the experiment, the volunteers determined the pain they felt after each impact on a scale from 0 (no pain) to 100 (unbearable pain) [8, 9]. The pain assessed was also used as a criterion to determine whether the experiment should be continued or stopped. It was initially expected that the volunteers would only feel a mild pain.

In the experiments, the robot end-effector collided with the human lower arm perpendicularly at a constant deceleration. We investigated impacts at a constant speed deceleration of the end-effector, because impacts at a constant speed are too dangerous for human volunteers. The point of impact was

positioned midway between the wrist and the elbow on the dorsal aspect of the lower arm (Fig. 3). The robot end-effector was displaced from an initial point toward the point of impact along a straight line. Several tests were carried out at a maximal velocity, different robot decelerations, different end-effector shapes (Fig. 2), and different depths of stop points with regard to the arm surface.

The assessed impact force was logged at 8 kHz by a real-time xPC target computer. The measuring results sampled at a high frequency provided us with an adequate insight into the impact of the robot end-effector and the lower arm (Figs. 5, 6). The measured data will be used in our further investigations where end-effector protection covers and protection clothing will be evaluated.

Keywords: Human-robot cooperation, human-robot collision, impact-pain intensity assessment.

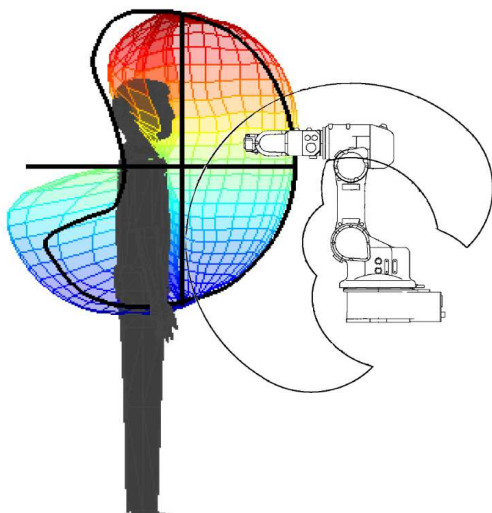
1 Uvod

V industriji narekujejo povečevanje učinkovitosti proizvodnje in uvajanje novih tehnologij tesnejše sodelovanje robota in človeka. Roboti v prihodnosti ne bodo delovali za varovalnimi ograjami ali varnostnimi zavesami, ampak bodo sodelovali z ljudmi. Glavno vprašanje, ki se poraja, je, kako zagotoviti varno fizično interakcijo med robotom in človekom.

Naše raziskovalno delo obravnava sodelovanje robota in človeka. Primer sodelovanja človeka in robota v industrijski montažni celici je kompleksno sestavljanje oz. montaža izdelkov. Človek opravlja zahtevne operacije (npr.: vstavljanje gibljivih, fleksibilnih

elementov), medtem ko robot vstavlja toge sestavne elemente, ki jih je treba vgraditi z veliko natančnostjo. V predlagani industrijski celici je skupni delovni prostor človekove roke in robota definiran, kot je prikazano na sliki 1 [1]. Do trka lahko pride le med robotskim orodjem in podlaktema sodelujočega človeka. Smrtno nevarne situacije niso mogoče; v najslabšem primeru lahko pride do zloma kosti podlakti (ulna, radius). Cilj našega raziskovalnega dela je odgovoriti na vprašanje, ali je mogoče zagotoviti varno fizično interakcijo med človekom in malim standardnim šestosnim industrijskim robotom.

Za določanje stopnje varnosti fizične interakcije robota in človeka so bili predlagani različni pristopi [2 - 4]. Trk med robotom in človekom ter rezultirajoče poškodbe so raziskovali predvsem na inštitutu za robotiko in mehatroniko, DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) [5, 6]. Za določanje stopnje poškodbe mehkega tkiva so predlagali gostoto energije udarca. Poškodbe mehkega tkiva nastanejo pri udarcih z gostoto energije, višjo od $2,52 \text{ J/cm}^2$ [7].



Slika 1: Skupni delovni prostor robota in človekove roke
Figure 1. Common human arm and robot workspace.

V predstavljenem delu obravnavamo predvsem bolečino, ki jo človek čuti med udarcem. V robotski celici, kjer sodelujeta robot in človek, ne smemo dovoliti bolečih trkov. Nekateri trki med robotom in človekom ne povzročijo poškodbe mehkega tkiva, ker je gostota energije udarca manjša od omenjene vrednosti, a je kljub temu udarec za človeka boleč. Stopnja občutene bolečine bi morala biti strožji kriterij za načrtovanje varne robotske celice kot gostota energije udarca. S pomočjo eksperimentov smo poskušali določiti korelacijo med občuteno bolečino in gostoto energije udarca za različna robotska orodja.

Varen niz poskusov, ki vključujejo sodelovanje prostovoljcev, smo določili s preliminarnimi poskusi na enem od avtorjev tega prispevka. Z vsakim udarcem

robotskega orodja smo večali pojemek vrha robota do 5 m/s^2 in globino prodiranja robotskega orodja v mehko tkivo podlakti do 30 mm. Testna oseba je po vsakem udarcu določila občuteno bolečino. Udarci z orodjem za ravninski dotik s hitrostmi do 2 m/s niso povzročili znatne bolečine. Med udarci z robotskim orodjem za premi dotik je bila stopnja bolečine določena kot blaga bolečina. Ocenili smo tudi, da so za eksperimente s prostovoljci udarci z orodjem za točkasti dotik prenevarni. Izveden je bil le varen nabor eksperimentov z robotskima orodjema za ravninski in premi dotik.

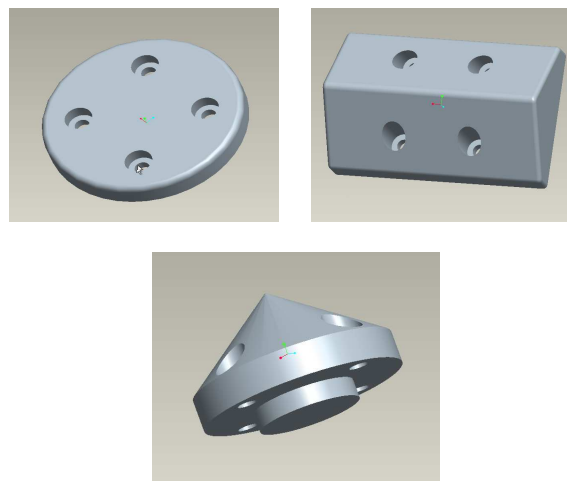
Prostovoljci so morali med poskusom po vsakem udarcu oceniti občuteno bolečino na lestvici od 0 (brez bolečine) do 100 (neznosna bolečina). Občutena bolečina je bila tudi merilo, ali smemo eksperiment nadaljevati, ali ga je treba za trenutno sodelujočo testno osebo prekiniti. Pričakovano je bilo, da bolečina udarca ne bo presegala blage bolečine. Poskuse smo opravili na petih različnih osebah moškega spola, starih od 25 do 60 let.

Vsi prostovoljci so po seznanitvi s potekom in drugimi podrobnostmi poskusa podpisali privolitev za sodelovanje v eksperimentu. Pridobili smo tudi soglasje komisije za medicinsko etiko.

2 Metodologija

2.1 Robotska orodja

Industrijski roboti so glede na nalogo, ki jo opravljajo, opremljeni z orodji in prijemalemi različnih oblik. Za ovrednotenje čim širšega spektra dotikov



Slika 2: Robotska orodja različnih oblik za ravninski, premi in točkasti dotik

Figure 2. Differently-shaped robot end-effectors for a plane, line and point impact.

je treba v eksperiment vključiti robotska orodja, ki povzročijo točkasti, premi in ravninski dotik. Zaradi varnosti pa sta bili v poskus vključeni le orodji za ravninski in premi dotik.

2.2 Merilni sistem

V raziskavi smo uporabili merilni sistem, ki vključuje triosni senzor sil in navorov (JR3, Inc.) in optični merilni sistem Optotrak Certus (Northern Digital, Inc.). Med trkom robotskega orodja s podlaktjo smo merili lego podlakti oz. robotskega orodja in silo med vrhom robota ter orodjem. Izmerjene vrednosti sile smo zajeli z xPC target računalnikom. Podlaket in robotsko orodje smo opremili z infrardečimi markerji ter njuno trenutno pozicijo beležili z optičnim merilnim sistemom Optotrak.

2.3 Trk robotskega orodja s podlaktjo

Pri izvajanju eksperimentov je robot trčil v podlaket pravokotno s konstantnim pojemkom. Točka trka je bila na sredini med zapestjem in komolcem na dorzalni strani podlakti. Z različnimi robotskimi orodji so bili izvedeni eksperimenti pri različnih pojemkih robotskega orodja ter različnih globinah končne točke glede na površino podlakti. Najvišja hitrost robotskega orodja je bila 2 m/s. Pojemek robotskega orodja pa smo spreminjali od 1 m/s² do 5 m/s² s korakom 1 m/s². Globino končne točke smo spreminjali glede na površino dorzalne strani podlakti s korakom 10 mm od 10 mm do 30 mm. Pri nastavitvi pojemka 1 m/s² so bili izvedeni trije eksperimenti s končnimi točkami robotskega orodja izbranimi na vseh treh globinah. Eksperimente smo ponovili še pri pojemkih robotskega orodja 2 m/s², 3



Slika 3: Prostovoljec in antropomorfni robot z orodjem za premi dotik

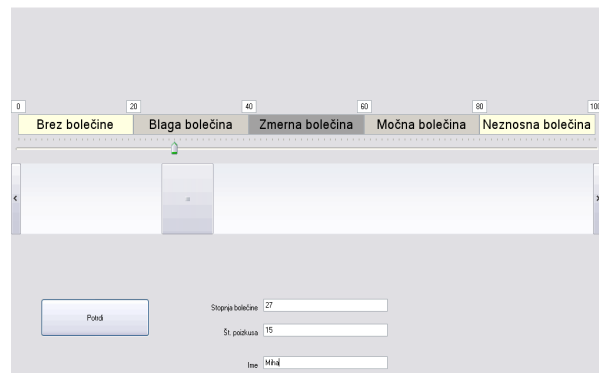
Figure 3. Human volunteer and a six-axis robot with a line end-effector.

m/s², 4 m/s² in 5 m/s². Za vsako robotsko orodje je bilo torej opravljenih 15 različnih eksperimentov. Po vsakem trku je moral prostovoljec postaviti podlaket v isto lego. Pri tem mu je bila v pomoč struktura sestavljena iz aluminijastih profilov in dveh žic. Podlaket je bilo potrebno po vsakem udarcu postaviti v položaj, v katerem se je dotikala obeh žic (slika 3).

2.4 Določanje stopnje bolečine

Testna oseba je po vsakem udarcu ocenila občuteno stopnjo bolečine z grafičnim vmesnikom, programiranim v programskem okolju Visual Studio. Oseba je drsnik na zaslonu premaknila na mesto, ki je najbolje ustrezalo občuteni stopnji bolečine med trkom. Vzduž drsnika je bila prikazana linearna lestvica stopnje bolečine z razponom od 0 (brez bolečine) do 100 (neznosna bolečina) [8, 9]. Lestvica je bila razdeljena v naslednjih pet razredov:

- 0 ... 20 brez bolečine
- 20 ... 40 blaga bolečina
- 40 ... 60 zmerna bolečina
- 60 ... 80 močna bolečina
- 80 ... 100 neznosna bolečina



Slika 4: Grafični uporabniški vmesnik za ocenjevanje stopnje občutene bolečine

Figure 4. Graphical user interface for pain-intensity assessment.

Zanesljivo ocenjevanje bolečine je bilo zagotovljeno z naključnim vrstnim redom izvajanja udarcev z različnimi parametri. Rezultate smo primerjali z gostoto energije udarca. Domnevali smo, da višja gostota energije udarca povzroči močnejšo bolečino. Gostota energije udarca je definirana kot

$$e_A = \frac{\int_{s_{trk_start}}^{s_{trk_stop}} F \cdot ds}{A_{dotik}} \quad (1)$$

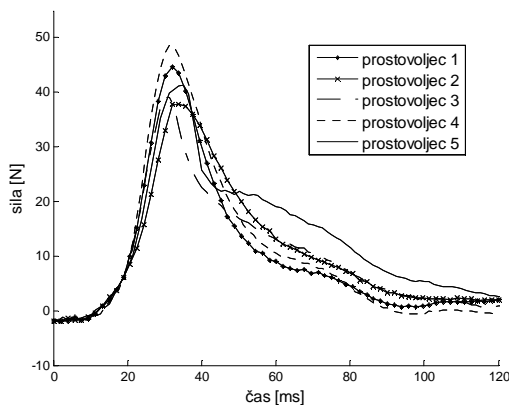
V enačbi (1) je F sila, izmerjena med robotskim orodjem in podlaktjo; s_{trk_start} in s_{trk_stop} sta položaja vrha robotskega orodja na začetku in na koncu trka, A_{dotik} pa pomeni površino dotika med robotskim orodjem in podlaktjo. Sila F je bila izmerjena s triosnim senzorjem sil in navorov. Integracijski interval $[s_{trk_start}, s_{trk_stop}]$ je bil določen z meritvami položaja infrardečih markerjev, pritrdjenih na robotsko orodje in podlaket. Med trkom se kinetična energija robotskega orodja pretvarja v notranjo in prožnostno energijo mehkega tkiva podlakti

od točke dotika orodja s kožo podlakti ($s_{\text{trk_start}}$) do točke, ko je razdalja med robotskim orodjem in trdno oporo mehkega tkiva roke (kost ulna, radius) najmanjša ($s_{\text{trk_stop}}$). Potem se kinetična energija robotskega orodja prenaša v kinetično energijo podlakti, ker začne vrh robota potiskati podlaket [10]. Površino dotika med orodjem in podlaktjo smo določili z meritvijo površine odtisa, ki ga na koži podlakti pusti orodje, namočeno v črnilo. Gostoto energije udarca pomeni energija, ki jo je prejelo mehko tkivo podlakti, deljena s površino dotika med orodjem in podlaktjo (1).

3 Rezultati

3.1 Trk robotskega orodja s podlaktjo

Pri poskusih se je robot premaknil proti roki prostovoljca pod pravim kotom z najvišjo hitrostjo, pri čemer smo spreminjali pojemek in končno točko robotskega orodja. Na slikah 5 in 6 so prikazani poteki



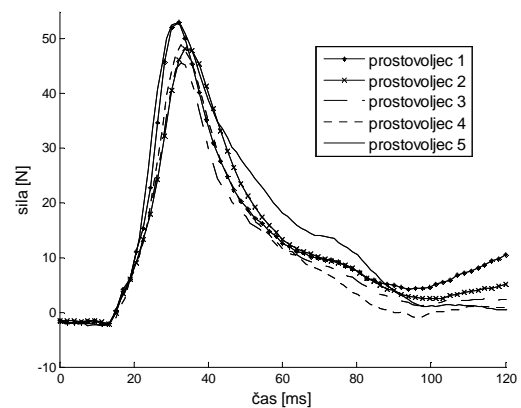
Slika 5: Sila trka med vrhom robota in podlaktjo za različne prostovoljce (pojemek 5 m/s^2 , globina končne točke 30 mm, premi dotik)

Figure 5. Force during the contact of the robot end-effector and lower arm for different volunteers (deceleration of 5 m/s^2 , stop-point depth 30 mm, line impact).

sil trkov z različnimi prostovoljci za premi in ravninski dotik. Odvisnost najvišje sile udarca od globine končne točke oz. od pojemka robotskega orodja je prikazana na slikah 7 in 8.

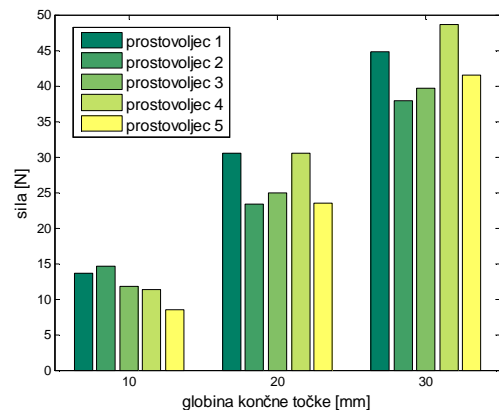
3.2 Ocenjena stopnja bolečine

Rezultati ocen stopnje bolečine petih prostovoljcev so prikazani na slikah 9 in 10. Škatlični diagrami z brki pomenijo vrednosti 5., 25., 50., 75. in 95. percentila v vsakem koraku. Ozka črtica na sredini vsakega škatličnega diagrama torej pomeni mediano petih ocen bolečine za izbrani eksperiment. Zgornja vodoravna os



Slika 6: Sila trka med vrhom robota in podlaktjo za različne prostovoljce (pojemek 5 m/s^2 , globina končne točke 30 mm, ravninski dotik)

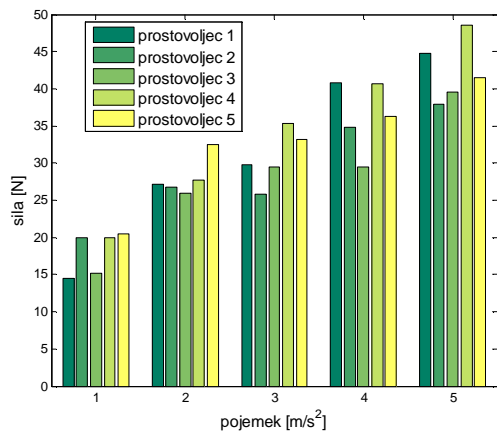
Figure 6. Force during the contact of the robot end-effector and lower arm for different volunteers (deceleration of 5 m/s^2 , stop-point depth 30 mm, plane impact).



Slika 7: Največja sila trka med vrhom robota in podlaktjo pri različnih globinah končne točke (pojemek 5 m/s^2 , premi dotik)

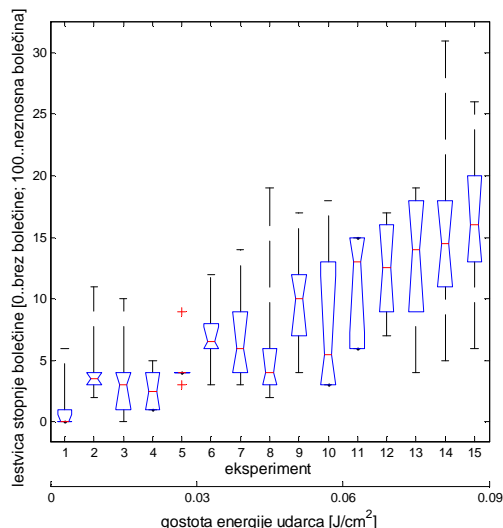
Figure 7. Maximal robot end-effector and lower-arm contact force at different stop-point depths (deceleration of 5 m/s^2 , line impact).

prikazuje poskuse, urejene glede na naraščajočo gostoto energije udarca. Pod številko 1 je torej zbranih pet eksperimentov; za vsakega prostovoljca je prikazan poskus z najmanjšo gostoto energije udarca. Pripadajoče ocene stopnje bolečine pa so prikazane v škatličnem diagramu nad isto številko. Spodnja vodoravna os deli eksperimente v tri skupine glede na vrednost gostote energije udarca. Za primer vzemimo skupine eksperimentov od 1 do 5 na sliki 10. Pri teh petindvajsetih poskusih je izračunana gostota energije udarca v območju od 0 do 0.125 J/cm^2 .

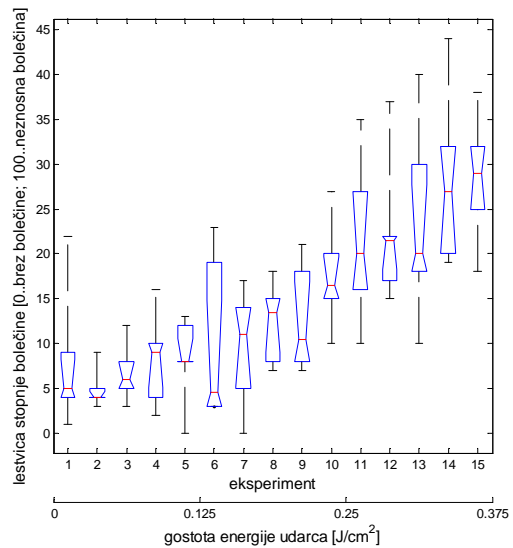


Slika 8: Največja sila trka med vrhom robota in podlaktjo pri različnih pojemkih vrha robota (globina končne točke 30 mm, premi dotik)
 Figure 8. Maximal robot end-effector and lower-arm contact force at different end-effector decelerations (stop-point depth 30 mm, line impact).

Na navpični osi je prikazana stopnja bolečine v območju od 0 do 100. Za poskuse z ravninskim in točkastim dotikom smo izračunali Spearmanov korelacijski faktor r_s , s čimer smo določili stopnjo korelacije med oceno občutene bolečine in gostoto energije udarca. Korelacijski faktor za eksperimente z orodjem za ravninski dotik znaša $r_s = 0.31$ ($p < 0.01$) in za premi dotik $r_s = 0.67$ ($p < 0.01$). Oba korelacijska faktorja nakazujeta ustrezno stopnjo korelacije med oceno občutene bolečine in gostoto energije udarca.



Slika 9: Ocene stopenj občutene bolečine, ravninski dotik
 Figure 9. Volunteer pain assessment, plane impact end-effector.



Slika 10: Ocene stopenj občutene bolečine, premi dotik
 Figure 10. Volunteer pain assessment, line impact end-effector.

4 Sklep

Z eksperimenti na prostovoljcih smo poskušali določiti povezavo med gostoto energije udarca in stopnjo občutene bolečine za trke različnih robotskih orodij s podlaktjo. Poskuse smo izvedli z robotskim orodjem za premi in ravninski dotik. Gostoto energije udarca smo izračunali iz podatkov o sili udarca, kontaktni površini in trenutnem položaju podlakti oz. vrha robota. Največja sila udarca se za različne prostovoljce pri posameznem poskusu razlikuje za največ 30 odstotkov. Pri udarcih z orodjem za ravninski dotik je bila največja gostota energije $0,09 \text{ J/cm}^2$ s pripadajočo najvišjo oceno občutene bolečine 30, kar ustreza blagi bolečini. Za udarce z orodjem za premi dotik je bila največja gostota energije enaka $0,375 \text{ J/cm}^2$ in najvišja ocena stopnje občutene bolečine 44, kar je v območju zmerne bolečine. Iz rezultatov raziskave lahko sklepamo, da bi udarci z gostoto energije v velikostnem razredu $2,52 \text{ J/cm}^2$ [7] povzročili visoko stopnjo bolečine za obe obravnavani robotski orodji. To je nesprejemljivo v varni industrijski robotski celici, namenjeni sodelovanju robota in človeka. Treba bi bilo določiti še sprejemljivo stopnjo bolečine udarca in glede na to vrednost preračunati dovoljeno območje gostote energije udarca z uporabo rezultatov raziskave. Pri načrtovanju robotske celice omogoča podatek o dovoljenem območju vrednosti gostote energije udarca izbiro nekaterih lastnosti robotske celice, kot so pojemek vrha robota, najvišja hitrost vrha robota in najmanjša kontaktna površina dotika.

Izziv za prihodnje raziskave je ovrednotenje robotskega orodja za točkasti dotik v obliki povezave med gostoto energije udarca in stopnjo občutene bolečine. Treba je

določiti varen obseg poskusov, ki ne povzročijo poškodbe mehkega tkiva in so hkrati zadosten vzorec trkov za proučevanje točkastega dotika.

Rezultati eksperimentov bodo uporabljeni za načrtovanje in testiranje zaščitnih oblog na robotu oz. zaščitnih oblek na rokah človeka. Zaščitni elementi bodo omogočali varnejšo fizično interakcijo robota in človeka.

5 Literatura

- [1] N. Klopčar, M. Tomšič, J. Lenarčič, "A Kinematic Model of Shoulder Complex to Evaluate the Arm-Reachable Workspace," *J. Biomechanics*, vol. 40, pp. 86-91, 2007.
- [2] K. Ikuta, H. Ishii, M. Nokata, "Safety Evaluation Method of Design and Control for Human-Care Robots," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 22, no. 5, pp. 281-298, 2003.
- [3] J. Heinzmann, A. Zelinsky, "Quantitative Safety Guarantees for Physical Human-Robot Interaction," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 22, no. 7-8, pp. 479-504, 2003.
- [4] H. -O. Lim, K. Tanie, "Human Safety Mechanisms of Human-Friendly Robots: Passive Viscoelastic Trunk and Passively Movable Base," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 19, no. 4, pp. 307-335, 2000.
- [5] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, G. Hirzinger, "Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing," *Robotics: Science and Systems Conference (RSS2007)*, Atlanta, USA, 2007.
- [6] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, G. Hirzinger, "Requirements for Safe Robots: Measurements, Analysis and New Insights," *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 28, no. 11-12, pp. 1507-1527, 2009.
- [7] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, G. Hirzinger, "Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis & New Insights," *International Symposium on Robotics Research (ISR2007)*, Hiroshima, Japan, 2007.
- [8] J. Katz, R. Melzack, "Measurement of Pain," *Surgical Clinics of North America*, vol. 79, pp. 231-252, 1999.
- [9] S. L. Collins, R. A. Moore, H. J. McQuay, "The Visual Analogue Pain Intensity Scale: What is Moderate Pain in Millimeters?," *Pain*, vol. 72, pp. 95-97, 1997.
- [10] B. Povše, D. Koritnik, T. Maver, R. Kamnik, T. Bajd, M. Munih, "Cooperation of Small Industrial Robot and Human Operator," *18th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2009)*, pp. 1339-1349, Brasov, Romunia, 2009.

Zahvala

»Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada.«

Borut Povše je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Istega leta se je zaposlil v podjetju Dax, d.o.o., Trbovlje. Od leta 2008 je mladi raziskovalec iz gospodarstva. Raziskovalno delo opravlja na sedežu podjetja Dax v Trbovljah in v Laboratoriju za robotiko in biomedicinsko tehniko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegovo raziskovalno delo zajema proučevanje fizične interakcije med robotom in človekom.

Darko Koritnik je direktor podjetja Dax, d.o.o., v Trbovljah. Diplomiral je leta 1979 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Po končanem študiju se je zaposlil v podjetju Iskra polprevodniki v Trbovljah, kjer je delal do leta

1991 kot razvojni inženir in vodja področja za opremo in informatiko. Leta 1991 je ustanovil podjetje Dax, d.o.o., Trbovlje, leta 1993 pa RR-enoto v okviru podjetja. Registriran raziskovalec je od leta 1982. Deluje na področju avtomatizacije in robotike v elektroindustriji ter razvoja merilnih sistemov za potrebe industrije. Pri izvedbi projektov je sodeloval in se izobraževal pri Epson Industrial Automation, Seiko Instruments, Philips Semiconductors, Bosch-Siemens, ASM, Lumonics, Textronics, BTU, Ismecca, Disco, ETI, BSH, ETA Cerkno, Domel, Lama, FC-Group, Gorenje.

Tadej Bajd je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in redni član SAZU. Njegovo raziskovalno področje dela sta analiza in sinteza gibanja pri človeku in stroju.

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 biomedicinsko tehniko na Fakulteti za elektrotehniko je s področja FES privedel na področje rehabilitacijske robotike oz. haptičnih robotov.