

# Elektrotaktilni *feedback* za prepoznavanje osobina predmeta manipuliranih mekim robotom

Gorana Marković, Jovana Malešević, Milica Isaković, Miloš Kostić, Matija Štrbac, Kosta Jovanović

**Apstrakt**— Glavni preduslov da se u potpunosti iskoriste prednosti telemanipulacionih sistema jeste dvosmjerna razmjena haptičkih informacija između operatora i udaljene okoline, što omogućuje operatoru da percipira kolizije, kontaktne sile, težinu, oblik, veličinu, strukturu objekta i sl. Da bismo odgovorili na neke od ovih zahtjeva, u ovom radu predlažemo upotrebu elektrotaktilne stimulacije s prostornim i frekvencijskim kodiranjem informacija. Korišćeni sistem sastoji se od robotskog aktuatora konačne mehaničke krutosti, električnog stimulatora i površinske elektrode s više polja (engl. *multi-pad*) koja se postavlja na vrh kažiprsta subjekta. Za razliku od sličnih postavki haptičke povratne sprege, u našoj studiji ispitanici su se oslanjali isključivo na taktilne, bez vizuelnih ili auditivnih povratnih informacija. Eksperimentalni rezultati pokazali su da elektrotaktilna stimulacija može poslužiti za prenos informacija o mekoći (prosječna stope prepoznavanja 3 nivoa mekoće iznosila je 90%) i veličini (prosječna stopa prepoznavanja 2 veličine iznosila je 98%) predmeta koji se hvata udaljenim aktuatorom.

**Ključne reči**—Telemanipulacija; Elektrotaktilni feedback; Meki robot

## I. UVOD

Daljinski upravljani (telemanipulacioni, teleoperacioni) robotski sistemi koriste se u sredinama u kojima direktni ljudski kontakt može biti ili nebezbedan (poput nuklearnih postrojenja [1] i svemira [2]) ili nedovoljno precizan (robotski asistirana telehirurgija [3]). Kontrola ranih telemanipulacionih sistema bazirala se prvenstveno na vizuelnim povratnim informacijama (eng. *feedback*), pri čemu ljudski operater nije dobijao povratne informacije o interakciji aktuatora sa okolinom, što je obično rezultiralo velikim kognitivnim opterećenjem za njega.

Da bi se nadoknadila ograničenja vizuelnih i auditivnih povratnih informacija, počevši od sredine 1990-ih, razvoj haptičkih interfejsa započeo je džojsticima u industriji igara [4], a nastavio je brzi rast, posebno u smjeru vibrotaktilnog i *feedback*-a sile. Studije o učinku haptičkog *feedback*-a na zadacima manipulacije objektima otkrile su da haptička povratna sprema poboljšava performanse i efikasnost telemanipulacije utičući na smanjenje kontaktnih sila, potrošnje energije, vremena i broja grešaka prilikom izvršenja zadatka [3], [5]–[7]. Međutim, vizuelni senzori (najčešće

različite vrste kamera) u udaljenoj okolini i dalje ostaju nezamjenjiv dio *feedback* sistema [8].

Prevalencija vibrotaktilne stimulacije u odnosu na druge modalitete *feedback*-a postoji i dalje u većini današnjih primjena, uprkos određenim nedostacima. U posljednjih 20 godina realizovani su vibrotaktilni *feedback* sistemi namijenjeni različitim primjenama bilo samostalno [9] ili u kombinaciji s drugim *feedback* modalitetima [10]. Za razliku od vibrotaktilnih, sistemi elektrotaktilnog *feedback*-a su efikasni u pogledu potrošnje energije, jednostavni su za proizvodnju i sposobni su proizvesti senzaciju čiji se parametri mogu pouzdano kontrolisati [11]. Ideja da se povratna informacija obezbjedi pomoću sistema koji putem površinskih elektroda stimuliše kožu strujama malog intenziteta, pojavila se prije više od 40 godina [11].

Takva ideja korištena je u *feedback* sistemima za proteze gornjih udova [12]–[15], za pojačavanje interakcije za korisnike virtuelne realnosti [16], te pri upravljanju robotskom šakom tokom zadataka poput izbjegavanja prepreka i klin-urupu (engl. *peg-in-a-hole*) [17]. Pamungkas i Ward su u svoja tri istraživanja kombinovali elektrotaktilnu stimulaciju sa sistemom za stereo viziju [18], [19] i infra crvenim (engl. *infra-red*, *IR*) sensorima daljine i sensorima sile postavljenim na hvataljku robota [17]. Identifikaciju predmeta pomoću elektrotaktilnog *feedback*-a ispitivalo je nekoliko istraživačkih grupa. Li i saradnici su testirali stopu tačnosti prepoznavanja tri objekta različite težine: lakog, srednje teškog i teškog, koristeći različite šeme kodiranja, uključujući amplitudsku, frekvencijsku i modulaciju širine impulsa [20]. Arakeri je sa svojom grupom pokazao da su ispitanici s povezom preko očiju uspješno naučili da primjene elektrotaktilne senzacije za razlikovanje 27 predmeta različite težine, širine i popustljivosti [21]. Chai i njegov tim su pokazali da ispitanici mogu prepoznati predmete u tri veličine, tri mekoće kao i četiri nivoa sile hvatanja tih predmeta sa relativno visokom stopom tačnosti koristeći prostorno, amplitudsko i mješovito kodiranje [22].

U ovom radu, pokazali smo da elektrotaktilna stimulacija može na intuitivan način pružiti informacije ljudskom operatoru o mekoći i veličini predmeta kog hvata udaljeni aktuator. Ispitanici su se oslanjali isključivo na taktilne senzacije, dok je dotok vizuelnih i auditivnih informacija bio onemogućen. Hvatanje je izvedeno pomoću aktuatora promjenive krutost (engl. *Variable Stiffness Actuator*), QBmove Maker Pro [23], a podaci o položaju i momentu sile hvataljke prikupljenih sa njenih senzora su kodirani lokacijom i učestalošću elektrotaktilne stimulacije na vrhu kažiprsta.

U prikazanoj studiji testirali smo sljedeće hipoteze:

1. Elektrotaktilna stimulacija može proizvesti dovoljan broj različitih taktilnih senzacija tako da pouzdano prenose

Gorana Marković, Kosta Jovanović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: kostaj@etf.bg.ac.rs)

Gorana Marković, Jovana Malešević, Milica Isaković, Miloš Kostić, Matija Štrbac – TecNALIA Serbia Ltd, Deligradska 9/39, 11000 Beograd, Srbija (e-mails: {gorana.markovic} {jovana.malesevic} {milica.isakovic} {milos.kostic} {matija.strbac}@tecnalia.com).

informacije o dvije veličine i tri mekoće predmeta;

2. Prostorna i frekvencijska modulacija su nezavisne, a mješovito prostorno-frekvencijsko kodiranje je intuitivno i može se razlikovati bez međusobnog maskiranja;

3. Visok nivo tačnosti prepoznavanja (iznad 90%) može se postići bez dodatnih vizuelnih ili auditivnih povratnih informacija.

## II. METOD

### A. Postavka sistema

Postavku sistema čine:

1. QBmove maker pro aktuator i hvataljka;
2. Tactility stimulator;
3. Posebno dizajnirana Tactility *multi-pad* elektroda;
4. Personalni laptop računar (Intel Core i7-10510U CPU @ 1.8 GHz, 16 GB RAM) i monitor (dijagonale jednake 60.45 cm).

#### 1) Qbmove maker pro aktuator

QBmove maker pro je bidirekcion, antagonistički aktuator promjenjive krutosti, čija ekvilibrijumska pozicija izlazne osovine zavisi od pozicija dva motora  $q_1$  i  $q_2$  (1). Položaj izlazne osovine ( $x$ ) direktno se mjeri enkoderom, dok se moment sile ( $\tau$ ) procjenjuje iz (2).

$$x_{eq} = \frac{q_1 + q_2}{2}. \quad (1)$$

$$\tau = k_1 * \sinh(a_1 * (x - q_1)) + k_2 * \sinh(a_2 * (x - q_2)). \quad (2)$$

Parametri  $k_1 = 0,0227$  Nm,  $k_2 = 0,0216$ ,  $a_1 = 6,7328$  1/rad i  $a_2 = 6,9602$  1/rad, baš kao i jednačine, dobijeni su iz tehničkog lista [24].

Aktuator komunicira s računarom putem USB komunikacije. Softver s jednostavnim grafičkim korisničkim interfejsom (engl. *Graphical User Interface, GUI*) za skeniranje portova, povezivanje, aktiviranje i podešavanje aktuatora preuzet je s web stranice QB robotics [23]. Hvataljka korištena u ovoj studiji je štampana 3D štampačem i sastoji se iz dva dijela: nepokretnog i pokretnog. Pokretni dio je povezan direktno na osovinu, tako da je apertura hvataljke direktno proporcionalna položaju izlazne osovine.

#### 2) Sistem za elektrotaktilnu stimulaciju

Elektrotaktilni sistem se sastojao od stimulatora i posebno dizajnirane *multi-pad* elektrode za površinsku stimulaciju. Razvojni Tactility stimulator (Tecnalia R&I, San Sebastian, Španija) je strujno kontrolisan stimulator koji generiše simetrične, bifazne impulse čija je impulsna širina u opsegu od 30  $\mu$ s do 500  $\mu$ s (sa korakom od 10  $\mu$ s), frekvencija u opsegu između 1 Hz i 200 Hz (sa korakom od 1 Hz) i amplituda u rasponu od 0,1 mA - 9 mA (sa korakom od 0,1 mA). Elektroda je proizvedena procesom sitoštampe komercijalnim mastilima za biomedicinsku upotrebu na komercijalnoj PET (polietilen tereftalat) podlozi. Provodni sloj napravljen je od srebra (srebro-srebro-hlorid, Ag/AgCl,

proizvođača Henkel Electrodag 6037E SS), sa izolacionim premazom (Henkel Electrodag PF-455B) koji pokriva provodna polja.

Čitav sistem elektrotaktilne stimulacije, zajedno s QBmove aktuatorom i predmetima koji se koriste za hvatanje, prikazan je na Sl. 1. Elektroda i način njenog pozicioniranja na kažiprstu prikazani su na Sl. 2.

### B. Kodiranje feedback-a

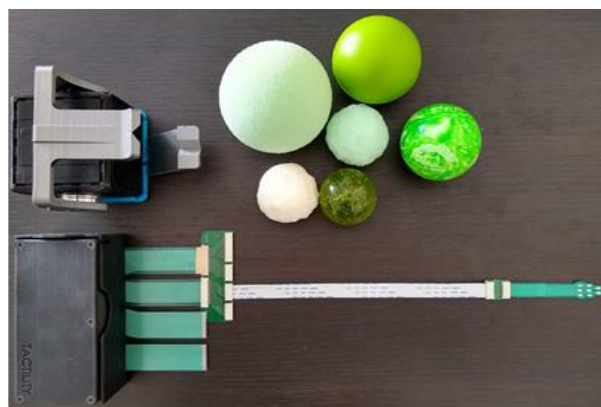
Informacija o mekoći predmeta je prenijeta putem frekvencijske modulacije stimulacije, dok su veličine kodirane prostorno. Prostorno kodiranje odnosi se na upotrebu različitih polja elektrode za izazivanje senzacija na različitim lokacijama, u ovom slučaju na vrha kažiprsta. Za ovaj eksperiment korištena su dva od osam polja elektrode: br. 2 i br. 7 (Sl. 2, lijevi panel). Pored toga, tri nivoa frekvencije su empirijski odabrana: niska = 5 Hz, srednja = 20 Hz i visoka = 50 Hz.

Prilikom prepoznavanja mekoće, maksimalni moment sile postignut tokom hvatanja procjenjen je pomoću (2) i zatim mapiran u jedan od tri nivoa frekvencije tako da najmanja mekoća odgovara najmanjoj frekvenciji. S druge strane, u zavisnosti od izmjerenog položaja izlazne osovine pokretnog dijela hvataljke u trenutku kontakta s objektom pali se određeno polje: br. 2 ako je predmet mali, br. 7 ako je predmet veliki. Granice nivoa momenta sile i pozicije određene su na osnovu pilot mjerenja prilikom hvatanja šest različitih lopti za unaprijed definisanu vrijednost krutosti aktuatora.

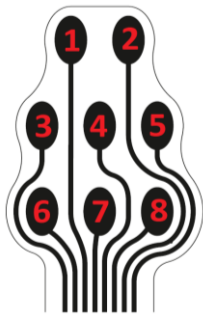
Tabela I rezimira prostornu i frekvencijsku mapu kodiranja.

### C. Protokol

Deset zdravih dobrovoljaca ( $26,1 \pm 3,7$  godina, pol: 6 žena / 4 muškaraca, dominantna ruka: desna 9/lijeva 1) učestvovalo je u tri psihometrijska testa. Ispitanicima je objašnjen protokol i potencijalni rizici, nakon čega su potpisali pristanak za učešće u studiji. Ispitanici su bili smješteni u sjedeći položaj, s podlakticom oslonjenom na ravnu površinu i leđima okrenutim prema osobi koja vrši eksperiment, a samim tim i postavci sistema. Eksperiment je izveden u tihom ambijentu, a ispitanici su nosili izolacione slušalice u slučaju jače buke.



Sl. 1. Stimulator, *multi-pad* elektroda, Qbmove aktuator i objekti korišćeni u eksperimentu. Lopte su prečnika 5,4 cm (velika) i 4 cm (mala).



Sl. 2. Tehnički crtež elektrode (lijevo) i njeno pozicioniranje na vrh kažiprsta (desno).

Osoba koja vrši eksperiment je postavila *multi-pad* elektrodu na kažiprst nedominantne ruke ispitanika i navukla silikonski naprstak preko elektrode (Sl. 2, desno). Silikonski naprstak je korišćen za obezbjeđivanje dobrog kontakta elektrode sa kožom i sprječavanje neželjenog pomjeranja elektrode. Prije tri glavna testa, protokol je uključivao kalibraciju i trening.

Kalibracija je podrazumjevala postupak ručnog podešavanja amplitude stimulusa kako bi se ispod oba polja izazvale jasne, ugodne i lokalizovane senzacije. Podešavanjem jednakih intenziteta senzacije ispod oba korišćena polja izbjegnuto je maskiranje slabijih stimulusa onim jačim. Preostali parametri stimulacije, frekvencija i širina impulsa, bili su konstantni tokom kalibracije intenziteta i postavljeni na 20 Hz, odnosno 400  $\mu$ s, redom.

Trening se sastojao od familijarizacije i učenja sa podsticanjem. Tokom familijarizacije, u posebno pripremljenoj aplikaciji, ispitanik samostalno bira različite kombinacije parametara stimulacije (Tabela I), na taj način se upoznaje sa različitim osjećajima i vježba lokalizaciju osjećaja izazvanih aktiviranjem dva polja i diskriminaciju između tri nivoa frekvencije. Na osnovu samoprocjene ispitanika da je spreman, prelazi se na učenje sa podsticanjem. Učenje sa podsticanjem uključivalo je provjeru identifikacije šest poruka (2 lokacije i 3 frekvencije), dok je ispitanik primao usmene povratne informacije o tačnom odgovoru. Nakon deset uzastopno tačno identifikovanih poruka, ispitanik je smatran spremnim za testove. Trajanje treninga mjereno je za sve ispitanike.

Protokol testova obuhvatao je nekoliko koraka: osoba koja vrši eksperiment prvo stavlja 1 od 6 lopti (Sl. 1) između prstiju hvataljke, a potom pokreće robota putem specijalno dizajniranog LabVIEW (National Instruments, Austin, TX) grafičkog korisničkog interfejsa. Hvataljka se konstantnom brzinom zatvara dok ne dostigne unaprijed definisani položaj i uhvati predmet, a ispitanik prima taktilni *feedback* o veličini i/ili mekoći lopte i daje verbalni odgovor o svojoj interpretaciji primljenih povratnih informacija. Prvi i drugi test obuhvatali su po 10 hvatanja pseudo-nasumično odabranih loptica, dok je zadatak ispitanika bio da da usmeni odgovor o mekoći odnosno veličini lopte koju je robot

TABELA I  
MAPA KODIRANJA SENZORSKIH PODATAKA U PARAMETRE  
ELEKTROTAKTILNE STIMULACIJE

Lopta	Frekvencija [Hz]	Moment sile (Nm)	Aktivno polje	Pozicija izlazne osovine (°)
<i>Mala meka</i>	5	$\tau < 1.6$		$x > 8$
<i>Mala srednje meka</i>	20	$1.6 < \tau < 2.2$		$x > 8$
<i>Mala tvrda</i>	50	$\tau > 2.2$		$x > 8$
<i>Velika meka</i>	5	$\tau < 1.6$		$x < 8$
<i>Velika srednje meka</i>	20	$1.6 < \tau < 2.2$		$x < 8$
<i>Velika tvrda</i>	50	$\tau > 2.2$		$x < 8$

uhvatio. Tokom prvog testa, polje br. 7 uvijek je bilo aktivno nezavisno od veličine predmeta, dok se frekvencija stimulacije mijenjala zavisno od mekoće lopte. Frekvencija stimulacije u drugom testu bila je 20 Hz, nezavisno od mekoće predmeta, dok se aktivno polje mijenjalo zavisno od njegove veličine. Treći test bio je kombinacija prethodna dva, i cilj mu je bio da ispita sposobnost istovremenog prepoznavanja i veličine i mekoće lopte u 12 pseudo-nasumičnih pokušaja. Ostale vrijednosti parametara (amplituda i širina impulsa) ostale su nepromijenjene u sva tri testa.

Nakon završetka eksperimenta, svaki od 10 ispitanika ocijenio je sljedeće tvrdnje na skali od 1 do 10 (1 - uopšte se ne slažem, 10 - u potpunosti se slažem):

Tvrdnja 1: Vjerujem da sam bio dobar u prepoznavanju mekoće (test 1)

Tvrdnja 2: Vjerujem da sam bio dobar u prepoznavanju veličina (test 2);

Tvrdnja 3: Vjerujem da je trening značajno doprinio uspješnosti u testovima.

### III. ANALIZA PODATAKA

Glavna izlazna mjera u svim testovima bila je stopa uspješnosti prepoznavanja (SUP) (%) mekoće (test 1), veličine (test 2) ili obje osobine lopte (test 3). Pored toga, u testu 3 izračunali smo marginalne SUP za dvije osobine. S obzirom na to da je Anderson-Darling test pokazao da podaci nisu normalno raspoređeni, za statističku analizu su korišćeni neparametarski testovi, a rezultati u tekstu su prikazani u formi medijan (interkvartilni opseg - IKO). Wilcoxon-ov test rangova korišćen je za upoređivanje uspješnosti ispitanika prilikom prepoznavanja informacija o osobinama predmeta koje su prenijete pojedinačno i u kombinaciji, odnosno mekoće u testu 1 u odnosu na test 3 i veličine u testu 2 u odnosu na test 3. Prag statističke značajnosti je postavljen na  $p < 0.05$ . Uticaj trajanja treninga na performanse testa ispitan je računanjem korelacije između ove dvije varijable.

### IV. REZULTATI

Sl. 3 prikazuje matrice konfuzije koje slikovito prikazuju rezultate ispitanika prilikom prepoznavanja mekoće lopte (test

1 - gore lijevo), veličine (test 2 - gore desno) i obje osobine u kombinaciji (test 3 - dole). U testu 1, svi ispitanici su svaki put prepoznali tvrdu loptu, dok su rijetko mijenjali srednje meku i meku loptu za onu jedan nivo tvrdu. U testu 2, svi ispitanici su prepoznali malu loptu u svim pokušajima, a jedini izvor greške bilo je pogrešno tumačenje velike lopte kao male u par navrata. U testu 3, ispitanici su češće pogrešno interpretirali mekoću lopte nego njenu veličinu, dok je SUP od 100% evidentna za najrazličitije lopte, tj. veliku tvrdu i malu meku.

Tabela II prikazuje pojedinačne i grupne rezultate po ispitanicima: SUP u tri testa, marginalne SUP prilikom identifikacije mekoće i veličine u testu 3, trajanje treninga i informacije o prethodnom iskustvu ispitanika u električnoj stimulaciji. Ispitanici su mogli prepoznati mekoću u testu 1 i veličinu u testu 2 sa vrijednošću medijane (IKO) SUP jednakom 100 (20)%, odnosno 100 (0)%. Marginalne SUP ove dvije osobine bile su vrlo slične SUP u pojedinačnim testovima: mekoća 96 (25)% i veličina 100 (0)%. Statistička analiza nije pokazala značajne razlike između SUP osobina u pojedinačnim i kombinovanom testu. Prosječno trajanje treninga bilo je ispod 5 minuta i pokazuje umjerenu negativnu korelaciju ( $c = -0,49$ ) sa SUP u testu 3.

Tabela III pokazuje rezultate upitnika. Subjektivno mišljenje o prepoznavanju veličine (Tvrđnja 2) ima veću

ocjenu od subjektivnog mišljenja o prepoznavanju mekoće (Tvrđnja 1).

## V. DISKUSIJA

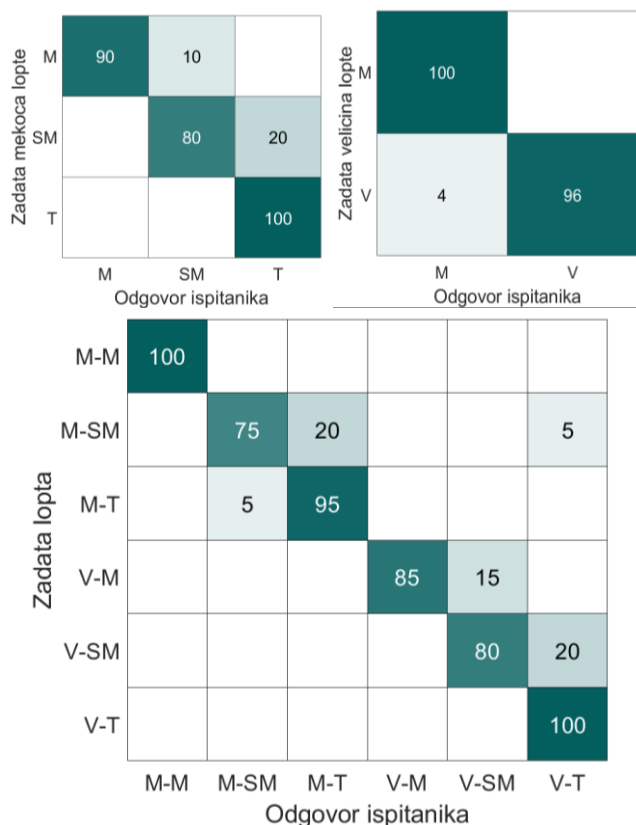
### A. Rezultati testova

Tabela III sugerira da su subjekti bili uspješniji u prepoznavanju veličine, što odgovara prepoznavanju 2 lokacije stimulacije, u odnosu na prepoznavanje mekoće, što odgovara prepoznavanju 3 frekvencije stimulacije. To se može primjetiti upoređivanjem rezultata prvog i drugog testa, ali i na osnovu rezultata trećeg testa u kojem su ispitanici rijetko pogrešno protumačili informaciju o veličini objekta. Marginalna SUP mekoće i marginalna SUP veličine u kombinovanom zadatku u potpunosti su usklađene sa SUP postignutim u pojedinačnim testovima. Statistička analiza pokazala je da ne postoji značajna razlika u SUP u pojedinačnom i kombinovanom zadatku, čime je potvrđena početna hipoteza da se prostorna i frekvencijska modulacija mogu koristiti kao dva nezavisna *feedback* kanala. Prosječna SUP veličine (test 2) od 100 (0)%, bio je očekivan ishod s obzirom da je u prethodnim istraživanjima zabilježena prosječna tačnost od 97% za prostornu diskriminaciju 4 polja [12]. Međutim, budući da su u pomenutom istraživanju ova 4 polja bila locirana oko podlaktice s razmakom između polja jednakim ~ 4,8 cm, a u našoj studiji polja su smještena na vrhovima prstiju s razmakom od samo ~1,5 cm, ovi rezultati ohrabruju i sugeriraju da bi i više lokacija stimulacije moglo pouzdano da se prepozna na vrhu prsta.

U zadatku prepoznavanja mekoće, ispitanici su također postigli visoku SUP od 100 (20)%. Ovaj rezultat je u skladu s prethodnim rezultatima [12] gdje su autori pokazali da se 3 nivoa frekvencije (4 Hz, 27 Hz i 100 Hz) mogu prepoznati sa SUP jednakom 99% nakon kratkog treninga. Na gornjem, lijevom panelu na Sl. 3 može se primjetiti da je najniža SUP od 80% postignuta prilikom prepoznavanja srednje meke lopte, koja je pogrešno prepoznata kao tvrda, dok su s druge strane svi ispitanici tačno prepoznali tvrdu loptu. U kombinovanom testu, SUP je bila najniža prilikom identifikacije srednje meke lopte, i velike (80%) i male (75%). Matrica konfuzije (Sl. 3, dole) pokazuje da su ispitanici često mijenjali srednje meku loptu za tvrdu. Štaviše, velika, meka lopta je relativno često interpretirana kao velika, srednje meka lopta. Generalno se više grešaka javljalo kada su se u testu koristile velike lopte.

### B. Individualni rezultati i uticaj dužine trajanja treninga

Četiri od deset ispitanika imalo je SUP jednaku 100% u sva tri testa, a prosječnu SUP jednaku ili veću od 90% postiglo je 7 ispitanika u testu 1, 8 ispitanika u testu 2 i 6 ispitanika u testu 3, koji se smatra najtežim. Primjetno je da je svaki ispitanik koji je griješio u prvom testu, gotovo sigurno postigao nižu SUP u trećem testu, što opet potvrđuje da je prepoznavanje mekoće bio izazovniji zadatak. Uzimajući u obzir subjektivni utisak, može se primjetiti da su ispitanici mogli dobro procjeniti sopstvene performanse u testovima (Tvrđnje 1 i 2, Tabela III). Na primjer, ISP8 je ocjenio



Sl. 3. Matrice konfuzije sa SUP (%) mekoće (gore, lijevo), veličine (gore, desno) i obje osobine zajedno (dole). Mekoća: 'M' = meka, 'SM' = srednje meka, 'T' = tvrda; Veličina: 'M' = mala, 'V' = velika; Kombinovano: 'M-M' = mala meka, 'M-SM' = mala srednje meka, 'M-T' = mala tvrda, 'V-M' = velika meka, 'V-SM' = velika srednje meka, 'V-T' = velika tvrda.

TABELA II

SUP (%) U TRI TESTA, MARGINALNA SUP U TESTU 3, TRAJANJE TRENINGA I INFORMACIJE O PRETHODNOM ISKUSTVU 10 ISPITANIKA. USREDNJENE VRIJEDNOSTI SU PRIKAZANE KAO MEDIJANA (INTERKVARTILNI OPSEG). PRETHODNO ISKUSTVO JE OZNAČENO KAO: 'F' = ISPITANICI SA DUGOGODIŠNJIM ISKUSTVOM U ELEKTROTAKTILNOM *FEEDBACK*-U; 'S' = ISPITANICI SA ISKUSTVOM U NEKOM VIDU ELEKTRIČNE STIMULACIJE; 'B' = ISPITANICI BEZ IKAKVOG ISKUSTVA

Isпитаници	Test 1 – mekoća [%]	Test 2 – veličina [%]	Test 3 – oboje [%]	Test 3 – marginalna mekoća [%]	Test 3 – marginalna veličina [%]	Trajanje familiarizacije [min]	Trajanje učenja sa podsticanjem [min]	Prethodno iskustvo (F/S/B)
ISP1	100	90	100	100	100	1.4	2.9	S
ISP2	100	100	83.3	83.3	91.7	2.0	1.4	S
ISP3	50	100	75	75	100	2.4	1.5	S
ISP4	100	100	100	100	100	3.4	2.3	F
ISP5	100	100	100	100	100	1.5	1.9	F
ISP6	100	90	75	75	100	1.9	5.2	S
ISP7	100	100	100	100	100	1.1	1.2	F
ISP8	60	100	66.7	66.7	100	4.9	4.6	B
ISP9	100	100	100	100	100	6.3	1.1	B
ISP10	80	100	91.7	91.7	100	2.4	2.5	S
Mediana (IKO)	100 (20)	100 (0)	96 (25)	96 (25)	100 (0)	2.2 (1.9)	2.1 (1.5)	

Tvrđnju 1 ocjenom 7 i postigao SUP mekoće jednaku 60% i 66,7% u testu 1 i testu 3, respektivno. To ukazuje na to da su ispitanici bili svjesni u kojoj mjeri su se elektrotaktilne informacije dobro razumjele, a kada su bile nejasne i nisu bili sigurni u svoj odgovor.

Nemoguće je izvući jasne zaključke o direktnom odnosu između dužine trajanja treninga i pojedinačne SUP postignute u eksperimentu. Neki ispitanici koji su duže trenirali postigli su odlične rezultate, dok su se neki izjednačili ili bili gori od subjekata koji su dosta kraće trenirali. Međutim, primjetno je da su ispitanici bez prethodnog iskustva u bilo kojoj vrsti električne stimulacije (ISP8 i ISP9) imali najduže trajanje treninga (Tabela II). Štaviše, ispitanici sa dugogodišnjim iskustvom (ISP4, ISP5 i ISP7) uglavnom su se mogli pripremiti za test nakon kratkog treninga (do 5 minuta). Rezultati upitnika pokazuju da su i iskusni i neiskusni subjekti istakli važnost treninga (Tvrđnja 3, Tabela III).

Uzimajući u obzir da su sva tri ispitanika sa dugogodišnjim iskustvom imala ukupnu SUP jednaku 100%, možemo zaključiti da rezultati u velikoj mjeri zavise od prethodnog iskustvu ispitanika u elektrotaktilnom *feedback*-u, što je u skladu s našim prethodnim istraživanjem koje je pokazalo dugoročni efekat učenja [25]. Međutim, treba skrenuti pažnju na to da je ISP8 postigao identičan SUP u prepoznavanju

veličine lopte bez ikakvog prethodnog iskustva, što ukazuje na to da su poruke bile intuitivne i da ih je lako bilo naučiti nakon kratkog treninga (manje od 10 minuta). S druge strane, bilo je i ispitanika koji, uprkos protokolu koji je obuhvatao prenos samo šest različitih poruka i činjenici su imali neograničeno vrijeme za trening, nisu mogli postići visoku SUP. To se može pripisati drugim faktorima poput taktike učenja ispitanika, brzine učenja, mentalne koncentracije, stope navikavanja, fizičkog stanja (poput umora) i sl. koji mogu da igraju važnu ulogu. U literaturi [12], [25] postoje naznake da se SUP stimulusa povećava tokom treninga, ali da bi se taj i slični fenomeni ispitali, trebalo bi provesti dalje eksperimente koji bi uključili veći broj ponavljanja, duži i trening s više pokušaja.

## VI. ZAKLJUČAK

Cilj ove studije bio je ispitati mogućnost pružanja povratnih informacija sa telemanipulisanog aktuatora promjenjive krutosti o veličini i mekoći uhvaćenog predmeta putem elektrotaktilnog sistema za stimulaciju na vrhu prsta. U tu svrhu izvedeni su eksperimenti na Qbmove Maker Pro aktuatoru, dok je elektrotaktilni *feedback* obezbjeđen zahvaljujući programibilnom stimulatoru i specijalno dizajniranoj, fleksibilnoj, površinskoj, *multi-pad* elektrodi.

Aktuator promjenjive krutosti omogućio je izvođenje eksperimenta s različitim osobinama predmeta. Uz odgovarajuće podešavanje krutosti, mogla bi se postići osjetljivost na meke ili tvrde materijale i u oba slučaja operatoru pružiti raspoznatljiva povratna informacija. Veličina i mekoća predmeta procjenjivani su na osnovu položaja hvataljke pri kontaktu sa objektom, i podataka o momentu sile izmjerenim senzorima unutar aktuatora, a kodirani su prostornom (tj. promjenom aktivnog polja elektrode) i frekvencijskom modulacijom.

Testovi su pokazali da se tri nivoa frekvencije stimulacije (koja predstavljaju mekoću objekta) i dvije lokacije stimulusa (koje predstavljaju veličinu objekta) mogu prepoznati sa prosječnim SUP jednakom 100 (20)% i 100 (0)%,

TABELA III

REZULTATI UPITNIKA O POSTIGNUTIM PERFORMANSAMA PRILIKOM PREPOZNAVANJA MEKOĆE I VELIČINE (TVRDNJA 1 I TVRDNJA 2) I VAŽNOSTI TRENINGA (TVRDNJA 3)

	Tvrđnja 1	Tvrđnja 2	Tvrđnja 3
ISP1	10	8	10
ISP2	8	10	10
ISP3	6	10	9
ISP4	10	9	8
ISP5	10	10	10
ISP6	8	10	9
ISP7	9	9	9
ISP8	7	10	9
ISP9	10	10	8
ISP10	7	9	7

respektivno. U kombinovanom frekvencijskom i prostornom kodiranju, prosječna SUP bila je 96 (25)%, i ne pokazuje statistički značajne razlike sa SUP osobina objekata u pojedinačnim testovima (test 1 i test 2). Preliminarni rezultati predstavljeni u ovom radu ohrabruju dalja istraživanja primjene elektrotaktilnog *feedback*-a u robotskim sistemima za telemanipulaciju i drugim scenarijima od interesa.

#### ZAHVALNICA

Rad u ovoj studiji izveden je u okviru projekta TACTILITY, koji je finansiran od strane Evropske Unije H2020-ICT-2018-2020/H2020-ICT-2018-3 prema sporazumu o dodjeli bespovratnih sredstava broj 856718. Ovom prilikom, autori bi se željeli zahvaliti svim partnerima u projektu na radu koji nam je omogućio predstavljeno istraživanje. Zahvaljujemo se svim zdravim volonterima koji su učestvovali u našoj studiji.

#### LITERATURA

- [1] J. Van Oosterhout, D. A. Abbink, J. F. Koning, H. Boessenkool, J. G. W. Wildenbeest, and C. J. M. Heemskerk, "Haptic shared control improves hot cell remote handling despite controller inaccuracies," *Fusion Eng. Des.*, vol. 88, no. 9–10, pp. 2119–2122, 2013.
- [2] T. B. Sheridan, "Space teleoperation through time delay: Review and prognosis," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 9, no. 5, pp. 592–606, 1993.
- [3] C.-H. King *et al.*, "Tactile feedback induces reduced grasping force in robot-assisted surgery," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 2, no. 2, pp. 103–110, 2009.
- [4] M. Ouhyoung, W.-N. Tsai, M.-C. Tsai, J.-R. Wu, C.-H. Huang, and T.-J. Yang, "A low-cost force feedback joystick and its use in PC video games," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 41, no. 3, pp. 787–794, 1995.
- [5] Y.-Y. Liao, L.-R. Chou, T.-J. Horng, Y.-Y. Luo, K.-Y. Young, and S.-F. Su, "Force reflection and manipulation for a VR-based telerobotic system," *Proc.-Nat. Sci. Coun. Repub. China Part Phys. Sci. Eng.*, vol. 24, no. 5, pp. 382–389, 2000.
- [6] M. Zhou, S. Tse, A. Derevianko, D. B. Jones, S. D. Schwaizberg, and C. G. L. Cao, "Effect of haptic feedback in laparoscopic surgery skill acquisition," *Surg. Endosc.*, vol. 26, no. 4, pp. 1128–1134, 2012.
- [7] G. Tholey, J. P. Desai, and A. E. Castellanos, "Force feedback plays a significant role in minimally invasive surgery: results and analysis," *Ann. Surg.*, vol. 241, no. 1, p. 102, 2005.
- [8] C. R. Wagner, R. D. Howe, and N. Stylopoulos, "The role of force feedback in surgery: analysis of blunt dissection," in *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, International Symposium on*, 2002, pp. 73–73.
- [9] H. Kim, C. Seo, J. Lee, J. Ryu, S. Yu, and S. Lee, "Vibrotactile display for driving safety information," in *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2006, pp. 573–577.
- [10] I. Zubrycki and G. Granosik, "Novel haptic device using jamming principle for providing kinaesthetic feedback in glove-based control interface," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 85, no. 3–4, pp. 413–429, 2017.
- [11] A. Y. Szeto and F. A. Saunders, "Electrocuteaneous stimulation for sensory communication in rehabilitation engineering," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, no. 4, pp. 300–308, 1982.
- [12] M. Štrbac *et al.*, "Integrated and flexible multichannel interface for electrotactile stimulation," *J. Neural Eng.*, vol. 13, no. 4, p. 046014, 2016.
- [13] M. Isaković *et al.*, "Electrotactile feedback improves performance and facilitates learning in the routine grasping task," *Eur. J. Transl. Myol.*, vol. 26, no. 3, 2016.
- [14] S. Dosen *et al.*, "Multichannel electrotactile feedback with spatial and mixed coding for closed-loop control of grasping force in hand prostheses," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 183–195, 2016.
- [15] G. K. Patel, S. Dosen, C. Castellini, and D. Farina, "Multichannel electrotactile feedback for simultaneous and proportional myoelectric control," *J. Neural Eng.*, vol. 13, no. 5, p. 056015, Oct. 2016, doi: 10.1088/1741-2560/13/5/056015.
- [16] D. S. Pamungkas and K. Ward, "Electro-Tactile Feedback System to Enhance Virtual Reality Experience," *Int. J. Comput. Theory Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 465–470, Dec. 2016, doi: 10.7763/IJCTE.2016.V8.1090.
- [17] D. S. Pamungkas and K. Ward, "Tele-operation of a robot arm with electro tactile feedback," in *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Wollongong, NSW, Jul. 2013, pp. 704–709. doi: 10.1109/AIM.2013.6584175.
- [18] D. S. Pamungkas and K. Ward, "Electro-tactile feedback system for achieving embodiment in a tele-operated robot," in *2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, Singapore, Dec. 2014, pp. 1706–1711. doi: 10.1109/ICARCV.2014.7064573.
- [19] D. Pamungkas and K. Ward, "Immersive teleoperation of a robot arm using electro-tactile feedback," in *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, Queenstown, New Zealand, Feb. 2015, pp. 300–305. doi: 10.1109/ICARA.2015.7081164.
- [20] K. Li, P. Boyd, Y. Zhou, Z. Ju, and H. Liu, "Electrotactile Feedback in a Virtual Hand Rehabilitation Platform: Evaluation and Implementation," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 1556–1565, Oct. 2019, doi: 10.1109/TASE.2018.2882465.
- [21] T. J. Arakeri, B. A. Hasse, and A. J. Fuglevand, "Object discrimination using electrotactile feedback," *J. Neural Eng.*, vol. 15, no. 4, p. 046007, Aug. 2018, doi: 10.1088/1741-2552/aabc9a.
- [22] G. Chai, J. Briand, S. Su, X. Sheng, and X. Zhu, "Electrotactile Feedback with Spatial and Mixed Coding for Object Identification and Closed-loop Control of Grasping Force in Myoelectric Prostheses," in *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Berlin, Germany, Jul. 2019, pp. 1805–1808. doi: 10.1109/EMBC.2019.8856508.
- [23] "qrobotics: robotics and automation." <https://qrobotics.com/> (accessed Feb. 02, 2021).
- [24] "45c5a1\_792590e00b134129b2b6363a1ea7de45.pdf." Accessed: Feb. 02, 2021. [Online]. Available: [https://www.qrobotics.com/wp-content/uploads/2016/03/45c5a1\\_792590e00b134129b2b6363a1ea7de45.pdf](https://www.qrobotics.com/wp-content/uploads/2016/03/45c5a1_792590e00b134129b2b6363a1ea7de45.pdf)
- [25] M. Štrbac *et al.*, "Short- and Long-Term Learning of Feedforward Control of a Myoelectric Prosthesis with Sensory Feedback by Amputees," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 25, no. 11, pp. 2133–2145, Nov. 2017, doi: 10.1109/TNSRE.2017.2712287.

#### ABSTRACT

The major precondition to take full advantage of teleoperation systems is a bidirectional exchange of haptic information between an operator and the remote environment, enabling the operator to perceive collisions, contact forces, weight, object shapes, surface textures, etc. To address some of these requirements, we propose the use of electrotactile stimulation with spatial and frequency coding of information. The envisioned system is comprised of a remote compliant robot actuator, stimulator unit and a surface multi-pad electrode that is placed on the subject's index fingertip. Unlike similar haptic feedback setups, in our study the subjects relied exclusively on haptic feedback, without visual or auditory cues. Experimental results showed that tactile stimulation can serve as feedback regarding the softness (90% average recognition rate of 3 softness levels) and the size (98% average recognition rate of 2 sizes) of the object grasped by a remote actuator.

#### **Electrotactile feedback on object properties manipulated by a compliant robotic actuator**

Gorana Marković, Jovana Malešević, Milica Isaković,  
Miloš Kostić, Matija Štrbac, Kosta Jovanović