

Biomehanska povratna zanka z delovanjem v realnem času

Anton Umek, Anton Kos, Sašo Tomažič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: anton.umek@fe.uni-lj.si

Povzetek. Biomehanska povratna zanka (BPZ) pomaga pri hitrejšem motoričnem učenju. V članku obravnavamo koncept delovanja sistema BTZ za delovanje v realnem času pri motoričnem učenju v športu. Podajamo kratek pregled glavnih tehnoloških izzivov pri načrtovanju in izvedbi sistemov z biomehansko povratno zanko, ki omogočajo takojšen odziv uporabnika. Potrditev koncepta delovanja sistema BPZ v realnem času predstavimo na primeru izvirne aplikacije za pomoč pri učenju golfa.

Ključne besede: biomehanska povratna zanka, motorično učenje, poudarjena povratna informacija, sledenje gibanja, inertni senzorji, obdelava signalov v realnem času, prenos senzorskih signalov, brezžična senzorska omrežja

Real-time biomechanical feedback

Biomechanical feedback helps in accelerating motor learning. The paper presents a concept of biomechanical feedback for the use in sports motor learning. A short overview of the main technological challenges in real-time biofeedback systems is presented. Requirements for technical equipment and several parameters important in real-time biomechanical feedback are discussed. The developed Golf Assistant application demonstrates a concept of real-time biomechanical feedback in sports training.

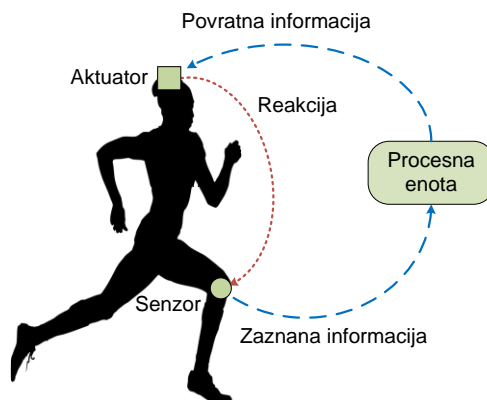
Keywords: biomechanical feedback, motor skill learning, augmented feedback, motion tracking, inertial sensors, real-time signal processing, sensor signal transmission, wireless sensor networks

1 UVOD

Biomehanska povratna zanka je namenjena izboljšanju učinkovitosti pri učenju gibanja. Proces učenja temelji na ponavljanju pravilno izvedenih gibov. Povratna informacija je poleg ponavljanja gibov najpomembnejši element v učenju gibanja [1]. Glavni vir povratne informacije pri samostojnem naravnem učenju gibanja omogoča prirojen notranji mehanizem (ang. intrinsic feedback). Zunanji povratni signal (ang. extrinsic feedback) lahko nastopa iz različnih zunanjih virov. Najpogosteje je pri učenju gibanja športnika glavni vir zunanje povratne informacije trener. Kot pomoč trenerju ali pa neposredno uporabniku se lahko uporabi tudi tehnična oprema. Najpogosteje se v veliko športnih disciplinah že dolgo uporablja analiza videoposnetkov treningov. Z uporabo sodobnih sistemov za sledenje gibanja je mogoče pridobiti natančno informacijo o izvajanju giba in generirati ustrezen povratni signal, ki

nosi informacijo o pravilnosti giba. Zunanja povratna informacija dopolnjuje notranjo informacijo o gibanju.

Osnovni koncept biološke povratne zanke podaja slika 1. V povratni zanki nastopa človek (*bio*) s senzorji, ki so pritrjeni na njegovo telo. Senzorski signali se obdelujejo v procesni enoti. Rezultat obdelave je povratni signal (*feedback*), ki ga je človek sposoben sprejeti s svojimi naravnimi čutili (sluh, vid, tip).



Slika 1: Koncept delovanja sistema BPZ

Verigo gradnikov v povratni zanki lahko razdelimo na tehnični del, ki ga sestavljajo elektronske naprave, in biološki del, to je človek. Iz perspektive načrtovalca tehnične opreme se v zanki zaznava človek, zato govorimo o biološki povratni zanki (ang.: *biofeedback*). Isti tehnični sistem pa človek zaznava kot vir dodane oziroma poudarjene povratne informacije (ang.: *augmented feedback*).

Biološka povratna zanka se zelo pogosto nanaša na zajem in uporabo fizioloških parametrov človekovega

telesa (telesna temperatura, parametri srčnega utripa, parametri dihanja). Senzorji so lahko namenjeni tudi zaznavanju fizikalnih parametrov, ki določajo gibanje človekovega telesa ali njegovih delov. V tem primeru govorimo o *biomehanski povratni zanki* (BPZ) [2, 3].

Z dodatno povratno zanko lahko v najpreprostejšem sistemu dodajamo samo informacijo o rezultatu izvajanja giba (ang.: *knowledge of result*, KR), ki ocenjuje rezultat glede na zastavljeno gibalno nalogo. Zahtevnejšo analizo gibanja potrebujemo, če želimo pridobiti informacijo o načinu izvajanja giba (ang.: *knowledge of performance*, KP). Povratna informacija o načinu izvajanja giba je izražena s parametri, ki so specifični za posamezno gibalno nalogo. Količina povratne informacije in način podajanja ne smeta povzročiti odvratanja pozornosti od primarne gibalne naloge. Zato učinkovitost sistema BPZ ni povezana samo s tehničnimi lastnostmi opreme, temveč tudi z izbiro gibalnih nalog, količino povratne informacije in načinom podajanja povratne informacije. Uporabnik se pogosto lahko osredotoči na spremljanje samo ene napake v izvajanju giba, zato je treba prilagoditi nabor učnih nalog za zaporedno parcialno izločanje najvplivnejših napak.

Povratna informacija se v zanki pridobi z zakasnitvijo. Najpogosteje po izvedbi giba in se uporabi pri nadaljevanju vadbe (ang.: *terminal feedback*). Zajem in obdelava signalov ter analiza podatkov v tem primeru niso časovno kritični. Manj pogosto se je človek sposoben odzvati na povratni signal že med izvajanjem giba (ang.: *concurrent feedback*). V takšnih primerih je lahko koristno, če povratni signal omogoči prekinitev napačnega izvajanja giba. Tako se lahko med vadbo zelo zmanjša število napačno izvedenih gibov in s tem skrajša čas do pridobitve sposobnosti izvajanja pravilnega giba. Takojšnja povratna informacija je koristna tudi tedaj, ko se podoben gibalni vzorec ciklično ponavlja in omogoča takojšnje zaznavanje napak ter popravljanje giba že v naslednjem ciklu ponovitve.

Glede zahtevnosti tehnične opreme so poseben izziv sistemi, ki omogočajo takojšnjo reakcijo človeka. Ti morajo zato delovati v realnem času in z majhno zakasnitvijo v komunikaciji in obdelavi signalov (ang.: *real-time biofeedback*). Glavna tema obravnave v nadaljevanju članka je sistem z biomehansko povratno zanko z delovanjem v realnem času.

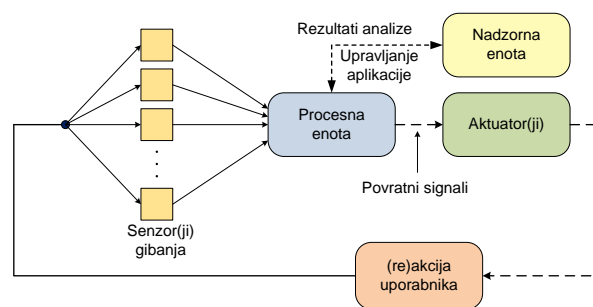
V nadaljevanju članka v poglavju 2 predstavljamo gradnike sistema BPZ, poudarek je na obravnavi senzorjev za zajem gibanja. V poglavju 3 opisujemo različne arhitekture sistema glede na lokacijo glavne procesne enote ter naprave za upravljanje in nadzor sistema. Primer praktične izvedbe sistema BPZ podaja opis aplikacije za pomoč pri učenju golfa v poglavju 4.

2 GRADNIKI SISTEMA BPZ

Glavni gradniki biomehanske povratne zanke so senzorji gibanja, procesna enota za obdelavo signalov,

komunikacijske naprave v zanki in aktuatorji povratne informacije, kot ponazarja slika 2.

Najpogosteje se za zaznavanje gibanja uporabljajo miniaturni MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) pospeškometri in žiroskopi. Nosljiva in avtonomna *senzorska naprava* ima poleg MEMS senzorjev (pospeškometra, žiroskopa in magnetometra) vgrajen mikrokontroler, komunikacijski vmesnik ter napajalni modul s polnilno baterijo. Senzorji gibanja so pritrjeni na telo uporabnika, lahko pa tudi na športno opremo. Podrobnejša obravnava senzorjev je podana v razdelku 2.1.



Slika 2: Gradniki sistema z biomehansko povratno vezavo

Jedro sistema je *procesna naprava* za obdelavo senzorskih signalov, analizo pridobljenih podatkov in generacijo povratne informacije. Lokalna procesna enota je lahko namenska nosljiva naprava ali pametni telefon. Pri uporabi sistema v omejenem prostoru je procesna naprava lahko tudi prenosni računalnik, ob primerni izbiri komunikacijskih povezav v zanki pa lahko glavno obdelavo signalov opravlja poljubno oddaljena virtualna procesna naprava v oblaku. Glede na lokacijo procesne enote ločimo več arhitektur sistema, nekoliko širša obravnava je podana v razdelku 3.1.

Aktuator povratne informacije generira povratni signal, ki ga človek lahko zaznava z vidom, sluhom ali tipom. Izbira povratnega zaznavnega kanala je odvisna od različnih dejavnikov: količine povratne informacije, nevarnosti preusmerjanja pozornosti uporabnika od primarne dejavnosti, potrebe po hitrosti reakcije in tudi od tehničnih omejitev pri nujenju povratnega signala v različnih fizikalnih razmerah delovanja (odprt/zaprt prostor, delovanje v vodi itn).

Za izvedbo biomehanske povratne zanke v realnem času potrebujemo ustrezne naprave za generiranje povratnega signala prek avditornega, vizualnega ali taktilnega povratnega kanala. V sistemih za statično vadbo v omejenem prostoru lahko slikovni povratni signal projiciramo daleč od telesa uporabnika, na odprtem prostoru pa je treba tudi slikovni signal posredovati prek nosljive naprave, na primer pametnih očal. Za posredovanje manjše količine informacij je primernejša uporaba avditornega ali pa taktilnega zaznavnega kanala. Prednosti v primerjavi z uporabo vizualnega zaznavnega kanala so preprosta tehnična

izvedba, krajši reakcijski čas uporabnika in tudi manjša kognitivna obremenitev.

Komunikacijske povezave med senzorji in procesno enoto ter povezava do aktuatorjev povratne informacije so lahko po radijskem kanalu, po žici ali po optičnem vlaknu. Vrvične povezave po žicah ali optičnem vlaknu so zelo primerne pri integraciji nosljivih senzorjev v oblačila, omogočajo pa lahko zelo zanesljivo širokopasovno komunikacijo z majhno porabo energije. Radijske komunikacijske povezave omogočajo mobilnost aplikacije in preprosto pritrdjevanje nosljivih senzorskih naprav na telo uporabnika, vendar pa so zaradi uporabe skupnega prenosnega medija občutljive na motnje v ISM (Industrial, Scientific and Medical) frekvenčnem pasu ter posledično precej manj zanesljive. Poleg brezžičnih tehnologij, ki so posebej namenjene za zelo majhen doseg v območju telesa WBAN (Wireless Body Area Network), so lahko primerne tudi radijske tehnologije za osebna, lokalna ali prostrana omrežja. Trenutno najbolj razširjene razpoložljive tehnologije so: ZigBee, Bluetooth, WiFi in LoRaWAN (Long Range Wide-area network). Naštete tehnologije se ne razlikujejo le po dosegu povezav, temveč tudi po porabi moči in po prenosni zmogljivosti. Izbira radijske tehnologije je odvisna od arhitekture sistema, v povezavi do interneta pa prevsem od pozicije postavitve komunikacijskega prehoda med senzorji in omrežjem. Na izbiro tehnologij za brezžično povezovanje senzorjev močno vplivajo pametni telefoni. Večina sodobnih pametnih mobilnikov ima poleg visoko zmogljivih LTE (Long Term Evolution) podatkovnih povezav že vgrajene tudi komunikacijske vmesnike za WiFi in Bluetooth.

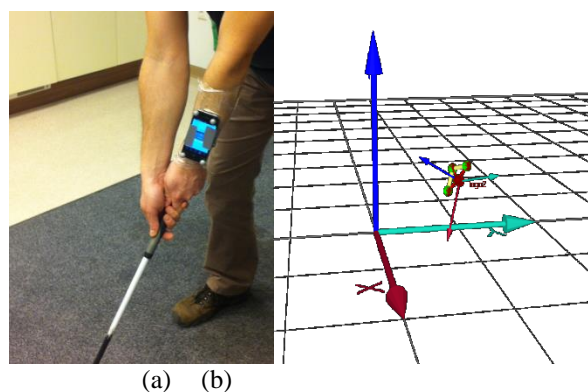
Nadzorna enota sistema omogoča upravljanje aplikacije in naknadno analizo rezultatov meritev, ki dajejo dodatno povratno informacijo po opravljenem treningu. Nadzorna naprava je lahko načrtovana tako, da tudi sproti omogoča prikaz vseh zajetih informacij inštruktorju ali trenerju.

2.1 Senzorji za zaznavanje gibanja

V sistemih z biomehansko povratno zanko se za zaznavanje parametrov gibanja največkrat uporabljajo kombinirane senzorske naprave z vgrajenimi miniaturnimi pospeškometri in žiroskopi, ki so izdelani v tehnologiji MEMS. Nosljivi senzorji morajo imeti majhne dimenzije in zaradi omejitve dimenzij napajalne baterije tudi majhno porabo energije.

Profesionalni sistemi za natančno sledenje gibanja telesa v odprtem prostoru uporabljajo veliko miniaturnih inertnih senzorjev (IMU), ki so na določenih točkah pritrjeni na telo uporabnika [4]. Vsaka senzorska naprava ima vgrajen 3D pospeškometer in 3D žiroskop. Natančno sledenje gibanja v prostoru je mogoče doseči z združevanjem senzorskih signalov (ang.: sensor fusion) in z uporabo apriornega znanja na podlagi kinematičnega modela pri definirani postavitvi senzorjev. Komunikacija med množico IMU senzorjev in procesno enoto lahko poteka po žicah, če so senzorji

pritrjeni na oblačilo, ali brezžično, če so senzorji z elastičnimi trakovi posamično pritrjeni na telo uporabnika. Slaba stran uporabe takšnega sistema je zamudno oblačenje posebej prilagojene obleke s senzorji ali pa posamično pritrdjevanje velikega števila senzorjev na telo uporabnika. Najbolj natančni so profesionalni sistemi za direktno optično sledenje gibanja. Ti so s pomočjo večjega števila kamer sposobni hkrati zaznavati 3D pozicije velikega števila pasivnih ali aktivnih markerjev [5], vendar pa je prostor zaznavanja omejen na nekaj deset metrov. Profesionalni optični sistem za sledenje gibanja Qualisys-QTM smo uporabili pri verifikaciji primernosti senzorjev pametnih telefonov za uporabo v sistemih biomehanske povratne vezave [6].



Slika 3: (a) Primer uporabe pametnega telefona za zajem podatkov o gibanju roke med zamahom pri golfu. (b) Markerji na telefonu so uporabljeni za vzporedno merjenje gibanja z referenčnim optičnim sistemom Qualisys.

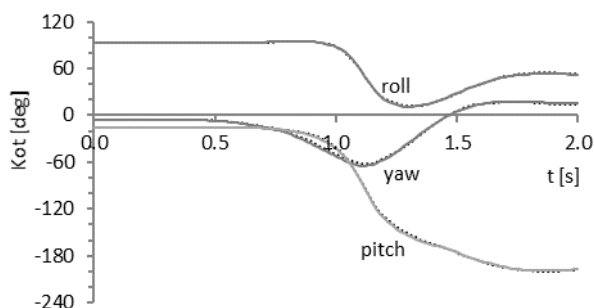
Če želimo sistem za pomoč pri učenju gibanja prilagoditi za množično uporabo, je treba zmanjšati kompleksnost in tudi znižati ceno sistema za zajem gibanja. Obseg analize gibanja je treba omejiti samo na spremljanje relevantnih parametrov, ki omogočajo pridobitev dovolj zanesljive informacije o pravilnosti ali nepravilnosti giba. To lahko dosežemo z manjšim številom senzorjev, ki so pritrjeni na telo uporabnika in vgrajeni v športno opremo. V sistemih biomehanske povratne vezave je mnogokrat čas izvajanja giba in s tem tudi čas analize senzorskih signalov samo nekaj sekund, zato ne potrebujemo tako natančnih senzorjev kot pri dolgotrajnem sledenju gibanja.

2.2 Uporaba senzorjev pametnega telefona

Za manj zahtevne aplikacije lahko uporabimo tudi senzorje, ki so vgrajeni v pametne telefone. V kratkem časovnem oknu analize gibanja so tudi pospeškometri in žiroskopi, ki so vgrajeni v pametnih telefonih, dovolj natančni za uporabo v aplikaciji BPZ [6, 7].

Natančnost žiroskopa pametnega telefona smo preverili z meritvijo kotov zasukov pri golfskem zamahu, pogoje meritve ponazarja slika 3(a). Vzporedno referenčno meritev smo izvajali s profesionalnim optičnim sistemom Qualisys Track

Manager (QTM). Primer spremljanja zasukov s sistemom QTM je prikazan na sliki 3(b). Slika 4 podaja natančnost izračunanih kotov zasukov prve generacije žiroskopov, ki so se začeli vgrajevati v pametne telefone (iPhone 4). Rezultati meritev s pametnim telefonom (roll, pitch, yaw) so podani s prekinjeno črto. Kot referenca so s polno črto prikazani rezultati meritev zasukov s profesionalnim optičnim sistemom za sledenje gibanja Qualisys. Izračunani Eulerjevi koti so podani v zaporedju osi (x,y,z). Testni gib je v danem primeru prva faza golfskega zamaha (backswing), začetek gibanja nastopi približno pri $t=0,6$ s. Izračunana standardna deviacija napake kota znaša 1,15 stopinje. Rezultati raziskav množice modelov pametnih telefonov [8] potrjujejo, da je v njih vgrajene žiroskope in pospeškometre mogoče uporabiti v aplikacijah za pomoč pri učenju gibalnih vzorcev z biomehansko povratno vezavo.



Slika 4: Primerjava izračunanih Eulerjevih kotov na podlagi podatkov žiroskopa z meritvijo referenčnega sistema QTM

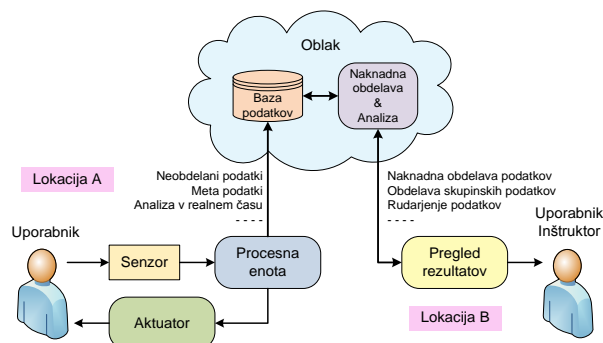
3 NAČRTOVANJE SISTEMA BPZ ZA DELOVANJE V REALNEM ČASU

Načrtovanje sistemov BPZ in pravilna izbira njihove arhitekture je odvisno od množice parametrov. Med najpomembnejšimi so: lastnosti senzorjev (dinamično območje, natančnost, vzorčevalna frekvenca), zmogljivost procesne enote (računska moč, poraba energije), način komunikacije s procesno enoto (žično, brezžično), komunikacijski parametri (pretok, zakasnitve), povratni kanal (sluh, vid, tip).

3.1 Arhitektura sistema

Glede na lokacijo procesne enote v zanki ločimo kompaktno in porazdeljeno izvedbo sistema. V kompaktni izvedbi je procesna enota nosljiva mobilna naprava in vsi gradniki povratne zanke se nahajajo pri uporabniku. Sistem v tej konfiguraciji ni omejen na določen prostor. Pri porazdeljeni izvedbi sistema BPZ se glavna procesna enota nahaja v bližini inštruktorja, povezava med uporabnikom in procesno enoto pa poteka prek dvosmernega radijskega kanala. Prednost porazdeljene izvedbe sistema BPZ je veliko večja zmogljivost procesne enote, zato je ta arhitektura posebej primerna v fazi razvoja aplikacije. Nadgradnja

sistema BPZ vključuje povezavo v oblak, ki omogoča poleg shranjevanja senzorskih signalov in meta podatkov v podatkovno bazo v oblaku tudi množico dodanih storitev obdelave signalov, analize podatkov in prikaza rezultatov. Arhitekturo kompaktnega sistema z lokalnim procesiranjem in posredovanjem podatkov v oblak podaja slika 5. V porazdeljenem sistemu se lahko tudi vsa obdelava signalov izvaja na bližnji lokaciji ali v oblaku, moč razpoložljive procesorske enote pa je skoraj neomejena. Glavna omejitev pri uporabi porazdeljene arhitekture so doseg in prenosna zmogljivost radijskega komunikacijskega vmesnika nosljive senzorske naprave ter skupna zakasnitev komunikacijskega kanala. Lokalna procesna naprava ne sme biti moteča za uporabnika, zato mora imeti majhne dimenzije in tudi majhno porabo energije. Pri obdelavi velikega števila senzorskih signalov z visoko vzorčevalno frekvenco lahko zahtevnost obdelave v realnem času preseže zmogljivosti miniaturne, na telo pritrjene procesne enote. V takšnem primeru se kot primernejša izkaže izvedba sistema s porazdeljeno arhitekturo.



Slika 5: Arhitektura kompaktnega sistema BPZ s povezavo v oblak

3.2 Zakasnitve na komunikacijskem kanalu

Zakasnitve v komunikaciji so odvisne predvsem od izbire komunikacijskega protokola. Transportne zakasnitve signalov so zanemarljivo majhne v primerjavi z zakasnitvami protokolov, ki nastopijo zaradi zbiranja podatkov v pakete. Uporaba protokolov z zaznavo napak in ponavljanjem prenosa ravno tako ni smiselna, če se izvaja s preveliko zakasnitvijo.

Skupna zakasnitev v dvosmerni komunikaciji in obdelavi signalov mora biti v primerjavi z reakcijskim časom človeka majhna. Reakcijski čas je odvisen od izbire vrste povratnega kanala in od psihofizičnih sposobnosti udeleženca. Tipični reakcijski časi za različne skupine študentov so 250 ms [9], minimalni reakcijski čas profesionalnih atletov pri startu sprinta pa je ocenjen na približno 100 ms [10]. Kot približek dopustne zakasnitve dodane tehnične opreme pri zelo zahtevnih aplikacijah BPZ verjetno lahko vzamemo vrednost $\tau_{\max}=10$ ms.

Zahteva po majhnih dimenzijah in masi nosljive senzorske naprave omejuje moč komunikacijskega vmesnika in s tem tudi doseg in zmogljivost radijske zveze. Komunikacijskih vmesnikov z majhno močjo, ki so namenjeni za delovanje v območju majhnega dosega PAN (Personal Area Network), ne moremo uporabiti za prenos signalov na večjem športnem terenu, na primer na nogometnem igrišču. Za večji doseg so trenutno razpoložljive tehnologije WLAN, 3G in LTE. V lokalnem omrežju lahko kljub veliki prenosni zmogljivosti nastopijo težave zaradi prevelike gostote senzorskih naprav.

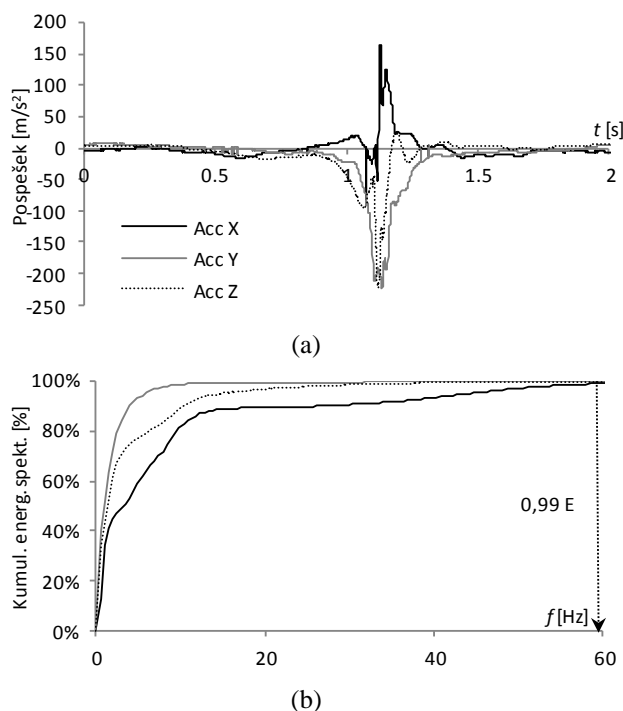
3.3 Obdelava signalov v realnem času

Računska kompleksnost algoritmov obdelave senzorskih signalov narašča s številom senzorskih signalov in s frekvenco vzorčenja. Pogoj za obdelavo v realnem času je, da se vzorci povratnega signala izračunajo znotraj vzorčnega časa T_{vz} . Za izpolnitev tega pogoja mora procesna enota delovati z visoko frekvenco osnovnega takta, meja minimalne frekvence procesiranja f_{CLK} pa se premika čedalje više z razvojem vse bolj kompleksnih algoritmov obdelave in analize signalov, ki znotraj vzorčnega intervala zahtevajo čedalje več operacij N .

$$f_{CLK} > \frac{N}{T_{vz}} \quad (1)$$

Visoka frekvence obdelave žal ne gre skupaj z željo po majhni porabi moči in kot primerna alternativna rešitev z bistveno manjšo porabo energije se kažejo sistemi z vzporednim procesiranjem [11]. Potencialno zanimiva tehnologija za vzporedno obdelavo signalov v miniaturnih nosljivih napravah postajajo nizkoenergijska programirljiva vezja (low-power FPGA).

Vzorčevalna frekvenca signalov pospeškometra in žiroskopa je odvisna od vrste gibanja in od pozicije sensorja na telesu. Slika 6 podaja primer analize spektra in ocene pasovne širine signalov 3D pospeškometra (Shimmer3) pri prostem metu rokometne žoge. Sensor je bil pritrjen na zunanji strani dlani. Slika 6(a) podaja časovni potek na vseh treh oseh pospeškometra v času izvajanja meta žoge po izločitvi gravitacijskega vektorja. Signal pospeškometra je vzorčen s frekvenco 1024 Hz. Slika 6(b) podaja potek kumulativnega energijskega spektra, kjer je mogoče oceniti frekvenčno območje, v katerem se nahaja najmanj 99 % energije izmerjenih signalov. Frekvenca vzorčenja bi bila za podani primer gibanja po izbranem kriteriju lahko znižana na 120 Hz. V nekaterih drugih primerih, pri senzorjih, nameščenih na športni opremi, smo izmerili odzive, ki zahtevajo vzorčevalno frekvenco vsaj 500 Hz.



Slika 6: (a) Odziv 3D pospeškometra pri prostem metu rokometne žoge, (b) kumulativni energijski spektri in ocena pasovne širine signala

Širina spektra senzorskih signalov je lahko v širokem območju od nekaj Hz do nekaj 100 Hz. Najvišje frekvence po navadi zaznavamo s senzorji, ki so pritrjeni na togo športno opremo, na primer na golfsko palico, teniški lopar ali smuči.

Maksimalne vrednosti amplitudnega dinamičnega območja širokodostopnih miniaturnih MEMS senzorjev so $\pm 16 g_0$ za pospeškometre in ± 2000 dps za žiroskope. Zato maksimalne amplitude pospeška in kotne hitrosti pri športni aktivnosti pogosto presežejo mejo dinamičnega območja uporabljenega MEMS sensorja, še zlasti tedaj, ko je senzor trdo pritrjen na konicah udov in v neposrednem stiku s kostjo, kar direktno prenaša vibracije.

4 PRIMER IZVEDBE SISTEMA BPZ

Delovanje biološke povratne zanke smo najprej preverili na testni aplikaciji, ki zaznava napake v izvajanju golfskega zamaha [12]. Razvojna verzija sistema, prikazana na sliki 7(a), uporablja senzorje pametnega telefona, obdelava signalov pa se izvaja na prenosnem osebni računalniku. Povezava med pametnim telefonom in osebnim računalnikom je vzpostavljena prek omrežja WLAN po transportnem protokolu UDP.

Aplikacija zaznava čezmerno premikanje glave med izvajanjem golfskega zamaha in prek akustičnega povratnega kanala uporabniku sproti (concurrent feedback) digitalno sporoča znak za zaustavitev izvajanja giba. Poleg akustičnega sprotne povratnega



Slika 7: Testna aplikacija Golf asistent: (a) konfiguracija opreme, (b) okno za prikaz rezultatov analize golfskega zamaha

signala podaja aplikacija tudi grafični pregled rezultatov, analizo gibanja glave, numerične podatke o izmerjenih mejnih vrednostih in semaforje prepoznavne vrste napak (slika 7(b)). Slikovne informacije lahko uporabimo pri učenju zamaha kot pomoč za analizo vrste nepravilnosti v zamahu, torej s časovnim zamikom (terminal feedback). Osnovna ideja algoritma temelji na ugotovitvi, da je pri pravilno izvedenem golfskem zamahu premikanje glave igralca komaj opazno [13]. Po pričakovanjih je aplikacija koristen pripomoček za začetnike, ki šele spoznavajo golf in imajo pogosto veliko napak pri izvajanju golfskega zamaha, zanje je značilno izrazito čezmerno gibanje glave.

5 SKLEP

Znanost in tehnologija že dolgo omogočata pridobitev prednosti pri doseganju športnih rezultatov. Z miniaturizacijo nosljivih senzorjev je mogoče čedalje bolj natančno analizirati gibanje in kot dodatna pomoč v športnem treniranju se lahko v nekaterih primerih uporabi tudi biomehanska povratna zanka z delovanjem v realnem času.

V članku smo predstavili koncept delovanja in opisali glavne gradnike sistema BPZ. Opisali smo predloge za različne arhitekture izvedbe sistema in poudarili posebne zahteve za komunikacijske povezave, obdelavo signalov in analizo podatkov. Primer testne aplikacije za pomoč pri učenju golfa Golf Asistent potrjuje koristnost uporabe biološke biomehanske povratne zanke v športnem treniranju. Za zahtevnejše aplikacije

in pri spremljanju skupinske igre z velikim številom igralcev in senzorjev se odpira tudi možnost izvedbe oblačne storitve.

LITERATURA

- [1] Bilodeau, I. M. (1966). Information feedback. *Acquisition of skill*, 55, 255-96.
- [2] Giggins, O. M., Persson, U. M., Caulfield, B. (2013) Biofeedback in rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil* 10:60. doi:10.1186/1743-0003-10-60.
- [3] Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., Wolf, P. (2013) Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review. *Psychon Bull Rev* 20:21–53. doi:10.3758/s13423-012-0333-8.
- [4] Roetenberg, D., H. Luinge, and P. Slycke. "Xsens MVN: full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. 2009." (2016).
- [5] Qualisys Track Manager (QTM) User Manual (Ver. 2.11). Gothenburg: Qualisys Ltd.; 2015.
- [6] Umek, Anton, and Anton Kos. "Validation of smartphone gyroscopes for mobile biofeedback applications." *Personal and Ubiquitous Computing* 20.5 (2016): 657–666.
- [7] Kos, Anton, Tomažič, Sašo, and Umek, Anton. "Suitability of smartphone inertial sensors for real-time biofeedback applications." *Sensors* 16, no. 3 (2016): 301.
- [8] Kos, Anton, Tomažič, Sašo, and Umek, Anton. "Evaluation of Smartphone Inertial Sensor Performance for Cross-Platform Mobile Applications." *Sensors* 16, no. 4 (2016): 477.
- [9] Jain, Aditya, Ramta Bansal, Avnish Kumar, and K. D. Singh. "A comparative study of visual and auditory reaction times on the basis of gender and physical activity levels of medical first year students." *International Journal of Applied and Basic Medical Research* 5, no. 2 (2015): 124.
- [10] Pain, Matthew, T. G., and Angela Hibbs. "Sprint starts and the minimum auditory reaction time." *Journal of sports sciences* 25, no. 1 (2007): 79–86.
- [11] Umek, Anton, and Kos, Anton. "The Role of High Performance Computing and Communication for Real-Time Biofeedback in Sport." *Mathematical Problems in Engineering* 2016 (2016).
- [12] Umek, A., Tomažič, S., Kos, A. (2015) Wearable training system with real-time biofeedback and gesture user interface. *Per Ubiquit Comput* 19:989-998. doi:10.1007/s00779-015-0886-4.
- [13] Tiger Woods: Maintain A Quiet Head. http://www.golfdigest.com/golf-instruction/2009-10/tiger_woods_keep_quiet_head.

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

Anton Kos je asistent z doktoratom 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.

Sašo Tomažič je redni profesor in predstojnik Katedre za informacijske in komunikacijske sisteme na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna področja vključujejo informacijske sisteme, digitalne prenosne sisteme, varnost informacijsko-komunikacijskih sistemov in sisteme z biološko povratno vezavo.