



UNIVERZA V LJUBLJANI

FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Borut Povše

TRK ROBOTSKEGA MANIPULATORJA S ČLOVEŠKO ROKO

DOKTORSKO DELO

Mentor: prof. dr. Tadej Bajd

Ljubljana, 2012

Zahvala

Najprej se iskreno zahvaljujem svojemu mentorju prof. dr. Tadeju Bajdu za vodstvo pri raziskovalnem delu. Hvala tudi vsem sodelavcem Laboratorija za robotiko, ki so mi s strokovnimi nasveti in pomočjo olajšali delo. Zahvaliti se želim tudi Darku Koritniku in ostalim sodelavcem podjetja Dax d.o.o. za koristne nasvete in pomoč pri izgradnji merilne opreme. Zahvaljujem se tudi Tomažu Mavru iz Inštituta RS za rehabilitacijo za pomoč pri izdelavi umetne podlakti. Posebna zahvala gre Sami Haddadinu in Ricu Belderju iz inštituta DLR, Wessling. Nenazadnje bi se rad zahvalil Daši in družini za podporo.

Vsebina

Povzetek	1
Abstract	3
1. Uvod	5
1.1 »Varni« robotski mehanizmi	5
1.2 Trk med robotom in človekom	7
1.3 Poškodbe mehkega tkiva	9
1.4 Cilji doktorske disertacije	10
2. Trk robota s človekovo podlaktjo	13
2.1 Robotska orodja	13
2.2 Ovrednotenje morebitnih poškodb	14
2.2.1 Gostota energije trka	14
2.2.2 Površina dotika	15
2.3 Preliminarni eksperimenti	19
2.4 Trk industrijskega robota s človekovo podlaktjo	20
2.4.1 Industrijski robot	20
2.4.2 Merilni sistem	21
2.4.3 Eksperimentalno okolje	21
2.4.4 Bolečina	22
2.4.5 Rezultati	23
2.5 Trk lahke robotske roke LWR III s človekovo podlaktjo	
2.5.1 LWR III (Light weight robot)	
2.5.2 Merilni sistem	29
2.5.3 Eksperimentalno okolje	
2.5.4 Rezultati	

2.6	Mejna vrednost gostote energije trka pri poškodbah tkiva 32
3. P	Prva izvedba pasivne mehanske roke
4. E	Oruga izvedba pasivne mehanske roke (PMR)43
4.1	Sestavni deli in delovanje 43
4.2	Vodenje mehanske roke 49
4	.2.1 Matematični model trka
4	.2.2 Optimizacija
4	.2.3 Sistem vodenje PMR
4.3	Trk industrijskega robota s PMR 56
4.4	Trk LWR III s PMR
4.5	Primerjava odzivov PMR s človekovo podlaktjo za trke z industrijskim in LWR II
rob	otom 62
5. V	/arni hitrostni profil za vodenje robota LWR III
Zaklju	ıček77
Litera	tura
Prilog	a91

Seznam slik

Slika 2.1: Robotska orodja: orodje za ravninski dotik (levo), orodje za premi dotik (sredina
zgoraj), orodje za točkasti dotik (desno)
Slika 2.2: Zaščita pred trkom (levo), smeri podajnosti pri preobremenitvi (desno) [46]14
Slika 2.3: Merilni listič, robotsko orodje in naprava uporabljeni za ovrednotenje površine
dotika16
Slika 2.4: Porazdelitev tlaka na površini dotika za premo robotsko orodje pri sili dotika 100
N
Slika 2.5: Porazdelitev tlaka na površini dotika za točkasto robotsko orodje pri sili dotika 50
N
Slika 2.6: Maksimalne vrednosti tlaka za posamezen premi dotik v odvisnosti od sile dotika in
regresijska krivulja
Slika 2.7: Maksimalne vrednosti tlaka za posamezen točkasti dotik v odvisnosti od sile dotika
in regresijska krivulja
Slika 2.8: Prostovoljec in antropomorfni robot z orodjem za premi dotik
Slika 2.9: Grafični uporabniški vmesnik za ocenjevanje stopnje občutene bolečine23
Slika 2.10: Sila trka med vrhom robota in podlaktjo za posamezne prostovoljce (pojemek 5
m/s ² , globina končne točke 30 mm, ravninski dotik levo, premi dotik desno)
Slika 2.11: Hitrost podlakti v točki dotika za posamezne prostovoljce (pojemek 5 m/s ² ,
globina končne točke 30 mm, ravninski dotik levo, premi dotik desno)24
Slika 2.12: Pospešek podlakti v točki dotika za posamezne prostovoljce (pojemek 5 m/s ² ,
globina končne točke 30 mm, ravninski dotik levo, premi dotik desno)24
Slika 2.13: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja in globine
končne (ravninski dotik)25
Slika 2.14: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja in globine
končne (premi dotik)25
Slika 2.15: Relativno odstopanje od povprečne vrednosti gostote energije trka za posamezen
eksperiment za vseh šest prostovoljcev (ravninski dotik)
Slika 2.16: Relativno odstopanje od povprečne vrednosti gostote energije trka za posamezen
eksperiment za vseh šest prostovoljcev (premi dotik)26
Slika 2.17: Ocene stopnje bolečine šestih prostovoljcev (ravninski dotik)27

Slika 2.18: Ocene stopnje bolečine šestih prostovoljcev (premi dotik)	28
Slika 2.19: Zgradba sklepa LWR III [24].	29
Slika 2.20: Prostovoljec in LWR III.	30
Slika 2.21: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (ravni	inski
dotik).	31
Slika 2.22: Hitrosti podlakti in vrha robota med trkom (ravninski dotik).	31
Slika 2.23: Pospeški podlakti v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega or	odja
(ravninski dotik).	31
Slika 2.24: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (ravninski do	otik).
	31
Slika 2.25: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (p	remi
dotik)	32
Slika 2.26: Hitrosti podlakti in vrha robota med trkom (premi dotik)	32
Slika 2.27: Pospeški podlakti v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega or	odja
(premi dotik).	32
Slika 2.28: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (premi dotik).	32
Slika 2.29: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (toči	kasti
dotik).	33
Slika 2.30: Hitrosti podlakti in vrha robota med trkom (točkasti dotik)	33
Slika 2.31: Pospeški podlakti v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega or	odja
(točkasti dotik).	33
Slika 2.32: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (točkasti dotik)). 33
Slika 2.33: Točke trka na dorzalni strani podlakti.	34
Slika 2.34: Točke trka na ventralni strani podlakti.	35
Slika 2.35: Točke trka na dorzalni strani roke v ožjem smislu	35
Slika 2.36: Sile trka s podlaktjo	36
Slika 2.37: Sile trka z roko	36
Slika 2.38: Hitrosti podlakti v točki trka	36
Slika 2.39: Hitrosti roke.	36
Slika 2.40: Pospeški podlakti v točki trka	37
Slika 2.41: Pospeški roke.	37

Slika 2.42: Gostote energije trka in občutljivost točk trka na dotik po dvanajstih urah Slika 2.43: Gostote energije trka in občutljivost točk trka na dotik po dvanajstih urah (roka). Slika 3.2: Sila trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (ravninski dotik) za študijo s Slika 3.3: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (ravninski dotik) za študijo s prostovoljci (povprečna vrednost za šest oseb) in pasivno mehansko roko.......41 Slika 3.4: Sila trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (premi dotik) za študijo s Slika 3.5: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (premi dotik) za Slika 4.2: Krmilna omara PMR......46 Slika 4.3: Blokovna shema komponent sistema PMR......47 Slika 4.5: Primerjava sile dotika v odvisnosti od globine za človekovo podlaket in triplastno Slika 4.6: Primerjava sile dotika v odvisnosti od globine za človekovo podlaket in triplastno Slika 4.8: Alternativni prikaz sheme biomehanskega modela antagonističnega mišično-Slika 4.9: Prikaz simulacijske sheme uporabljene pri optimizaciji parametrov matematičnega Slika 4.10: Shema vodenja PMR realizirana v grafičnem programskem okolju Simulink......55 Slika 4.11: Robot EPSON in PMR......56 Slika 4.12: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (ravninski Slika 4.13: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (ravninski dotik).

Slika 4.14: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (premi
dotik)
Slika 4.15: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (premi dotik) 57
Slika 4.16: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (točkasti
dotik)
Slika 4.17: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (točkasti dotik). 58
Slika 4.18: PMR in LWR III
Slika 4.19: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (ravninski
dotik)
Slika 4.20: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (ravninski dotik).
Slika 4.21: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (premi
dotik)
Slika 4.22: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (premi dotik) 61
Slika 4.23: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (točkasti
dotik)
Slika 4.24: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (točkasti dotik). 62
Slika 4.25: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (ravninski dotik)
Slika 4.26: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (ravninski dotik) 63
Slika 4.27: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (premi dotik)
Slika 4.28: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (premi dotik) 65
Slika 4.29: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (točkasti dotik)
Slika 4.30: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (točkasti dotik)
Slika 5.1: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega
mehanizma (ravninski dotik)
Slika 5.2: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti
robotskega mehanizma (ravninski dotik)
Slika 5.3: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega
mehanizma (premi dotik)
Slika 5.4: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti
robotskega mehanizma (premi dotik)

Slika 5.5: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega
mehanizma (točkasti dotik)74
Slika 5.6: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti
robotskega mehanizma (premi dotik)74
Slika 5.7: Varna hitrostna krivulja za LWR III in točkovno robotsko orodje76
Slika 5.8: Varna hitrostna krivulja za LWR III in točkovno robotsko orodje76

Seznam tabel

Tabela 4.1: Vrednosti parametrov matematičnega modela tr	rka robotskega orodja in člov	vekove
podlakti		53

Povzetek

Roboti v industrijskem okolju veljajo za človeku nevarne mehanizme, ki jih je potrebno ločiti od delovnega prostora ljudi s fizičnimi pregradami ali varnostnimi nadzornimi sistemi. V zadnjem času pa se pojavlja vse več zanimanja za »varne« robotske mehanizme, ki bi omogočali varno sobivanje in sodelovanje z ljudmi v industriji in domačem okolju. Pri interakciji robota in človeka je varnost na prvem mestu. Ključnega pomena je poznavanje posledic neželene fizične interakcije med robotom in človekom kot rezultat človekove neprevidnosti ali odpovedi oziroma nepravilnega delovanja robotskega sistema. V doktorski disertaciji, ki je razdeljena na pet poglavij, sta podani študiji trka majhnega šestosnega industrijskega robota in lahke LWR III robotske roke s človekovo podlaktjo ter izgradnja mehanskega modela človekove roke.

Uvodno poglavje je namenjeno pregledu dosežkov iz raziskovalnega področja varnega sodelovanja robota in človeka. Vrsta raziskovalnih skupin razvija nove regulacijske pristope, lahke mehanizme s podajnimi sklepi in aktuatorje z elastičnostjo, z namenom izboljšanja varnosti pri interakciji robota in človeka. Predstavljene so tudi študije trka robota v glavo in prsni koš človeka, ter poškodbe, ki pri omenjenih trkih nastanejo. Sledi opis poškodb mehkega tkiva in njihova delitev. Cilji doktorske disertacije so podani na koncu prvega poglavja.

Eksperimenti trka majhnega industrijskega robota (EPSON PS3L, šestosni antropomorfni robot) in človekove podlakti so predstavljeni v drugem poglavju. Opisana so robotska orodja ter način ovrednotenja poškodbe pri trku. V nadaljevanju je predstavljen trk industrijskega robota in lahke robotske roke LWR III (antropomorfni robot s sedmimi prostostnimi stopnjami) s človekovo podlaktjo. Na koncu poglavja je podana še študija mejnih vrednosti gostote energije trka, pri katerih lahko pride do poškodbe.

Tretje poglavje govori o prvi izvedbi pasivne mehanske roke. Sestavljena je iz aluminijastega ogrodja, pnevmatske rotacijske enote, ki predstavlja komolec in podlakti iz umetnega materiala. Odzivi prve izvedbe mehanske roke niso dosegli zadovoljivega ujemanja z odzivi človekove podlakti med trkom.

1

Pomanjkljivosti smo odpravili z izgradnjo druge izvedbe pasivne mehanske roke (PMR), ki je predstavljena v poglavju štiri. Pomembnejša sestavna dela PMR sta motoriziran komolec in triplastna ponazoritev mehkega tkiva. Za vođenje PMR je bil razvit matematični model človekove roke, ki teče na osebnem računalniku z xPC target operacijskim sistemom. Primerjava odzivov PMR in človekove podlakti med trkom je podana na koncu četrtega poglavja.

V petem poglavju je opisana aplikativna uporaba PMR pri določitvi varne hitrostne krivulje za vodenje LWR III robotske roke. Za vsako robotsko orodje je bilo opravljenih 72 eksperimentov, ki so bili ovrednoteni v smislu morebitne poškodbe. Pridobljeni rezultati so bili nato uporabljeni za določitev varne hitrostne krivulje, ki je natančneje predstavljena na koncu petega poglavja.

Abstract

Robots operating in industrial environment are known as dangerous mechanisms that need to be separated from human workspace with fences or safety control systems. However, lately there has been increased interest in "safe" robotic mechanisms, which would enable safe coexistence and cooperation with humans in industry and domestic environments. Safety is a primary concern in human-robot cooperation. One of the key points is the knowledge regarding the consequences of unintended physical human-robot interaction as a result of a human error or failure of a robotic system. The doctoral thesis, which is divided into five sections, presents a research focused on impacts of a small industrial robot with a human lower arm and development of a mechanical model of human lower arm.

The first chapter is devoted to an overview of advancements in the field of research regarding safe human-robot cooperation. Several research groups are developing new control techniques, light-weight mechanisms with compliant joints and actuators employing elasticity in order to improve safety in human-robot interaction. Investigations of robot impacts with human head or chest and resulting injuries are also presented, followed by a description of soft tissue injuries. The aims of the doctoral thesis are given at the end of the first chapter.

The impact experiments of a small industrial robot and a human lower arm are presented in the second chapter. The robot end-effectors and the method for impact injury assessment are described. Following is a description of an impact experiment of an industrial robot and LWR III with a human lower arm. Finally, the chapter presents investigation of impact energy density limits, at which injury is likely to occur.

The third section describes the development of the first realization of the passive mechanical lower arm. It comprises aluminum structure, pneumatic rotary unit representing the elbow, and the lower arm made of artificial material. The impact responses of the first realization of the mechanical lower arm did not sufficiently resemble the impact responses of the human lower arm.

Limitations were overcome by developing the second realization of the passive mechanical lower arm (PMLA) presented in the chapter four. Important components of the PMLA are the motorized elbow and the three-layer foam representing the soft tissue. For the control of the PMLA a mathematical model of human arm was developed and implemented on the xPC target computer. Comparison of the PMLA impact response with the human lower arm impact response is given at the end of the fourth chapter.

Chapter five describes a development of the velocity safety-curve for the control of the LWR III using the PMLA. For each robot end-effector 72 impacts were performed and evaluated in terms of the possible injury. Acquired data were then used to determine the velocity safety-curve depicted at the end of the fifth chapter.

1. Uvod

Povečevanje učinkovitosti proizvodnje in uvajanje novih tehnologij narekujeta tesnejše sodelovanje robota in človeka. Roboti v prihodnosti ne bodo delovali za zaščitnimi ograjami ali varnostnimi zavesami, ampak bodo sodelovali z ljudmi. Ti roboti morajo biti zato zgrajeni z zmožnostjo sobivanja in fizične interakcije s človekom. Takim robotom pravimo človeku prijazni roboti. Glavno vprašanje, ki se poraja, je, kako zagotoviti varno sobivanje robota in človeka.

Na možnost poškodbe človeka, ki sodeluje z robotom, vpliva pogostost pojava trkov ter mehanizmi, ki trke preprečujejo [1,2,3]. V običajnih robotskih celicah kolizije preprečuje omejen dostop ljudi do delovnega prostora robotskega mehanizma. Varnost je zagotovljena z uporabo ograj, pregradnih sten in senzorskih sistemov. Z omogočanjem sobivanja in sodelovanja robotov ter ljudi je potrebno te omejitve odstraniti ter vpeljati nove senzorske sisteme [4,5,6], naprednejše robotske pogone, inteligentne algoritme vodenja [7] in nove varnejše strukture robotskih mehanizmov [1,8,9]. Vodenje robota predstavlja še poseben izziv, saj lahko povsem varen robotski mehanizem postane nevaren, v trenutku ko prime nek oster ali koničast predmet [1].

1.1 »Varni« robotski mehanizmi

V preteklih letih je bilo veliko truda vloženega v razvoj posebnih robotskih mehanizmov, ki omogočajo višjo stopnjo varnosti pri fizični interakciji s človekom. Predlagani so bili različni pristopi, ki predvidevajo nove robotske mehanizme [10], spremembe vodenja robota ali izpopolnjen senzorski sistem [11,12,13].

V [14] je opisan z elastičnim materialom prekrit robotski mehanizem, sestavljen iz pasivno podajnega trupa in pasivno premikajoče se baze robota. Viskozno elastičen trup je opremljen z vzmetmi in blažilniki ter pritrjen na pasivno premikajočo se bazo. Gibanje baze je omejeno s silo trenja, ki nastopi med kontaktno površino baze in podlago. Med trkom človeka in robota majhne sile absorbira elastična prevleka robota in viskozno elastičen trup. Če sila trka preseže mejne vrednosti sile trenja med bazo in podlago, se baza skupaj z manipulatorjem premakne v smeri sile trka. Človek torej ne bo resneje poškodovan zaradi elastične prevleke, viskozno elastičnega trupa in pasivno premikajoče se baze, ki uspešno zadušijo sile trka. Omenjeni

robot naj bi bil namenjen predvsem delovanju v domačem neindustrijskem okolju. Težavo predstavlja vodenje robota, saj se lahko zaradi podajnosti sistema ob prisotni sili, ki deluje na mehanizem, želena in dejanska trajektorija vrha robota bistveno razlikujeta.

Za zagotavljanje varnosti in večjo zmogljivost obstoječih robotskih sistemov so bili razviti novi robotski pogoni. Pogon, voden z upoštevanjem navora v robotskem sklepu, je bil razvit z namenom izločitve učinka nelinearnosti in trenja aktuatorjev ter prenosov, ki so parazitno vgrajeni v robote. Začetne izvedbe so bile uspešne pri znatnem zmanjšanju učinka trenja v sklepih. Velike pasovne širine pogona sklepa vseeno ni bilo mogoče doseči brez dejanskega zmanjšanja trenja in nelinearnosti sklepov mehanizma [**15**]. Pogon uporablja visoko zmogljive aktuatorje in prenose z vgrajenim senzorjem navora za doseganje želenega nivoja zmogljivosti sklepa.

Odgovor na problem pogonskih mehanizmov z visoko vztrajnostjo oz. visoko impedanco so serijski elastični aktuatorji (SEA) [**16**]. SEA pogon poskuša omiliti omejitve visokoimpedančnih pogonov, kot so klasični elektromotorni oz. hidravlični pogoni z zobniškim prenosom, z vgradnjo elastičnega elementa med izhod pogona in robotski segment. Glavna prednost SEA pogona je nizka izhodna impedanca mehanizma preko celotnega frekvenčnega spektra. SEA pogon zmanjša izhodno impedanco proporcionalno togosti elastičnega elementa. Tipično zmanjšanje impedance je med faktorjem 10 in 100 ter omejeno le z največjo dosegljivo pasovno širino. Pri frekvencah nad pasovno širino SEA regulatorja je izhodna impedanca omejena s togostjo elastičnega sklopa [**16**].

Predlagan je bil tudi prenos s spremenljivo togostjo, ki dovoljuje spreminjanje pasivne podajnosti prenosa pogona med izvajanjem naloge [**17**,**18**]. Intuitivno gledano nastopi želena nizka togost prenosa v fazi konstantne visoke hitrosti, kar zmanjša impedanco segmenta in posledično verjetnost poškodbe človeka ob trku. V fazi pospeševanja je primerna visoka togost prenosa, kar omogoči pogonu, da v čim krajšem času pospeši segment do želene hitrosti. Podobno velja za fazo ustavljanja, ko želimo segment zaustaviti hitro in brez oscilacij [**19**,**20**,**21**].

Zmanjšanje mase robotskih segmentov in izboljšanje dinamičnih karakteristik robotskega pogona omogoča porazdeljen makro-mini pogon (DM²) [**15**]. Pristop predvideva premik glavnega vira navora mehanizma iz sklepa v bazo manipulatorja. To znatno zmanjša

vztrajnost celotnega manipulatorja z izločitvijo preslikane vztrajnosti pogona in hkrati zniža celotno maso manipulatorja. Prvi del pristopa predvideva delitev vira navora na visokofrekvenčni in nizkofrekvenčni vir ter optimalno postavitev obeh virov na strukturo mehanizma. Drugi del DM^2 pristopa deli visoko in nizkofrekvenčni pogon na različne lokacije mehanizma, tako da je njun doprinos k impedanci dotika minimalen. Nizkofrekvenčni pogoni so locirani v bazi manipulatorja, kar je še posebej prikladno, saj zahteva nizkofrekvenčno generiranje navora velik in razmeroma težak motor. Na ta način se vztrajnost in masa manipulatorja bistveno zmanjšata. Visokofrekvenčni viri navora so locirani v sklepih manipulatorja in je zaradi njihove majhne mase doprinos k vztrajnosti in masi celotnega manipulatorja minimalen [**16**].

Varnejše sodelovanje robota in človeka omogočajo tudi lahki DLR (German Aerospace Center, Deutsches Zentrum fur Luft und Raumfahrt) roboti [22]. Prednosti industrijskih robotov so predvsem visoka natančnost pozicioniranja, velika hitrost, vzdržljivost, robustnost kot tudi razmeroma nizka cena. Industrijski roboti so zato uporabljeni v dobro strukturiranih okoljih, kjer je oblika predmetov za robotsko manipulacijo določena in je trk robota s človekom že vnaprej izključen. Nasprotno so roboti DLR namenjeni interakciji s človekom v slabo strukturiranih okoljih. Tipični primeri uporabe DLR robotov so aplikacije, v katerih robot deluje v neposredni bližini ljudi ali celo sodeluje z njimi in je informacija o okolju ter objektih v okolici nezanesljiva. V primerjavi z industrijskimi roboti mora krmilnik DLR robotov imajo senzorji navora vgrajeni v sklepe robota. Ti senzorji merijo vibracije v samem sklepu oziroma pogonskem prenosu, kar omogoča aktivno dušenje nihanja segmenta [23].

1.2 Trk med robotom in človekom

Pri sodelovanju robota in človeka lahko nepredvidljive situacije privedejo do trka robotskega mehanizma s človekom kljub varnostnim in nadzornim sistemom. Poškodbe, ki jih povzroči trk robota, so odvisne od različnih dejavnikov, kot so oblika kontaktne površine, hitrost ter pospešek vrha robota, del telesa, v katerega trči robot, debelina oblačil, itd. [25]. Potrebno je poskrbeti, da robot v nobeni situaciji ne more poškodovati človeka, še več, kakršna koli

fizična interakcija med robotom in človekom ne sme biti za človeka neprijetna [1,26,27]. Podrobno poznavanje posledic trka in mehanizmov poškodb omogoča načrtovanje varnejših robotov in robotskih celic.

Na Inštitutu za robotiko in mehatroniko v Nemčiji (Institute of Robotics and Mechatronics, DLR - German Aerospace Center, Wessling, Germany) so opravljali eksperimente, pri katerih različni roboti s topim predmetom udarijo testno lutko v prsi oziroma glavo. Testi so bili izvedeni s štirimi roboti, različnih mas in nosilnosti. Enaki pogoji udarca so bili zagotovljeni s pomočjo aluminijastega orodja, ki je bilo pri testu pritrjeno na vrh robota [**28,29**].

Za oceno poškodbe pri udarcu v glavo je bil uporabljen HIC kriterij [**30**], utežen z rezultirajočim pospeškom glave in trajanjem udarca [**31**,**32**,**33**]. Kriterij je veljaven, kadar je trajanje pospeška glave krajše od 36 ms. Izsledki eksperimentov so pokazali, da noben robot pri hitrostih do 2 m/s ne predstavlja, ne glede na njegovo maso, smrtno nevarnost za človeka, če upoštevamo kriterije iz testiranja trkov motornih vozil in izključimo možnost ukleščenja [**34**].

Pri udarcih v prsi je bil za oceno poškodbe uporabljen kriterij stiska prsnega koša (Compression-Criterion CC) oziroma viskozni kriterij (Viscous-Criterion VC) [**35**]. Poizkusi in meritve so bili izvedeni na prostovoljcih in testnih lutkah. Iz rezultatov je razvidno, da robot ne predstavlja nevarnosti za človeka, če se robot z maso 10 kg giblje počasneje od 5.5 m/s oz. če se robot z maso 500 kg giblje počasneje od 3.5 m/s in trči v telo, ki ni ukleščeno [**35**].

Primer, ki potrjuje hipotezo, da udarci brez ukleščenja zelo verjetno niso smrtonosni, je brca nogometne žoge. Robot KUKA KR500 je z maksimalno hitrostjo brcnil žogo, ki je odletela 2 m daleč. Podobno je moral človek brcniti žogo 2 m daleč, pri čemer je zelo previdno in počasi izvedel brco, da ne bi žoga odletela predaleč. Za primerjavo si lahko predstavljamo, kako nogometaš brcne žogo čez celo nogometno igrišče. V teh dveh primerih je hitrost noge in robota neprimerljiva. S tem primerom dobimo boljšo predstavo, kaj pomeni udarec realnega robota [**35**].

Udarci v ukleščeno oz. omejeno telo lahko zadajo resnejše poškodbe človeškemu telesu kot udarci v telo, ki ni ukleščeno oz. omejeno [**36**,**37**]. Ena od situacij, pri katerih lahko pride do

stiska telesa, je opravljanje vzdrževalnih del v robotski celici. Zaradi delno omejenega delovnega prostora robota lahko robot stisne človeka ob zaščitno ograjo in ga resno poškoduje. Pri poizkusih udarcev z ukleščenjem se je težko izogniti poškodbam opreme, ker nastopijo pri udarcu velike sile, zato je v literaturi moč najti le rezultate simulacij in ne realnih poizkusov [**36**]. Rezultati simulacij nakazujejo, da lahko udarci v ukleščeno telo povzročijo smrtonosne poškodbe na glavi in prsnem košu ponesrečenca. Pri udarcih v glavo in udarcih v prsni koš se stopnja poškodbe viša z naraščajočo maso robota, če je telo ukleščeno oziroma omejeno.

V [**38**,**39**] je predlagan prag bolečine pri trku robota s človekom kot kriterij za vodenje robotskega mehanizma. Izvedene so bile meritve statičnega in dinamičnega praga človekove bolečine. Kontaktna sila 50 N je bila izbrana kot zgornja meja za varno fizično interakcijo robota in človeka.

1.3 Poškodbe mehkega tkiva

Poleg udarcev s topim predmetom, lahko pride pri fizični interakciji človeka in robota do poškodb mehkega tkiva zaradi udarcev z ostrimi predmeti, nameščenimi na robot. To področje je v veliki meri še neraziskano. Trenutno so nam znani le poizkusi in izsledki predstavljeni v [15,40,41]. Najpomembnejše poškodbe mehkega tkiva, ki lahko nastanejo pri udarcu so

- odrgnine,
- rane (ureznine),
- zmečkanine, modrice,
- vbodne rane.

Odrgnine večinoma povzroči tangencialno gibanje ostrih robov vzporedno z kožo. Energija udarca, ki že povzroči odrgnino, je okrog vrednosti 100 J. Zmečkanine in modrice so odvisne od gostote energije udarca. Tipični področji telesa, ki sta najhitreje prizadeti, sta skalp in koža na kolenu, ker imata trdo podlago. Poškodba tkiva nastane pri gostoti energije, ki je večja od 2.52 J/cm². Hematom oziroma modrica nastaneta že pri nižjih vrednostih gostote energije. Za določitev mejnih vrednosti vbodnih ran so bili izvedeni poizkusi z različnimi noži. Ugotovljeno je bilo, da tlak ni primerna tolerančna vrednost za vbod, ker je področje stika

orodja in kože premajhno. Predlagana je evalvacija preko sile penetracije. Tolerančne vrednosti sile penetracije so odvisne od števila plasti oblačil, ki jih ima človek oblečene. Sila penetracije za orodje podobno kuhinjskemu nožu variira od 76.5 N za odkrito kožo, do 173.2 N za kožo s tremi plastmi oblačil [**42**,**43**].

Raztrganine na koži lahko nastanejo pri udarcu s topim predmetom [44]. Izsledki raziskave se nanašajo na skalp, torej na tanko tkivo podprto s kostjo. Za izračun porazdelitve tlaka pri udarcu topega orodja s človekovo glavo je bil uporabljen matematični model glave in topega aluminijastega orodja. Mejna vrednost, pri kateri nastanejo raztrganine na koži, naj bi bila 1 MPa.

1.4 Cilji doktorske disertacije

Večina raziskav omenjenih v podpoglavju 1.2 se osredotoča predvsem na razmeroma nevarne udarce v glavo oziroma prsni koš. Na drugi strani so v podpoglavju 1.3 omenjene raziskave, v katerih je na vrh robota nameščeno ostro orodje, ki lahko povzroči vbodne rane in ureznine. Disertacija podaja študijo, ki poskuša zapolniti del vrzeli med omenjenima skrajnostnima.

Naša raziskava se osredotoča na varnost pri sodelovanju manjšega industrijskega šestosnega antropomorfnega robota in človeka. Primer sodelovanja človeka in robota v industrijski montažni celici je kompleksno sestavljanje oz. montaža izdelkov (npr.: sestava pralnega stroja). Človek opravlja zahtevne operacije (vstavljanje gibljivih, fleksibilnih elementov), medtem ko robot vstavlja toge sestavne elemente, ki jih je potrebno vgraditi z visoko natančnostjo. Na proizvodni liniji za sestavo pralnega stroja je celoten proces razdeljen v več stopenj. Dve od omenjenih stopenj se izvajata na ločenih montažnih postajah in zajemata procesa ožičenja stroja in spenjanja žic. Na prvi montažni postaji delavec vstavi žice v ogrodje pralnega stroja; na drugi postaji pa robot spne žice skupaj. Ti dve montažni postaji bi lahko združili v eno postajo z združenjem delovnega prostora robota in delavca. Medtem ko delavec vstavlja žice v stroj, robot spenja že vstavljene žice. Rezultat sodelovanja robota in človeka je torej manjši tloris proizvodne linije in krajši taktni čas. V predlagani industrijski celici je skupni delovni prostor človekovih rok in robota definiran tako, da lahko do trka pride le med robotskim orodjem in podlaktema sodelujočega človeka. Smrtno nevarne situacije niso možne; v najslabšem primeru lahko pride do zloma kosti podlakti (ulna, radius) [45]. Takšna študija v dosegljivi literaturi še ne obstaja. Cilj našega raziskovalnega dela je odgovoriti na vprašanje, ali je možno zagotoviti varno fizično interakcijo med človekom in malim standardnim šestosnim industrijskim robotom.

Originalni prispevki disertacije

- Določitev parametrov relevantnih za ocenjevanje trka med človeško roko in majhnim industrijskim robotom.
- Zasnova izvirnega biomehanskega emulacijskega modela človeške zgornje ekstremitete.
- Določitev pragovnih vrednosti za bolečino in poškodbo pri trku majhnega industrijskega robota s človeško roko.

2. Trk robota s človekovo podlaktjo

Posledice trka med robotom in človekom so odvisne od različnih dejavnikov. Glavni izmed njih so hitrost robota, oblika robotskega orodja in del telesa, v katerega robot trči. Zelo pomembno je tudi, ali robot trči v del telesa, ki se lahko prosto giblje, ali pa je ukleščeno. Vpogled v dogajanje med trkom robota in človeka smo pridobili z eksperimenti, ki smo jih izvedli s prostovoljci. Za izvajanje eksperimentov smo pridobili dovoljenje komisije za medicinsko etiko.

2.1 Robotska orodja

Industrijski roboti so glede na nalogo, ki jo opravljajo, opremljeni z orodji in prijemali različnih oblik. Za ovrednotenje čim širšega spektra dotikov smo v študijo vključiti robotska orodja, ki povzročijo točkasti (premer okrogline 3 mm), premi (premer ukrivljenosti 2 mm) in ravninski dotik (slika 2.1). Zaradi varnosti sta bili v eksperiment s prostovoljci vključeni le orodji za ravninski in premi dotik.



Slika 2.1: Robotska orodja: orodje za ravninski dotik (levo), orodje za premi dotik (sredina zgoraj), orodje za točkasti dotik (desno).

Za dodatno varnost prostovoljcev je bilo poskrbljeno tudi z zaščito pred trkom (slika 2.2). Zaščita pred trkom je vgrajena med vrh robota in robotsko orodje. Zgrajena je iz dveh delov. Prvi del je na sliki 2.2 (desno) obarvan modro, drugi del pa sivo. Glede na tlak, ki ga priključimo na zaščito, je odvisno, pri kateri sili oziroma navoru bo zaščita popustila. Kadar pride do preobremenitve, se drugi del zaščite izpahne in tako prepreči morebitne poškodbe človeka ali robota. V tem primeru je potrebno ročno namestiti drugi del zaščite na svoje mesto. Ponovljivost lege drugega dela zaščite po ponovni namestitvi je v smeri osi z ± 0.05 mm in okoli osi z $\pm 0.05^{\circ}$ [**46**]. Izpah zaščite zaznavamo s tokokrogom, ki je speljan skozi oba segmenta. Tokokrog zaščite je zaporedno vezan s stikalom za zasilno ustavitev robota. V primeru izpaha se prekine tokokrog, posledično se ustavi robot ter prepreči morebitne poškodbe zaradi ukleščenja roke prostovoljca.



Slika 2.2: Zaščita pred trkom (levo), smeri podajnosti pri preobremenitvi (desno) [46].

2.2 Ovrednotenje morebitnih poškodb

2.2.1 Gostota energije trka

V študiji smo se osredotočali predvsem na lažje oblike poškodb podlakti kot so modrice, zmečkanine in otekline. Lastnosti trka in omenjene tipe poškodb je primerno ovrednotiti z gostoto energije trka [47,43], ki je določena z izrazom 2.1.

$$e_A = \frac{1}{A_{dotik}} \int_{s_{trk_start}}^{s_{trk_stop}} F(s) \, ds \tag{2.1}$$

V izrazu 2.1 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. Med trkom se kinetična energija robotskega orodja pretvarja v notranjo in prožnostno energijo mehkega tkiva podlakti, od točke dotika orodja s kožo podlakti (s_{trk_start}) do točke, ko je razdalja med robotskim orodjem in trdno oporo mehkega tkiva roke (kost ulna,

radius) najmanjša (s_{trk_stop}). Potem se kinetična energija robotskega orodja prenaša v kinetično energijo podlakti, ker začne vrh robota potiskati podlaket. Površino dotika med orodjem in podlaktjo smo določili s folijami za merjenje tlaka (FujiFilm Prescale Film). Gostoto energije trka predstavlja torej energija, ki jo je prejelo mehko tkivo podlakti, deljena s površino dotika med orodjem in podlaktjo.

Gostota energije trka, pri kateri pride do zmečkanin mehkega tkiva, naj bi bila 2,52 J/cm² [47]. Modrice in otekline se lahko pojavijo tudi pri trkih z gostotami energije nižjimi od 2,52 J/cm² [43,41].

2.2.2 Površina dotika

Površino dotika med robotskim orodjem in podlaktjo smo ovrednotili s folijami za merjenje porazdelitve tlaka (FujiFilm Prescale Film, Super Low Pressure - LLW). Merilni listič sestavljata dve foliji položeni druga na drugo. Ob prisotnosti sile na površino merilnega lističa, se ena izmed folij obarva rdeče. Obarvano folijo nato z optičnim bralnikom prenesemo na računalnik, kjer sledi prva stopnja obdelave podatkov z namensko programsko opremo, ki je bila priložena folijam za merjenje porazdelitve tlaka. Zajem podatkov iz folije poteka z resolucijo $0,125 \cdot 0,125 mm$. Glede na radij krivine pri premem robotskem orodju in radij okrogline pri točkovnem robotskem orodju, je resolucija obdelave podatkov zadosti velika za verodostojno meritev. Druga stopnja obdelave je izvedena v Matlab programskem okolju.

Za ovrednotenje površine dotika je bil izveden eksperiment, v katerem smo na podlaket prostovoljca namestili merilni listič. Na merilni listič oz. podlaket so bili nato izvedeni dotiki različnih sil z orodjem za premi in točkasti dotik (slika 2.3). Robotsko orodje je bilo pritrjeno na mehanski sklop, ki omogoča gibanje samo v vertikalni smeri. Silo dotika smo spreminjali z dodajanjem uteži na vrh gibajočega se dela mehanskega sklopa. Pred posameznimi dotiki je bil merilni listič premaknjen za približno 1 cm, pri čemer je točka dotika na podlakti ostala nespremenjena.



Slika 2.3: Merilni listič, robotsko orodje in naprava uporabljeni za ovrednotenje površine dotika.

Na sliki 2.4 je prikazana porazdelitev tlaka na površini dotika za premo robotsko orodje pri sili dotika 100 N.



Slika 2.4: Porazdelitev tlaka na površini dotika za premo robotsko orodje pri sili dotika 100 N.

Na sliki 2.5 je prikazana porazdelitev tlaka na površini dotika za točkasto robotsko orodje pri sili dotika 50 N.



Slika 2.5: Porazdelitev tlaka na površini dotika za točkasto robotsko orodje pri sili dotika 50 N.

S premim robotskim orodjem so bili dotiki izvedeni pri silah 20 N, 40 N, 60 N, 80 N in 100 N. Maksimalne vrednosti tlaka za posamezen dotik v odvisnosti od sile dotika, so prikazane na sliki 2.6.



Slika 2.6: Maksimalne vrednosti tlaka za posamezen premi dotik v odvisnosti od sile dotika in regresijska krivulja.

Pri trku robotskega orodja in človekove podlakti se poškodbe tkiva najprej pojavijo na mestih, kjer sta tlak in gostota energije trka najvišja (rdeče obarvani deli površin na slikah 2.4 in 2.5). Za izračun gostote energije trka lahko uporabimo tudi drugo obliko izraza 2.1

$$e_{A} = \int_{s_{trk_start}}^{s_{trk_stop}} \frac{F(s)}{A_{dotik}} ds = \int_{s_{trk_start}}^{s_{trk_stop}} p(s) ds.$$
(2.2)

Za ovrednotenje morebitne poškodbe tkiva nas zanima najvišja gostota energije trka $e_{A_najvišja}$, torej je v izrazu 2.2 potrebno uporabiti najvišji tlak $p(s)_{najvišji}$. S podobnim razmislekom ugotovimo, da je potrebno za izračun aktivne površine dotika (ki jo uporabimo za izračun $e_{A_najvišja}$), uporabiti najvišji tlak in pripadajočo silo dotika

$$A_{dotik}' = \frac{F}{p_{najvišji}}.$$
(2.3)

Z izrazom 2.3 tako izračunamo aktivno površino dotika A_{dotik}' , ki je manjša od dejanske površine dotika A_{dotik} med robotskim orodjem in podlaktjo. Izraz 2.3 torej pomeni homogeno porazdelitev tlaka $p_{najvišji}$ na površini A_{dotik}' . Intuitivno gledano zmanjšamo dejansko površino dotika iz $A_{dotik} \vee A_{dotik}'$ in nehomogeno porazdelitev tlaka transformiramo v homogeno porazdelitev pri tlaku $p_{najvišji}$ za znano silo dotika F. Kot že omenjeno, se pri trku robotskega orodja in človekove podlakti poškodbe tkiva najprej pojavijo na mestih, kjer sta tlak in gostota energije trka najvišja, torej pri $p_{najvišji}$ oz. $e_{A_najvišja}$. Ker pri trku robotskega orodja in podlakti poznamo le silo dotika v vsakem zajetem vzorcu, lahko iz izmerjene sile ter površine A_{dotik}' določimo najvišjo gostoto energije trka $e_{A_najvišja}$. Pri izračunu gostote energije trka (izraz 2.1) za premo in točkasto orodje je v tem doktorskem delu vedno uporabljena aktivna površina A_{dotik}' .

Kot je razvidno z grafa na sliki 2.6 predpostavimo, da je aktivna površina dotika konstantna z naraščajočo silo dotika (rdeča regresijska krivulja) in znaša 1,22 cm².

S točkastim robotskim orodjem so bili dotiki izvedeni pri silah 20 N, 30 N, 40 N in 50 N. Maksimalne vrednosti tlaka za posamezen dotik v odvisnosti od sile dotika, so prikazane na sliki 2.7.



Slika 2.7: Maksimalne vrednosti tlaka za posamezen točkasti dotik v odvisnosti od sile dotika in regresijska krivulja. Ponovno predpostavimo, da je aktivna površina dotika konstantna z naraščajočo silo dotika (rdeča regresijska krivulja) in znaša 0,234 cm².

Robotsko orodje za ravninski dotik je oblikovano v obliki valja, zato je površina dotika enaka površini kroga in znaša 3,14 cm².

2.3 Preliminarni eksperimenti

Pred izvedbo eksperimentov trka robotskega orodja in človekove podlakti s prostovoljci, so bili vsi eksperimenti izvedeni na članu raziskovalne ekipe. Vsak trk smo ovrednotili v smislu bolečine in morebitne poškodbe ter ocenili njegovo primernost za eksperimente s prostovoljci. V nenevarnih eksperimentih s prostovoljci sta bili uporabljeni samo robotski orodji za ravninski in premi dotik. Med trkom se je vrh robota gibal s konstantnim pojemkom. Nevarnejši eksperimenti z orodjem za točkasti dotik in konstantno hitrostjo vrha robota so bili izvedeni samo na članu raziskovalne ekipe.

2.4 Trk industrijskega robota s človekovo podlaktjo

V študijo je bilo vključenih šest prostovoljcev starih med 20 in 60 let. Vsak izmed prostovoljcev je bil seznanjen s potekom eksperimenta. Pred eksperimentom je vsak prostovoljec podpisal informativno privolitev s sledečo vsebino:

»Eksperiment izvajamo v povezavi z raziskovalnim delom na področju sodelovanja robota in človeka. Vaše sodelovanje je popolnoma prostovoljno, prav tako lahko sodelovanje v eksperimentu kadarkoli odklonite. Za vaše sodelovanje ne boste poplačani. Pri eksperimentu ne more priti do resnih poškodb. Izsledki eksperimenta ne bodo imeli neposredne vrednosti za testno osebo, le za študijo sodelovanje med robotom in človekom. Eksperiment je skrbno pripravljen, tako da izbrane hitrosti in pospeški vrha robota ob trku z roko ne povzročijo poškodbe roke. Bolečina ob trku naj ne bi presegala blage bolečine. Sodelovanje pri poizkusu lahko odklonite oziroma izvajanje eksperimenta prekinete kadarkoli želite. Eksperiment naj bi trajal med 20 in 30 minut.

Na roko vam bomo narisali referenčne točke oz. črte. S pomočjo teh črt in dveh vzporednih žic boste postavili roko vedno na isto mesto v prostoru, tako da bosta pozicionirni žici pokrili referenčni črti. Robot bo trčil v dorzalni del vaše podlakti in sicer med pozicionirni žici. Po trku se bo robot umaknil.

S premikanjem drsnika na zaslonu boste izbrali stopnjo bolečine, ki ste jo občutili ob trku. Na lestvici sledi stopnja bolečine od brez bolečine na levi strani do neznosne bolečine na desni strani.«.

2.4.1 Industrijski robot

V eksperimentih je bil uporabljen šestosni antropomorfni industrijski robot EPSON PS3L namenjen uporabi v industriji. Njegovo zgradbo lahko opišemo kot odprto serijsko kinematično verigo s šestimi prostostnimi stopnjami. Vsi sklepi so rotacijski. Robot lahko razdelimo na dva dela. Prvi, pozicijski del, predstavljajo prve tri osi, katerih naloga je postaviti orodje v želeno pozicijo. Zadnje tri osi predstavljajo orientacijski del in služijo doseganju želene orientacije orodja. Najpogostejše aplikacije, kjer se uporablja, so sestavljanje delov, posluževanje strojev, pakiranje, rokovanje s hrano in mnoge druge

aplikacije, ki zahtevajo hitrost, točnost in ponovljive gibe. Masa robotskega mehanizma znaša 51 kg, nosilnost do 5 kg in doseg 859 mm.

2.4.2 Merilni sistem

V raziskavi smo uporabili merilni sistem, ki vključuje inercijski senzor z dvema triosnima pospeškomeroma (ADXL203) in tremi merilniki kotne hitrosti, triosni senzor sil in navorov (JR3, Inc.) in optični merilni sistem Optotrak Certus (Northern Digital, Inc.). Vse komponente inercijskega senzorja so bile vgrajene v kompaktno ohišje [48] in nameščene na prostovoljčevo podlaket. Za namestitev je bil uporabljen vmesnik, zgrajen iz trde pene in aluminijaste palice. Vmesnik je bil na podlaket pritrjen v zapestju in na komolcu, kjer je najmanj mehkega tkiva med kožo in kostjo. Z omenjenim načinom pritrditve se zmanjša vpliv mehkega tkiva na meritev pospeškov in kotnih hitrosti. Senzor sil in navorov je bil vgrajen med vrh robota in robotsko orodje. Med trkom robotskega orodja s podlaktjo smo merili lego podlakti oz. robotskega orodja, silo med vrhom robota in orodjem ter pospešek oz. hitrost podlakti. Izmerjene vrednosti sile trka, pospeška in hitrosti 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.

2.4.3 Eksperimentalno okolje

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 robotska orodja 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 2 m/s², 3 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 trku postaviti v položaj, v katerem se je dotikala obeh žic (slika 2.8).



Slika 2.8: Prostovoljec in antropomorfni robot z orodjem za premi dotik.

2.4.4 Bolečina

Prostovoljec je po vsakem trku ocenil občuteno stopnjo bolečine z grafičnim vmesnikom, programiranim v programskem okolju Visual Studio (slika 2.9). Prostovoljec je drsnik na zaslonu premaknil na mesto, ki je najbolje ustrezalo občuteni stopnji bolečine med trkom. Vzdolž drsnika je bila prikazana linearna lestvica stopnje bolečine z razponom od 0 (brez bolečine) do 100 (neznosna bolečina) [**49,50,51,52**]. 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

Zanesljivo ocenjevanje bolečine je bilo zagotovljeno z naključnim vrstnim redom izvajanja trkov z različnimi parametri.
0		20	40	60	80	100
	Brez bolečine	Blaga bolečina	Zmerna bol	ečina Močna l	polečina <mark>Neznos</mark> r	na bolečina
1.4		<u> </u>				* * * * * * * * * * * *
<		lin				>
	Potrdi	Stopnja b	bolečine 27 voizkusa 15			
			Ime Miha			

Slika 2.9: Grafični uporabniški vmesnik za ocenjevanje stopnje občutene bolečine.

2.4.5 Rezultati

Na slikah 2.10, 2.11 in 2.12 so prikazane sile trka, hitrosti podlakti in pospeški podlakti med trkom robotskega orodja in podlakti. Prikazane veličine so bile izmerjene med najmočnejšim trkom s pojemkom robotskega orodja 5 m/s² in globino končne točke 30 mm.

Najvišje sile trka se za posamezne prostovoljce razlikujejo in so v območju med 46 N in 73 N za ravninski dotik in med 39 N in 67 N za premi dotik (slika 2.10). Čas naraščanja sile od 0 N do najvišje vrednosti je približno 20 ms.

Najvišje hitrosti podlakti v točki dotika so za ravninski dotik v območju med 0,26 m/s in 0,37 m/s in za premi dotik v območju med 0,23 m/s in 0,34 m/s (slika 2.11).

Pospeški podlakti v točki dotika, izmerjeni med trkom robotskega orodja in podlakti, so za posamezne prostovoljce prikazani na sliki 2.12. Najvišji pospeški podlakti so v območju med 24 m/s^2 in 28 m/s^2 za ravninski dotik in med 21 m/s^2 in 27 m/s^2 za premi dotik.



Slika 2.10: Sila trka med vrhom robota in podlaktjo za posamezne prostovoljce (pojemek 5 m/s², globina končne točke 30 mm, ravninski dotik levo, premi dotik desno).



Slika 2.11: Hitrost podlakti v točki dotika za posamezne prostovoljce (pojemek 5 m/s², globina končne točke 30 mm, ravninski dotik levo, premi dotik desno).



Slika 2.12: Pospešek podlakti v točki dotika za posamezne prostovoljce (pojemek 5 m/s², globina končne točke 30 mm, ravninski dotik levo, premi dotik desno).

Podatek, ki je za nas najbolj zanimiv, je gostota energije trka. V primeru da se gostota energije trka približa 2,52 J/cm², lahko pride do poškodbe tkiva [**41**]. Za enega izmed prostovoljcev je gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja in globine končne točke prikazana na sliki 2.13 za ravninski dotik in na sliki 2.14 za premi dotik. V obeh primerih je bila gostota energije trka znatno pod mejo 2,52 J/cm².



Slika 2.13: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja in globine končne (ravninski dotik).



Slika 2.14: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja in globine končne (premi dotik).

Relativna odstopanja od povprečne vrednosti gostote energije trka za posamezen eksperiment za vseh šest prostovoljcev, so prikazana na sliki 2.15 za ravninski dotik in na sliki 2.16 za premi dotik. 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

relativnih odstopanj od povprečne vrednosti gostote energije trka za vseh šest prostovoljcev pri izbranem eksperimentu. Podatki, ki se nahajajo izven območja brkov škatličnega diagrama, so označeni z rdečim znakom plus. Iz obeh diagramov je razvidno, da se gostote energije trka za posamezne prostovoljce razlikujejo v območju +/- 25%. Te razlike so odvisne predvsem od telesnih značilnosti človeka, kot so teža, debelina podkožnega tkiva, dolžina podlakti, količina mišične mase in sproščenosti/napetosti mišic podlakti.



Slika 2.15: Relativno odstopanje od povprečne vrednosti gostote energije trka za posamezen eksperiment za vseh šest prostovoljcev (ravninski dotik).



Slika 2.16: Relativno odstopanje od povprečne vrednosti gostote energije trka za posamezen eksperiment za vseh šest prostovoljcev (premi dotik).

Ocene stopnje bolečine šestih prostovoljcev so prikazane na slikah 2.17 in 2.18. 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 šestih ocen bolečine za izbrani eksperiment. Vodoravna os prikazuje poskuse, urejene glede na naraščajočo gostoto energije trka. Pod številko 1 je torej zbranih šest eksperimentov; za vsakega prostovoljca je prikazan poskus z najmanjšo gostoto energije trka. Pripadajoče ocene stopnje bolečine pa so prikazane v škatličnem diagramu nad isto številko. Na navpični osi je prikazana stopnja bolečine v območju od 0 do 100.

Pri trku z orodjem za ravninski dotik je bila največja gostota energije 0,05 J/cm² s pripadajočo najvišjo oceno občutene bolečine 30, kar ustreza blagi bolečini. Za trke z orodjem za premi dotik je bila največja gostota energije enaka 0,15 J/cm² in najvišja ocena stopnje občutene bolečine 44, kar je v območju zmerne bolečine. Iz rezultatov eksperimenta lahko sklepamo, da bi trki z gostoto energije v velikostnem razredu 2,52 J/cm² povzročili razmeroma visoko stopnjo bolečine za obe obravnavani robotski orodji. Bolečino bi bilo potrebno pri načrtovanju varne fizične interakcije robota in človeka upoštevati kot potreben ne pa tudi zadosten pogoj. Podoben pristop je bil predlagan tudi v [**38,39**]. Zaradi subjektivnosti pri zaznavanju stopnje bolečine, bi bila potrebna izčrpna študija določanja še sprejemljive stopnje bolečine z velikim vzorcem testnih oseb.



Slika 2.17: Ocene stopnje bolečine šestih prostovoljcev (ravninski dotik).



Slika 2.18: Ocene stopnje bolečine šestih prostovoljcev (premi dotik).

2.5 Trk lahke robotske roke LWR III s človekovo podlaktjo

V raziskavo je bila vključena zadnja generacija lahke robotske roke LWR III, ki naj bi bila primernejša za delo s človekom. Raziskava je potekala na inštitutu DLR (German Aerospace Center, Deutsches Zentrum fur Luft und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen). Trki med robotom in človekom so bili izvedeni z vsemi tremi robotskimi orodji (točkasti, premi in ravninski dotik). Vrh robota je v podlaket trčil s konstantno hitrostjo. Pričakovano je bilo, da lahko pri trkih pride do lažjih poškodb mehkega tkiva podlakti, kot so modrice, zato so bili eksperimenti izvedeni samo na članu raziskovalne ekipe.

2.5.1 LWR III (Light weight robot)

Kratek opis LWR III je podan že v poglavju 1.1. Glavni cilj pri razvoju LWR III je bila izgradnja manipulatorja s kinematiko podobno človeški roki. Robot ima sedem prostostnih stopenj, z razmerjem masa robota proti masi bremena ena proti ena. Celoten sistem je lažji od 15 kg, z dosegom do 1.5 m ter visoko dinamično učinkovitostjo. Med normalno uporabo troši robotska roka le 150 W el. energije. Meritve v sklepih robota se izvajajo s frekvenco 3 kHz:

- merjenje navora z uporovnimi lističi,
- določanja pozicije z magnetnimi dajalniki pozicije,
- določanja pozicije segmentov s potenciometri (le kot dodaten senzor zaradi varnosti).



Na sliki 2.19 je prikazana zgradba sklepa LWR III [24].

Slika 2.19: Zgradba sklepa LWR III [24].

2.5.2 Merilni sistem

V raziskavi smo uporabili merilni sistem, ki vključuje triosni pospeškomer (PCB Piezotronics 356A02) in triosni senzor sil in navorov (JR3 90M31A-I50). Za namestitev pospeškomera na podlaket je bil uporabljen vmesnik zgrajen iz trde pene in aluminijaste palice. Vmesnik je bil na podlaket pritrjen v zapestju in na komolcu, kjer je najmanj mehkega tkiva med kožo in kostjo. Z omenjenim načinom pritrditve se zmanjša vpliv mehkega tkiva na meritev pospeška. Senzor sil in navorov je bil vgrajen med vrh robota in robotsko orodje. Lego vrha LWR III in izmerjene vrednosti sile trka ter pospešek podlakti je beležil LWR III krmilnik z vzorčno frekvenco 1 kHz. Premik podlakti med trkom je bil izračunan z integriranjem pospeška oz. hitrosti podlakti.

2.5.3 Eksperimentalno okolje

Pri izvajanju eksperimentov je robot trčil v podlaket pravokotno s konstantno hitrostjo. Točka trka je bila na sredini med zapestjem in komolcem na dorzalni strani podlakti. Podlaket se je lahko prosto gibala v prostoru in ni bila fizično omejena. Z robotskim orodjem za ravninski, premi in točkasti dotik so bili eksperimenti izvedeni pri različnih konstantnih hitrostih vrha robota. Hitrost vrha robota smo spreminjali od 0,1 m/s do 1 m/s s korakom 0,1 m/s. Za vsako robotsko orodje je bilo torej opravljenih 10 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 (slika 2.20).



Slika 2.20: Prostovoljec in LWR III.

2.5.4 Rezultati

Eksperimente s premim robotskim orodjem smo izvedli z dvema različnima strategijama robota. Prva strategija predvideva refleksni umik robota ob trku v nasprotno smer glede na prvotno gibanje vrha robota. Druga strategija ima izklopljene vse varnostne mehanizme, torej se robot premakne v končno točko ne glede na morebitne trke z okolico. Rezultati meritev niso pokazali pomembnejših razlik med obema strategijama. Pri eksperimentih z ravninskim in točkovnim orodjem je bila vključena prva strategija.

Rezultati meritev pri trkih z ravninskim robotskim orodjem so prikazani na slikah 2.21 do 2.23. Gostote energije trkov so prikazane na sliki 2.24. Najvišja sila trka 118 N je bila izmerjena pri hitrosti robotskega orodja 1 m/s (slika 2.21). Najvišji izmerjeni pospešek je bil

78 m/s² (slika 2.23). Pri najvišji hitrosti robotskega orodja 1 m/s je izračunana gostota energije trka 0,23 J/cm², kar je precej pod mejo 2,52 J/cm² (slika 2.24).



Slika 2.21: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (ravninski dotik).



Slika 2.22: Hitrosti podlakti in vrha robota med trkom (ravninski dotik).



Slika 2.23: Pospeški podlakti v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (ravninski dotik).



Slika 2.24: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (ravninski dotik).

Za eksperimente z orodjem za premi dotik so rezultati meritev prikazani na slikah 2.25 do 2.27. Gostote energije trkov so prikazane na sliki 2.28. Podobno kot pri trkih z orodjem za ravninski dotik, je pri trkih s premim robotskim orodjem največja izmerjena sila približno 120 N (slika 2.25). Največji izmerjeni pospešek podlakti je 90 m/s² (slika 2.27), največja gostota energije trka pa 0.5 J/cm² (slika 2.28). Tudi pri trkih s premim robotskim orodjem je torej gostota energije trka manjša od mejne vrednosti. Po eksperimentu ni prostovoljec na podlakti čutil nobene bolečine ob pritisku na mesto trka.



Slika 2.25: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (premi dotik).



Slika 2.26: Hitrosti podlakti in vrha robota med trkom (premi dotik).



Slika 2.27: Pospeški podlakti v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (premi dotik).



Slika 2.28: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (premi dotik).

Rezultati eksperimenta z robotskim orodjem za točkasti dotik so prikazani na slikah 2.29 do 2.31. Gostote energije trkov so prikazane na sliki 2.32. Najvišja sila trka s točkovnim robotskim orodjem je nižja kot pri trkih s premim oz. ravninskim orodjem, in znaša 102 N (slika 2.29). Podobno, kot sile trka, so nižji tudi pospeški podlakti. Najvišji izmerjeni pospešek je 55 m/s² (slika 2.31). Gostota energije trka pri hitrostih robotskega orodja 0,9 m/s in 1 m/s preseže mejne vrednosti 2.52 J/cm² (slika 2.32). Po eksperimentu je prostovoljec na podlakti čutil bolečino ob pritisku na mesto trka. Mesto trka je ostalo občutljivo na dotik še več dni po eksperimentu. Modrica se ni pojavila. Podrobnejša raziskava mejne vrednosti gostote energije trka za nastanek poškodbe je podana v podpoglavju 2.6.



Slika 2.29: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (točkasti dotik).



Slika 2.30: Hitrosti podlakti in vrha robota med trkom (točkasti dotik).



Slika 2.31: Pospeški podlakti v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (točkasti dotik).



Slika 2.32: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (točkasti dotik).

2.6 Mejna vrednost gostote energije trka pri poškodbah tkiva

Mejna vrednost, pri kateri lahko pride do poškodb tkiva, je 2,52 J/cm² [**41**]. Na delih telesa, kjer le tanka plast mehkega tkiva prekriva kost (skalp, koleno), lahko trki z omenjeno gostoto energije povzročijo modrice in zmečkanine. V nadaljevanju je opisana kratka študija, v kateri smo ovrednotili poškodbe trkov z gostoto energije v rangu 2.5 J/cm² za podlaket in roko v ožjem smislu. V eksperimentih je sodeloval član raziskovalne ekipe.

V eksperimentih je robot trčil v podlaket ali roko pravokotno s konstantno hitrostjo 1 m/s. Tri točke trka so bile izbrane na dorzalni strani podlakti, dve na ventralni strani podlakti in štiri točke na dorzalni strani roke (slike 2.33, 2.34 in 2.35). Robot je v vsako izmed točk trčil le enkrat. Na vrh robota je bilo nameščeno robotsko orodje za točkasti dotik. Prostovoljec je ocenil stopnjo bolečine, ki jo je občutil med trkom, na lestvici od 1 do 100 (0-20 brez bolečine, 20-40 blaga bolečina, 40-60 zmerna bolečina, 60-80 močna bolečina, 80-100 neznosna bolečina). Enaka lestvica je bila uporabljena tudi v raziskavi opisani v podpoglavju 2.4.4. Prostovoljec je ocenil še občutljivost točke trka na dotik po dvanajstih urah na lestvici od ena do pet.

Na slikah 2.33, 2.34 in 2.35 so prikazane točke dotika z oceno bolečine in občutljivosti po dvanajstih urah ter pripadajočo gostoto energije trka.



Slika 2.33: Točke trka na dorzalni strani podlakti.



Slika 2.34: Točke trka na ventralni strani podlakti.



Slika 2.35: Točke trka na dorzalni strani roke v ožjem smislu.

Sile, izmerjene med trkom, so za podlaket prikazane na sliki 2.36 in za roko na sliki 2.37. Najvišji izmerjeni sili sta 115 N za podlaket in 72 N za roko. Hitrosti vrha LWR III in podlakti oz. roke med trkom so prikazane na slikah 2.38 in 2.39. Pospeški podlakti in roke v odvisnosti od časa so prikazani na slikah 2.40 in 2.41.



Slika 2.38: Hitrosti podlakti v točki trka.

Slika 2.39: Hitrosti roke.



Slika 2.40: Pospeški podlakti v točki trka.

Slika 2.41: Pospeški roke.

Gostote energije trkov za podlaket so prikazane na sliki 2.42. Nad stolpčnimi diagrami je prikazana tudi občutljivost mesta trka na dotik po dvanajstih urah. V točki trka 1 je gostota energije trka 2,16 J/cm², ocena bolečine 20 in majhna občutljivost na dotik po dvanajstih urah. Podatki nakazujejo na zelo majhno, komaj zaznavno, poškodbo tkiva. Podobno velja za točko trka 5 na ventralni strani podlakti. V točki trka 2 je gostota energije trka 2,79 J/cm², ocena bolečine 40 in visoka občutljivost na dotik po dvanajstih urah. Iz podatkov je moč razbrati, da je bila poškodba tkiva v točki dva bistveno višja kot v točki ena. Gostota energije trka je v točki 3 enaka 1,3 J/cm², z oceno stopnje bolečine 15. Po dvanajstih urah ni bilo nobene občutljivosti na dotik. Sklepamo lahko, da v točki tri ni prišlo do poškodbe tkiva. V točki trka 4 je gostota energije trka 1,3 J/cm², ocena bolečine 35 in razmeroma visoka občutljivost na dotik po dvanajstih urah. Točka 4 leži na delu podlakti, kjer je med kožo in kostjo tanjša plast mehkega tkiva. Do lažje poškodbe tkiva je zatorej prišlo že pri nižji gostoti energije trka.

Za roko so gostote energije trkov prikazane na sliki 2.43. Nobena izmed štirih točk trka ni bila po dvanajstih urah pomembneje občutljiva na dotik. Do komaj zaznavne poškodbe tkiva je najverjetneje prišlo le v točki trka 2.

Za natančnejšo določitev mejne vrednosti gostote energije trka, pri kateri pride do poškodbe tkiva, bi bila potrebna obsežnejša študija z več prostovoljci. Vseeno lahko iz zbranih podatkov sklepamo, da se pri trkih v dorzalnem delu podlakti (slika 2.42, rdeč okvir) z gostotami energije v rangu 2,5 J/cm² pojavijo lažje poškodbe mehkega tkiva.



Slika 2.42: Gostote energije trka in občutljivost točk trka na dotik po dvanajstih urah (podlaket).



Slika 2.43: Gostote energije trka in občutljivost točk trka na dotik po dvanajstih urah (roka).

3. Prva izvedba pasivne mehanske roke

Za izvajanje nevarnejših eksperimentov je bila zgrajena pasivna mehanska roka. Naprava je zgrajena tako, da so njene biomehanske lastnosti čim bolj podobne lastnostim roke. Z napravo posnemamo elastičnost ter dušenje komolca in sile mišic roke, ki zagotavljajo kompenzacijo gravitacije. Naprava je sestavljena iz nosilnega stebra, na katerega je fiksno pritrjen aluminijast profil dolžine 280 mm, ki predstavlja nadlaket. Spoj med nosilnim stebrom in aluminijastim profilom (nadlaktjo) ponazarja ramenski sklep, katerega kot je nastavljiv vzdolž ene prostostne stopnje. Na aluminijast profil oz. nadlaket je pritrjena pnevmatična rotacijska enota. Delovni tlak rotacijske enote je od 1,5 bar do 7 bar z navorom 5,5 Nm pri tlaku 5,5 bar.



Slika 3.1: Pasivna mehanska roka in antropomorfni Epson robot.

Na rotacijsko enoto je preko aluminijastega profila pritrjen valj iz umetnega protetičnega materiala. Podobno kot sila skrčene mišice biceps, navor rotacijske enote drži podlaket v mirovnem položaju, kar kompenzira silo gravitacije. Dušenje sklepa komolca in mišic nadlakti posnema pnevmatični valj vpet med podaljšani aluminijasti profil podlakti in med nadlaket. Njegova dolžina je 180 mm, premer 16 mm in najvišji delovni tlak 10 bar. Na priključke cilindra sta nameščeni dušilki. Z nastavljanjem dušilk se spreminja upornost pretoka zraka in posledično dušenje cilindra, kar ponazarja viskozno elastične lastnosti v

sklepu komolca (slika 3.1). Aluminijasti profil podlakti dolžine 266 mm, nudi oporo silikonski estetski rokavici, napolnjeni s poliuretansko peno. Silikonska rokavica ponazarja kožo človeške podlakti, poliuretanska pena pa ponazarja mehko tkivo podlakti. Masa podlakti je 2,1 kg, kar je v območju povprečne mase ženske podlakti (1,94 kg) in moške podlakti (2,23 kg) glede na [**53**].

S pasivno mehansko roko je bila izvedena preliminarna študija. Nabor eksperimentov je bil identičen študiji s prostovoljci (podpoglavje 2.4) zaradi primerjave rezultatov obeh eksperimentov. 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 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 med 10 mm in 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 m/s², 4 m/s² in 5 m/s². Za vsako robotsko orodje je bilo torej opravljenih 15 različnih eksperimentov.

Pri študiji s prostovoljci in pri študiji s pasivno mehansko roko je bil uporabljen isti merilni sistem, sestavljen iz večosnega merilnika pospeškov in kotnih hitrosti, senzorja sil in navorov (JR3, Inc.) ter optičnega sistema za brezkontaktno merjenje kinematike gibanja Optotrak Certus (Northern Digital, Inc.). Tridimenzionalni merilnik pospeškov in kotnih hitrosti je bil pritrjen na podlaket. Sestavljajo ga trije enoosni merilniki kotnih hitrosti ADXRS150 in štirje dvoosni merilniki translacijskih pospeškov ADXL203 [38]. Senzorji so v ohišje merilnika nameščeni tako, da merijo pospeške in kotne hitrosti vzdolž posameznih ravnin kartezičnega koordinatnega sistema. Sile, ki so nastale med trkom orodja robota z oviro, so bile izmerjene s senzorjem sil in navorov, ki je bil nameščen med vrh robota in orodje. Senzor meri sile v x, y in z smeri ter navore okoli x, y in z osi. Signali senzorja so zajemani z računalniško PCI kartico, preko katere dostopamo do podatkov o sili in navoru. Položaj roke v prostoru je bil izmerjen z optičnim sistemom za merjenje kinematike gibanja Optotrak Certus, ki je določal

položaj roke z beleženjem pozicije aktivnih markerjev (infrardeče diode) nameščenih na podlaket.

Primerjava rezultatov eksperimentov s pasivno mehansko roko in študije s prostovoljci je podana na slikah 3.2 do 3.5. Prikazane so vrednosti sil in gostot energij trka pri različnih pojemkih robotskega orodja in globini končne točke 30 mm. Za primerjavo odzivov pasivne mehanske roke in človeka med trkom, so bili uporabljeni rezultati študije s prostovoljci iz podpoglavja 2.4.5. Za vsak eksperiment je bila izračunana povprečna vrednost odziva vseh šestih prostovoljcev in primerjana z odzivom pasivne mehanske roke.

Na slikah 3.2 in 3.3 so prikazane sile in gostote energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja za ravninski dotik. Iz slike 3.2 je razvidno, da pasivna mehanska roka dobro prikazuje sile pri trku ravninskega orodja s podlaktjo. Veliko napako pa opazimo pri primerjavi gostot energije trka (slika 3.3). Gostota energije pri trku s pasivno mehansko roko je do 20-krat manjša kot pri trku s človekovo podlaktjo.



Slika 3.2: Sila trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (ravninski dotik) za študijo s prostovoljci (povprečna vrednost za šest oseb) in pasivno mehansko roko.



Slika 3.3: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (ravninski dotik) za študijo s prostovoljci (povprečna vrednost za šest oseb) in pasivno mehansko roko.

Sliki 3.4 in 3.5 prikazujeta sile in gostote energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja za premi dotik. Na sliki 3.4 vidimo, da pasivna mehanska roka razmeroma dobro, čeprav nekoliko previsoko, prikazuje sile pri trku premega orodja s podlaktjo. Večjo napako lahko ponovno opazimo pri primerjavi gostot energije trka (slika 3.5). Gostota energije pri trku s pasivno mehansko roko je do 4-krat manjša kot pri trku s človekovo podlaktjo.





Slika 3.4: Sila trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (premi dotik) za študijo s prostovoljci (povprečna vrednost za šest oseb) in pasivno mehansko roko.

Slika 3.5: Gostota energije trka v odvisnosti od pojemka robotskega orodja (premi dotik) za študijo s prostovoljci (povprečna vrednost za šest oseb) in pasivno mehansko roko.

Prva izvedba pasivne mehanske roke razmeroma dobro prikazuje sile pri trku ravninskega in premega robotskega orodja s podlaktjo. Večje napake opazimo pri gostoti energije trka, ki je ključnega pomena za določanje morebitne poškodbe, ki se pri trku pojavi. Razlog za odstopanja je predvsem v neprimernem oz. pretrdem materialu mehanske podlakti (poliuretanska pena, silikonska rokavica) in v slabih možnostih nastavljanja lastnosti mehanskega komolca (pnevmatska rotacijska enota in pnevmatski cilinder).

4. Druga izvedba pasivne(mirujoče) mehanske roke (PMR)

4.1 Sestavni deli in delovanje

Zaradi omejitev, ki jih je imela prva izvedba mehanske roke, je bila razvita nova pasivna mehanska roka (PMR). Ugotovili smo, da je potrebno izboljšati lastnosti umetnega materiala, ki ponazarja mehko tkivo podlakti in izdelati mehanski komolec, ki bo omogočal poljubno nastavljanje parametrov in ponovljivo delovanje ob vsakem udarcu. Raziskovalne skupine, ki se ukvarjajo s trkom robota in človeka, uporabljajo za eksperimente predvsem lutke za testiranje trkov motornih vozil [**28,32**]. V njihovih eksperimentih robot trči v glavo ali prsni koš lutke, medtem ko v naši študiji robot trči v roko, ki jo delavec drži v vodoravnem položaju. Tudi pri PMR je potrebno podlaket držati v vodoravnem položaju, kar nam pri novi pasivni mehanski roki omogoča električni pogon komolca. Glavni sestavni deli nove mehanske roke so torej: enosmerni motor s servo-ojačevalnikom za emulacijo komolca, računalnik in krmilna omarica, ogrodje mehanske roke iz aluminijastih profilov in večplastna pena za emulacijo mehkega tkiva podlakti (slika 4.1).



Slika 4.1: Pasivna mehanska roka.

Oporo celotnemu sistemu nudi aluminijasta plošča debeline 1,5 cm. Na vsaki strani plošče sta dve ročki za lažjo prenosljivost sistema. Na ploščo so pritrjeni računalnik za vodenje, krmilna omarica in aluminijasti steber. Spoj med nosilnim stebrom in aluminijastim profilom

(nadlaket, dolžina 280 mm) ponazarja ramenski sklep, katerega kot je nastavljiv vzdolž ene prostostne stopnje. Na aluminijasti profil oz. nadlaket je pritrjen mehanski komolec sestavljen iz motorja in planetnega prenosa. Na mehanski komolec je preko aluminijastega profila pritrjena triplastna struktura iz umetnega protetičnega materiala, ki ponazarja mehko tkivo. Masa podlakti je 2,1 kg, kar je v območju povprečne mase ženske podlakti (1,94 kg) in moške podlakti (2,23 kg). Dolžine in mase segmentov roke so bile izbrane glede na povprečne vrednosti iz [**53**].

V mehanski komolec je vgrajen motor tipa RE 40 proizvajalca Maxon (Maxon motor AG, Sachseln, Švica). Motor RE 40 spada v skupino enosmernih krtačnih brezjedrnih električnih motorjev. Glavne prednosti motorja so: majhni vztrajnostni moment rotorja, relativno velik navor, linearna odvisnost med tokom in navorom na osi motorja ter možnost delovanja pri zelo nizkih vrtljajih. Tehnični podatki motorja RE 40 so:

- nazivna napetost: 48 V,
- vrtljaji neobremenjenega motorja pri nazivni napetosti: 7590 obr./min,
- tok neobremenjenega motorja pri nazivni napetosti: 68,6 mA,
- nazivni vrtljaji motorja: 7590 obr./min,
- nazivni navor (največji konstantni navor): 0,187 Nm,
- nazivni tok (največji konstantni tok): 3,17 A,
- zagonski navor: 2,560 Nm,
- zagonski tok: 42,4 A,
- največji izkoristek: 91,8 %,
- električna upornost navitja: 1,13 Ω ,
- induktivnost navitja: 329 μH,
- navorna konstanta (k_t): 0,0603 Nm/A,
- hitrostna konstanta (k_v): 158 obr./min V⁻¹,
- vztrajnostni moment rotorja: 138 g cm².

Na osi motorja je nameščen dvokanalni enkoderski dajalnik pozicije MR 225787 s 1024 impulzi na obrat. Napajalna napetost enkoderskega dajalnika je 5 V. Med motor in podlaket je nameščen planetni prenos GP 52 C (Maxon motor AG, Sachseln, Švica) s sledečimi tehničnimi lastnostmi:

• prestavno razmerje: 4,3 (13/3),

- premer osi motorja: 8 mm,
- največji stalni navor (na strani roke): 4 Nm,
- največji izkoristek: 91 %,
- masa: 0,46 kg,
- največja radialna obremenitev: 500 Nm.

Motor je krmiljen preko močnostnega servo-ojačevalnika ADS 50/10 podjetja Maxon. Servoojačevalnik ADS 50/10 omogoča delovanje v štirih različnih načinih. Želeni način delovanja izberemo preko stikal, ki se nahajajo na tiskanem vezju. Regulacija vrtljajev motorja se izvaja v načinih »Tacho«, »Encoder« ali »IxR«. Za vođenje PMR, kjer je potrebno proizvajati želene navore v komolcu, smo uporabili tokovni način vođenja motorja. Servo-ojačevalnik regulira tok, ki teče skozi motor, na podlagi referenčne vrednosti. Posredno se preko referenčne vrednosti oz. toka in enačbe (4.1) regulira tudi navor na osi motorja (T – navor, I – el. tok, k_t – navorna konstanta).

$$T = I \cdot k_t \tag{4.1}$$

Servo-ojačevalniku podajamo referenčno vrednost preko napetostnega vhoda v območju od -10 V do 10 V. Napetost 10 V proizvaja največji navor na osi motorja, pri napetosti 0 V motor ne proizvaja nobenega navora in napetost -10 V proizvaja največji navor na osi motorja v obratni smeri. Tehnični podatki servo-ojačevalnika ADS 50/10 so naslednji:

- napajalna napetost: 12 V 50 V,
- največji trenutni tok: 20 A,
- največji konstantni tok: 10 A,
- frekvenca pulzno-širinske modulacije: 50 kHz,
- največji izkoristek: 95 %,
- pasovna širina krmilnika: 2,5 kHz,
- vgrajena tuljava: 75 μH.

Ojačevalnik je skupaj z napajalnikom vgrajen v standardno industrijsko krmilno omaro. Napajalnik je izveden s toroidnim transformatorjem, diodnim mostičnim usmernikom in dvema kondenzatorjema. Na sliki 4.2 je prikazana krmilna omara.



Slika 4.2: Krmilna omara PMR.

Vodenje robota teče na osebnem računalniku s Celeron procesorjem in 2 GB delovnega pomnilnika. Za vodenje motorja in branje enkoderskega dajalnika je na PCI vodilo nameščena kartica NI6221 (National Instruments Corporation). Tehnične lastnosti kartice NI6221 so sledeče:

- digitalni vhod/izhod:
 - o število kanalov: 24,
 - o logični nivoji: TTL,
 - o tokovna zmogljivost kanala: 24 mA,
 - o tokovna zmogljivost kanalov skupaj: 448 mA,
 - o največja frekvenca signala: 1 MHz,
- analogni izhod:
 - število analognih izhodov: 2,
 - o resolucija: 16 bitov,
 - o območje izhodne napetost: -10 V do 10 V,
 - o frekvenca posodabljanja: 833 kHz,

- števnik enkoderskega dajalnika:
 - o število kanalov: 2,
 - o vsak kanal sestavljajo vhodni signali: A, B in indeks,
 - o napetostno območje: 0V, 5V,
 - o največja frekvenca vhodnega signala: 1 MHz.

Vodenje motorja je izvedeno z analognim izhodom kartice NI6221, ki je priključen na vhod servo-ojačevalnika ADS 50/10. Za programski vklop ojačevalnika je uporabljen digitalni izhod. Na sliki 4.3 je prikazana blokovna shema sistema PMR z vsemi glavnimi komponentami. Poleg nadzornega osebnega računalnika je za delovanje sistema potreben še računalnik za vodenje. Nadzorni računalnik pošilja ukaze preko UDP povezave računalniku za vodenje. Komunikacija v obratni smeri zajema predvsem informacije o trenutnem stanju izvajanja zadnjega ukaza. Na računalniku za vodenje teče operacijski sistem xPC target, ki se izvaja v realnem času s frekvenco 2,5 kHz.



Slika 4.3: Blokovna shema komponent sistema PMR.

Emulacija mehkega tkiva podlakti je izvedena iz treh različnih materialov. Triplastna struktura je sestavljena iz silikonske plasti debele 4 mm, trše poliuretanske pene debeline 8 mm in mehkejše poliuretanske pene debeline 7 mm. Ustrezni materiali za izgradnjo so bili izdelani na Univerzitetnem inštitutu za rehabilitacijo »Soča«, na oddelku za izdelavo protez. Ustreznost materialov in potrebno debelino posameznega materiala smo določili s študijo elastičnosti oz. trdote materialov in mehkega tkiva podlakti. Meritve smo izvedli na članu raziskovalne ekipe s sledečim postopkom. Podlaket prostovoljca smo podprli v zapestju in pod komolcem, tako da je bila dorzalna stran podlakti obrnjena navzgor. Vrh robota smo približali točki na sredini podlakti med komolcem in zapestjem. Robot se je nato z robotskim orodjem premaknil do izbrane globine v tkivo roke in nazaj (slika 4.4). Med premikanjem

smo beležili pozicijo vrha robota in silo, ki je nastopala med vrhom robota in tkivom podlakti. Podobne meritve smo izvedli tudi s testnimi vzorci materialov različne elastičnosti. Najprimernejši materiali z ustrezno debelino so bili izbrani za izgradnjo nove umetne podlakti za pasivno mehansko roko.



Slika 4.4: Podpora podlakti in mesto dotika pri določanju lastnosti mehkega tkiva.

Primerjava sile dotika v odvisnosti od globine za človekovo podlaket in triplastno strukturo je prikazana na sliki 4.5 za ravninski dotik in na sliki 4.6 za premi dotik. Ujemanje je zelo dobro za premo robotsko orodje in razmeroma dobro za ravninsko robotsko orodje. Pri izvajanju eksperimenta s premim dotikom je bila pri globini 14 mm in 16 mm prisotna bolečina, zato eksperimenta z orodjem za točkasti dotik nismo izvajali.



Slika 4.5: Primerjava sile dotika v odvisnosti od globine za človekovo podlaket in triplastno strukturo (ravninski dotik).



Slika 4.6: Primerjava sile dotika v odvisnosti od globine za človekovo podlaket in triplastno strukturo (premi dotik).

4.2 Vodenje mehanske roke

Za emulacijo človekove roke med trkom je potrebno razviti in umeriti ustrezno vodenje PMR. V ta namen je bil izdelan matematični model trka med robotom in podlaktjo. Že opravljeni rezultati na prostovoljcih iz poglavja 2.4 so bili uporabljeni za optimizacijo parametrov matematičnega modela, ki je bil kasneje uporabljen za vodenje PMR.

4.2.1 Matematični model roke in trka

V matematični model sta, kot pri trkih opisanih v poglavju 2.4, vključena dva objekta, ki pri trku sodelujeta: robot z robotskim orodjem in človekova podlaket. Trk je odvisen predvsem od hitrosti in oblike robotskega orodja ter od lastnosti človekove roke. Matematični model trka mora torej vsebovati vse pomembne elemente, ki definirajo karakteristike trka. Na eni strani model robota z robotskim orodjem, ki se giblje s konstantnim pojemkom in na drugi strani model človekove roke s pomembnimi biomehanskimi lastnostmi.

Biomehanski model pasivne človekove roke je prikazan na sliki 4.7. Model temelji na modificiranem Hillovem modelu mišice [54,55] in na matematičnem modelu človekove spodnje ekstremitete [56]. Na sliki 4.8 je alternativni prikaz sheme biomehanskega modela antagonističnega mišično-skeletnega sistema človekove roke. Ker gre pri gibanju sklepov vselej za rotacijo, so v modelu uporabljene rotacijske spremenljivke, skica pa je zaradi enostavnosti ponazorjena translacijsko.



Slika 4.7: Biomehanski model človekove roke.



Slika 4.8: Alternativni prikaz sheme biomehanskega modela antagonističnega mišično-skeletnega sistema človekove roke [55].

V model sta vključeni dve antagonistični si mišici, ki ju lahko opišemo z enačbama:

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 + B_1 \dot{\varphi}_1 + K_1 (\varphi_1 - \varphi) + T_1 = 0 \tag{4.2}$$

$$J_2 \ddot{\varphi}_2 + B_2 \dot{\varphi}_2 + K_2 (\varphi_2 - \varphi) = 0.$$
(4.3)

Enačba (4.2) predstavlja mišico biceps in enačba (4.3) mišico triceps. J_1 oz. J_2 predstavlja vztrajnostni moment mišice, φ_1 in φ_2 pa sta notranja pomika posamezne mišice [55]. B_1 in B_2 pomenita rotacijsko viskozno dušenje, medtem ko K_1 in K_2 pomenita elastičnost. T_1 je notranji generator navora za mišico biceps. Položaj podlakti je označen kot φ .

Komolec in podlaket lahko opišemo z enačbama (4.4) in (4.5).

$$J\ddot{\varphi} + B_p\dot{\varphi} + K_p\varphi + K_1(\varphi - \varphi_1) + K_2(\varphi - \varphi_2) - M_b - F_{tr} = 0$$
(4.4)

$$M_b = F_g R \cos \varphi \tag{4.5}$$

V enačbi (4.4) *J* označuje vztrajnostni moment podlakti, $\ddot{\varphi}$ pospešek in $\dot{\varphi}$ hitrost podlakti. B_p pomeni rotacijsko viskozno dušenje komolca in K_p rotacijsko elastičnost komolca. Vpliv gravitacije na podlaket je označen z navorom M_b , vpliv Coulombovega trenja pa z navorom F_{tr} .

Sila gravitacije F_g povzroči v komolcu navor, označen z M_b (4.5). R označuje razdaljo od komolca do prijemališča sile (slika 4.7).

Če enačbe (4.2) do (4.5) preuredimo, dobimo izraze (4.6) do (4.8). Parametre za mišici biceps in triceps lahko glede na [**56**] izenačimo, torej $J_1 = J_2$, $B_1 = B_2$ in $K_1 = K_2$, in pri tem vnesemo v model le minimalno napako.

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 = -B_1 \dot{\varphi}_1 - K_1 \varphi_1 + K_1 \varphi - T_1 \tag{4.6}$$

$$J\ddot{\varphi} = -B_p\dot{\varphi} - (K_p + 2K_1)\varphi + K_1\varphi_1 + K_1\varphi_2 + M_b + F_{tr}$$
(4.7)

$$J_1 \ddot{\varphi}_2 = -B_1 \dot{\varphi}_2 - K_1 \varphi_2 + K_1 \varphi \tag{4.8}$$

Za robotsko orodje, ki se giblje s konstantnim pojemkom proti podlakti smo zapisali izraz (4.9). M_{trka} predstavlja navor, ki ga v komolcu povzroči trk robotskega orodja in podlakti. Razdalja od točke trka na podlakti do komolca je označena z R. F_{tkiva} pomeni silo, ki nastopi v času trka med robotskim orodjem in podlaktjo, v odvisnosti od globine prodora robotskega orodja v tkivo podlakti. To silo izračunamo preko krivulje, prikazane na sliki 4.5 oz. 4.6. Na slikah sta prikazani sili dotika v odvisnosti od globine za človekovo podlaket. Premik vrha robota se izračuna z dvakratno integracijo pojemka robotskega orodja -a. Razlika med premikom vrha robotskega orodja in položajem podlakti pomeni globino prodora robotskega orodja v tkivo podlakti ($x_{vrh_robota} - x_{roke}$).

$$M_{trka} = RF_{tkiva} \tag{4.9}$$

Izraz (4.9) vključimo v (4.7) in dobimo:

$$J\ddot{\varphi} = -B_p\dot{\varphi} - (K_p + 2K_1)\varphi + K_1\varphi_1 + K_1\varphi_2 + M_b + F_{tr}$$
(4.10)
+ *Mtrka*.

Izraze (4.7), (4.9) in (4.10) uporabimo za izgradnjo simulacijske sheme.

4.2.2 Optimizacija

Simulacija matematičnega modela trka iz podpoglavja 4.2.1 je realizirana v programskem okolju Matlab. Za optimizacijo parametrov sta primerjana odziv matematičnega modela in odziv človekove roke ob trku. Ocenjene začetne vrednosti parametrov so določene iz literature [56]. Na sliki 4.9 je prikazana simulacijska shema. Simulacija matematičnega modela je izvedena v grafičnem programskem okolju Simulink, optimizacija pa je realizirana

z Matlab M-skriptom. V optimizacijski proceduri je uporabljena funkcija *fminsearch()*, ki poišče minimum neomejene funkcije z več spremenljivkami. Cenilka izračunava razliko med odzivom matematičnega modela in odzivom človekove roke ob trku. Parametri, ki so bili vključeni v optimizacijo, so B_1, K_1, B_p, K_p in F_{tr} . V tabeli 4.1 so prikazani vsi parametri matematičnega modela. Optimizirani parametri so odebeljeni, ostali parametri so izmerjeni (R), izračunani (J, T₁) ali pridobljeni iz literature (J1) [**57,56**].



Slika 4.9: Prikaz simulacijske sheme uporabljene pri optimizaciji parametrov matematičnega modela človekove podlakti.

Tabela 4.1: Vrednosti parametrov matematičnega modela trka robotskega orodja in človekove podlakti.

<i>T</i> ₁	0,31	[<i>Nm</i>]
<i>B</i> ₁	0,059	[Nms/rad]
K ₁	5,91	[Nm/rad]
J ₁	$4,5 \cdot 10^{-4}$	[Nms ² /rad]
J	0,07	[Nms ² /rad]
B _p	0,431	[Nms/rad]
Kp	1,86	[Nm/rad]
F _{tr}	0,5	[<i>Nm</i>]
R	0,15	[<i>m</i>]

4.2.3 Sistem vodenje PMR

Za izgradnjo sistema vodenja PMR uporabimo matematični model iz podpoglavja 4.2.1 in parametre modela iz podpoglavja 4.2.2. V enačbi (4.7) zamenjamo $J\ddot{\varphi} \ z \ T_{motor}$, kar predstavlja navor, ki ga mora motor generirati. Preurejene enačbe so torej:

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 = -B_1 \dot{\varphi}_1 - K_1 \varphi_1 + K_1 \varphi - T_1 \tag{4.11}$$

$$T_{motor} = -B_p \dot{\varphi} - (K_p + 2K_1)\varphi + K_1 \varphi_1 + K_1 \varphi_2 + M_b + F_{tr}$$
(4.12)

$$J_1 \ddot{\varphi}_2 = -B_1 \dot{\varphi}_2 - K_1 \varphi_2 + K_1 \varphi. \tag{4.13}$$

Izhod iz sistema vodenja predstavlja signal navora T_{motor} , ki ga je potrebno ustrezno prilagoditi. Algoritem vodenja teče na računalniku z operacijskim sistemom xPC target. V računalniku je na PCI vodilo priključena analogno digitalna kartica (NI6221) z analognim izhodnim signalom od -10 V do +10 V. Na kartico je priključen servo-ojačevalnik (ADS 50/10) motorja vgrajenega v mehanski komolec (tip motorja, RE 40). Navorna konstanta motorja K_t znaša 60,3 · 10⁻³ Nm/A in razmerje vhodna napetost/izhodni tok servoojačevalnika K_{VA} znaša 1 V/A. Prestavno razmerje planetnega prenosa vgrajenega med podlaket in motor K_{pr} znaša 13/3. Prilagoditev izhodnega signala sheme vodenja je torej:

$$U_{izh} = \frac{T_{motor}}{K_t} \cdot \frac{K_{VA}}{K_{pr}} = T_{motor} \cdot 3,86 \frac{V}{Nm}.$$
(4.14)

Vhod v sistem vodenja predstavlja položaj oz. kot podlakti φ . Podobno kot izhodni signal je potrebno prilagoditi vhodni signal iz enkoderskega dajalnika. Enkoderski dajalnik MR 225787 ima 1024 impulzov na obrat in je priklopljen na NI6221 kartico. Za beleženje spremembe položaja enkoderskega dajalnika je izbran način štetja, ki poveča oz. zmanjša števec ob vsaki spremembi enkoderskega signala na kanalu A ali B. Ob enem obratu se torej števec *n* spremeni 4096-krat. Prestavno razmerje planetnega prenosa vgrajenega med podlaket in motor znaša 13/3. Prilagoditev vhodnega signala v sistemu vodenja je:

$$\varphi = \frac{n \cdot 2\pi}{1024 \cdot \frac{13}{3} \cdot 4}.\tag{4.15}$$

Shema vodenja PMR, zgrajena v grafičnem programskem okolju Simulink, je prikazana na sliki 4.10.



Slika 4.10: Shema vodenja PMR realizirana v grafičnem programskem okolju Simulink.

V zgornjem delu sheme je prikazana realizacija modela mišice biceps, v spodnjem delu mišice triceps in v srednjem delu je prikazan model komolca. Vhod v sistem je označen na levi strani sheme s *fi*. Izhod iz sistema je označen na desni strani sheme z oznako *napetost*.

4.3 Trk industrijskega robota s PMR

Z drugo izvedbo pasivne mehanske roke (PMR) smo izvedli eksperimente trka z industrijskim robotom EPSON. Pri izvajanju eksperimentov je robot trčil v podlaket pravokotno s konstantno hitrostjo. Točka trka je bila na sredini med zapestjem in komolcem. Z robotskim orodjem za ravninski, premi in točkasti dotik so bili eksperimenti izvedeni pri različnih konstantnih hitrostih vrha robota. Hitrost vrha robota smo spreminjali od 0,1 m/s do 1 m/s s korakom 0,1 m/s. Za vsako robotsko orodje je bilo torej opravljenih 10 različnih eksperimentov. Po vsakem trku se je podlaket PMR avtomatsko premaknila v začetno lego.



Slika 4.11: Robot EPSON in PMR.

Pri eksperimentih s PMR je bil uporabljen isti merilni sistem kot pri študiji s prostovoljci, sestavljen iz večosnega merilnika pospeškov in kotnih hitrosti, senzorja sil in navorov (JR3, Inc.) ter optičnega sistema za brezkontaktno merjenje kinematike gibanja Optotrak Certus (Northern Digital, Inc.). Tridimenzionalni merilnik pospeškov in kotnih hitrosti je bil pritrjen na podlaket PMR pod mesto trka.

Rezultati eksperimentov so prikazani na slikah 4.12 do 4.17. Sile, izmerjene pri trku z ravninskim orodjem, so prikazane na sliki 4.12, s pripadajočimi gostotami energije trka na sliki 4.13. Najvišja izmerjena sila trka je bila 130 N z gostoto energije trka 0,25 J/cm².

Sile trka, izmerjene pri eksperimentih s premim robotskim orodjem, so prikazane na sliki 4.14 in gostote energije trka na sliki 4.15. Sile trka so malenkost manjše kot pri trku z ravninskim robotskim orodjem. Najvišja gostota energije trka je 0,6 J/cm², kar je nižje od mejne vrednosti gostote energije, pri kateri lahko pride do poškodbe tkiva.



Slika 4.12: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (ravninski dotik).



Slika 4.13: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (ravninski dotik).



Slika 4.14: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (premi dotik).



Slika 4.15: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (premi dotik).







Slika 4.17: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (točkasti dotik).

Sliki 4.16 in 4.17 prikazujeta sile in gostote energije trka pri eksperimentih s točkovnim robotskim orodjem. Največja izmerjena sila je nekoliko višja kot pri eksperimentih s premim robotskim orodjem, to je 125 N. Gostota energije trka preseže mejno vrednost 2,52 J/cm² pri hitrostih robotskega orodja 0,8 m/s, 0,9 m/s in 1 m/s.

Primerjava rezultatov eksperimenta trka industrijskega robota in PMR z rezultati študije s prostovoljcem iz poglavja 2.5 nakazuje razmeroma podobne odzive. Podrobnejša primerjava odzivov PMR s človekovo podlaktjo je podana v poglavju 4.5.

4.4 Trk LWR III s PMR

S PMR in LWR III robotom smo izvedli enak nabor eksperimentov kot z industrijskim robotom. V eksperimentih je robot trčil v podlaket pravokotno s konstantno hitrostjo. Z robotskim orodjem za ravninski, premi in točkasti dotik so bili eksperimenti izvedeni pri hitrostih vrha robota od 0,1 m/s do 1.2 m/s. V nabor eksperimentov sta bili torej vključeni še dve dodatni hitrosti vrha robota in sicer 1,1 m/s in 1,2 m/s. Z vsakim robotskim orodjem je bilo izvedenih 12 eksperimentov.


Slika 4.18: PMR in LWR III.

Uporabljen je bil merilni sistem, ki vključuje triosni pospeškometer (PCB Piezotronics 356A02) in triosni senzor sil in navorov (JR3 90M31A-I50). Pospeškometer je bil nameščen na podlaket v bližino zapestja, izmerjeni pospešek pa preračunan na mesto trka. Senzor sil in navorov je bil vgrajen med vrh robota in robotsko orodje. Lego vrha LWR III, izmerjene vrednosti sile trka ter pospešek podlakti, je beležil LWR III krmilnik z vzorčno frekvenco 1 kHz. Za premik podlakti med trkom je bil beležen signal enkoderskega dajalnika vgrajenega v PMR. Sinhronizacija je bila med LWR III krmilnikom in PMR računalnikom izvedena preko časovne oznake, ki se je pošiljala dvosmerno preko UDP povezave.

LWR III robot zazna trk kateregakoli segmenta robota z okolico preko merjenja navorov v sklepih in primerjavo le teh z odzivi natančnega modela robotskega mehanizma. Po zaznanem trku spremeni robotski krmilnik način vođenja robota glede na izbrano strategijo. Glavni načini vođenja robota po zaznanem trku so:

 zasilna zaustavitev- v tem načinu se v trenutku zaznave trka izklopijo vsi motorji in vključijo zavore,

- mehka zaustavitev- robotski mehanizem se ustavi samo z zaviranjem motorjev,
- breztežnostni način- po trku se začne robot prosto gibati, podobno kot v breztežnostnem prostoru,
- refleksni umik- vrha robota se po trku umakne v nasprotni smeri, kot je bilo gibanje vrha robota pred trkom,
- normalno delovanje- vrh robota nadaljuje s premikom v končno točko, če ni presežen najvišji dovoljeni navor elektromotorjev v sklepih.

Za eno izmed robotskih orodij smo celoten nabor eksperimentov izvedli z različnimi strategijami (navedene zgoraj). Primerjali smo obliko in višino sile trka ter gostoto energije trka za posamezne eksperimente. Pri primerjavi rezultatov smo ugotovili, da različne strategije vodenja robota po zaznanem trku nimajo bistvenega vpliva na silo trka oz. gostoto energije trka, če se vrh robota giblje s hitrostmi od 0 m/s do 1,2 m/s in trči v neomejeno telo mase okrog 2 kg. Strategije vodenja imajo bistveno večji vpliv na lastnosti trka in morebitne poškodbe, kadar robot trči v telo z večjo maso ali v omejeno oz. ukleščeno telo [**35,36**]. Če robot pri trku telo uklešči, je potrebno spremeniti strategijo vodenja v breztežnostni način ali refleksni umik, kar omogoči sprostitev telesa iz ukleščenja. V tem slučaju bi bila neprimerna zasilna zaustavitev robota, ki ne omogoča sprostitve iz ukleščenja brez posredovanja operaterja. Glede na okoliščine trka imajo lahko strategije vodenja različno velik vpliv na resnost morebitne poškodbe. Vsi eksperimenti, opisani v nadaljevanju, so bili izvedeni s strategijo refleksnega umika vrha robota.

Rezultati eksperimentov so prikazani na slikah 4.19 do 4.24. Sile trka, izmerjene pri eksperimentih z ravninskim robotskim orodjem, so prikazane na sliki 4.19 in gostote energije trka na sliki 4.20. Najvišja izmerjena sila trka je bila 145 N z gostoto energije trka 0,25 J/cm².

Sile, izmerjene pri trku s premim orodjem, so prikazane na sliki 4.21, s pripadajočimi gostotami energije trka na sliki 4.22. Sile trka so malenkost višje kot pri trku z ravninskim robotskim orodjem. Največja gostota energije trka je 0,8 J/cm² pri hitrosti robotskega orodja 1,2 m/s.

Sliki 4.23 in 4.24 prikazujeta sile in gostote energije trka pri eksperimentu s točkovnim robotskim orodjem. Največja izmerjena sila trka je 165 N, kar je višje kot pri eksperimentu s

premim robotskim orodjem. Kot je razvidno iz slike 4.24, gostota energije trka preseže mejno vrednost 2,52 J/cm² pri hitrostih robotskega orodja 0,9 m/s, 1,0 m/s, 1,1 m/s in 1,2 m/s.

Primerjava odzivov PMR in človekove podlakti pri trku z LWR III robotsko roko je podana v poglavju 4.5.



Slika 4.19: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (ravninski dotik).



Slika 4.20: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (ravninski dotik).



Slika 4.21: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (premi dotik).



Slika 4.22: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (premi dotik).



Slika 4.23: Sila trka v odvisnosti od časa pri različnih hitrostih robotskega orodja (točkasti dotik).



Slika 4.24: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti robotskega orodja (točkasti dotik).

4.5 Primerjava odzivov PMR s človekovo podlaktjo za trke z industrijskim in LWR III robotom

Druga izvedba pasivne mehanske roke (PMR) je bila zgrajena zaradi omejitev, ki jih je imela prva izvedba mehanske roke. Kako dobro PMR posnema odziv človekove podlakti med trkom, lahko ugotovimo s primerjavo rezultatov študije s prostovoljcem iz poglavja 2.5 in rezultatov iz poglavja 4.4, v katerem je predstavljen trk LWR III in PMR. V obeh študijah so bili z LWR III robotom izvedeni primerljivi eksperimenti z vsemi tremi robotskimi orodji, pri čemer se je vrh robota proti podlakti gibal s konstantno hitrostjo. Rezultati obeh študij z LWR III robotom so primerjani še z rezultati eksperimentov trka industrijskega robota in PMR iz poglavja 4.3.

Za eksperimente z ravninskim robotskim orodjem so rezultati prikazani na slikah 4.25 in 4.26. Sile izmerjene pri trkih industrijskega robota s PMR so pri večini hitrostih robotskega orodja malo višje od sil izmerjenih pri trku LWR III robota s podlaktjo prostovoljca (slika 4.25). Obratno velja za sile izmerjene pri trku LWR III robota s PMR, ki so malenkost nižje. Za sile trka so najvišja odstopanja za posamezen robot v rangu 10 N v primerjavi z eksperimenti s prostovoljcem. Gostote energije trka so za eksperimente z ravninskim orodjem prikazane na sliki 4.26. Rezultati eksperimentov z industrijskim robotom se dobro prilegajo rezultatom eksperimentov s prostovoljcem. Manjša odstopanja lahko opazimo le pri hitrostih vrha robota 0,9 m/s in 1,0 m/s. Za eksperimente z LWR III robotom in PMR so odstopanja od eksperimentov s prostovoljcem nekoliko višja pri hitrostih vrha robota od 0,7 m/s do 0,9 m/s.



Slika 4.25: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (ravninski dotik).



Slika 4.26: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (ravninski dotik).

Na slikah 4.27 in 4.28 so prikazani rezultati eksperimentov s premim robotskim orodjem. Sile trka so za eksperimente z industrijskim robotom višje od eksperimentov s prostovoljcem pri večini hitrostih vrha robota. Podobna odstopanja smo že opazili tudi pri eksperimentih z ravninskim robotskim orodjem. Pri eksperimentih LWR III robota in PMR se sile trka zelo dobro prilegajo rezultatom eksperimenta s prostovoljcem. Gostota energije trka je pri rezultatih eksperimentov z industrijskim in LWR III robotom malo višja od rezultatov eksperimenta s prostovoljcem pri hitrostih vrha robota od 0,6 m/s do 0,9 m/s. Največje odstopanje je v rangu 0,15 J/cm².



Slika 4.27: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (premi dotik).



Slika 4.28: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (premi dotik).

Sliki 4.29 in 4.30 prikazujeta rezultate eksperimentov s točkovnim robotskim orodjem. Podobno kot pri eksperimentih z ravninskim in premim robotskim orodjem, so sile trka pri eksperimentih z industrijskim robotom in točkovnim orodjem malo večje kot pri eksperimentih s prostovoljcem. Največje odstopanje je v rangu 20 N. Sile trka se za LWR III robot s PMR razmeroma dobro prilegajo silam trka s prostovoljcem. Podobno ujemanje lahko opazimo tudi pri gostotah energije trka, kjer rezultati eksperimentov z LWR III in PMR odstopajo od rezultatov eksperimenta s prostovoljcem za največ 0,4 J/cm² (slika 4.30). Za eksperimente z industrijskim robotom so ta odstopanja nekoliko višja (0,9 J/ cm²).

Na vseh slikah lahko opazimo, da so vrednosti izmerjenih parametrov pri eksperimentih z industrijskim robotom nekoliko večji kot pri eksperimentih z LWR III ali s prostovoljcem. Glede na [**35**] se resnost poškodbe pri trku viša z naraščajočo maso robota. V obzir je potrebno vzeti, da LWR III tehta 15 kg in EPSON PS3L 51 kg. Pričakovano je torej, da so sile in gostote energije trka pri eksperimentih z industrijskim robotom EPSON nekoliko večje.



Slika 4.29: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (točkasti dotik).



Slika 4.30: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota (točkasti dotik).

Iz rezultatov vseh eksperimentov lahko zaključimo, da PMR zadovoljivo posnema pasivno podlaket človeka med trkom z robotom. Pri primerjavi odzivov prve izvedbe pasivne mehanske roke z odzivi prostovoljcev, so se pokazale velike razlike. To velja predvsem za gostoto energije trka, ki je ključnega pomena za določanje morebitne poškodbe. Z drugo izvedbo pasivne mehanske roke (PMR) smo to omejitev premostili in dosegli zadovoljivo ujemanje s človekovo podlaktjo tudi v smislu gostote energije trka.

5. Varni hitrostni profil za vodenje robota LWR III

V nadaljevanju je predstavljena aplikativna uporaba PMR. Na nemškem inštitutu DLR razvijajo sistem vodenja robota, ki prilagaja hitrost vrha robota glede na obliko robotskega orodja in preslikano vztrajnost (angleško: reflected inertia) [**58,21**] robotskega mehanizma v smeri gibanja. Pri fizični interakciji robota in človeka je varnost človeka na prvem mestu. Potrebno je zagotoviti, da robot v nobeni situaciji ne more resneje poškodovati človeka. Regulacijski sistem, razvit na inštitutu DLR, prilagaja hitrost vrha robota, tako da morebiten trk zaradi odpovedi sistema ali človeške napake naj ne bi poškodoval sodelujočega človeka. Z novim regulacijskim sistemom je robot LWR III še korak bližje uporabi v aplikacijah, namenjenih fizični interakciji robota in človeka v industrijskem in domačem okolju.

Glede na [58] imajo največ vpliva na lastnosti morebitnega trka preslikana vztrajnost mehanizma ter oblika in hitrost robotskega orodja. Preslikana vztrajnost pomeni maso robotskega mehanizma, odraženo na vrhu robota [58,21]. V nadaljevanju je podan kratek opis izračuna preslikane vztrajnosti mehanizma. Podrobnejši potek izračuna je predstavljen v [59,21]. Preslikano vztrajnost mehanizma izračunamo s transformacijo matrike vztrajnostnih momentov segmentov iz notranjih koordinat v zunanje koordinate. Pri izračunu kinetične energije mehanizma v notranjih koordinatah uporabimo vztrajnostno matriko segmentov iz enačbe dinamičnega modela robota in vektor kotnih hitrosti. Podobno uporabimo za izračun kinetične energije mehanizma v zunanjih koordinatah hitrost vrha mehanizma ter matriko kinetične energije, izraženo v operacijskem prostoru [59]. Vztrajnostna matrika segmentov in matrika kinetične energije sta povezani preko Jacobijeve matrike [59]. Z dekompozicijo inverzne matrike kinetične energije ločimo prispevka rotacijskega oz. translacijskega gibanja mehanizma [58]. Prispevek translacijskega gibanja mehanizma pomnožimo z enotskim vektorjem v smeri gibanja vrha robota in dobimo maso robotskega mehanizma odraženo na vrhu robota v smeri gibanja [59,58]. Preslikana vztrajnost robotskega mehanizma naraste proti neskončni vrednosti, kadar je lega robotskih segmentov v bližini singularnosti [58,44]. V teh primerih zahteva preslikana vztrajnost mehanizma posebno obravnavo [58,44].

Robotski krmilnik LWR III izračuna preslikano vztrajnost mehanizma v vsakem koraku glede na maso robotskega orodja in trenutno konfiguracijo robotskih segmentov [**58**]. Preslikano vztrajnost mehanizma, ki jo robotski krmilnik beleži s frekvenco 1 kHz, smo uporabili pri analizi podatkov. Za zanesljivo delovanje potrebuje sistem vodenja tudi podatke o orodju, nameščenem na vrh robota in o poškodbah, ki jih to orodje človeku lahko zada. Vsako robotsko orodje je torej potrebno posebej ovrednotiti v smislu morebitne poškodbe za vsak del telesa, v katerega lahko trči pri različnih hitrostih.

Namen raziskovalnega dela v DLR je zgraditi bazo podatkov, v kateri so informacije o različnih robotskih orodjih za poškodbe različnih delov telesa. Ti podatki so potem na voljo sistemu za vodenje robota. Baza podatkov trenutno zajema trke različnih robotskih orodij v predelu trebuha. Naš prispevek so podatki o trku ravninskega, premega in točkovnega robotskega orodja v neomejeno podlaket človeka. Za vsako robotsko orodje je potrebno izdelati varno hitrostno krivuljo, ki določa hitrost vrha robota glede na preslikano vztrajnost robotskega mehanizma.

S PMR in LWR III robotom smo izvedli serijo eksperimentov z različnimi robotskimi orodji in dodatnimi utežmi na vrhu robota. V eksperimentih je robot trčil v podlaket pravokotno s konstantno hitrostjo. Z robotskim orodjem za ravninski, premi in točkasti dotik so bili eksperimenti izvedeni pri hitrostih vrha robota od 0,1 m/s do 1,2 m/s. Maso dodatnih uteži na vrhu robota smo spreminjali od 0 kg do 5 kg. Z vsako utežjo so bili trki ponovljeni za vse hitrosti vrha robota. Z vsakim robotskim orodjem je bilo torej izvedenih 72 eksperimentov.

Merilni sistem je bil isti kot pri eksperimentih, opisanih v poglavju 4.4.

Rezultati za trk ravninskega robotskega orodja s PMR so podani na slikah 5.1 in 5.2. Sile trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti mehanizma so podane na sliki 5.1. Največje izmerjene sile trka so v rangu 140 N in rahlo rastejo z naraščajočo preslikano vztrajnostjo mehanizma. Vpliv hitrosti je na silo trka bistveno večji, kot vpliv preslikane vztrajnosti mehanizma.



Slika 5.1: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega mehanizma (ravninski dotik).



Slika 5.2: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega mehanizma (ravninski dotik).

Gostota energije trka je za eksperimente z ravninskim robotskim orodjem prikazana na sliki 5.2. Najvišja gostota energije trka je bila 0,23 J/cm², kar je pod mejo 2,52 J/cm², pri kateri lahko nastanejo poškodbe tkiva. Za ravninsko robotsko orodje torej ni potrebno omejevati hitrosti vrha robota za preslikane vztrajnosti robotskega mehanizma do 9 kg in hitrosti vrha robota do 1,2 m/s.

Na slikah 5.3 in 5.4 so prikazani rezultati za eksperimente s premim robotskim orodjem. Najvišja izmerjena sila trka presega 150 N (slika 5.3). Podobno kot pri trkih z ravninskim robotskim orodjem, sile trka rahlo naraščajo z naraščajočo preslikano vztrajnostjo mehanizma. Večji vpliv na sile trka kaže hitrost vrha robota.

Najvišje gostote energije trka so za premo robotsko orodje okoli 0,75 J/cm² (slika 5.4). Za dorzalno stran podlakti trki z gostotami energije v rangu 0,8 J/cm² ne povzročijo poškodb tkiva glede na izsledke iz poglavja 2.6 in literaturo [**41**]. Podobno kot za ravninsko orodje tudi za premo orodje ni potrebno omejevati hitrosti vrha robota, če so preslikane vztrajnosti mehanizma in hitrosti vrha robota znotraj območja do 9 kg oz. do 1,2 m/s.



Slika 5.3: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega mehanizma (premi dotik).



Slika 5.4: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega mehanizma (premi dotik).

Sliki 5.5 in 5.6 prikazujeta rezultate eksperimentov z orodjem za točkasti dotik. Sile trka so prikazane na sliki 5.5, pri čemer so najvišje izmerjene sile nad 150 N. Izmerjene sile so pri trku s točkovnim orodjem malenkost višje kot pri trku s premim robotskim orodjem.

Na sliki 5.6 so prikazane gostote energije trka s točkovnim robotskim orodjem. Najvišje gostote energije trka so nad 4 J/cm². Gostote energije trka, ki lahko povzročijo poškodbe tkiva se na sliki 5.6 nahajajo nad rdečo črto, ki predstavlja mejo 2,52 J/cm². To velja predvsem za trke s hitrostmi robotskega orodja med 1 m/s in 1,2 m/s pri preslikanih vztrajnostih mehanizma med 4 kg in 6 kg. Do poškodb tkiva lahko pride že tudi pri nižjih hitrostih vrha robota (0,9 m/s), če je preslikana vztrajnost robotskega mehanizma med 7 kg in 9 kg.



Slika 5.5: Sila trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega mehanizma (točkasti dotik).



Slika 5.6: Gostota energije trka v odvisnosti od hitrosti vrha robota in preslikane vztrajnosti robotskega mehanizma (premi dotik).

Točke gostote energije trka, ki jih povezuje rdeča krivulja na sliki 5.6, so uporabljene za generiranje varne hitrostne krivulje, ki je za območje preslikanih vztrajnosti ovrednotenih v eksperimentu prikazana na sliki 5.7. Modra črta prikazuje varno hitrostno krivuljo v odvisnosti od preslikane vztrajnosti mehanizma, medtem ko rdeči trikotniki pomenijo mejne vrednosti gostote energije trka pridobljene z eksperimenti. Varna hitrostna krivulja je izbrana tako, da so vse točke, pri katerih lahko pride do poškodbe tkiva, nad krivuljo.

Pred uporabo varne hitrostne krivulje v robotskem krmilniku je potrebno določiti še najvišje hitrosti vrha robota pri preslikanih vztrajnostih mehanizma, ki jih v eksperimentu nismo ovrednotili. Za generiranje preostalega dela krivulje smo uporabili metodologijo, opisano v [**58**]. Robotski mehanizmi, namenjeni interakciji robota in človeka, med njih sodi tudi LWR III, naj bi imeli preslikano vztrajnost med 1 kg in 15 kg. Na levi strani krivulje je hitrost preslikane vztrajnosti med 0 kg in 4 kg omejena glede na »nevarno« točko pri preslikani vztrajnosti 4 kg (slika 5.8). Za preslikane vztrajnosti mehanizma nad 9 kg krivulje nismo ekstrapolirali, ampak smo v smislu varnosti uporabili strožji kriterij in jo povezali s hitrostjo vrha robota pri preslikani vztrajnosti 15 kg [**58**]. Mehanizmi s preslikano vztrajnostjo nad 15 kg za servisno robotiko niso zanimivi, saj naj bi bila preslikana vztrajnost »varnih« mehanizmov do 15 kg. Četudi v bližini singularnosti robotskega mehanizma preslikana vztrajnost narašča proti neskončni vrednosti, je nesmiselno ustaviti robot oz. zmanjšati njegovo hitrost na 0 m/s [**58**]. Potrebno je izbrati še smiselno hitrost, s katero se lahko vrh robota premika v okolici singularnih leg, kar je glede na [**44**] 0,1 m/s (slika 5.8).



Slika 5.7: Varna hitrostna krivulja za LWR III in točkovno robotsko orodje.



Slika 5.8: Varna hitrostna krivulja za LWR III in točkovno robotsko orodje.

Zaključek

Pri načrtovanju fizične interakcije robota in človeka je pomembno poznavanje morebitnih poškodb, ki jih lahko robot zada človeku ob neželeni fizični interakciji oz. ob trku [22]. Na to temo je bilo opravljenih že več raziskav, predvsem eksperimentov s trki robota v glavo ali prsni koš človeka [41,28,30,32,31]. Naše raziskovalno delo je osredotočeno predvsem na trk majhnega industrijskega robota z rokami človeka.

Vpogled v dogajanje med trkom robota in človekove podlakti smo pridobili s študijo, ki je vključevala šest prostovoljcev. Varnost prostovoljcev je bila zagotovljena z več ukrepi. Robot je trčil v neomejeno prostovoljčevo podlaket s konstantnim pojemkom, tako da je bila končna točka vrha robota vnaprej določena na globini 10 mm, 20 mm ali 30 mm glede na površino podlakti. Kot dodaten ukrep je bila med vrh robota in robotsko orodje vgrajena zaščita pred trkom, ki se ob prekoračitvi sile trka izpahne in zaustavi robotski mehanizem. Celoten nabor eksperimentov je bil najprej izveden na članu raziskovalne ekipe in ovrednoten v smislu bolečine ter morebitne poškodbe. Eksperimenti so bili izvedeni z robotskim orodjem za premi in ravninski dotik. Ocenili smo, da bi bili eksperimenti z orodjem za točkasti dotik prenevarni. Za oceno poškodbe, ki bi lahko pri trku nastala, smo za vsak trk izračunali gostoto energije. Poškodbe tkiva, kot so zmečkanine, nastanejo pri trkih z gostotami energije višjimi od 2,52 J/cm² [41]. Modrice lahko nastanejo že pri nižjih vrednostih gostote energije trka. Zgoraj omenjena mejna vrednost velja predvsem za tanke plasti tkiva, ki prekrivajo kost (skalp, koleno). V ločeni študiji smo mejno vrednost 2,52 J/cm² ovrednotili tudi za področje podlakti in roke v ožjem smislu (drugi odstavek, str. 79). Pri izračunu gostote energije trka je potrebno poznati površino dotika med robotskim orodjem in podlaktjo, ki smo jo določili z uporabo folij za merjenje porazdelitve tlaka. Nihče od prostovoljcev ni občutil po opravljenih eksperimentih nobene bolečine na mestu dotika, iz česar lahko sklepamo, da ni prišlo do poškodbe tkiva, kar potrjujejo tudi izračunane gostote energije trka. Najvišje gostote energije trka so bile za ravninski dotik 0,05 J/cm² in za premi dotik 0,15 J/cm², kar je približno 50-krat oziroma 16-krat manj od gostote energije, pri kateri lahko pride do poškodbe.

Z upoštevanjem rezultatov študije s šestimi prostovoljci smo izvedli še serijo eksperimentov, v katerih je robot trčil v neomejeno podlaket prostovoljca s konstantno hitrostjo. Eksperimente smo izvedli z vsemi tremi robotskimi orodji. Hitrost vrha robota smo spreminjali od 0,1 m/s do 1 m/s s korakom 0,1 m/s. Pričakovano je bilo, da lahko pri eksperimentih pride do lažjih poškodb tkiva podlakti, zato so bili eksperimenti izvedeni samo na članu raziskovalne ekipe (spol: moški, starost: 30 let, masa: 80 kg). Vsak trk smo ovrednotili v smislu bolečine in morebitne poškodbe ter se odločili ali je varno z eksperimentom nadaljevati. Pri robotskih orodjih za ravninski in premi dotik, sta bili najvišji gostoti energije trka 0,23 J/cm² in 0,5 J/cm². Prostovoljec ni čutil nobene bolečine na mestu dotika po eksperimentu. Za obe robotski orodji lahko torej zaključimo, da trk z dorzalnim delom podlakti najverjetneje ne povzroči poškodbe pri hitrostih vrha robota do 1 m/s. Trki z orodjem za točkovni dotik so se izkazali za nevarnejše in povzročili lažje poškodbe tkiva. Že med trkom je prostovoljec čutil močnejšo bolečino kot pri trkih z orodjema za premi in ravninski dotik. Na mestu trka nismo opazili nobene modrice, vendar je ostalo občutljivo na dotik še več dni. Navedena opažanja veljajo za hitrosti vrha robota 0,9 m/s in 1 m/s z gostotama energije trka 2,5 J/cm² ter 3,1 J/cm². V obeh primerih je bila gostota energije trka večja ali v okolici mejne vrednosti 2,52 J/cm².

V ločeni študiji smo ovrednotili mejno vrednost gostote energije trka, ki znaša 2,52 J/cm² in velja za področja telesa, kjer le tanka plast tkiva prekriva kost (skalp, koleno) [41]. Zanimalo nas je, kakšne poškodbe povzročijo trki z gostoto energije ranga 2,5 J/cm² na področju podlakti in roke v ožjem smislu. Glede na rezultate študije trka z različnimi konstantnimi hitrostmi vrha robota (prejšnji odstavek), je bilo za eksperimente izbrano točkovno orodje in hitrost vrha robota 1 m/s. Ponovno so bili eksperimenti izvedeni le na članu raziskovalne ekipe (spol: moški, starost: 30 let, masa: 80 kg). Za podlaket je bilo določenih pet točk trka; tri na dorzalni strani in dve na ventralni strani podlakti. Na dorzalni strani podlakti je bila prva točka izbrana poleg zapestja, druga poleg komolca in tretja na sredini med zapestjem in komolcem. Podobno sta bili na ventralni strani podlakti točki izbrani v bližini zapestja in v bližini komolca. Za roko v ožjem smislu so bile izbrane sledeče štiri točke: prva poleg palca, druga v bližini sredinca, tretja blizu mezinca in četrta v bližini zapestja. Dvanajst ur po eksperimentu je prostovoljec podal oceno občutljivosti točk trka na dotik. Nobena izmed točk na roki v ožjem smislu ni bila opazneje občutljiva na dotik. Za vse štiri točke so bile gostote energije trka pod 1,9 J/cm². Podobno velja za točko trka na ventralni strani podlakti v bližini komolca, ki je bila po dvanajstih urah komaj zaznavno občutljiva na dotik. V tej točki je debelina tkiva med kožo in kostjo razmeroma debela, zato kljub visoki gostoti energije trka (3,64 J/cm²) najverjetneje do poškodbe tkiva ni prišlo. Druga točka na ventralni strani podlakti je bila kljub nižji gostoti energije trka (1,26 J/ cm²) opazneje občutljiva na dotik. Potrebno je poudariti, da je na tem mestu med kožo in kostjo zelo tanka plast tkiva, zato je najverjetneje do lažje poškodbe tkiva prišlo že pri razmeroma nizki gostoti energije trka. Mesto trka blizu zapestja na dorzalni strani podlakti ni bilo po dvanajstih urah občutljivo na dotik. Večjo občutljivost na dotik je prostovoljec podal v točki trka na sredini med zapestjem in komolcem ter največjo v točki trka blizu komolca. Pripadajoči gostoti energije trka sta 2,16 J/cm² in 2,79 J/cm². V obeh točkah trka je torej najverjetneje prišlo do poškodbe tkiva in v točki trka na sredini med zapestjem in komolcem je trk povzročil lažjo poškodba tkiva in v točki poleg komolca močnejšo poškodbo tkiva. V nobeni izmed točk ni bila poškodba tkiva tako resna, da bi se na mestu trka pojavila modrica. Navkljub izvedbi eksperimenta le na eni osebi lahko zaključimo, da se najverjetneje pri trkih z gostotami energije v rangu 2,5 J/cm², pojavijo lažje oblike poškodbe tkiva na dorzalni strani podlakti. Za natančnejšo določitev mejne vrednosti gostote energije trka bi bila potrebna študija z večjim vzorcem prostovoljcev obeh spolov iz več starostnih skupin.

Za preučevanje nevarnejših trkov robota in človekove podlakti smo razvili pasivno mehansko roko. Prva izvedba pasivne mehanske roke je zgrajena iz aluminijastega ogrodja, ki predstavlja ramo nastavljivo v eni prostostni stopnji, nadlaket in podlaket. Komolec je zgrajen iz pnevmatske rotacijske enote in pnevmatskega cilindra. Na aluminijast profil, ki predstavlja podlaket, je pritrjena silikonska estetska rokavica napolnjena s poliuretansko peno. Silikonska rokavica naj bi predstavljala kožo in poliuretanska pena mehko tkivo podlakti. Podlaket drži v vodoravnem položaju pnevmatska rotacijska enota, ki glede na priključen tlak generira konstanten navor za kompenzacijo gravitacije. S prvo izvedbo pasivne mehanske roke je bil izveden enak nabor eksperimentov kot v študiji s šestimi prostovoljci. Robot je trčil v neomejeno podlaket s konstantnim pojemkom. Spreminjali smo pojemek robotskega orodja in globino končne točke. Rezultate eksperimentov smo primerjali z rezultati študije s prostovoljci. Prva izvedba pasivne mehanske roke razmeroma dobro posnema sile pri trku robota s človekovo podlaktjo. Večja odstopanja se pojavijo pri primerjavi gostote energije trka. Pri trkih z orodjem za premi dotik se gostote energije trkov razlikujejo za faktor štiri. Še večja odstopanja so pri trkih z ravninskim robotskim orodjem, kjer se gostote energije trka razlikujejo za 20-krat. Gostota energije trka je ključnega pomena za določanje morebitne poškodbe, ki se pri trku pojavi, zato je potrebno zagotoviti dobro ujemanje odzivov mehanske in človeške roke še posebej v smislu gostote energije trka.

Omejitve prve izvedbe pasivne mehanske roke smo premostili z izboljšano izvedbo pasivne mehanske roke (PMR), ki vključuje motoriziran komolec in triplastno strukturo za emulacijo mehkega tkiva. Celoten sistem je nameščen na aluminijasti plošči, ki nudi oporo krmilni omari, osebnemu računalniku in aluminijasti strukturi mehanske roke. Na nosilni steber je pritrjena aluminijasta nadlaket, ki je v ramenskem sklepu pasivno nastavljiva v eni prostostni stopnji. Na nadlaket je pritrjen elektromotor s planetnim prenosom. Podlaket je pritrjena na elektromotor in nudi oporo ponazoritvi mehkega tkiva. Motor komolca je voden preko servoojačevalnika in osebnega računalnika z nameščenim operacijskim sistemom, ki teče v realnem času. Vodenje mehanskega komolca je izvedeno z matematičnim modelom človekove roke. Parametri matematičnega modela za vodenje so bili določeni preko optimizacije, v kateri je tekla simulacija trka robota in človekove podlakti. V optimizaciji so bili odzivi simulacije primerjani z odzivi, zabeleženimi v študiji s prostovoljci. Glede na razlike odzivov so bili parametri modela ustrezno korigirani. Del modela, ki predstavlja komolec ter mišici biceps in triceps, je bil nato uporabljen za vodenje mehanskega komolca PMR. Odzivi PMR pri trku z industrijskim robotom ali lahko robotsko roko LWR III so bili primerjani z odzivi človekove podlakti pri trku z LWR III. V vseh treh študijah je bil izveden enak nabor eksperimentov. Iz primerjave rezultatov lahko sklepamo, da PMR zadovoljivo posnema človekovo podlaket med trkom v smislu sile in gostote energije trka.

PMR je bila uporabljena za določitev varne hitrostne krivulje pri vodenju lahke robotske roke LWR III. Preko varne hitrostne krivulje robotski krmilnik prilagaja hitrost vrha robota glede na preslikano vztrajnost robotskega mehanizma in obliko robotskega orodja. Glede na [58] imajo največ vpliva na lastnosti morebitnega trka oblika in hitrost robotskega orodja ter preslikana vztrajnost mehanizma. Z LWR III in PMR je bilo za vsako robotsko orodje (ravninsko orodje, premo orodje in točkovno orodje) izvedenih 72 trkov. Hitrost vrha robota smo spreminjali od 0,1 m/s do 1,2 m/s ter dodatno maso na vrhu robota od 0 kg do 5 kg. Robot je v neomejeno podlaket PMR trčil s konstantno hitrostjo. Glede na rezultate eksperimentov je potrebno samo pri točkovnem robotskem orodju zmanjšati hitrost vrha robota. Ravninsko in premo robotsko orodje naj ne bi povzročili poškodb pri trku v dorzalni del neomejene podlakti, če so hitrosti vrha robota med 0,1 m/s in 1,2 m/s. Za točkovno

robotsko orodje je bila iz podatkov eksperimentov določena varna hitrostna krivulja za vodenje lahke robotske roke LWR III. Metodologija za generiranje varne hitrostne krivulje je bila enaka kot v [**58**].

Primerjava posledic oz. morebitnih poškodb pri trku industrijskega robota PS3L ali LWR III nakazuje, da industrijski robot pri trku v neomejeno podlaket ni bistveno bolj nevaren od »varnejše« lahke LWR III robotske roke. Poudariti je potrebno, da je masa človekove podlakti razmeroma majhna v primerjavi z maso enega ali drugega robotskega mehanizma. V primeru trka robota v telo večje mase (npr. trup) ali v omejeno telo, pa sta masa robota in detekcija trka ključnega pomena [**36**]. Pri trku v telo večje mase ali pri trku v omejeno telo, je torej glede na [**35**,**36**] lahka LWR III robotska roka »varnejša« od industrijskega robota, kar pa ne velja za trke v lažje dele telesa (npr. podlaket), ki niso ukleščeni ali omejeni.

Študije, ki se ukvarjajo z varnostjo pri fizični interakciji robota in človeka, so poleg vključevanja novih tehnologij v industrijske proizvodne procese pomembne tudi za uvajanje robotov v oskrbo starejših in ohromelih ljudi ter robotskih pomočnikov v naše domove. Varnost interakcije naj bi tako sestavljala dva sklopa [**60**]. Poleg varnosti strojne opreme, ki zajema možnosti odpovedi senzorjev ali vođenja mehanizma, je pomembna tudi veđenjska varnost. V veđenjsko varnost sodijo predvsem dvosmerni večmodalni komunikacijski kanali kot so: kretnje, položaji telesa, izrazi na obrazu in govor [**61**].

Pri nadaljnjih študijah trka robota in človekove podlakti vidim predvsem dve smeri razvoja. Potrebno bi bilo ovrednotiti trke robota s podlaktjo pri še višjih hitrostih. To bi omogočilo določitev mejnih hitrosti še za premo in ravninsko robotsko orodje. Eksperimente bi lahko izvedli z obstoječo pasivno mehansko roko. Prepričati bi se bilo potrebno o ustreznosti odziva PMR pri višjih hitrostih trka. Povsem odprt prostor za študije pa predstavlja trk robota v omejeno oziroma ukleščeno roko. Za izvajanje eksperimentov trka robota v ukleščeno podlaket bi bilo potrebno zgraditi novo mehansko roko z merilnim sistemom prilagojenim za visoke sile, ki pri ukleščenju lahko nastanejo. Metodologijo uporabljeno za določanje poškodbe pri trku robota v neomejeno podlaket bi bilo najverjetneje potrebno nadgraditi ali povsem spremeniti za ocenjevanje poškodb pri trku robota v ukleščeno podlaket.

Literatura

- [1] D. Gao in C. W. Wampler, "Head injury criterion: assessing the danger of robot impact," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 16, no. 4, str. 71-74, 2009.
- [2] O. Ogorodnikova, "The role of risk assessment in human centered robot work cell," v International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2007), Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [3] M. Giuliani, C. Lenz, T. Müller, M. Rickert in A. Knoll, "Design principles for safety in human-robot interaction," *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, no. 3, str. 253-274, 2010.
- [4] T. Gecks in D. Henrich, "Human-robot cooperation: safe pick-and-place operations," v Robot and Human Interactive Communication, 2005. ROMAN 2005. IEEE International Workshop on, Nashville, USA, 2005, str. 549-554.
- [5] D.M. Ebert in D.D. Henrich, "Safe human-robot-cooperation: image-based collision detection for industrial robots," v Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on, Switzerland, 2002, str. 1826 - 1831.
- [6] Y. Yong in K. Gupta, "Sensor-based roadmaps for motion planning for articulated robots in unknown environments: some experiments with an eye-in-hand system," v Intelligent Robots and Systems, 1999. IROS '99. Proceedings. 1999 IEEE/RSJ International Conference on, Kyongju, South Korea, 1999, str. 1707 - 1714.
- [7] Y. Oh, C. Kang in W. Woo, "U-VR simulator linking real and virtual environments based on context-awareness," v Ubiquitous Virtual Reality, 2009. ISUVR '09. International Symposium on, Gwangju, 2009, str. 52-55.
- [8] R. Koeppe et al., "Robot-robot and human-robot cooperation in commercial robotics applications," *v Robotics Research, Springer Berlin*, vol. 15, str. 202-216, 2005.
- [9] A. Bicchi, M. A. Peshkin in J. E. Colgate, "Safety for physical human-robot interaction,"

v Springer Handbook of Robotics, str. 1335-1348, 2008.

- [10] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, O. Eiberger in G. Hirzinger, "New insights concerning intrinsic joint elasticity for safety," v Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, Taipei, 2010, str. 2181 - 2187.
- [11] W. Sepp, "A direct method for real-time tracking in 3-D under variable illumination," v DAGM-Symposium, Vienna, Austria, 2005, str. 246-253.
- [12] J.L. Novak in I.T. Feddema, "A capacitance-based proximity sensor for whole arm obstacle avoidance," v Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on, Nice, France, 1992, str. 1307 - 1314.
- [13] A. Ohya, T. Ohno in S. Yuta, "Obstacle detectability of ultrasonic ranging system and sonar map understanding," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 18, no. 1-2, str. 251-257, 1996.
- [14] H.-O. Lim in 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, str. 307-335, 2000.
- [15] M. Zinn, O. Khatib in B. Roth, "A new actuation approach for human friendly robot design," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 23, str. 379-398, 2004.
- [16] M. Zinn, O. Khatib, B. Roth in J. K. Salisbury, "Playing it safe," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11, no. 2, str. 12-21, 2004.
- [17] A. Bicchi in G. Tonietti, "Fast and soft arm tactics: dealing with the safety-performance trade-off in robot arms design and control," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 11, str. 22-33, 2004.
- [18] V. Duchaine in C. M. Gosselin, "General model of human-robot cooperation using a novel velocity based variable impedance control," v Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and

Teleoperator Systems (WHC'07), 2007, str. 446-451.

- [19] A. Bicchi, L. Rizzini in G. Tonietti, "Compliant design for intrinsic safety: general issues and preliminary design," v Proc. Int. Conf. Intell. Robots Syst., vol. 4, Hawaii, 2001, str. 1864-1869.
- [20] S. Kajikawa, "Development of a robot hand with an adjuster mechanism for joint compliance," v Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International Conference on , Bangkok, 2008, str. 1683 - 1688.
- [21] S. Haddadin et al., "Kick it with elasticity: Safety and performance in human-robot soccer," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 57, no. 8, str. 761-775, 2009.
- [22] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, A. Stemmer C. Ott, T. Wimböck in G. Hirzinger, "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, no. 5, str. 376-385, 2007.
- [23] A. De Luca, A. Albu-Schäffer, S. Haddadin in G. Hirzinger, "Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm," v *International Conference* on *Intelligent Robots and Systems*, China, 2006.
- [24] A. Albu-Schäffer et al., "Soft robotics: from torque feedback controlled light-weight robots to intrinsically compliant systems," *Robotics and Automation Magazine (RAM): Special Issue on Adaptable Compliance / Variable Stiffness for Robotic Applications*, vol. 15, no. 3, str. 20-30, 2008.
- [25] B. Povse et al., "Cooperation of small industrial robot and human operator," v 18th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD 2009), Brasov, Romunia, 2009, str. 1339-1349.
- [26] J. Heinzmann in A. Zelinsky, "Quantitative safety guarantees for physical human-robot interaction," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 22, no. 7-8, str. 479-504, 2003.
- [27] K. Ikuta, H. Ishii in M. Nokata, "Safety evaluation method of design and control for

human-care robots," Int. J. of Robotics Research, vol. 22, no. 5, str. 281-298, 2003.

- [28] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, M. Frommberger, J. Rossmann in G. Hirzinger, "The DLR crash report: towards a standard crash-testing protocol for robot safety - part I: results," v *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2009)*, Japan, 2009, str. 272-279.
- [29] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, M. Frommberger, J. Rossmann in G. Hirzinger, "The DLR crash report: towards a standard crash-testing protocol for robot safety - part II: discussions," v *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2009)*, Japan, 2009, str. 280-287.
- [30] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, M. Strohmayr, M. Frommberger in G. Hirzinger, "Injury evaluation of human-robot impacts," v *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (*ICRA 2008*), Pasadena, USA, 2008.
- [31] S. Haddadin, A. Albu- Schäffer in G. Hirzinger, "Safety evaluation of physical humanrobot interaction via crash-testing," v *Robotics: Science and Systems Conference*, 2007.
- [32] S. Oberer in R. D. Schraft, "Robot-dummy crash tests for robot safety assessment," v *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Italy, 2007, str. 1864-1869.
- [33] S. Oberer, M. Malosio in R. D. Schraft, "Investigation of robot-human impact," v Proceedings of the Joint Conference on Robotics ISR, 37th International Symposium on Robotics, Germany, 2006.
- [34] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer in G. Hirzinger, "Requirements for safe robots: measurements, analysis and new insights," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 28, no. 11-12, str. 1507-1527, 2009.
- [35] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer in G. Hirzinger, "The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction - part I: unconstrained blunt impacts," v IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008), Pasadena, USA, 2008, str. 1331-1338.

- [36] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer in G. Hirzinger, "The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction - part II: constrained blunt impacts," v *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008)*, Pasadena, USA, 2008, str. 1339-1345.
- [37] T. Malm et al., "Safety of interactive robotics-learning from accidents," *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, no. 3, str. 221-227, 2010.
- [38] Y. Yamada, Y. Hirasawa, S. Huand in Y. Umetani, "Fail-safe human/robot contact in the safety space," v IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, 1996, str. 59–64.
- [39] Y. Yamada, Y. Hirasawa, S. Huang, Y. Umetani in K. Suita, "Human-robot contact in the safeguarding space," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 2, no. 4, str. 230–236, 1997.
- [40] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, A. De Luca in G. Hirzinger, "Evaluation of collision detection and reaction for a human-friendly robot on biological tissues," v IARP International Workshop on Technical challenges and for dependable robots in Human environments (IARP2008), Pasadena, USA, 2008.
- [41] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer in G. Hirzinger, "Safe physical human-robot interaction: measurements, analysis & new insights," v International Symposium on Robotics Research (ISRR2007), Hiroshima, Japan, 2007.
- [42] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer in G. Hirzinger, "Safety analysis for a human-friendly manipulator," *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, no. 3, str. 235-252, 2010.
- [43] S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, F. Haddadin, J. Rosmann in G. Hirzinger, "Study on soft-tissue injury in robotics," *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, vol. 18, no. 4, str. 20-34, 2011.
- [44] J. Park, S. Haddadin, J. Song in A. Albu-Schäffer, "Designing optimally safe robot surface properties for minimizing the stress characteristics of human-robot collisions," v

Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on , Shanghai , 2011, str. 5413 - 5420.

- [45] S. M. Duma et al., "Dynamic injury tolerances for long bones of the female upper extremity," *Journal of Anatomy*, vol. 194, str. 463-471, 1999.
- [46] Techno Sommer Automatic. (15.1.2012). Crash protector datasheet. Dostopno na: http://www.techno-sommer.com/PDF/Pg_292.pdf
- [47] R. Edlich, G. Rodenheaver, R. Morgan, D. Berman in J. Thacker, "Principles of emergency wound management," *Annals of Emergency Medicine*, vol. 17, no. 12, str. 1284-1302, 1988.
- [48] J. Music, R. Kamnik in M. Munih, "Model based inertial sensing of human body motion kinematics in sit-to-stand movement," *Simulation Modeling Practice and Theory*, vol. 16, str. 933-944, 2006.
- [49] J. Katz in R. Melzack, "Measurement of pain," *Surgical Clinics of North America*, vol. 79, str. 231-252, 1999.
- [50] E. Kremer, J. H. Atkinson in R. J. Ignelzi, "Measurement of pain: patient preference does not confound pain measurement," *Pain*, vol. 10, str. 241-248, 1981.
- [51] L. Lasagna, "The psychophysics of clinical pain," *The Lancet*, vol. 280, no. 7256, str. 572-575, 1962.
- [52] S. L. Collins, R. A. Moore in H. J. McQuay, "The visual analogue pain intensity scale: what is moderate pain in millimeters?," *Pain*, vol. 72, str. 95-97, 1997.
- [53] Paolo de Leva, "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters," J. *Biomechanics*, vol. 29, no. 9, str. 1223-1230, 1996.
- [54] A. V. Hill, "The heat of shortening and the dynamic constants of muscle," *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 126, no. 843, str. 136–195, 1938.

[55] L. Vodovnik, Nevrokibernetika.: Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, 1991.

- [56] A. Trnkoczy, T. Bajd in M. Maležič, "A dynamic model of the ankle joint under functional electrical stimulation in free movement and isometric conditions," *J. Biomech*, vol. 9, str. 509–519, 1976.
- [57] G. Venture, Y. Nakamura, K. Yamane in M. Hirashima, "Identification of limbs joint passive visco-elasticity: a comparison of two experimental methods," v *International Symposium on Skill Science*, 2007, str. 31-37.
- [58] S. Haddadin et al., "On making robots understand safety I: embedding injury knowledge into control," *accepted for publication: International Journal of Robotics Research (IJRR2012)*, 2012.
- [59] O. Khatib, "Inertial properties in robotic manipulation: an object-level framework," *Int. J. Robotics Research*, vol. 14, no. 1, str. 19-36, 1995.
- [60] G. Herrmann in C. Melhuish, "Towards safety in human robot interaction," Int J Soc Robot, vol. 2, str. 217-219, 2010.
- [61] C. Harper in G. Virk, "Towards the development of international safety standards for human robot interaction," *Int J Soc Robot*, vol. 2, str. 229-234, 2010.

Priloga

Emulation system for assessment of human-robot collision. Meccanica, 2010

IZJAVA O AVTORSTVU

Izjavljam, da sem avtor te doktorske naloge, ki je plod raziskovalnega dela pod mentorstvom prof. dr. Tadej Bajda. Vsa pomoč drugih sodelavcev je izkazana v zahvali. Že objavljeni dosežki drugih avtorjev so navedeni v literaturi.

Ljubljana, 16. 6. 2012

Borut Povše