

FREKVENCIJSKO KODOVANJE VIBROTAKTILNE POVRATNE SPREGE**FREQUENCY CODING OF VIBROTACTILE FEEDBACK**Jelena Bulatović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – RAČUNARSTVO I AUTOMATIKA**

Kratak sadržaj – U ovom radu objašnjen je značaj haptičke povratne sprege zasnovane na vibrotaktilnoj senzornoj supstituciji kao i princip njenog funkcionisanja. Urađen je eksperiment sa 10 ispitanika koji su imali zadatak da nauče da razlikuju osam nivoa aktivacije vibromotora, postavljenih na podlakticu ispitanika. Prije početka eksperimenta, nakon serije pilot testova, definisana je frekvencijska šema kodiranja nivoa za aktivaciju vibromotora. Eksperiment se sastojao od tri faze: faze upoznavanja, faze učenja i test faze. Nakon test faze analizirana je uspjehnost ispitanika u razlikovanju nivoa u zavisnosti od dobijenih vrijednosti mjera kvaliteta.

Gljučne reči: Haptički interfejs, Vibrotaktilna povratna sprega, Vibromotori

Abstract – This paper explains the importance of haptic feedback based on vibrotactile sensory substitution as well as the principle of its functioning. An experiment was performed with 10 subjects whose task was to learn to distinguish eight levels of vibromotor activation, which were placed on the subject's forearms. Before the start of the experiment, after series of pilot tests, a frequency coding scheme for vibromotor activation was defined. The experiment consisted of three phases: the introduction phase, the learning phase and the test phase. After the test phase, the success of the subjects in discriminating levels of activation of vibromotors was analyzed.

Keywords: Haptic Interface, Vibrotactile Feedback, Vibromotors

1 UVOD

Čulo dodira je jedno od najinformativnijih čula koja čovjek posjeduje [1]. Dodir može da se definiše kao senzacija koja izazva mehaničke, termičke, hemijske ili električne stimulse [2].

Postoje situacije kada čovjek nije u mogućnosti da putem čula dobije dovoljno informacija iz okoline, na primjer, u slučaju upravljanja na daljinu, amputacije dijela tijela, itd. Tada je potrebno obezbijediti dodatne načine pomoću kojih se ostvaruje prenos povratnih informacija iz čovjekove okoline do čovjeka. To je moguće ostvariti uz pomoć haptike, koja omogućava korisniku interakciju sa virtuelnim okruženjem ili sistemom kojim se upravlja daljinski. Generalno govoreći, pojam „haptika“ se odnosi na čulo dodira u dvostrukom smislu: na osjećaj dodira na koži i na kinestetički dodir.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Nikola Jorgovanović, red.prof.

Senzacije kinestetičkog dodira se javljaju unutar mišića i tetiva i čovjeku omogućavaju da stekne osjećaj o položaju udova u prostoru.

Haptički interfejs se sastoji od prikaza virtuelnog ili udaljenog okruženja u realnom vremenu i manipulatora koji služi kao interfejs između ljudskog operatera i simulacije. Korisnik pravi pokrete unutar virtuelnog ili udaljenog okruženja pomjeranjem robotskog uređaja. Haptička povratna sprega, koja je u osnovi povratna informacija sile ili dodira u interfejsu čovjek-mašina, omogućava računarskim simulacijama različitih zadataka da korisniku prenose realne, opipljive senzacije, a objektima koji se obično vizuelno simuliraju da poprime stvarna fizička svojstva, poput mase, tvrdoće i teksture. Uključivanjem haptičnih povratnih informacija u virtuelno ili udaljeno okruženje, korisnici imaju mogućnost da intereaguju sa objektima umjesto da samo vide njihovu predstavu u prostoru na monitoru.

Mogućnosti koje pruža haptika od velikog značaja je za korisnike simulatora za obuku u hirurškim procedurama, radu na kontrolnoj tabli ili u neprijateljskom radnom okruženju [3]. Haptički interfejsi se mogu koristiti i za pružanje povratne informacije o sili tokom izvršavanja zadataka na daljinu (poznatih kao teleoperacija) kao što su telesurgija ili uklanjanje opasnog otpada. Veliku primjenu haptika ima i u protetici – usljed amputacije uda protetička zamjena mora da izbalansira složene senzorske sa spretnim motornim funkcijama koje ruka treba da obavlja i istovremeno da bude biološki integrisana u ljudskom tijelu u cilju što boljeg prihvatanja od strane korisnika. Ovako širok spektar primjene haptičke povratne sprege govori od njenim prednostima i potrebi za daljim razvojem i napretkom u toj oblasti.

U eksperimentu opisanom u radu [4] 18 zdravih ispitanika upravljalo je virtuelnim objektom uz pomoć vizuelne i/ili vibrotaktilne povratne sprege. Informaciju putem vibracije dobijali su na prstu, ruci, vratu ili stopalu. Svi ispitanici su imali poboljšane performanse prilikom upravljanja uz pomoć vibrotaktilne povratne sprege. Njihovi rezultati pokazali su i snažan efekat učenja tokom vremena, a kako je proces učenja napredovao, tako su i pozicije stimulusa manje uticale na uspjehnost upravljanja, što implicira na važnost adekvatne obuke pri korišćenju vibrotaktilne povratne sprege.

Ispitivanje performansi 10 amputiraca pri virtuelnom hvatanju objekata uz pruženu povratnu informaciju o otvorenosti šake i sili hvata opisano je u radu [5]. Njihov zadatak bio je da virtuelnom rukom uhvate objekat prikazan na monitoru računara uz podešavanje otvorenosti šake i sile hvata pomoću kompjuterskog miša. Procenat dobro primijenjenih nivoa otvorenosti šake i sile hvata pokazuje

da korištenje vibrotaktilne povratne sprege dovodi do poboljšanja u kontroli virtualne ruke u odnosu na kontrolu bez povratne sprege, dok su još bolji rezultati dobijeni dodavanjem i vizuelne povratne sprege.

U [6] opisana su dva eksperimenta: prvi se odnosio na prostornu diskriminaciju nadražaja, a drugi na opažanje različitih intenziteta stimulacije. Kombinacijom tri intenziteta i tri trajanja vibrotaktilnog nadražaja dobijeno je devet različitih stimulusa koji su testirani pomoću šest vibromotora raspoređenih na četiri različita načina. 11 zdravih ispitanika učestvovalo je u dva gorenavedena eksperimenta, dok je sedam amputiraca učestvovalo samo u zadatku prostorne diskriminacije.

U prvom eksperimentu kružno postavljene vibromotore oko nadlaktice sa proporcionalnim razmakom dali su najbolje rezultate gdje je tačnost dostizala 75%. Drugi eksperiment je pokazao da na percepciju intenziteta vibracije utiče kako intenzitet, tako i trajanje aktivacije vibromotora. Sedam amputiraca je postiglo rezultate sa do 92% tačnosti sa kružno-proporcionalnom postavkom vibromotora.

2 PRINCIPI HAPTIČKE PERCEPCIJE

Haptički receptori obuhvataju tri nezavisna modaliteta: pritisak/dodir (mehano-recepcija), toplota i hladnoća (termorecepcija) i bol (nocicepcija) [7]. Kako su mehano-receptori odgovorni za taktilni osećaj pritiska/ dodira koji je od ključnog značaja u primjeni haptičke povratne sprege, u nastavku rada fokus će biti na modalitetu pritiska/dodira.

Mehano-recepcija obuhvata četiri različite senzacije: osjećaj pritiska, dodira, vibracija i golicanja. Raspodjela ovih receptora nije ravnomjerna po tijelu. Koža koja nije prekrivena dlakama ima pet vrsta receptora: slobodne receptore (ili nervne završetke), Majsnierova tjelašca, Merkelove diskove, Pačnijeva i Ruffinijeva tjelašca. Pored ovih receptora, dlakava koža ima plexus korjena dlake (ili folikul) koji detektuje kretanje na površini kože. Sistemi pomoću kojih se ostvaruje senzorna povratna sprega mogu da se podijele u tri kategorije: sistemi sa povratnom spregom zasnovanoj na senzornoj supstituciji, sistemi sa povratnom spregom sa podudarnim modalitetom stimulusa i na sisteme sa povratnom spregom zasnovane na somatotopskom podudaranju.

2.1 Povratna sprega zasnovana na senzornoj supstituciji

Senzorna supstitucija je metod koji omogućuje da informacije iz spoljašnje sredine stignu do tijela korisnika kroz senzorne kanale koji nisu predviđeni za taj konkretan nadražaj (na primjer, zamjena čula dodira čulom sluha) ili putem istih čulnih kanala ali kada nadražaj stigne u drugom obliku (na primjer, zamjena pritiska vibracijama) [8].

Većina sistema za pružanje povratne informacije koriste baš ovu ideju, a tehnike koje prevladavaju su vibrotaktilna i elektrotaktilna supstitucija koja koristi ili mehaničke vibracije ili električnu struju na koži u cilju kodiranja informacija iz spoljašnje sredine.

2.1.1 Vibrotaktilna senzorna supstitucija

Vibrotaktilna stimulacija izaziva se mehaničkim vibracijama frekvencije između 10 i 500 Hz [8]. Dva glavna parametra ovog stimulusa su amplituda i

frekvencija vibracija, ali i trajanje i oblik impulsa, kao i faktor ispune. Podešavanjem ovih parametara, moguće je kodirati različite vrste informacija [9][10]. Doživljaj ovih nadražaja je subjektivan, a osim od gorenavedenih parametara, zavisi i od dijela tijela na kom se stimuliše koža (od čega zavisi debljina kože, prekrivenost dlakama, blizina kostiju, itd.).

Vibrotaktilna povratna sprega se često koristi da prenese informaciju u toku pokreta koji podrazumijevaju hvatanje objekta. Jedan od načina upotrebe je, na primjer, kada vibromotor proizvodi kontinualne ili diskretne vibracije u trenutku kada proteza ruke dođe u kontakt sa objektom [11–13]. Zdravi ispitanici se obično koriste u procesu evaluacije efikasnosti vibrotaktilnih sistema. Manipuliše se parametrima kao što su amplituda [13] ili frekvencija nadražaja [12][13] da bi se kodirali različiti nivoi sile hvata.

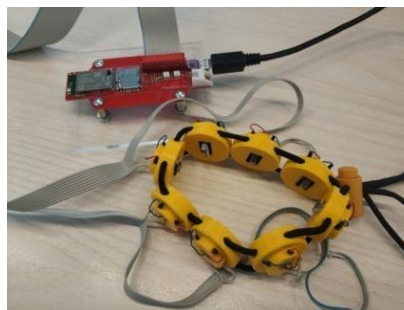
3 METOD

Cilj istraživanja opisanog u ovom radu jeste da se pronađe adekvatan način na koji će povratne informacije u sklopu haptičkog interfejsa biti saopštene njegovom korisniku. Ideja je da se koriste četiri vibromotora koja će biti aktivirana prema različitim šemama frekvencijskog kodiranja tako da korisnik sa što većom sigurnošću može da interpretira različite informacije iz spoljašnje sredine. Analiza podataka prikupljenih tokom ovog eksperimenta treba da odgovori na pitanje da li je ispitanik u stanju da razlikuje osam različitih nivoa aktivacije vibromotora i ako jeste, kolike su mjere njegove uspješnosti u obavljanju ovog zadatka.

3.1 Eksperimentalno okruženje

U cilju izvođenja eksperimenta korišten je personalni računar, vibromotore i drajverska pločica.

Vibromotore su ugrađeni u narukvicu prikazanoj na Slici 1, koja se postavlja na podlakticu ispitanika. U narukvicu je ugrađeno osam vibromotora, ali su za potrebe ovog ispitivanja aktivirani jedan ili četiri, u zavisnosti od cjeline eksperimenta. Povezani su sa drajverskom pločicom, razvijenom na Fakultetu tehničkih nauka, koja je pomoću USB kabla povezana sa PC računarom. Prilikom izrade eksperimentalnog okruženja za personalni računar korišten je programski paket MATLAB (verzija R2018a, MathWorks, USA).



Slika 1. Narukvica sa vibromotorima i drajverska pločica

3.2 Aplikacija za izvođenje eksperimenta

Aplikacija za izvođenje eksperimenta izrađena je u programskom paketu MATLAB i sastoji se iz grafičkog korisničkog interfejsa (GUI) koji je kreiran u okviru GUIDE specijalizovanog proširenja programskog paketa

Matlab. Čine ga osnovna i nekoliko pomoćnih formi koje pružaju dodatna podešavanja. Sam interfejs je krajnje jednostavan, a korisniku prije svega omogućava intuitivno vođenje eksperimenta. Aplikacija daje korisniku mogućnost podešavanja parametara stimulacije, jednostavno praćenje eksperimenta i što je najvažnije, strukturirano čuvanje svih prikupljenih podataka.

3.3 Podešavanje parametara stimulacije

Prije početka samog eksperimenta bilo je potrebno odrediti parametre vibrotaktilne stimulacije, odnosno kombinovanjem različitih intenziteta i trajanja stimulacije kreirati šemu kodiranja koja je dovoljno intuitivna za korisnika tako da može da razlikuje osam različitih nivoa stimulacije. Važno je napomenuti da se u ovom eksperimentu termin „nivo“ ne odnosi isključivo na nivo intenziteta stimulacije, već i na dužinu periode sa kojom će se aktivni period ponavljati u toku ukupnog trajanja stimulacije. Nakon serije pilot testova i isprobavanja različitih vrijednosti traženih parametara, određeno je da ukupno trajanje stimulacije bude 1600 ms u toku kojih se vibromotori aktiviraju periodično, sa aktivnim periodom stimulacije od 50 ms. Dužina periode razlikuje se u zavisnosti od nivoa stimulacije i dobijena je dijeljenjem opsega od 50-400 ms na osam dijelova. Smanjenjem periode stimulacije, odnosno povećanjem frekvencije kojom se stimulus pojavljuje, stiže se subjektivan osjećaj da stimulacija dobija sve veći intenzitet. Podešavanjem intenziteta tako da se on postepeno smanjuje sa porastom broja perioda može se postići da se jačina vibracija osjeti približno jednako na svim nivoima. Kada je frekvencija pojavljivanja stimulusa najmanja, intenzitet stimulacije je podešen da bude najveći, odnosno 100% od maksimalne vrijednosti simulacije i to odgovara prvom nivou aktivacije. Isprobavanjem različitih intenziteta utvrđeno je da, kada je frekvencija pojavljivanja stimulusa najveća, ima smisla smanjiti intenzitet aktivacije na 50% od maksimalne vrijednosti stimulacije – to će odgovarati posljednjem, odnosno osmom nivou aktivacije. Dakle, intenziteti izraženi u procentima u odnosu na maksimalnu vrijednost stimulacije od prvog do osmog nivoa dobijeni su linearnom podjelom opsega od 50-100 na osam vrijednosti.

3.4 Eksperimentalni protokol

Eksperiment je podijeljen u dvije cjeline koje obuhvataju tri faze eksperimenta: fazu upoznavanja, fazu učenja i test fazu. Dvije cjeline eksperimenta se odvijaju gotovo identično, jedina razlika je to što prva cjelina podrazumijeva stimulaciju pomoću jednog vibromotora dok se u drugoj aktiviraju sva četiri.

1.1.1 Faza upoznavanja

Prva faza jeste upoznavanje sa okruženjem kao i osjećajem koji različiti nivoi aktivacije vibromotora izazivaju kod ispitanika. Nakon unosa gorenavedenih parametara stimulacije, ispitanik se proizvoljnim pritiskanjem na dugmad koja su obilježena brojevima od jedan do osam, upoznaje sa načinima aktivacije vibromotora. Na fazu učenja se prelazi kada ispitanik procijeni da je sposoban da razlikuje osam različitih nivoa aktivacije vibromotora.

1.1.2 Faza učenja

U fazi učenja, vibromotori se aktiviraju različitim nivoima nasumičnim redom, ali tako da se svaki nivo aktivira bar po tri puta. Ispitanik ima zadatak da nakon stimulacije pogodi vrijednost nivoa aktivacije vibromotora, a nakon odabira odgovora prikazuje mu se stvarna vrijednost nivoa aktivacije. Na taj način, ispitaniku je omogućen proces učenja.

1.1.3 Test faza

Test faza se odvija na sličan način kao i faza učenja s tim da se, nakon datog odgovora, ispitaniku ne daje povratna informacija o stvarnoj vrijednosti nivoa aktivacije vibromotora. Nakon 25 stimulacija, test faza je završena, a pretpostavljene i stvarne vrijednosti se čuvaju u .mat fajlu.

1.1.4 Ispitanici

U eksperimentu je učestvovalo 10 ispitanika, sedam žena i tri muškarca, starosti 29 ± 11 (srednja vrijednost \pm standardna devijacija). Svi ispitanici su potpisali pismenu saglasnost za učestvovanje u eksperimentu..

4 REZULTATI

U toku eksperimenta prikupljeni su podaci o pravim i pretpostavljenim vrijednostima nivoa aktivacije vibromotora. Od prikupljenih podataka formirane su matrice konfuzije na osnovu kojih su dobijene mjere uspješnosti ispitanika u prepoznavanju. Zbog ograničenosti obima ovog rada, biće prikazani samo rezultati dobijeni iz druge cjeline eksperimenta, pri aktivaciji sva četiri vibromotora, gdje su ispitanici ostvarili bolje rezultate u odnosu na prvu cjelinu eksperimenta. Mjere uspješnosti ispitanika u prepoznavanju nivoa aktivacije date su u Tabeli 1. Mjere uspješnosti ispitanika posmatrane po nivoima u toku druge cjeline eksperimenta prikazane su u Tabeli 2.

Tabela 1: Mjere uspješnosti ispitanika u prepoznavanju nivoa u toku druge cjeline eksperimenta

Ispitanik	Osjetljivost	Specifičnost	Tačnost	Preciznost
1	73 %	96 %	93 %	75 %
2	53 %	93 %	88 %	55 %
3	79 %	97 %	95 %	85 %
4	50 %	93 %	87 %	55 %
5	73 %	96 %	93 %	75 %
6	96 %	99 %	99 %	97 %
7	94 %	99 %	98 %	95 %
8	84 %	98 %	96 %	87 %
9	71 %	96 %	93 %	73 %
10	46 %	93 %	87 %	43 %
Proječna vrijednost	72 %	96 %	93 %	71 %

Tabela 2: Mjere uspješnosti ispitanika posmatrane po nivoima u toku druge cjeline eksperimenta

Nivoi	Osjetljivost	Specifičnost	Tačnost	Preciznost
1	94 %	99%	98 %	91 %
2	87 %	98 %	96 %	84 %
3	77 %	96 %	94 %	74 %
4	65 %	95 %	91 %	65 %
5	43 %	95 %	88 %	52 %
6	45 %	91 %	86 %	42 %
7	63 %	94 %	90 %	63 %
8	100 %	100 %	100 %	100 %

Dobijene mjere uspješnosti ispitanika su veoma visoke, što govori da je utvrđeni način frekvencijskog kodovanja aktivacije vibromotora intuitivan i da je, nakon svega nekoliko minuta treninga, sa velikim uspjehom moguće razlikovati osam nivoa aktivacije vibromotora.

Interesantno je posmatrati i mjere uspješnosti po različitim nivoima koje su date u Tabeli 2 odakle se može vidjeti da su ispitanici najviše griješili u prepoznavanju nivoa pet i šest, sa velikim procentom svih vrijednosti mjera kvaliteta su prepoznavali nivoje jedan, dva i tri, dok su u 100 % slučajeva pogodili da se radi o nivou osam, sa kojim nisu pomiješali nijedan drugi nivo u toku trajanja eksperimenta što je i očekivano, s obzirom na to da u slučaju osmog nivoa vibromotori rade neprekidno 1600 ms, što je lako prepoznati.

5 ZAKLJUČAK

Visoke mjere uspješnosti ukazuju na to da je šema frekvencijskog kodovanja nivoa aktivacije vibromotora intuitivna za korištenje, te da bi mogla da se primijeniti u svrhu pružanja povratnih informacija u skupu haptičkog interfejsa. Većina grešaka koje su ispitanici pravili, podrazumijevaju miješanje susjednih nivoa. Najveća razlika koju su ispitanici pravili između nivoa je pet (u samo 1% slučajeva). Drugo, bolji rezultati u toku druge cjeline eksperimenta ukazuju na to da su ispitanici u toku prve cjeline još uvijek bili u fazi učenja, kao i da da većom uspješnošću mogu da razlikuju nivoje kada je aktiviran veći broj vibromotora. Ovakvi rezultati su i očekivani, budući da veći broj vibromotora podrazumijeva i veću dodirnu površinu vibromotora i kože, što kod ispitanika izaziva senzacije većeg intenziteta. Ipak, neki ispitanici su u toku druge cjeline ostvarili lošije rezultate u poređenju sa onima iz prve. Razlog za to je, kako kažu, pad koncentracije koji je uslijedio tokom vršenja eksperimenta.

6. LITERATURA

- [1] O'malley, M.K. and Gupta, A., 2008. Haptic interfaces. *HCI beyond the GUI: Design for Haptic, Speech, Olfactory, and other nontraditional Interfaces*, pp.25-64.
- [2] Cholewiak, R.W. and Collins, A.A., 1991. Sensory and physiological bases of touch. *The psychology of touch*, pp.23-60.

- [3] Meech, J.F. and Solomonides, A.E., 1996. User requirements when interacting with virtual objects.
- [4] Stepp, C.E. and Matsuoka, Y., 2011. Object manipulation improvements due to single session training outweigh the differences among stimulation sites during vibrotactile feedback. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 19(6), pp.677-685.
- [5] Witteveen, H.J., Rietman, H.S. and Veltink, P.H., 2015. Vibrotactile grasping force and hand aperture feedback for myoelectric forearm prosthesis users. *Prosthetics and orthotics international*, 39(3), pp.204-212.
- [6] Guemann, M., Bouvier, S., Halgand, C., Paquet, F., Borrini, L., Ricard, D., Lapeyre, E., Cattaert, D. and de Ruyg, A., 2019. Effect of vibration characteristics and vibror arrangement on the tactile perception of the upper arm in healthy subjects and upper limb amputees. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 16(1), p.138.
- [7] Schmidt, R.F., 1981. Somatovisceral sensibility. In *Fundamentals of sensory physiology* (pp. 81-125). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] Kaczmarek, K.A., Webster, J.G., Bach-y-Rita, P. and Tompkins, W.J., 1991. Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 38(1), pp.1-16.
- [9] Cipriani, C., D'Alonzo, M. and Carrozza, M.C., 2011. A miniature vibrotactile sensory substitution device for multifingered hand prosthetics. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 59(2), pp.400-408.
- [10] Jones, L.A. and Sarter, N.B., 2008. Tactile displays: Guidance for their design and application. *Human factors*, 50(1), pp.90-111.
- [11] Pylatiuk, C., Kargov, A. and Schulz, S., 2006. Design and evaluation of a low-cost force feedback system for myoelectric prosthetic hands. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 18(2), pp.57-61.
- [12] Chatterjee, A., Chaubey, P., Martin, J. and Thakor, N., 2008. Testing a prosthetic haptic feedback simulator with an interactive force matching task. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 20(2), pp.27-34.
- [13] Stepp, C.E. and Matsuoka, Y., 2011. Vibrotactile sensory substitution for object manipulation: amplitude versus pulse train frequency modulation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 20(1), pp.31-37.

Kratka biografija:



Jelena Bulatović rođena je 16. septembra 1996. godine u Trebinju. Završila je osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, smjer biomedicinsko inženjstvo i nastavila master studije na istom smjeru. Od oktobra 2019. godine zaposlena je kao saradnik u nastavi na Fakultetu tehničkih nauka, katedra za računarstvo i automatiku.