

# Merilni sistem za analizo dinamičnega trka sodelujočega robota v skladu z ISO/DIS 21260

Sebastjan Šlajpah, Mario Klenovšek, Marko Munih, Matjaž Mihelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana  
E-pošta: {sebastjan.slajpah, marko.munih, matjaz.mihelj}@fe.uni-lj.si, mk8933@student.uni-lj.si

## Measurement system for collaborative robot's collision analysis according to ISO/DIS 21260

*In this paper, we present the design of a measurement system for analysing dynamic contact of the collaborative robot. Proper assessments of impact forces are utmost importance for providing a safe robotic system that can collaborate with the human worker. The measurement system comprises a force/torque sensor and compression spring for mimicking dynamic of human tissue. Weights are added for changing the inertia of the system and thus modelling different parts of the human body. The whole system is placed on a custom-designed gantry that enables nearly frictionless motion in the direction of impact to mimic the human reaction to the collision. Experimental tests were performed with the robot Universal Robot UR5e at four TCP velocities and with different sensor's inertia. Results show that the maximal impact force depends on the velocity of the robot and the inertia of the measurement system and less on the configuration of the robot. Analysis of the collisions show that contacts with the robot with TCP velocity below 250 mm/s are classified as G2 – occasional contacts; contacts with the robot with velocity 750 mm/s are classified as G3 – rare contacts; contact with the robot with TCP velocity 1000 mm/s are not permitted.*

## 1 Uvod

Sodelujoči roboti predstavljajo pomemben gradnik avtomatizacije v Industriji 4.0, saj so fleksiblni in enostavnii za uporabo obenem pa omogočajo izvajanje operacij skupaj z ljudmi v skupnem delovnem prostoru [1]. Sodelujoči roboti imajo lahko več strategij zagotavljanja varnosti uporabnika. Najpogostejsa je omejevanje moči in sil, ki poskrbi, da ob neželenem kontaktu z uporabnikom ne pride do prevelikega prenosa energije ter posledično poškodbe uporabnika [2].

Področja varnosti sodelujočih robotov se dotika več ISO standardov [3, 4, 5]. Med bolj pomembne spada tehnična specifikacija ISO/TS 15066, kjer so definirane varnostne meje za sile in pritiske na določene dele človeškega telesa. Trenutno je v pripravi tudi posodobljena različica standarda ISO/DIS 21260 [6], ki podaja metodologijo klasifikacije trkov, te razvrsti v skupine in zanje določi ustrezne meje.

Za zagotavljanje varnosti uporabnika je potrebna dejalna obravnava vsake robotske celice. Pri tem je pomembna analiza tveganja, ki identificira posamezne potencialne nevarne situacije. Za te je potrebno uvesti dodatne varnostne ukrepe ter z meritvami preveriti skladnost s standardi. Merilni sistem za ocenjevanje trka je sestavljen iz merilne celice ter kombinacije vzmeti in gume, ki modelirata človeško telo [7]. Pri meritvi se senzor togo vpne, sam trk pa se deli na dva dela: dinamični del od trka do časa 0,5 s ter kvazi-statičen po času 0,5 s. Največja pomankljivost komercialnih sistemo je, da ne upoštevajo dinamike človeškega telesa, kot je na primer nihaj roke ob trku.

V tem delu bomo predstavili razviti merilni sistem za merjenje trkov robota v dinamičnih razmerah ter ga eksperimentalno preiskusili s sodelujočim robotom UR5e.

## 2 Standard ISO/DIS 21260

Standard ISO/DIS 21260 [6] podaja omejitve za fizične stike med delom stroja in človekom, ki so posledica gibanja stroja ali njegove zlorabe. Dokument zajema vse vrste strojev, ki so zasnovani tako, da se lahko človek nahaja v njihovem delovnem prostoru ali pa lahko pride do fizičnega stika pri opravljanju nalog.

Inherentno varna zasnova po definiciji vsebuje zaščitne ukrepe a) omejevanje pogonske sile, da gnan del ne povzroča nevarnosti in b) omejevanje mase in/ali hitrosti gibajočih se delov in s tem omejevanje njihove kinetične energije.

Za uporabo tega dokumenta se upošteva postopek za ocenjevanje in zmanjševanje tveganja predstavljen v ISO 12100 [3]. Upoštevajo se vsi pogoji uporabe in predvidljive zlorabe. Priporočeni koraki za analizo kontaktov so sledeči.

- Identifikacija kontaktov med strojem in človekom.
- Kontakt v območju 50 mm od očesa je potrebno preprečiti. Za ostale kontakte je potrebno določiti klasifikacijsko skupino.
- Določiti je potrebno dovoljene pogoje kontakta.
- Primerjava dejanskih in dovoljenih pogojev stika. Če dejanski pogoji presežejo dovoljene, je potrebno spremeniti zasnova varnostnih ukrepov, dokler niso vrednosti pod dovoljeno mejo.
- Ponovitev postopka za vsak prepoznan stik.

## 2.1 Klasifikacija kontaktov in meje

V ISO/DIS 21260 so kontakti razdeljeni v štiri skupine glede na čas trajanja. Skupina G1 (visokofrekvenčni kontakti) obsega dinamične kontakte enega posameznika, ki se v obdobju osmih ur pojavljajo več kot enkrat na uro. Skupina G2 (občasni kontakti) obsega dinamične kontakte enega posameznika, ki se v obdobju osmih ur pojavljajo manj kot enkrat na uro, ampak več kot enkrat na teden. Skupina G3 (redki kontakti) obsega dinamične kontakte enega posameznika, ki se pojavljajo manj kot enkrat na teden. V tabeli 1 so podane meje za kontaktne skupine G1, G2 in G3.

	G1	G2	G3
Najmanjša površina kontakta / cm <sup>2</sup>	0,5	0,5	0,5
Največji prenos energije / J	1	2	4
Največja dinamična sila / N	75	150	400

Tabela 1: Limite za kontakte skupine G1, G2 in G3

Skupina G4 opisuje statične ali kvazi-statične kontakte in obsega vsak kontakt, kjer je prenos energije manjši od 2 J/s ali pa je sila prisotna za več kot 500 ms. V tabeli 2 so podane meje za kontakte skupine G4.

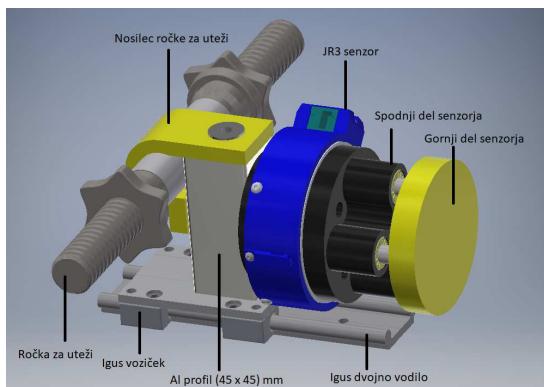
Najmanjša površina kontakta	0,5 cm <sup>2</sup>
Največja sila na enoto površine	35 N/cm <sup>2</sup>
Največja stalna kontaktna sila	100 N

Tabela 2: Limite za kontakte skupine G4

## 3 Merilni sistem

ISO/DIS 21260 posebej obravnava dinamične kontakte. Za merjenje dinamičnih trkov je potreben merilni sistem, ki je sposoben posnemati dinamiko človeškega telesa.

Merilni sistem je bil sestavljen iz senzorja sil in navorov JR3 45E15A4 ter vzmeti s togostjo 70 N/mm. Z vzmetjo smo posnemali elastičnost človeškega tkiva - uporabljena vzmet ustrezata parametrom dlani in prstov. Vztrajnost segmentov smo modelirali s spreminjačo maso ter tako dobili različen dinamični odziv sistema.



Slika 1: Model sestavljenega merilnega sistema

Merilni sistem smo pritrdirili na Igus DryLin WW voziček, ki je bil nameščen na vodilo Igus DryLin WS. Z drsnimi ležaji smo zagotovili minimalen vpliv trenja. Ta pasivna linearna stopnja je ponazarjala odmak človeškega telesa pri trku z robotom. Na sliki 1 je predstavljen celoten sistem merilnega sistema.

Za trk smo uporabili robota UR5e proizvajalca Universal Robots (Danska) z nastavljeno varnostno omejitvijo sile na 250 N. Robot je bil opremljen s prijemalom Robotiq 2F85 (Kanada). Kot kontaktno površino smo izbrali vrh prstov prijemala.

### 3.1 Merilni protokol

Meritve smo izvedli pri dveh različnih konfiguracijah robota. S tem smo preverili, kako sama postavitev vpliva na pravilno delovanje varnostne funkcije manipulatorja, ter če prihaja do razlik pri izmerjeni sili trka med konfiguracijama. Prva konfiguracija je bila pri iztegnjeni roki robota pri  $\mathbf{p} = [-130, -647, -306]$  mm, druga pa pri pokrčenem komolčnem sklepu  $\mathbf{p} = [-253, -444, -309]$  mm (slika 2).



Slika 2: Konfiguracija 1 (levo) in konfiguracija 2 (desno)

Najprej smo naredili primerjavo med predstavljenim merilnim sistemom in komercialnim merilnim sistemom KMG-500 (GTE, Nemčija). KMG-500 ima merilno območje od 20 N do 500 N z maksimalno napako 3 %. Analizirali smo trke pri dveh masah (4 kg in 9 kg) ter pri dveh hitrostih vrha robota (250 mm/s in 300 mm/s) za prvo konfiguracijo. Vsaka meritev je bila ponovljena petkrat.

Z gibajočim merilnim sistemom smo analizirali trke pri obeh konfiguracijah. Pri tem smo spremenjali tako hitrost s korakom 250 mm/s v mejah od 250 mm/s do 1000 mm/s, kot tudi maso s korakom 2,5 kg v mejah od 2 kg do 11,5 kg. Pri vsaki kombinaciji smo zajeli pet meritev trka. Na sliki 3 je predstavljen postavitev me-



Slika 3: Postavitev merilnega sistema

rilnega sistema z robotom. Dobljene rezultate smo tudi statistično primerjali med posameznima konfiguracijama robota z uporabo  $t$ -testa.

Analizirali smo tudi primer, ko je na merilnemu sistemu neskončna vztrajnost (togo vpet merilni sistem). Izkazalo se je, da varnostna funkcija robota ne samo ustavi gibanje, temveč tudi odmakne vrh robota od mesta trka, zato statičnih sil trka nismo mogli primerjati.

Merilni sistem smo povezali preko vmesnika Simulink RealTime, ki deluje v realnem času. Zajem in obdelava podatkov sta potekala preko programskega paketa Matlab R2019b. Vzorčna frekvenca merilnega sistema je bila 1 kHz.

## 4 Rezultati

Rezultati zajemajo primerjavo predstavljenega merilnega sistema s komercialnim merilnim sistemom ter analizo trkov pri gibajočim senzorjem z različnimi masami ter stacionarnim senzorjem.

### 4.1 Primerjava z referenčnim merilnikom

Naredili smo primerjavo meritev trka zajetimi tako s predstavljenim kot tudi s komercialnim merilnim sistemom. Komercialni senzor je imel nameščeno vzmet s togostjo 75 N/mm. Pritrdili smo ga na voziček, da se je lahko prostro gibal po vodilu.

Analizirali smo trk pri hitrostih vrha robota 250 mm/s in 300 mm/s. Ker je bila masa komercialnega senzorja večja od našega sistema, smo za primerjavo uporabili samo kombinacije uteži 4 kg in 9 kg (naš sistem: 4,22 kg in 9,22 kg; komercialni: 4,30 kg in 9,30 kg). V tabeli 3 so prikazane povprečne sile  $\bar{F}$  in standardne deviacije  $SD$  petih meritev dinamičnega trka za prvo konfiguracijo. Podane so tudi  $p$  vrednosti statistične primerjave dobljenih rezultatov z obema merilnima sistemoma.

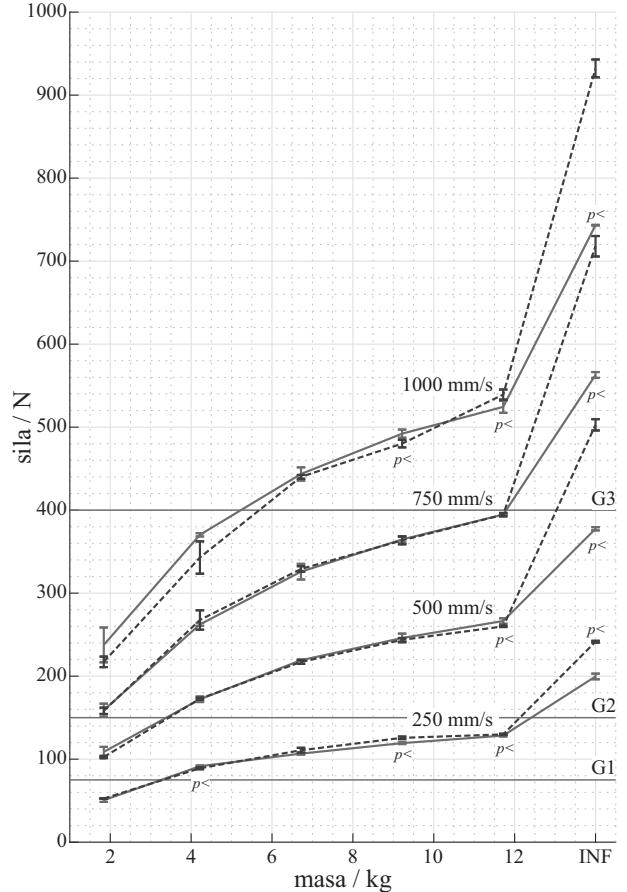
Masa	Sistem	250 mm/s		300 mm/s	
		$\bar{F}$ / N	$SD$ / N	$\bar{F}$ / N	$SD$ / N
4 kg	S1	87,9	1,8	106,2	4,9
	S2	89,3	1,5	108,3	0,6
		$p = 0,24$		$p = 0,18$	
9 kg	S1	121,4	1,1	143,7	3,1
	S2	117,7	1,2	142,0	1,7
		$p = 0,19$		$p = 0,93$	

Tabela 3: Primerjava rezultatov predstavljenega merilnega sistema (S1) in komercialnega merilnega sistema (S2)

### 4.2 Premikajoči senzor

Na sliki 4 so predstavljene srednje vrednosti maksimalnih izmerjenih sil trka pri obeh konfiguracijah z ustreznim razstrosom ( $\pm$  ena standardna deviacija). Merive so predstavljene za linearne hitrosti vrha robota 250 mm/s, 500 mm/s, 750 mm/s in 1000 mm/s. Maso senzornega sistema smo povečevali s korakom 2,5 kg (1,84 kg, 4,22 kg, 6,72 kg, 9,22 kg, 11,72 kg). Meritve, ki se statistično signifikantno razlikujejo med prvo in drugo konfiguracijo,

so označene s  $p <$ . Na grafu so označene tudi mejne vrednosti največje dinamične sile za kontaktne skupine G1, G2 in G3.



Slika 4: Srednje vrednosti maksimalne sile pri trku v prvi konfiguraciji (polna črta) in drugi konfiguraciji robota (črtkana črta) z razstrosom pri različnih hitrostih in masah merilnega sistema. S  $p <$  so označene meritve, ki se med obema konfiguracijama statistično signifikantno razlikujejo ( $p < 0,05$ ).

### 4.3 Mirujoči senzor

Mirujoči senzor predstavlja senzor z neskončno veliko vztrajnostjo. Na tak način se merijo tudi dinamične sile pri komercialnih sistemih glede na standard ISO/TS 15066. Senzor smo privili na fiksno mesto na vodilu, konfiguraciji in hitrosti robota pa so pri tem ostale nespremenjene. Tabela 4 prikazuje izmerjeno dinamično silo pri trku s togo vpetim senzorjem (povprečna sila  $\bar{F}$  in standardna deviacija  $SD$  petih meritev).

Hitrost	Konfiguracija 1		Konfiguracija 2	
	$\bar{F}$ / N	$SD$ / N	$\bar{F}$ / N	$SD$ / N
250 mm/s	199,6	3,4	241,5	1,1
500 mm/s	377,5	2,0	502,8	6,8
750 mm/s	562,9	3,5	717,9	12,3
1000 mm/s	743,3	0,4	932,2	10,8

Tabela 4: Izmerjene sile pri mirujočem senzorju

Naredili smo statistično analizo, ki je pokazala, da

so vse meritve pri isti hitrosti in različnih konfiguracijah statistično signifikantno različne ( $p < 0,002$ ).

## 5 Diskusija

Iz tabele 3 vidimo, da je naš merilni sistem primerljiv s komercialnim. Razlike pri izmerjenih maksimalnih vrednostih sile trka so manjše od 5 N oziroma 3 %. Statistična analiza je pokazala, da ni statistično signifikantnih razlik med meritvami s komercialnim in meritvami s predstavljenim merilnim sistemom.

Slika 4 prikazuje rezultate trka robota s premikajočim senzorjem pri spremenljajoči vztrajnosti merilnega sistema. Iz grafov vidimo, da na maksimalno silo trka vplivata tako hitrost robota kot tudi masa merilnega sistema, ne pa tudi konfiguracija robotskega mehanizma. Za 14 merilnih točk od 20 ne moremo trditi, da so statistično signifikantno različne, če primernamo konfiguraciji robota. Za ostalih šest bi se verjetno rezultat statistične analize spremenil s povečanjem števila meritov.

Dobljeni rezultati so v nasprotju z delom [7], kjer so imeli senzor togo vpet. Njihov eksperiment je pokazal močno korelacijo med maksimalno silo trka in oddaljenostjo vrha robota od baze robota. V skladu z njihovimi rezultati pa so rezultati trka pri merilnem sistemu z neskončno vztrajnostjo, ki so prikazani v tabeli 4. Tu vidimo, da je razlika pri isti hitrosti in različnih konfiguracijah lahko tudi 200 N. Zavedati se je potrebno, da mora robotski krmilnik zagotoviti enako hitrost ob trku pri vseh konfiguracijah, če želimo imeti primerljive rezultate. Zaradi mehanskih in kinematičnih omejitev se namreč lahko naredi, da robotski krmilnik, v primeru, da je vrh robota v bližini baze, prilagodi trapezni hitrostni profil gibanja vrha na tak način, da se zagotovi linearnost giba. Ob tem seveda hitrost premikanja robota ustrezno pade.

Tabela 4 nakazuje, da se glede na standard ISO/DIS 21260 trki v mirujoče telo z omejenim gibanjem (na primer roka na mizi) s hitrostjo 250 mm/s uvrščajo v skupino G3, kar pomeni, da se lahko ponavljajo manj kot enkrat na teden. Ostale hitrosti prekoračijo mejo 400 N, tako da ti kontakti niso dovoljeni.

Situacijo, ko je telo prosto gibljivo v prostoru (na primer roka v zraku), opisuje slika 4. Trk z robotom pri hitrosti 250 mm/s spada v skupino G2 – občasni kontakti. Pri tem velja, da je trk v spodnjem delu roke (masa dlani s podlaktjo odraslega moškega z maso 80 kg znaša približno 1,8 kg, celotna roka pa 4 kg [8]) klasificiran kot G1 – pogosti kontakti. Pogoj pri tem je, da je roka prosto gibljiva, kontakt pa pride iz lateralne smeri; s tem se zagotovi vrtišče v komolcu. Pri izvajanju naloge, kjer si robot in človek delita delovni prostor, bi se, glede na meje podane v standardu [6], lahko v obdobju osmih ur pojavičali trki v podlakti ali dlani več kot enkrat na uro (skupina G1), v nadlakt pa manj kot enkrat na uro (skupina G2).

Trki s hitrostjo robota do 750 mm/s spadajo v skupino G3. V skupino G3 spadajo tudi trki s hitrostjo 1000 mm/s v telo z maso 4 kg ali manj (na primer, človeška roka). Ostali trki robota s hitrostjo 1000 mm/s niso dovoljeni.

## 6 Zaključek

Primerjava razvitega sistema s komercialnim je pokazala, da sta merilna sistema primerljiva. Meritve trka pri gibljivem senzorju so pokazale, da je maksimalna sila trka odvisna od hitrosti robota in vztrajnosti senzorja. Sama konfiguracija robota ima manjši vpliv. Pri meritvah s stacionarnim senzorjem pa ima ravno konfiguracija robota velik vpliv na maksimalno silo: bližje kot je vrh robota svoji bazi, večja je maksimalna sila trka.

Rezultati so pokazali, da trki z robotom s hitrostjo do 250 mm/s spadajo v kategorijo G2. Trke v roko pri tej hitrosti lahko uvrstimo v kategorijo G1 – visokofrekvenčni kontakti. Kontakti pri hitrosti robota do 750 mm/s spadajo v kategorijo redkih kontaktov, medtem ko kontakti pri hitrosti robota 1000 mm/s niso dovoljeni (izjema je trk v roko, ki spada v skupino G3).

Merjenje trka z gibljivim senzorjem s spremenljivo vztrajnostjo je pokazalo zanimive ugotovitve. Bolj poglobljena študija lahko služi kot osnova za nadgradnjo obstoječega standarda ISO/TS 15066, kjer so podane mejne vrednosti sil za dinamične in kvazi-statične trke, pri čemer bi se seveda omejitve ustrezno zmanjšale s tem pa povečala fleksibilnost in uporabnost sodelujočih robotov.

## Zahvala

Delo je nastalo v okviru raziskovalnega programa številka P2-0228, ki ga sofinancira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

## Literatura

- [1] D. Surdilovic, G. Schreck, and U. Schmidt, “Development of collaborative robots (cobots) for flexible human-integrated assembly automation,” in *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, June 2010, pp. 1–8.
- [2] M. Mihelj, T. Bajd, A. Ude, J. Lenarčič, A. Stanovnik, M. Munih, J. Rejc, and S. Šlajpah, *Robotics*. Springer, 2019.
- [3] ISO, “ISO 12100:2010: Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction,” Ženeva, Švica, 2010.
- [4] ——, “ISO 10218-1:2011: Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots,” Ženeva, Švica, 2011.
- [5] ——, “ISO/TS 15066:2016: Robots and robotic devices – Collaborative robots,” Ženeva, Švica, 2016.
- [6] ——, “ISO/DIS 21260:2018: Safety of machinery – Mechanical safety data for physical contacts between moving machinery or moving parts of machinery and persons,” Ženeva, Švica, 2018.
- [7] A. Schlotzhauer, L. Kaiser, J. Wachter, M. Brandstötter, and M. Hofbaur, “On the trustability of the safety measures of collaborative robots: 2D Collision-force-map of a sensitive manipulator for safe HRC,” in *2019 IEEE 15th international conference on automation science and engineering (CASE)*. IEEE, 2019, pp. 1676–1683.
- [8] P. De Leva, “Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov’s segment inertia parameters,” *Journal of biomechanics*, vol. 29, no. 9, pp. 1223–1230, 1996.