

Taktilni aktuatorji v vodnem okolju

Matevž Hribernik^{1,2}, Anton Umek¹, Milivoj Dopsaj³, Sašo Tomažič¹, Anton Kos¹

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva c. 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

³ Univerza v Beogradu, Fakulteta za šport in telesno vzgojo, Beograd, Srbija

E-pošta: anton.kos@fe.uni-lj.si

Povzetek. Uporaba nosljivih naprav v športu se nenehno povečuje. To še zlasti velja za aplikacije, ki uporabljajo koncept biomehanske povratne vezave v realnem času. V tem članku raziskujemo problem zagotavljanja takšnih povratnih informacij uporabniku prek taktilnih aktuatorjev v vodnih okoljih, ki pomenijo dodaten izziv. Razvita je bila vodoodporna nosljiva naprava s šestimi taktilnimi aktuatorji, krmilnim vezjem, mikrokrmilnikom in brezžično povezljivostjo. S to napravo smo izvedli dve študiji. S prvo raziskovalno študijo smo pridobili osnovno razumevanje človeškega zaznavanja taktilnih vmesnikov v vodnem okolju. Napravo je uporabljalo 34 udeležencev v osmih ločenih testih, ki so jih določale tri neodvisne spremenljivke: namestitev, okolje in aktivnost. Udeleženci so naprave nosili okoli pasu in na glavi, v vodi in zunaj nje, med gibanjem in mirovanjem. Z drugo uporabnostno študijo z 51 udeleženci pa smo preizkusili uporabo naprave med športno vadbo v vodnem okolju, kjer nas je zanimalo, ali se uporabniki lahko med intenzivno vadbo odzovejo na ukaze iz naprave. Prva študija je vključevala 20 različnih taktilnih simbolov, pri čemer je bila za vsak simbol uporabljena edinstvena kombinacija enega ali več aktuatorjev naprave, druga študija pa je vključevala 6 najbolj uspešnih simbolov iz prve študije. V drugem delu članka predstavljamo rezultate raziskovalne in uporabnostne študije ter razpravljamo o ugotovitvah.

Ključne besede: taktilni uporabniški vmesnik, aktuatorji, povratne informacije, vodni šport, nosljiva oprema

Haptic actuators in aquatic environment

The use of wearable devices in sport is steadily increasing. This is particularly true for the applications using the concept of the real-time biomechanical feedback. The paper investigates the problem of providing such feedback to the user via tactile actuators in aquatic environments, which poses an additional challenge. A waterproof wearable device with six tactile actuators, control circuit, microcontroller and wireless connectivity is developed. Two studies are carried out with it. The exploratory study provides a basic understanding of the human perception of tactile interfaces in an aquatic environment. The device is used by 34 participants in eight separate trials determined by three independent variables i. e. a setup, environment and activity. Participants wear the devices around their waist and on their head, in and out of the water, while moving and at rest. A usability study involving 51 participants tests the use of the device during an intense sport tests exercise in an aquatic environment to establish whether users can respond to commands from the device. The first study uses 20 different tactile symbols, each symbol using a unique combination of one or more of the device actuators. The second study uses six best performing symbols from the first study. The paper ends by presenting the results of the exploratory and usability study and discusses their findings.

Keywords: tactile user interface, actuators, feedback, water sports, wearables

1 UVOD

Uporaba različnih tehnologij in naprav v športu in telesni rehabilitaciji je danes zelo razširjena. Pri sodobni športni vadbi in telesni rehabilitaciji se prevladujoče uporablja visokotehnološka nosljiva oprema [1]. V zadnjih letih se sta se na teh dveh področjih povečala pomen in uporaba biomehanske povratne vezave v realnem času (angl. Real-time biomechanical feedback – RTBF) [2], [3]. V osnovi RTBF združuje senzorje, ki merijo uporabnikovo telesno aktivnost, obdelavo podatkov iz senzorjev gibanja ter predstavitev povratnih informacij uporabniku glede na izmerjeno gibanje in izračunane parametre gibanja, kot to prikazuje shema na sliki 1. Za izvedbo RTBF so že dobro raziskani in uveljavljeni različni tipi senzorjev. Najpogosteje se uporabljajo kinematični senzorji [2], pogosta pa je tudi uporaba plošč za merjenje sile ter kamer za zajem gibanja. Podatke iz teh senzorjev je mogoče uspešno analizirati v realnem času. Zelo aktualna smer raziskovanja RTBF pa so najučinkovitejši in najprimernejši načini predstavitve oz. prikaza povratne informacije uporabniku, na kar še ni dokončnih odgovorov. Glede na rezultate, predstavljene v [2], je razvidno, da se večina študij v kontekstu RTBF le bežno posveča modalnostim ali aktuatorjem, zato je to področje še precej neraziskano. Večina laboratorijskih testov uporablja vizualno in slušno modaliteto, le redki pa

taktilno. Glede na pregled področja [2] je najmanj aplikacij RTBF v vodnem okolju. Ker nam je to pomenilo velik izziv, smo začeli raziskovati možnost razvoja naprav in aplikacij v tem okolju.

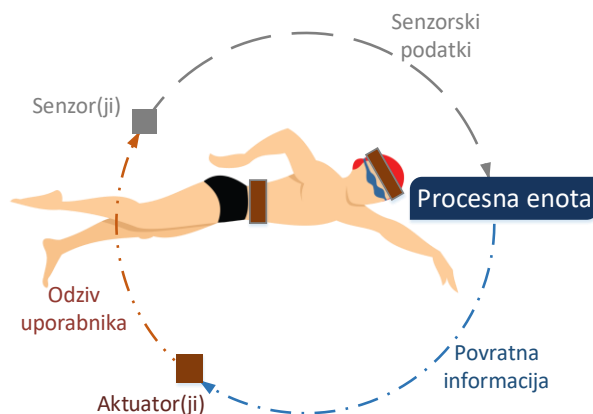
Glavna motivacija za naše delo so bili zasnova in razvoj ter preizkus sistema za RTBF za šport in telesno rehabilitacijo s taktilnimi aktuatorji, primernimi za uporabo v vodnih okoljih. Izvedli smo miniaturno nosljivo napravo z integriranimi vibracijskimi motorji kot aktuatorji, ki jo je mogoče pritrditi na uporabnikov pas ali glavo in jo je mogoče brezžično nadzorovati z oddaljenega računalnika. Naš cilj je bil najprej preizkusiti, kako ljudje zaznavajo taktilno modaliteto v vodi in zunaj nje, ter nato še njeno uporabnost med vadbo. Glavna naloga udeležencev je bila pravilno prepoznati aktivnost aktuatorjev in se odzvati glede na podano nalogo. Izvajali smo dve različni študiji. V prvi študiji [4] smo preizkusili delovanje taktilnega vmesnika v vodi in zunaj nje ter uspešnost prepoznavne podanih taktilnih simbolov, druga študija pa se je osredotočila na uporabnost naprave med intenzivnejšo športno vadbo med plavanjem.

Pred razvojno fazo smo proučili najsodobnejše sisteme RTBF, ki uporabljajo taktilno modaliteto, ter aplikacije teh sistemov v vodnem okolju. Preseka med obema skupinama nismo našli, zato smo bili dodatno motivirani za delo na tem področju. V sistemih RTBF se podatki, pridobljeni iz senzorjev, prenesejo v obdelovalno napravo. Tam se obdelajo in pretvorijo v uporabne informacije, ki se uporabniku predstavijo prek izbrane povratne naprave (aktuatorja). Uporabniki se na te dražljaje odzovejo tako, da prilagodijo svoje gibanje, s čimer se sklene povratna zanka. To lahko izboljša uporabnikovo zmogljivost in/ali zdravje. Naš pregled področja [2] je prinesel omejene rezultate, kar zadeva taktilne aktuatorje v športu, zato smo se odločili, da podrobneje raziščemo možnosti izvedbe RTBF z nosljivimi napravami, ki vključujejo taktilne aktuatorje.

Povratne informacije morajo biti za športnika ustrezne in nedvoumne ter so odvisne od čutil, za katere podajajo dražljaje (modaliteta). Modalitete povratne vezave so: vizualna, slušna in taktilna. Tovrstne dražljaje lahko proizvajajo različni aktuatorji in naprave za povratno vezavo. Uporabniku se z njimi predstavijo informacije različne kompleksnosti, ki so odvisne od izbrane modalitete ter njegovega znanja in izkušenj. Naše prejšnje raziskave RTBF so pokazale, da so slušne in taktilne povratne informacije najbolj uporabne za preproste nosljive naprave, medtem ko so vizualne povratne informacije primernejše za različne zaslone, tudi tiste, nameščene na glavo [2]. Za dejavnosti na prostem se zdita slušna in taktilna modaliteta boljše izbira, saj je za orientacijo v okolju potreben vid. Slušne in taktilne dražljaje pa je navadno mogoče zaznavati brez motenj ali večje dodatne kognitivne obremenitve [2], [3].

Glavni izziv pri razvoju aplikacij z biomehansko povratno vezavo je zagotoviti ustrezne in uporabne povratne informacije uporabniku ter izbrati najprimernejšo modaliteto, saj se v podobnih študijah

lahko uporabljajo različni senzorji in aktuatorji. Na voljo so tri modalitete, vendar se njihova uporabnost v različnih aplikacijah razlikuje. Uporaba v vodnih okoljih prinaša dodatne težave, tako s tehničnega vidika kot z vidika izkušenj uporabnika. Ta izziv nas je vodil k razvoju naprave s taktilnim uporabniškim vmesnikom (pozneje v tekstu navedena tudi kot nosljiva naprava ali taktilna naprava), ki je primerna za uporabo v vodnih okoljih.



Slika 1: Koncept biomehanske povratne vezave. V tem članku se z zaznavo gibanja ne ukvarjamo, zato so senzorji in senzorski podatki označeni s sivo. Lokacija aktuatorjev na glavi in pasu je označena na plavalcu. Predloga za grafiko Vectorportal.com.

Večina obstoječih aplikacij RTBF v vodi uporablja vizualno [5], [6], [7] ali slušno [8], [9] modaliteto. Avtorji v [8], [9] so na primer pokazali, da lahko slušne povratne informacije delujejo tudi v vodi. Taktilne povratne informacije se redkeje uporabljajo v različnih aplikacijah RTBF, znani sta nam dve študiji [10], [11], ki sta uporabljali taktilno modaliteto med hojo. V obeh študijah je bila uporabljena taktilna naprava na nogah ali gležnjih, ki uporabnikom zagotavlja informacije o simetriji hoje.

Zanimiv koncept [12] združuje več taktilnih aktuatorjev, kinematične senzorje in brezžično komunikacijo v univerzalno napravo s taktilnim vmesnikom, ki se lahko uporablja v različnih aplikacijah. Menimo, da je ta naprava nekoliko podobna naši zasnovi, vendar je primer njene uporabe drugačen. Medtem ko so avtorji v [12] napravo predstavili v fazi izdelave prototipa, smo mi izvedli tudi študije z več uporabniki. Študije o gibanju in tehnikah plavanja, ki jih je izvedla naša skupina [7], [13], so nam omogočile upoštevanje pomembnih spremenljivk in gibalnih vzorcev, ki jih najdemo pri različnih plavalnih slogih.

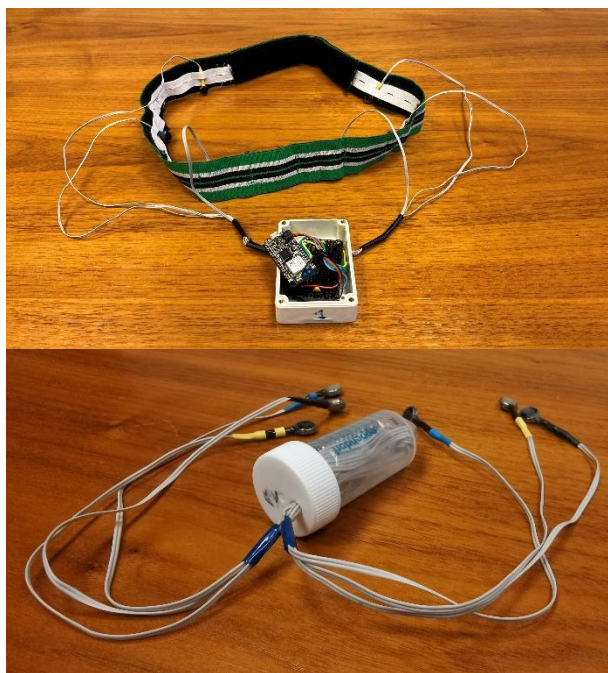
To združeno znanje nam je omogočilo razvoj naprave in taktilnega vmesnika za povratno vezavo ter izvedbo dveh študij, ki to napravo preizkusita na udeležencih tako na suhem kot v vodi z aktuatorji, nameščenimi na pasu ali glavi, ter v gibanju in mirovanju. V prvi študiji nas je zanimalo, kaj udeleženci občutijo, ko so izpostavljeni taktilnim dražljajem, in opazovali razlike zaznave različnih kombinacij sproženih aktuatorjev. V drugi

študiji nas je zanimal odziv uporabnikov na vnaprej pripravljene ukaze, ki so lahko uporabljeni pri bolj intenzivni vadbi.

Glavni prispevki tega članka so razvoj naprave, raziskovalna študija taktilnega vmesnika in uporabnostna študija podajanja taktilne povratne informacije. Zasnovali smo koncept univerzalne taktilne naprave; razvili in izdelali smo prototip naprave ter jo razvili v več stopnjah. Te prototipe smo uporabili v raziskovalni študiji in uporabnostni študiji s športniki, da bi ugotovili, kako zaznavajo taktilne povratne informacije.

2 RAZVOJ TAKTILNEGA VMESNIKA IN NOSLJIVE NAPRAVE

Vodno okolje je v primerjavi z drugimi okolji v marsičem zahtevnejše. Vse elektronske naprave morajo biti vodotesne ali vsaj vodoodporne, običajne širokopasovne radijske komunikacije pa pod vodo ne delujejo, poleg tega se v vodi človeško telo drugače obnaša. Pri razvoju (pod)vodne taktilne naprave smo izhajali iz našega prejšnjega dela [13] pa tudi iz taktilnih vmesnikov, ki so jih razvili drugi avtorji [11], [12]. Naše zahteve za to nosljivo napravo so: zmožnost delovanja pod vodo, brezžična povezljivost za nadzor delovanja, več taktilnih aktuatorjev, ki jih je mogoče razporediti po potrebi in posamično upravljati.



Slika 2: Fotografija naprave s taktilnim uporabniškim vmesnikom. V prvi študiji je bila uporabljena zgornja, v drugi pa spodnja. Obe napravi imata vibro motorje, povezane prek gonilnega vezja na mikrokrilniško napravo, ki brezžično komunicira s kontrolnim računalnikom.

Senzorske naprave, ki smo jih razvili v [7], [13], so bile izhodišče za zasnovano našo napravo. Vodotesno škatlico s senzorji in mikrokrilnikom smo nadgradili z modulom za brezžično komunikacijo in elektronskim vezjem za

pogon taktilnih aktuatorjev. Ta zasnova združuje mikrokrilniško ploščo Adafruit Feather M0 [14] s kinematičnimi senzorji [15], [16] in 6 gonilniki za aktuatorje, ki jih mikrokrilnik upravlja posamično. Kinematični senzorji v naših študijah niso uporabljeni. Fotografija naprav je predstavljena na sliki 2. V prvi študiji smo uporabili večjo napravo z daljšimi povezavami do aktuatorjev, saj smo poskusili tako namestitve na glavi kot na hrbtu, pri drugi študiji smo zunanji videz naprave prilagodili in skrajšali žice ter zmanjšali napravo, saj je bila ta nameščena na glavo pod plavalno kapico. V obeh primerih je imela naprava enako arhitekturo in sestavljale so jo enake komponente. Vsak vibro motor je bil prekrit z vodoodpornim materialom in povezan z gonilnikom s parom žic. V vnaprej izdelani vodotesni škatli, ki vsebuje krmilno elektroniko, so bile izvedene odprtine za prehod povezovalnih žic, ki so bile po dokončanju naprave zatesnjene.

Izvedena arhitektura omogoča avtonomno delovanje brez zunanje povezljivosti ali brezžično komunikacijo z računalnikom. To pomeni, da lahko taktilne aktuatorje sprožijo tako zunanja naprava, npr. ukaz računalnika, kot notranji ukazi, npr. časovniki in signali iz senzorjev ali rezultat njihove obdelave. V študijah smo uporabljali obe funkcionalnosti. Najprej smo uporabili oddaljene ukaze za opredelitev vrste opravljanega poskusa ter njegov zagon in zaključek. Med poskusom je bil za aktivacijo vibro motorjev uporabljen notranji časovnik. Vsak motor je bil nadzorovan posebej. Količina toka skozi motor je nadzorovala intenzivnost vibracij in frekvenco nihanja ter posledično amplitudo vibracij. Amplitudo motorja smo krmilili s signalom PWM (pulznoširinska modulacija), ki ga mikrokrilnik posreduje gonilnemu vezju. To omogoča večji nadzor moči vibracij aktuatorja. Ta preprosti nadzor lahko zagotovi napredne taktilne signale s spreminjanjem intenzitete in spreminjajočimi vzorci vibracij. Računalnik za nadzor in taktilna naprava sta bila povezana z isto dostopno točko wi-fi. Med računalnikom in napravo je bila vzpostavljena preprosta dvosmerna komunikacija za pošiljanje ukazov napravi in prejetje stanja o napravi z osnovnimi informacijami, kot je podatek o bateriji.

Taktilno napravo nadzoruje po meri izdelana programska oprema na lokalnem osebem računalniku. Ta napravi pošilja več vrst ukazov. Najpreprostejši ukaz pošlje seznam aktuatorjev, ki naj bodo aktivni, skupaj z njihovo močjo delovanja in časom trajanja. Ko naprava izvede ukaz in ustvari taktilen signal, pošlje računalniku informacije o stanju. Za potrebe obeh uporabniških študij smo ustvarili posebne ukaze, ki definirajo vrsto testa, vrstni red simbolov in parametre časovnih zamikov (pred začetkom poskusa in med simboli). V primeru napake med izvajanjem študije smo ustvarili tudi ukaz »reset«, ki je razveljavil prejšnje navodilo.

3 METODOLOGIJA

Glavni cilj študije je raziskati možnost uporabe taktilnih vibracijskih aktuatorjev v vodnih okoljih, zlasti med plavanjem. Naše hipoteze so, da: (a) udeleženci čutijo

vibracije aktuatorjev, (b) udeleženci razlikujejo med različnimi lokacijami aktuatorjev, (c) aktuatorji so uporabni tako v vodi kot zunaj nje in (č) udeleženci se znajo odzvati na ukaze in prilagoditi način plavanja.

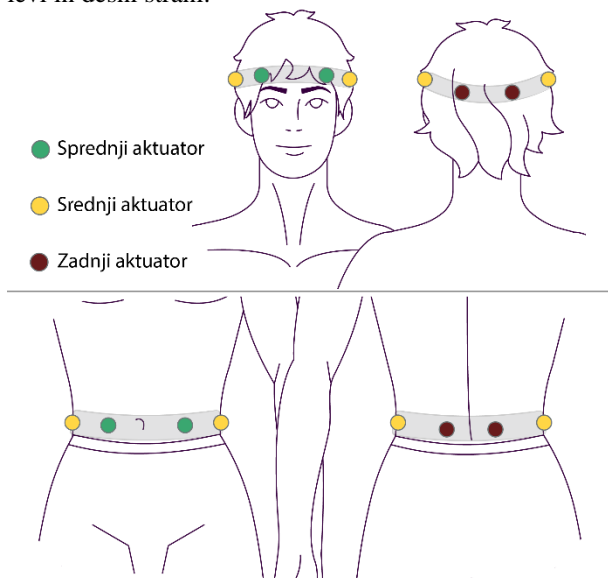
3.1 Raziskovalna študija

Za preverjanje prvih treh hipotez (a)–(c) smo izvedli študijo s 34 udeleženci. Določili smo tri neodvisne binarne spremenljivke: (1) lokacija namestitve – pas ali glava, (2) okolje – zunaj vode in v vodi, (3) aktivnost – mirovanje ali gibanje. Vse kombinacije treh neodvisnih spremenljivk dajejo osem različnih testov, navedenih v tabeli 1.

Tabela 1: Imena testov in neodvisne spremenljivke.

Ime testa	Lokacija	Okolje	Aktivnost
WOS	Pas (Waist)	Zunaj (Outside)	Mirovanje (Standstill)
WOM	Pas (Waist)	Zunaj (Outside)	Gibanje (Motion)
WIS	Pas (Waist)	V vodi (Inside)	Mirovanje (Standstill)
WIM	Pas (Waist)	V vodi (Inside)	Gibanje (Motion)
HOS	Glava (Head)	Zunaj (Outside)	Mirovanje (Standstill)
HOM	Glava (Head)	Zunaj (Outside)	Gibanje (Motion)
HIS	Glava (Head)	V vodi (Inside)	Mirovanje (Standstill)
HIM	Glava (Head)	V vodi (Inside)	Gibanje (Motion)

Udeleženci so imeli na pasu ali glavi nameščeno napravo z aktuatorji, ki so bili razporejeni, kot je prikazano na sliki 3. Aktuatorji so bili nameščeni v šestih položajih na levi in desni strani telesa: okoli pasu so bili nameščeni na trebuhu, bokih in spodnjem delu hrbta na levi in desni strani.



Slika 3: Namestitev aktuatorjev taktilne naprave na uporabnika. Pri prvi študiji so bili aktuatorji nameščeni na glavo in pas, v drugi pa zgolj na glavo. Predloga za grafiko Freepik.com.

Podobno velja za glavo, kjer so bili aktuatorji nameščeni na čelo, sence in tilnik na obeh straneh glave. V obeh

primerih so bili vstavljeni v elastični trak, da bi se prilagodili različnim velikostim udeležencev in zagotovili večje udobje. V vodi so vsi udeleženci nosili tudi plavalno kapo.

Proučevali smo, kako se udeleženci odzovejo na signale iz aktuatorjev pri različnih testih iz tabele 1. Ker je mogoče vsak aktuator upravljati ločeno, smo zasnovali različne kombinacije aktuatorjev, ki smo jih definirali kot simbole. Določili smo 20 simbolov (kombinacij aktuatorjev), za katere menimo, da bi bili zanimivi za prihodnjo uporabo v aplikacijah RTBF, predstavljeni so v tabeli 2. V grobem jih lahko razdelimo v tri skupine glede na predvideno zahtevnost njihove uspešne identifikacije: (a) preproste – vsebujejo samo en aktivni aktuator, simboli 1 do 6, (b) zmerne – vsebujejo par aktivnih aktuatorjev na obeh straneh telesa, simboli 7 do 12 in 16 do 17, (c) kompleksne – vsebujejo tri ali več aktivnih aktuatorjev, simboli 13 do 15 in 18 do 20. Vsi simboli so bili pri polni moči aktivni eno sekundo. Dva posebna simbola (19 in 20) predstavljata časovno zaporedje treh aktuatorjev na vsaki strani, ki se sprožijo vsak ločeno za pol sekunde. Teh 20 simbolov je bilo naključno premešanih pri vsakem testu iz tabele 1 ter so se izvedli v naključnih časovnih intervalih. Udeleženci so teste izvajali v naključnem vrstnem redu, da bi tako zmanjšali učinek učenja.

Tabela 2: Seznam simbolov in aktivnih aktuatorjev pri posameznem simbolu. Polni krogi predstavljajo aktiven aktuator. Simbola 19 in 20 sta drugačna in predstavljata zaporedno sproženje aktuatorjev.

Simbol	Lokacija aktuatorja					
	Sprednji L	Srednji L	Zadnji L	Zadnji D	Srednji D	Sprednji D
1	●	○	○	○	○	○
2	○	●	○	○	○	○
3	○	○	●	○	○	○
4	○	○	○	●	○	○
5	○	○	○	○	●	○
6	○	○	○	○	○	●
7	○	○	○	●	●	○
8	○	○	○	○	●	●
9	○	○	○	●	○	●
10	○	●	●	○	○	○
11	●	●	○	○	○	○
12	●	○	●	○	○	○
13	○	○	○	●	●	●
14	●	●	●	○	○	○
15	●	●	●	●	●	●
16	●	○	○	●	○	○
17	○	○	●	○	●	○
18	●	○	●	●	○	○
19	●*	●*	●*	○	○	○
20	○	○	○	●*	●*	●*

Pred začetkom prvega testa je bil vsakemu udeležencu na kratko predstavljeno delovanje sistema in kratka demonstracija iz štirih simbolov. Ti štirje simboli so bili vedno predstavljeni izven vode, čeprav je udeleženec morda začel s testom v vodi. Predstavitveni simboli so bili enaki za vse udeležence.

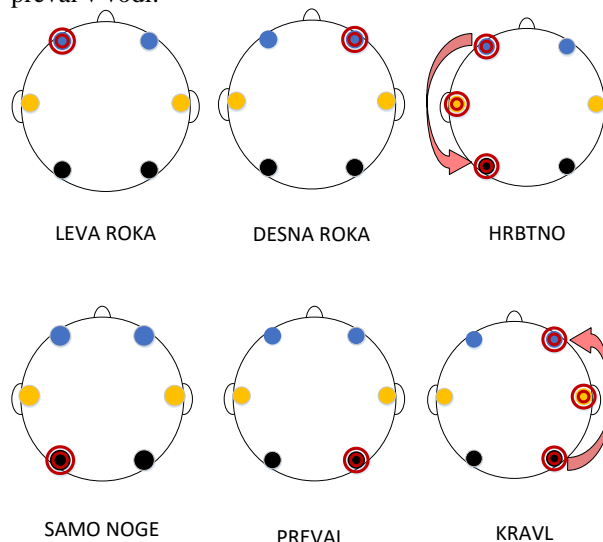
Po učni sekvenci je bilo v naključnem vrstnem redu izvedenih vseh osem testov iz tabele 1. Oseba, ki je izvajala študijo, je udeležence obvestila, kdaj se bo začel vsak test, in po približno 10 sekundah se je aktiviral prvi simbol. Simboli so si sledili v zaporedju z naključnim časovnim presledkom med 5 in 10 sekundami, da se omogoči glasovna komunikacija med udeležencem in izvajalcem poskusa, ki beleži rezultate. Pri izvajanju testov so udeleženci glasovno komunicirali, katere aktuatorje čutijo, in njihovi odgovori so bili zabeleženi. Naključni časovni interval je bil uveden, da bi odvrnil morebitne lažne (izmišljene) zaznave simbolov.

3.2 Uporabnostna študija

V raziskovalni študiji smo dokazali, da uporabniki občutijo taktilne dražljaje med telesno aktivnostjo v različnih okoljih, ter relativno uspešno poročajo o lokacijah aktivnih aktuatorjev. Ugotovili smo, da je mogoče taktilne aktuatorje uporabljati med plavanjem. V tej študiji pa se osredotočamo na vidike uporabnosti predlaganega taktilnega uporabniškega vmesnika, hipoteza (č). Raziskovalno vprašanje te študije je, ali lahko plavalec med intenzivnejšim plavanjem razume in upošteva informacije, ki jih podaja taktilna naprava. V prejšnji študiji smo preizkusili le, katere aktuatorje uporabniki čutijo in kako jih razlikujejo med seboj. V tej študiji preverjamo, ali lahko uporabniki te vibracije razumejo kot ukaze in ustrezno spremenijo svoje gibanje. Ker so športni strokovnjaki favorizirali namestitve na glavo, smo pri tej študiji uporabljali zgolj to namestitev.

V uporabnostno študijo smo vključili 51 mladih plavalcev. Aktuatorji so bili pritrjeni zgolj na glavo pod plavalno kapo, kot je prikazano na sliki 3. Z vsakim udeležencem smo izvedli dva testa, najprej zunaj vode in nato v vodi, obakrat med telesno dejavnostjo: hojo zunaj vode in plavanjem v vodi. Med vsakim testom je bilo udeležencem predstavljenih 18 ukazov iz nabora 6 različnih simbolov (kombinacij aktuatorjev), ki so v prejšnji študiji pokazali največji potencial, izbrani simboli so imeli v raziskovalni študiji največjo uspešnost, kot je razvidno s slik 5 in 7. Uporabljeni simboli so prikazani na sliki 4 in se lahko štejejo za logične ter izhajajo iz najuspešnejših simbolov v tabeli 2. Ko je bil sprožen eden od sprednjih aktuatorjev, je to pomenilo plavanje samo z eno roko (simbola 1 in 6 v tabeli 2); ko je bilo sproženo zaporedje aktuatorjev od spredaj nazaj (simbol 19 v tabeli 2), je to pomenilo hrbtno plavanje; ko je bilo zaporedje od zadaj naprej (simbol 20 v tabeli 2), pa plavanje prostega sloga. Za zadnje aktuatorje so si morali zapomniti pomen aktuatorjev, saj je levi zadnji aktuator (simbol 3 v tabeli 2) pomenil plavanje samo z

nogami, desni zadnji aktuator (simbol 4 v tabeli 2) pa preval v vodi.



Slika 4: Ukazi in simboli, uporabljeni pri uporabnostni študiji.

Pred začetkom testa so bili uporabnikom predstavljeni vsi simboli in pojasnjena jim je bila tehnika plavanja, ki jo morajo uporabiti, ko je določen simbol aktiven. Ta del smo poimenovali spoznavanje simbolov. Po tem smo izvedli t. i. učenje simbolov. To je vključevalo 12 naključnih simbolov (vsak simbol dvakrat), ki so bili predstavljeni udeležencem, ti pa so to učenje izvajali, kot bi test izvajali zunaj vode med hojo; učenje se je ponovilo tolikokrat, kolikor je bilo potrebno, da se je uporabnik naučil vseh simbolov in zahtevanih dejanj. Kar zadeva teste, je bil prvi izveden na suhem med hojo (udeleženci so med hojo nakazali ustrezno tehniko plavanja ali izvedli obrat), drugi pa v vodi med plavanjem. Vsakič ko se je sprožil naključen simbol, je moral udeleženec spremeniti tehniko plavanja. Simboli se med testom niso nikoli ponavljali, izvajalec poskusa pa je udeležence opazoval med obema testoma in beležil njihove aktivnosti.

4 REZULTATI

4.1 Raziskovalna študija

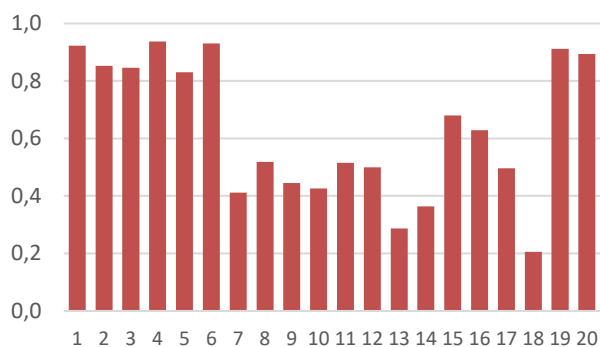
Med izvajanjem preizkusov smo beležili tako uspeh simbolov kot posameznih aktuatorjev, ki so jih udeleženci pravilno ali napačno čutili. To nam je omogočalo analizo uspešnosti prepoznave simbolov in aktuatorjev v različnih poskusih. V nadaljevanju predstavljamo nekaj najbolj zanimivih rezultatov.

Iz predstavljenih rezultatov lahko razberemo, kako uspešno so udeleženci zaznavali različne simbole. Na sliki 5 je prikazana uspešnost prepoznave posameznih simbolov. Opazna je izrazita razlika med preprostimi simboli 1–6 ali posebnimi simboli 19, 20 v nasprotju z vsemi drugimi simboli, ki so manj uspešni. Simbola 4 in 6 imata več kot 95-odstotno uspešnost, pri čemer je 4 zadnji desni aktuator, 6 pa sprednji desni aktuator. Zanimivo je, da imata simbola 19 in 20 boljše uspešnosti

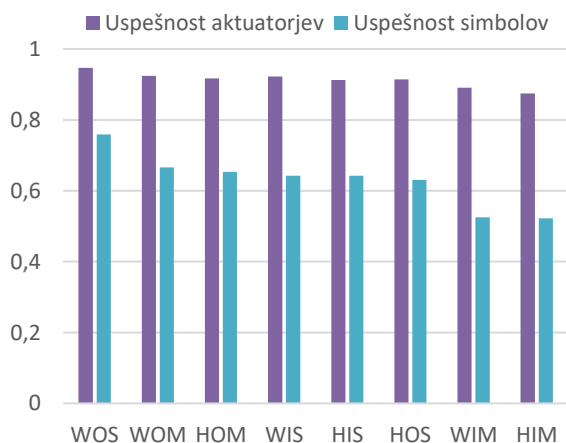
kot preostali enostavni simboli. Večjo uspešnost simbolov lahko pripišemo tudi simbolom 15–17, saj so se pri simbolu 15 sprožili vsi aktuatorji, pri simbolih 16 in 17 pa sta se sprožila dva aktuatorja, po eden z vsake strani telesa. Slabše rezultate kažeta simbola 13 in 14, pri katerih so se sprožili vsi trije aktuatorji na vsaki strani telesa, ter simbol 18, pri katerem so se sprožili trije nepovezani simboli (spredaj desno, zadaj desno, zadaj levo).

Med testiranjem smo pri udeležencih ocenili stopnjo uspešnosti simbolov in aktuatorjev pri vsakem testu. Tako smo lahko analizirali, kako udeleženci prepoznavajo taktilne dražljaje glede na neodvisne spremenljivke. Rezultati na sliki 6 prikazujejo, kako se stopnje uspešnosti simbolov in aktuatorjev razlikujejo med testi. Test WOS ima najvišjo stopnjo uspešnosti, kar je bilo pričakovano in ga potrjuje kot osnovni test. Tudi vsi drugi testi dajejo pričakovane rezultate, pri čemer so vsi testi v vodi slabši od testov zunaj vode.

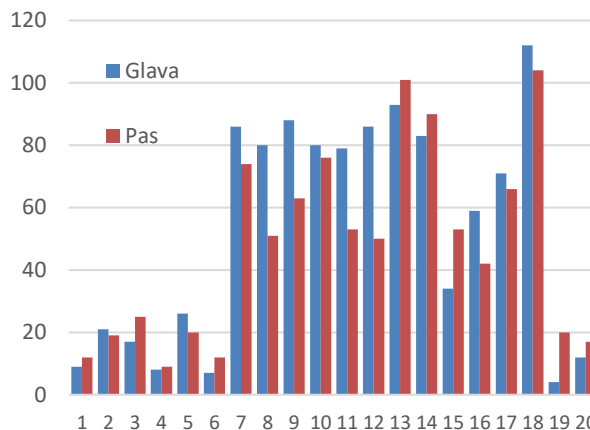
Na podlagi naših rezultatov je mogoče oceniti tudi uspešnost namestitve aktuatorjev, to je prikazano na sliki 7. Podobna stopnja uspešnosti je bila dosežena pri namestitvi na glavo (61,21 %) ali pas (64,81 %). Pri simbolih, 1, 4, 6, 19 in 20, kjer je bilo zabeleženih manj napak in imajo večjo uspešnost (glej sliko 5), je mogoče glede na sliko 7 opaziti boljši rezultat na glavi kot na pasu v primerjavi s preostalimi simboli.



Slika 5: Normalizirana uspešnost prepoznave simbolov glede na posamezni simbol v vseh testih.



Slika 6: Normalizirana uspešnost vseh aktuatorjev in vseh simbolov v posameznem testu.



Slika 7: Število napak posameznega simbola glede na namestitev na glavi in pasu. Pri simbolih 1, 3, 4, 6, 19 in 20 obstaja manjša verjetnost napake na glavi.

4.2 Uporabnostna študija

Ta študija je dala zelo kakovostne rezultate z visoko stopnjo uspešnosti. Udeleženci so morali upoštevati ukaze, ki jim jih je podala taktilna naprava (glej sliko 4). Rezultati so bili boljši od pričakovanih, saj so vsi simboli skupaj dosegli 96,96-odstotno uspešnost v vseh testih z zgolj 2,34 % napak in 0,71 % zgrešenih ukazov. Za napake se obravnavajo simboli, ki so bili napačno interpretirani, za zgrešene pa štejemo primere, ko udeleženci niso spremenili svojega gibanja, čeprav se je to od njih pričakovalo, tj. niso zaznali ukaza. Stopnja uspešnosti zunaj vode je bila 99,35 %, v vodi pa 94,55 %.

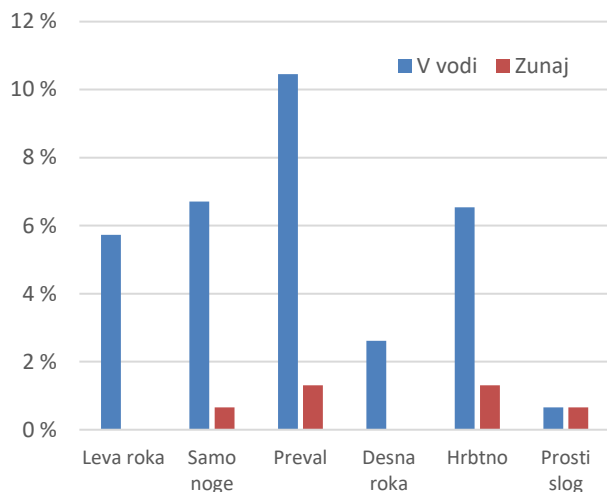
Ker so vsi udeleženci izvedli podobne teste, je bila edina razlika v vrstnem redu oz. zaporedju simbolov. Tabela 3 prikazuje uspešnost udeležencev pri obeh testih. Skoraj polovica udeležencev (25) ni naredila napak. Drugi so naredili eno napako (13 udeležencev) ali več. Mnogo več napak, po 5 oz. 8 napak v obeh testih, sta naredila zgolj dva udeleženca.

Tabela 3: Udeleženci in njihove napake pri obeh testih uporabnostne študije.

Število napak	Število udeležencev
0	25
1	13
2	6
3 ali več	7

Ocenimo lahko tudi stopnjo napake vsakega simbola. Slika 8 prikazuje, kako se je vseh 6 vključenih simbolov odrezalo pri preizkusih v vodi ali zunaj nje. Vsak simbol je bil v vsakem testu sprožen trikrat, bodisi v vodi bodisi zunaj nje, skupaj torej šestkrat za vsakega udeleženca. Opaziti je bilo, da so se nekateri simboli obnesli bolj kot drugi. Pri vseh simbolih je bila stopnja napak zunaj vode zelo nizka. Dva simbola s sprednjimi aktuatorji (leva roka, desna roka) nista imela napak, ko je bil test izveden

zunaj vode. Največje število napak (2) je bilo zabeleženih pri simbolih preval in hrbtno, ko je šlo za osnovni test zunaj vode. Bolj zanimivi so rezultati testov v vodi, kjer so se rezultati gibali od 0,65 % (npr. 1 napaka, prosti slog) do 10,46 % (npr. 16 napak, preval), pri čemer je bil prosti slog boljši od vseh drugih, preval pa najslabši, pri teh dveh so bili rezultati pod oz. nad normalno porazdelitvijo.



Slika 8: Pogostost napak posameznih simbolov v obeh testih.

5 RAZPRAVA

RTBF je razvijajoče se področje sodobnega športnega treninga in telesne rehabilitacije. Da bi napredovali na področju aktuatorjev za podajanje povratne informacije, smo razvili napravo s taktilnim uporabniškim vmesnikom, ki jo je mogoče nositi med vodnimi in drugimi dejavnostmi. Razvili smo dve napravi za dve študiji z različnim zunanjim videzom, vendar enakim delovanjem. Za preverjanje učinkovitosti in človeškega zaznavanja taktilnih dražljajev smo izvedli raziskovalno študijo s 34 udeleženci ter uporabnostno študijo z 51 udeleženci. Rezultati študij niso presenetljivi in kažejo, da je naprava s taktilnim uporabniškim vmesnikom koristno še naprej razvijati za prihodnje študije.

Rezultati raziskovalne študije kažejo, da so udeleženci na splošno sposobni razlikovati med aktuatorji ne glede na namestitev naprave. Uspeh simbola je bolj povezan z vrsto in izvedbo simbola kot z namestitvijo naprave. Slika 6 prikazuje, da je povprečna stopnja uspešnosti simbola višja, kadar je naprava nameščena na pasu. Če pogledamo posamezne simbole, pa lahko vidimo, da so simboli z najboljšimi rezultati (1–6, 19, 20) v splošnem uspešnejši, če je naprava nameščena na glavi, edini izjemi sta simbola 2 in 5. Eden od možnih vzrokov je spremenljivost položajev aktuatorjev, zlasti stranskih, ko je naprava nameščena na glavi, kar verjetno povzroči različno zaznavanje njihovih vibracij. Te razlike v položaju lahko prispevajo k dobljenim rezultatom ali pa nas vodijo k sklepu, da je položaj stranskega aktuatorja manj ugoden od drugih. Presenečeni smo bili, ko smo

ugotovili, da je bila pri simbolih, ki so uporabljali več aktuatorjev, stopnja napak veliko višja. Simboli, ki so si podobni, kot so npr. 7, 8, 9 in 13 ter 10, 11, 12 in 14, so bili veliko pogosteje napačno interpretirani. Pogosto so jih razumeli kot simbola 2 in 5, pri katerih je aktiven le en aktuator. To kaže, da uporabniki ne morejo učinkovito razlikovati, ali je aktiven en stranski aktuator ali sta hkrati aktivna dva aktuatorja (spredaj in zadaj). Zato se je treba izogibati uporabi teh simbolov v isti aplikaciji, saj jih je težko razlikovati med seboj. Predvidevamo, da bi udeleženci lahko zaznali razliko v amplitudi, kadar sta aktivna dva aktuatorja, v primerjavi z enim, vendar zaradi praktične omejitve te študije o tem ne moremo biti prepričani, zato bo treba trditev preizkusiti v prihodnjih študijah.

Uporabnostna študija je bila za udeležence edinstven izziv. Njeni rezultati so zelo obetavni in dokazujejo uspešnost tako raziskovalne študije kot tudi uporabnostne študije. Uporabniki so zelo uspešno razumeli ukaze in spremenili svoje gibe z zelo visoko stopnjo uspešnosti, skoraj 95 % v vodi med plavanjem in skoraj 100 % zunaj nje. Ta stopnja uspešnosti je veliko višja kot v raziskovalni študiji. To je bilo mogoče pričakovati, saj so se v tej študiji uporabniki naučili simbolov, prav tako pa je bilo število predstavljenih simbolov manjše. Poleg tega so bili uporabljeni le najuspešnejši simboli iz raziskovalne študije. Nekoliko presenetljivo je, da skoraj polovica udeležencev ni naredila niti ene napake. Tako obstaja možnost, da bi bila stopnja uspešnosti lahko še višja, če bi imeli udeleženci več časa za učenje simbolov in možnost ponovnega opravljanja poskusa. Štiri od šestih simbolov lahko obravnavamo kot logične. Le preval in plavanje samo z nogami sta bila težja za učenje, zato je bilo pri teh dveh tudi več napak. Zanimivo je, da sta hrbtni in prosti slog pokazala očitno razliko v napakah, čeprav gre za podobna simbola. Za te rezultate ni logične razlage, le da hrbtni slog zahteva več gibalnih sprememb (rotacija telesa) kot prosti in je bil za plavalce zato težji za razumevanje.

Prav tako je treba omeniti, da imata obe predstavljeni študiji nekatere omejitve. Naprave smo preizkusili z omejenim številom profesionalnih plavalcev med njihovimi običajnimi treningi. Ker so bili udeleženci telesno pripravljene športniki, namestitev aktuatorjev ni bila težavna; pri splošni populaciji bi lahko dobili drugačne rezultate. Ker je vsako telo nekoliko drugačno, je šlo za več različnih načinov namestitve aktuatorjev.

Raziskovalna študija je dokazala, da je taktilne informacije mogoče predstaviti uporabnikom med plavanjem in drugimi aktivnostmi, vendar je treba biti pazljiv pri izbiri simbolov in kompleksnosti predstavljenih informacij. Uporabnostna študija je pokazala, da je mogoče med plavanjem razumeti preproste ukaze in da lahko plavalci upoštevajo ukaze, posredovane s taktilno nosljivo napravo. Te pomembne ugotovitve bodo omogočile prihodnji razvoj nosljivih naprav v RTBF za vodne športe. Naša nosljiva naprava je trenutno že sposobna zagotavljati taktilne informacije

uporabniku in komunicirati z nadzorno in obdelovalno napravo. V prihodnosti bo treba za dokončanje povratne vezave omogočiti kinematične senzorce ter določiti zanimive biomehanečne parametre. Te prihodnje študije bodo združevale delo, predstavljeno v tem prispevku, in prejšnje delo, ki je proučevalo plavalno gibanje [13].

ZAHVALA

To delo sta deloma podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS) v okviru raziskovalnega programa ICT4QoL – Informacijsko komunikacijske tehnologije za kakovost življenja (P2-0246) in bilateralni projekt med Slovenijo in Srbijo z naslovom Senzorske tehnologije kot podporni sistemi za odkrivanje in izbiro talentov v športu in spremljanje sposobnosti športnikov (BI-RS/20-21-023).

LITERATURA

- [1] K. Lightman, "Silicon gets sporty," *IEEE Spectrum*, vol. 53, pp. 48–53, Mar. 2016, doi: 10.1109/MSPEC.2016.7420400.
- [2] M. Hribernik, A. Umek, S. Tomažič, and A. Kos, "Review of Real-Time Biomechanical Feedback Systems in Sport and Rehabilitation," *Sensors*, vol. 22, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22083006.
- [3] A. Kos and A. Umek, *Biomechanical Biofeedback Systems and Applications*. Springer, 2018.
- [4] M. Hribernik and A. Kos, "Exploring the applicability of haptic actuators in aquatic environments," *Internet of Things*, vol. 24, p. 100924, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.iot.2023.100924.
- [5] M. Gandolla *et al.*, "Wearable Biofeedback Suit to Promote and Monitor Aquatic Exercises: A Feasibility Study," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 4, pp. 1219–1231, 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2911756.
- [6] M. O. Santos, J. Costa, T. R. Fernandes, C. Silva, and S. M. M. Faria, "Wearable Inertial and Bio-signal Device for Real-time Swimmer's Monitoring," in *2021 Telecoms Conference (ConfTEL)*, Feb. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ConfTEL50222.2021.9435472.
- [7] A. Kos and A. Umek, "Wearable Sensor Devices for Prevention and Rehabilitation in Healthcare: Swimming Exercise With Real-Time Therapist Feedback," *Ieee Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 1331–1341, Apr. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2850664.
- [8] D. Cesarini *et al.*, "MEDIATION: an eMbedded system for auditory feedback of hand-water InterAcTION while swimming," *Engineering of Sport 11*, vol. 147. in *Procedia Engineering*, vol. 147. ELSEVIER SCIENCE BV, pp. 324–329, 2016. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.301.
- [9] N. Schaffert, A. Engel, S. Schlüter, and K. Mattes, "The sound of the underwater dolphin-kick: developing real-time audio feedback in swimming," *Displays*, vol. 59, pp. 53–62, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.displa.2019.08.001.
- [10] M. Fiorentino, A. E. Uva, and M. M. Foglia, "Self Calibrating Wearable Active Running Asymmetry Measurement and Correction," *Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 13, no. 2. Romanian Soc Control Tech Informatics, pp. 3–8, Jun. 2011. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80055063063&partnerID=40&md5=772005cd801c7f169473296fa9daa16e>
- [11] D. K. Y. Chen, M. Haller, and T. F. Besier, "Wearable lower limb haptic feedback device for retraining Foot Progression Angle and Step Width," *GAIT & POSTURE*, vol. 55. Elsevier Ireland Ltd, pp. 177–183, Jun. 2017. doi: 10.1016/j.gaitpost.2017.04.028.
- [12] M. S. Ashapkina, A. V. Alpatov, V. A. Sablina, and O. V. Melnik, "Vibro-tactile Portable Device for Home-base Physical Rehabilitation," in *2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Jun. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460218.
- [13] A. Umek and A. Kos, "Wearable sensors and smart equipment for feedback in watersports," vol. 2018. in *Procedia Computer Science*, vol. 2018. Elsevier science BV, pp. 496–502, 2018. doi: 10.1016/j.procs.2018.03.030.
- [14] A. Industries, "Adafruit Feather M0 WiFi - ATSAM21 + ATWINC1500." Accessed: Nov. 05, 2019. [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/3010>
- [15] "Pololu - MinIMU-9 v5 Gyro, Accelerometer, and Compass (LSM6DS33 and LIS3MDL Carrier)." Accessed: Mar. 31, 2020. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2738>
- [16] "BNO055," Bosch Sensortec. Accessed: Sep. 23, 2020. [Online]. Available: <https://www.bosch-sensortec.com/products/smart-sensors/bno055.html>

Matevž Hribernik je leta 2019 magistriral iz elektrotehnike na Univerzi v Ljubljani. Je raziskovalec in doktorski kandidat na Fakulteti za elektrotehniko ter asistent na Naravoslovnotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Njegovo raziskovalno delo obsega komunikacijske protokole, kinematične senzorce, nosljive naprave, povratne modalitete in sisteme biomehanske povratne vezave.

Anton Umek je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna področja vključujejo digitalne komunikacije, digitalno obdelavo signalov, varnost komunikacijskih sistemov in sisteme z biomehansko povratno vezavo.

Milivoj Dopsaj je redni profesor na Fakulteti za šport in telesno vzgojo Univerze v Beogradu. V svojem raziskovalnem delu se ukvarja z uveljavljanjem modernih tehnologij in znanstvenih pristopov v športnem treningu, zlasti tekmovalnem plavanju, pa tudi z različnimi merjenji v športu in testiranju telesne pripravljenosti.

Sašo Tomažič je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Je predstojnik Laboratorija za informacijske tehnologije na Katedri za informacijske in komunikacijske tehnologije. Njegovo delo obsega raziskave na področju digitalne obdelave signalov, varnosti v telekomunikacijah in elektronskem poslovanju ter informacijskih sistemov.

Anton Kos je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna področja vključujejo sisteme z biološko povratno vezavo, informacijske sisteme, komunikacijske protokole, varnost informacijsko-komunikacijskih sistemov in podatkovno pretočno računalništvo.