

# Vplivi izpostavljenosti navidezni višini na psihofizične parametre človeka

Jernej Čamernik, Sanja Kezić, Jan Babič

Institut Jožef Stefan, Jamova c. 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: jernej.camernik@ijs.si

**Povzetek.** Namen raziskave je bil na podlagi analiz fizioloških in psiholoških odzivov ovrednotiti vpliv navidezne višine na posturalni nadzor človeka. S kombinacijo navidezne resničnosti in robotske platforme smo ustvarili okolje, v katerem lahko človeka navidezno dvignemo na višino 3 metrov. S tem smo želeli vplivati na veččutno zaznavo premikanja v prostoru, ki bi povzročila ali okrepila psihofizične odzive človeka na spremembo okolja. V raziskavi smo pripravili kratek preizkus, kjer smo ob hkratnem sunkovitem dvigu robotske platforme in vizualni spremembi višine spremljali posturalni nadzor 20 prostovoljcev ter ga primerjali s stanjem, ki smo ga zabeležili pred tem dogodkom. S pomočjo pritiskovnih plošč in optičnega sistema za zajem gibanja smo opazovali premike sil na podlago in premike težišča telesa merjencev – COP in COM. Analizirali smo njihovi povprečni vrednosti, povprečni frekvenci močnostnega spektra (MPF) in efektivni vrednosti (RMS). Pred končanim navideznim dvigom in po končanem navideznem dvigu smo pri merjencih z vprašalnikom za ugotavljanje stopnje anksioznosti ter merilnikom prevodnosti kože (EDA) in temperature na površini kože ovrednotili še stanje njihove trenutne in splošne zaznave tesnobe. Ugotovili smo, da so se takoj po izpostavljenosti navidezni višini povečali tesnoba, strah, prevodnost kože ter povprečni frekvenci močnostnega spektra gibanja COP in COM. Hkrati so se zmanjšali stabilnost, zaupanje, temperatura ter efektivni vrednosti oziroma amplitudi COP in COM. Fiziološki odziv na zaznavo višine se je pokazal tudi v spremembi povprečnih vrednostih premika COP in COM v smeri naprej-nazaj, saj so se posamezniki takoj po dvigu nagnili nazaj – stran od roba. Z raziskavo smo pokazali, da se tudi pri posameznikih, ki se ne bojijo višine, s posturalno grožnjo pojavijo spremembe v čustvenem in fiziološkem stanju, hkrati pa se poostri nadzor drže.

**Ključne besede:** nadzor drže, posturalna anksioznost, akrofobija, navidezna resničnost (VR), elektrodermalna aktivnost (EDA)

## Impact of the virtual-height exposure on human psychophysical parameters

The study evaluates the impact of the virtual height on the human postural control by analyzing the human physiological and psychological responses. Combining the virtual reality and a robotic platform, an environment is created in which a human is seemingly raised to a height of three meters, to affect the human's multi-sensory perception of a movement in the space, causing or enhancing the human's psychophysical responses to an environment at change. A short test is made to monitor the postural control of 20 volunteers during an event of a simultaneous sudden jerk of a robotic platform and a visual change in the height. The data are recorded before and after the event and the results are compared. Using force-plates and an optical system for capturing the volunteer's movement, the movements of forces on the ground and the volunteer's body mass (COP and COM) are observed. Their average values, average power spectrum frequency (MPF) and the root mean square values (RMS) are analyzed. Before and after a virtual rise, the state of the volunteer's current and general perception of anxiety is evaluated with a questionnaire to determine their level of anxiety, electrodermal activity (EDA) and skin-surface temperature. It is shown, that immediately after the volunteer's exposure to a virtual height, their anxiety, fear,

skin conductivity and average frequency spectrum of the COP and COM movement increase and their stability, confidence, temperature and RMS values of COP and COM decrease. The volunteer's physiological response to their height perception is also reflected in the change in the mean values of the COP and COM movement in the anterior-posterior direction after they lean backwards, i.e. away from the edge, immediately after lifting. Our study results show that changes in the human emotional and physiological state, as a consequence of a postural threat, and simultaneously also an increase in the human postural control, occur even in humans who are not afraid of the height.

**Keywords:** human postural control, postural anxiety, acrophobia, virtual reality, electrodermal activity

## 1 UVOD

Nadzor človekove drže (posturalni nadzor) zajema nadzor in ohranjanje stabilnosti telesa in je bistvenega pomena za ravnotežje in gibanje. Padci, ki so nemalokrat posledica nenadne izgube ravnotežja zaradi različnih fizičnih (npr. zdrs ali spotik) in/ali psiholoških (strah) vzrokov, pa se večkrat končajo tudi z resnejšimi telesni poškodbami. Za večino ljudi se strah pred padcem pojavi ob ekstremnih okoliščinah, kot je stoja na visoki zgradbi

ali na robu skale. Vendar pa se morajo nekateri posamezniki spopadati s takšnimi psihološkimi bremenitvami tudi v vsakdanjem življenju [6]. Ta strah se kaže kot anksiozna motnja, imenovana akrofobija. Psihologi so ugotovili, da se ta motnja lahko zdravi, če se posameznik sooči s strahovi in se postopoma prilagodi na take situacije. V primeru zdravljenja akrofobije lahko tako navidezno povečanje posturalne grožnje ustvarimo z nenadnimi premiki podporne ploskve [7] ali s spremembo višine [3], [1], [8], [17].

Dosedanje raziskave so pokazale, da mirna staja blizu roba na določeni višini povzroča povečanje fiziološke vzburjenosti, ki se kaže kot povečano izločanje znoja, povečanje krvnega pritiska in zmanjšanje telesne temperature [14]. S samooceno so posamezniki potrdili povečano tesnobo in strah pred padcem. Pri tem so opazili tudi druge psihološke spremembe, kot sta manjše zaupanje v ravnotežne sposobnosti in povečanje nestabilnosti, ko stojijo na bolj ogroženih površinah [1], [2], [11]. Te raziskave dokazujejo povezavo med fiziološkimi in psihološkimi spremembami stanja ter spremembami v posturalnem nadzoru. Podoben odziv se pojavi pri vseh ljudeh, ne glede na starost in zdravstveno stanje [4], saj je to nenadzorovan proces centralnega živčnega sistema, ki zazna grožnjo in sproži nagon po preživetju.

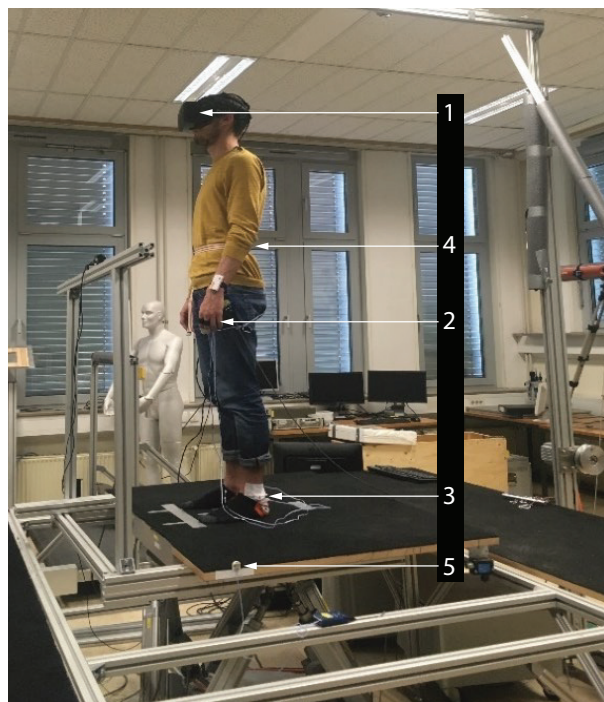
Ker je izpostavljanje realni višini lahko zelo nevarno, se v raziskovanju vse bolj pogosto uporablja tehnologija z virtualno resničnostjo (VR). Ta tehnologija, ki omogoča varno raziskovanje, je sicer v uporabi že od leta 1995 in je v preteklosti prevladovala pri psihološkem zdravljenju številnih anksioznih motenj, dandanes pa se vse več uporablja tudi za proučevanje sprememb in težav pri posturalnem nadzoru [9]. Poleg tega je uporabna za rehabilitacijske namene ter starejše posameznike, ki imajo težave s pomanjkanjem ravnotežja in z njimi povezanimi fiziološkimi spremembami. Dokazano je tudi, da je človeška percepcija virtualne višine primerljiva z realnim svetom [8], [14].

V tej študiji smo želeli pokazati, da se tudi pri posameznikih, ki se ne bojijo višine, pri določeni višini pojavi tesnoba ter da lahko z virtualno pogojeno posturalno grožnjo vplivamo na človekovo čustveno in fiziološko stanje. Ker ljudje višino zaznamo izključno z razpoložljivo vizualno informacijo, mora biti ta usklajena z informacijo iz vestibularnega in somatosenzoričnega sistema, saj se v nasprotnem primeru pojavi slabost. Zato smo v naši študiji združili virtualni dvig s premikom paralelne robotske platforme. Zaznava navideznega okolja kot realnega se bo tako čim bolj približala realnemu okolju in omogočila učinkovitejše ovrednotenje človekovega odziva na nenadno spremembo višine. Predvidevali smo, da se bodo zaradi veččutne zaznave spremembe okolja tako fiziološki kot psihološki odzivi merjenecv pomembno povečali.

## 2 METODE

Pri študiji je sodelovalo 20 mladih in zdravih oseb, ki niso imele strahu pred višino (povprečna vrednost  $\pm$  standardni odklon: starost  $25,4 \pm 1,4$  let, 5 žensk).

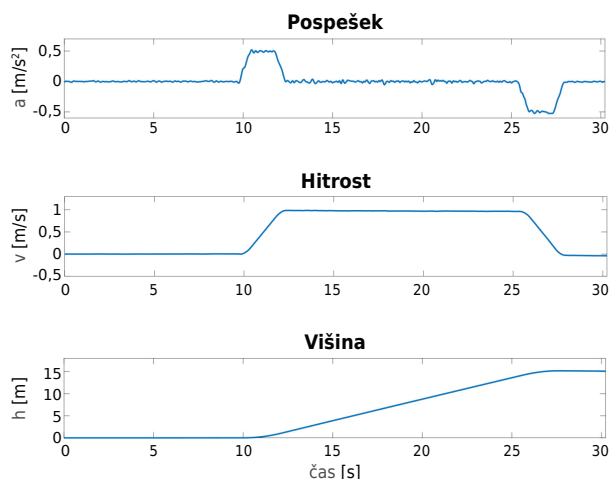
Za simulacijo dviga z dvigalom smo uporabili Stewartovo platformo – paralelnega robota s 6 prostostnimi stopnjami (slika 1). Platforma je vgrajena v večji eksperimentalni oder, ki je namenjen izvajanju študij za proučevanje človekovega ravnotežja in nadzora drže [13].



Slika 1: Eksperiment. Udeleženci so stali bos na Stewartovi platformi. Roki so imeli ob telesu in stopala rahlo razmaknjena. Med merjenjem so stali čim bolj mirno in s pogledom, usmerjenim v virtualno steno, oddaljeno 3,14 m. Na glavo smo jim namestili očala za prikaz navidezne resničnosti Oculus Rift (1). Na nedominantno roko smo jim pritrčili merilnik temperature in prevodnosti kože (2). Na oba gležnja (3), ledveni del hrbta (4) in rob platforme (5) smo namestili aktivne markerje, s katerimi smo spremljali premike udeležencev in platforme.

Ker ima uporabljena platforma območje gibanja omejeno na le 17 cm, smo morali signal za dvigovanje platforme ustrezno prirediti (slika 2). Tako je signal, ki ga pošljamo na os v vertikalni smeri (os z), sestavljen iz začetnega hitrega pospeševanja, kjer poleg gravitacijske sile deluje še sila pospeška, ter rahlega pojemka, ki naj ga udeleženci ne bi občutili. Nato sledi območje mirovanja oziroma del, ko se človek dviguje in pri tem ne čuti nobenih sil razen gravitacijske. Pristanek dvigala smo simulirali s pospeškom, vendar v nasprotni smeri. Tako smo ustvarili občutek pojemanja.

Na vrhu platforme sta nameščeni dve pritiskovni plošči (Kistler Instrumente AG, Winterthur, Switzer-



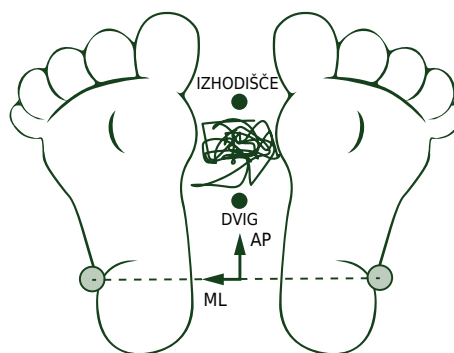
Slika 2: Časovni profil gibanja platforme navzgor – simulacija premika realnega dvigala. Pot je sestavljena iz treh delov. Na začetku dvigalo pospešuje s pospeškom  $0,5 \text{ m/s}^2$ , nato sledi konstantno gibanje s pridobljeno hitrostjo ter na koncu ustavitev s pojemkom, ki ima enako absolutno vrednost kot začetni pospešek.

land), na katerima so med eksperimentom merjenci stali. S pritiskovnimi ploščami smo merili sile reakcije podlage (sile na območju stika stopal s podlago), na osnovi katerih smo izračunali center pritiska na podlago (COP) [16]. Sile na podlago smo vzorčili s frekvenco 1000 Hz in nato podatke filtrirali z nizkopasovnim filtrom drugega reda Butterworth z mejno frekvenco 5 Hz.

S sistemom za zajem gibanja Optotrak 3D Investigator (Northern Digital Incorporated, Kanada) smo opazovali aktivne markerje, ki smo jih namestili na zunanjo stran obeh gleženjskih sklepov (lateralni malleolus) in izrastek petega ledvenega vretenca (L5) udeležencev ter na rob Stewartove platforme. Signale aktivnih markerjev smo vzorčili s frekvenco 100 Hz. Za analizo smo kinematične podatke interpolirali na frekvenco 1000 Hz in nato filtrirali z nizkopasovnim filtrom drugega reda Butterworth z mejno frekvenco 5 Hz. Interpolacija na višjo frekvenco je bila potrebna zaradi poravnave podatkov, zajetih s pritiskovnimi ploščami.

Vrednosti COP in COM smo opazovali v sagitalni (AP – anterior posterior) in čelni ravnini (ML – mediolateral). Srednje vrednosti COP in COM določajo položaj telesa posameznika na obeh višinah. Povprečno srednjo vrednost smo določili referenčno glede na položaj markerja na desnem gleženjskem sklepu v smeri AP in referenčno glede na središče razkoraka v smeri ML (slika 3).

Za določitev učinkovite vrednosti (angl. root mean square – RMS) in povprečne frekvence močnostnega spektra (angl. mean power frequency – MPF) smo najprej odšteli povprečno vrednost od vseh vrednosti COP oz. COM. RMS odraža velikost spremembe položaja COP oziroma amplitudo nihanja na obeh višinah. MPF



Slika 3: Izhodišče koordinatnega sistema za analizo parametrov COP in COM. Prikazana sta še primer položaja srednje vrednosti COP na izhodiščni višini (IZHODIŠČE) in višini po dvigu (DVIG) ter primer krivulje gibanja COP. Premik srednje vrednosti COP iz izhodišča v smer nazaj nakazuje na nagib človeka stran od roba platforme.

je podatek o povprečni frekvenci v spektru moči vrednosti COP in predstavlja frekvenco nihanja telesa udeleženca v smeri AP oziroma ML. Glede na literaturo [6], [8], [17] izračun teh vrednosti zadostuje za oceno vpliva posturalne grožnje na nadzor COP in COM.

Oba parametra, COP in COM, smo analizirali v treh fazah. V prvi fazi smo izhodiščne povprečne vrednosti (stoja na nizki višini) primerjali s povprečnimi vrednostmi v prvih 5 sekundah po dvigu na končno višino. Ker je v prvih 5 sekundah po končanem dvigu vpliv dviga na destabilizacijo stoječega položaja največji, smo ta del analizirali ločeno. V drugi fazi smo primerjali izhodiščne povprečne vrednosti s povprečnimi vrednostmi na intervalu od 5 do 120 sekund po končanem dvigu. Za analizo preostalega časa na končni višini smo se osredotočili zgolj na vpliv višine in tako delno ločili vpliv dviga na rezultate meritev. Za opazovanje povprečne srednje vrednosti smo uporabili še dodaten način (tretja faza), s katerim smo analizirali spremembe premikov COP in COM posameznika po dvigu oziroma na višini 3,2 m. Signal smo zato najprej razdelili na krajše intervale – dvominutni interval smo razdelili na 24 delov, vsak del traja 5 sekund, nato pa za vsak del izračunali povprečno vrednost signala.

Za merjenje prevodnosti kože smo uporabili merilnik GRS+unit (Shimmer Sensing, Dublin, Irska). Priložene suhe elektrode smo pritrdili na kožo notranje strani prstov (planarna prstnica) na nedominantni roki. Dodatno smo merili temperaturo na površini kože na blaznici prsta nedominantne roke z merilnikom MSR145 (Seuzach, Švica). Podatke smo analizirali z uporabo programskega okolja Ledalab – prosto dostopen program, podprt v okolju Matlab, za analizo signala prevodnosti kože.

Za večjo zanesljivost rezultatov smo k poskusu dodali še vprašalnike, ki nam pomagajo razumeti posameznikovo doživljanje situacije. Ocenjevali smo tesnobo, strah, zaupanje in stabilnost. Po vsaki dvominutni

stoji na obeh višinah je udeleženec ustno odgovoril na vprašanja, projicirana v virtualnem okolju. V ta namen smo uporabili splošno dostopni vprašalnik (angl. The State-Trait Anxiety Inventory oziroma krajše STAI) [15], ki temelji na 4-točkovni Likertovi skali in vsebuje 40 vprašanj na podlagi samoocene.

Za lažjo primerjavo rezultatov smo poskušali čim bolj posnemati virtualen laboratorij (slika 4), prikazan v članku [8]. Virtualno okolje smo ustvarili s pomočjo programa Unity (Unity Technologies, San Francisco, Kalifornija, ZDA), ki smo ga prek povezave UDP sinhronizirali s premikom Stewartove platforme.

Celoten eksperiment je bil zasnovan v programskem okolju Simulink (Mathworks, Natick, MA, USA), ki omogoča Real-Time™ sinhronizacijo in krmiljenje paralelnega robota v realnem času. Preko povezave UDP pa smo povezali in krmilili še navidezno okolje, izdelano v programskem okolju Unity.

Za ugotavljanje statistične razlike med višinama (0,8 m in 3,2 m) smo za vse spremenljivke (povprečne vrednosti, RMS, MPF pri merjenju COP in COM v obeh smereh, prevodnost, temperatura, strah, stabilnost, tesnoba, zaupanje) uporabili parni t-test.

Metode z vsemi preostalimi podrobnostmi in psihološkimi vprašalniki so zapisane v magistrskem delu [12].

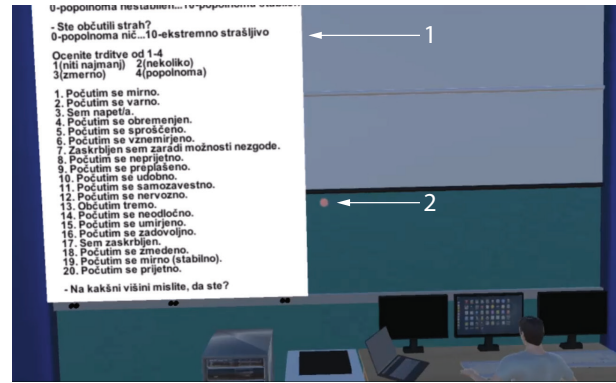
### 2.1 Protokol merjenja

Po prihodu udeležencev eksperimenta v laboratorij smo jih najprej seznanili s potekom merjenja in jim v podpis predložili obrazec za prostovoljno privolitev k sodelovanju. Nato smo nanje namestili senzorce in virtualna očala. Sledila je faza umiritve v sedečem položaju in privajanja na virtualno okolje. Po nekaj minutah smo udeležencem pomagali vstati in nato se je začela dvominutna faza merjenja na virtualni višini 0,8 m – izhodišče. Pri tem so morali stati čim bolj mirno in gledati naravnost v označeno točko na virtualni steni, oddaljeni 3,14 m. Po končani fazi umiritve so udeleženci ustno odgovorili na vprašanja, ki smo jih projicirali na steno v virtualnem okolju (slika 4). Nato se je platforma dvignila in takoj po tem je ponovno sledila faza dvominutne mirne stoje na virtualni višini 3,2 m – končna višina. Po končani fazi mirne stoje so udeleženci zopet odgovorili na isti vprašalnik kot na začetku.

## 3 REZULTATI

### 3.1 Analiza parametrov COP

Pri primerjanju podatkov na začetni višini s prvimi 5 sekundami na višini 3,2 m obstaja statistična razlika pri skoraj vseh opazovanih vrednostih parametrov COP (slika 5 levo). Pri primerjanju srednjih vrednosti v smeri AP obstaja statistična razlika med višinama ( $t(18) = 3,281, p = 0,004$ ), medtem ko v smeri ML ni opazne statistične razlike ( $t(18) = -0,792, p = 0,439$ ). Pri vrednostih RMS obstaja razlika s podobnim trendom



Slika 4: Virtualno okolje. V virtualnem okolju (pisarni) so udeleženci stali na premični platformi, na steno pred njimi pa smo projicirali vprašalnik (1) ter točko (2), na katero so se osredotočali v fazah umiritve.

v smereh AP ( $t(18) = -4,410, p < 0,001$ ) in ML ( $t(18) = -4,436, p < 0,001$ ). Prav tako opazimo razliko s podobnim trendom pri vrednostih MPF v smereh AP ( $t(18) = -9,426, p < 0,001$ ) in ML ( $t(18) = -11,119, p < 0,001$ ).

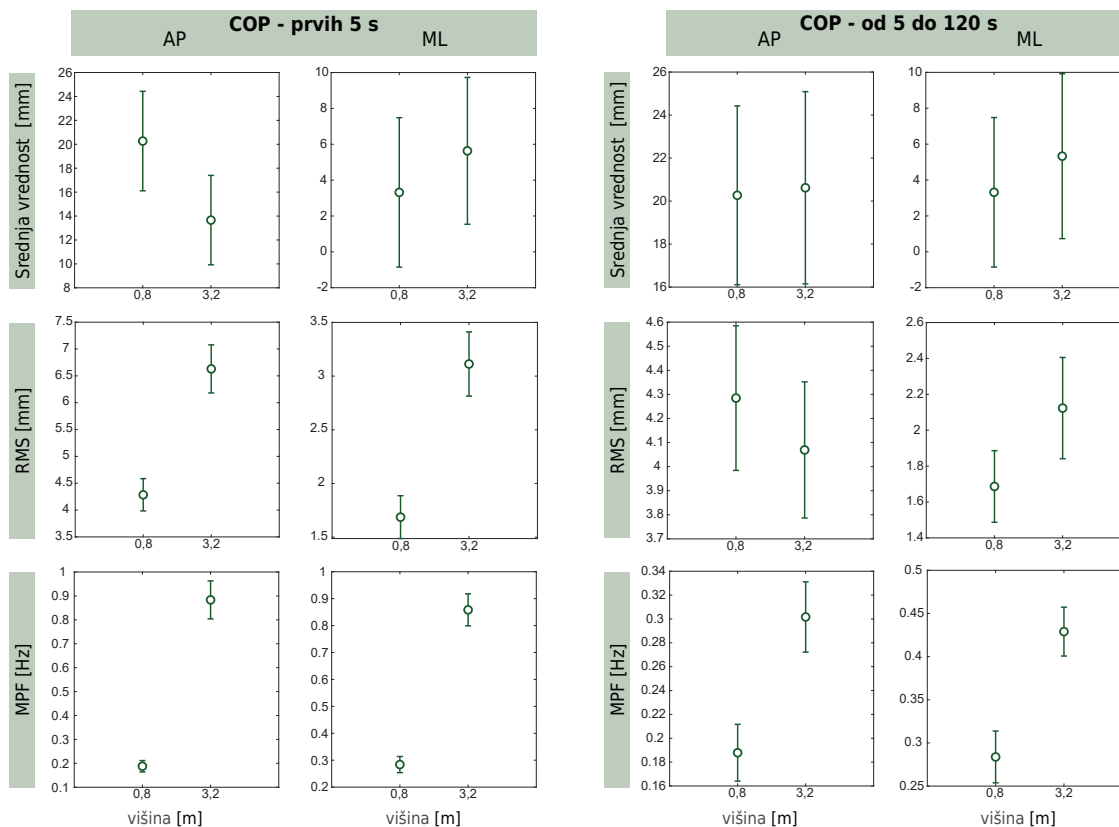
Pri primerjavi vrednosti pri začetni višini s preostalimi podatki (ne opazujemo prvih 5 sekund po dvigu - slika 5 desno) ni opazne statistične razlike pri srednjih vrednosti v smereh AP ( $t(18) = -0,161, p = 0,874$ ) in ML ( $t(18) = -1,987, p = 0,062$ ). Prav tako se statistično ne razlikujejo vrednosti RMS v AP ( $t(18) = 0,736, p = 0,471$ ). V smeri ML opazimo statistično razliko ( $t(18) = -2,616, p = 0,017$ ). Razlika obstaja tudi pri vrednostih MPF s podobnim trendom v smereh AP ( $t(18) = -5,133, p < 0,001$ ) in ML ( $t(18) = -6,193, p < 0,001$ ).

### 3.2 Analiza parametrov COM

Pri primerjanju podatkov na nizki višini z začetnimi 5 sekundami na višini 3,2 m obstaja statistična razlika pri primerjanju srednjih vrednosti v smeri AP ( $t(18) = 2,738, p = 0,014$ ), medtem ko v smeri ML ni opazne statistične razlike ( $t(18) = -0,069, p = 0,946$ ). Pri vrednostih RMS obstaja razlika v smeri AP ( $t(18) = 2,119, p = 0,048$ ). S primerjavo podatkov RMS v smeri ML opazimo, da ni statistične razlike ( $t(18) = -0,272, p = 0,788$ ). Prav tako obstaja razlika pri vrednostih MPF v smereh AP ( $t(18) = -5,150, p < 0,001$ ) in ML ( $t(18) = -9,988, p < 0,001$ ) s podobnim trendom v obeh smereh.

Pri primerjavi vrednosti pri nizki višini s preostalimi podatki (ne opazujemo prvih 5 sekund po dvigu) pa ni opazne statistične razlike med opazovanimi spremenljivkami: med srednjimi vrednostmi v smereh AP ( $t(18) = 0,473, p = 0,642$ ) in ML ( $t(18) = -0,261, p = 0,797$ ), vrednostmi RMS v smereh AP ( $t(18) = 1,447, p = 0,165$ ) in ML ( $t(18) = -1,528, p = 0,144$ ) ter vrednostmi MPF v smereh AP ( $t(18) = -1,742, p = 0,099$ ) in ML ( $t(18) =$





Slika 5: Primerjava vrednosti COP na obeh višinah – na višini 3,2 m brez prvih 5 sekund po dvigu. Diagrami levo prikazuje vrednosti v smeri AP (naprej-nazaj), diagrami desno pa vrednosti v smeri ML (levo-desno). Primerjave so izrisane za srednje vrednosti COP glede na desni gleženj in MPF. Označene so srednje vrednosti in standardna napaka srednje vrednosti. Manjša je vrednost v smeri AP, večji je nagib telesa stran od roba.

-1,810,  $p = 0,087$ ).

### 3.3 Potek prilagoditve ravnotežja na novo okolje

Opazovanje srednje vrednosti COP in COM v 5-sekundnih intervalih je prikazano na slikah 7 in 8. Na višini 0,8 m je srednja povprečna vrednost tako pri COP kot COM bolj konstantna v primerjavi z vrednostmi po dvigu na višino 3,2 m, kjer se na začetku opazi negativen odklon vrednosti predvsem v smeri AP (vrednosti se pomaknejo proti ničli). Kot že omenjeno, to pomeni nagib nazaj oziroma stran od roba. S časom (umirjanje po končanem dvigu) se povprečna vrednost ustali in vrne na vrednosti, ki smo jih zabeležili na začetni višini.

### 3.4 Analiza fizioloških kazalcev - elektrodermalna aktivnost in temperatura kože

Na sliki 9 so grafično prikazane spremembe prevodnosti kože in temperature na površini kože s spremembo višine. Pričakovano je, da se z izpostavljenostjo nevarni situaciji prevodnost kože poveča in temperatura zmanjša. To potrjujejo rezultati, saj se faktor prevodnosti poveča za 0,5 in temperatura pade približno za 0,3 °C. Z uporabo statistične analize smo dokazali, da se fiziološko stanje posameznika razlikuje med opazovanima višinama. Za vrednosti SCL je  $t(19) = -7,165$ ,

in  $p < 0,001$ . Pri primerjavi temperature pa dobimo  $t(19) = 2.630$  in  $p = 0.016$ .

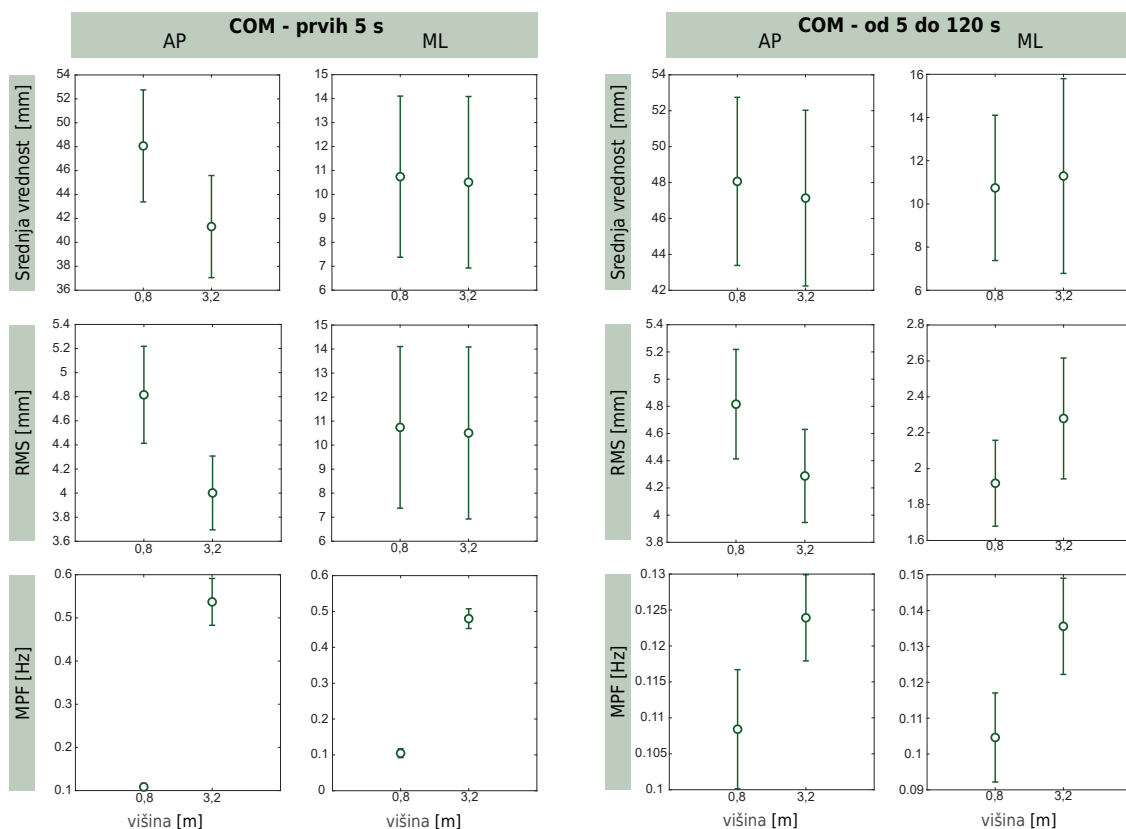
### 3.5 Psiho-socialni kazalci

Rezultati psiholoških vprašalnikov, s katerimi smo preverili stopnjo vživetja v virtualno resničnost, so prikazani na sliki 10. Zaupanje v sposobnost vzdrževanja ravnotežja in stabilnost z izpostavljenostjo višini padata, medtem ko strah in tesnoba naraščata. S t-testom smo ugotovili, da obstaja statistična razlika med višinama 0,8 m in 3,2 m pri vseh opazovanih psiholoških spremenljivkah. Na višini 0,8 m je faktor precejevanja (ocena višine/dejanska višina)  $1,5 \pm 0,10$  (povprečna vrednost  $\pm$  napaka srednje vrednosti), na višini 3,2 m pa smo dobili nekoliko nižjo vrednost  $1,3 \pm 0,07$  (povprečna vrednost  $\pm$  napaka srednje vrednosti). Rezultat je grafično prikazan na sliki 10.

Dodatno smo s t-testom ugotovili, da za faktor precejevanja obstaja signifikantna razlika med obema višinama ( $t(19) = 5.135$  in  $p < 0.001$ ) (slika 11).

## 4 ZAKLJUČEK

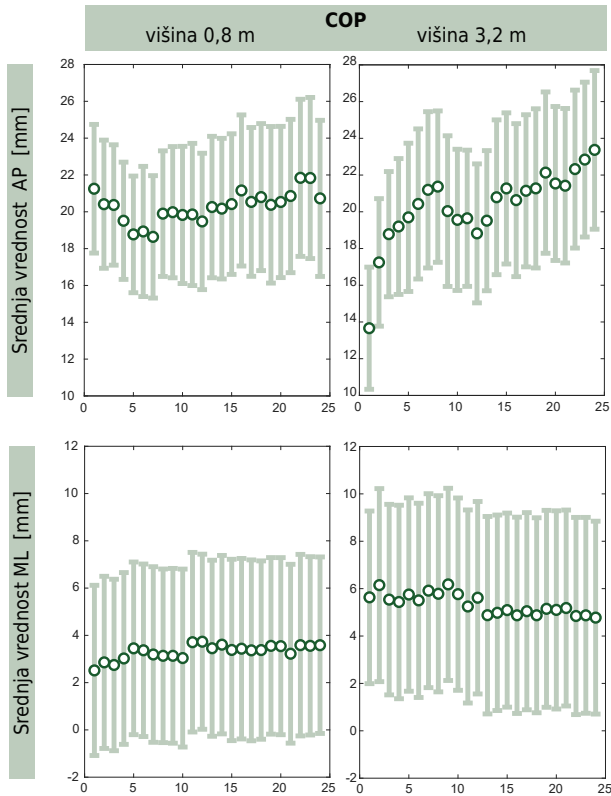
Podobno kot v prejšnjih raziskavah [1], [6], [10] smo pokazali, da ima sprememba virtualne višine vpliv na



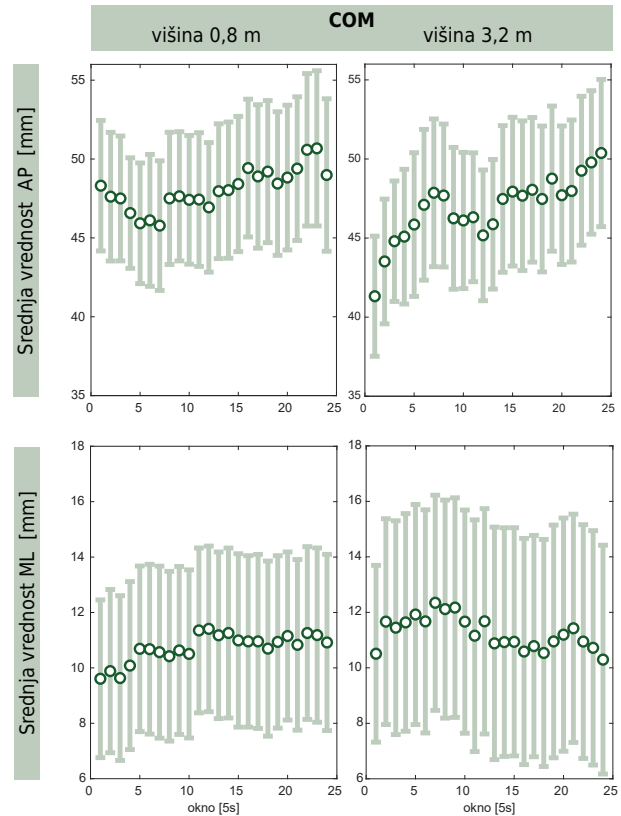
Slika 6: Primerjava vrednosti COM na obeh višinah - na višini 3,2 m brez prvih 5 sekund po dvigu. Diagrami levo prikazuje vrednosti v smeri AP (naprej-nazaj), diagrami desno pa vrednosti v smeri ML (levo-desno). Primerjave so izrisane za srednjo vrednost COM glede na desni gleženj, RMS in MPF. Označene so srednje vrednosti in standardna napaka srednje vrednosti. Manjša je vrednost v smeri AP, večji je nagib telesa stran od roba.

posturalni nadzor posameznika in čustven odziv, za katerega so značilni povečanje fiziološke vzburjenosti in tesnobe. Drastično spremembo višine človek zazna kot grožnjo in nenadzorovano se sproži nagon po preživetju. To vključuje poostren nadzor nad držo, preprečevanje izgube ravnotežja in padca. Centralni živčni sistem poveča togost sklepov gležnja ter s tem uravnava napetost mišic in zmanjša nihanje. Pri tem se poveča frekvenca in nižja amplituda zibanja. Pri analizi podatkov COP in COM smo najprej primerjali vrednosti dvominutne stoje na nižji višini z vrednostmi na višini 3,2 m. Ker ni bilo opaziti očitne spremembe v povprečnih vrednostih na obeh višinah, smo se odločili, da opazovanje na večji višini razdelimo na dva dela. Prvi del zajema prvih 5 sekund takoj po dvigu, saj je takrat posturalna sprememba največja, drugi del pa preostali del stoji na višini 3,2 m. S tem delno ločimo vpliv dviga na meritev. Iz dobljenih rezultatov vidimo, da se srednja vrednost COP in COM v smeri AP v prvih petih sekundah zmanjša, kar pomeni odklon stran od roba. Če opazujemo interval brez prvih 5 sekund, pa se v povprečju srednja vrednost skoraj ne spreminja, kar prikazuje, da se posameznik prilagodi na višino in vzdržuje mirno stoji. Zgolj zaradi boljšega pregleda nad srednjimi vrednostmi COP in COM smo se

odločili za razširitev analize tako, da dvominutna intervala na obeh višinah razdelimo na manjše petsekundne intervale in izračunamo povprečne vrednosti na teh intervalih. Tako vidimo, da je odklon največji takoj po dvigu in se sčasoma ustali. Povprečna frekvenca močnostnega spektra MPF se poveča pri podatkih COP in COM v obeh smereh. Višja frekvenca zibanja omogoča poostren nadzor nad stoji. Efektivna vrednost RMS pri podatkih COP v prvih petih sekundah opazovanja narašča v obeh smereh, v intervalu opazovanja brez prvih 5 sekund pa v smeri AP pada. Podoben potek imajo tudi vrednosti COM, v smeri AP se z višino RMS nižja, medtem ko se v smeri ML zviša. Opazimo, da se vrednosti COM spreminjajo nekoliko drugače kot vrednosti COP. Možnost odstopanja vrednosti COM je povezana tudi z 10-krat nižjo frekvenco vzorčenja kot tudi načinom merjenja, saj smo merili le približek z enim aktivnim markerjem. Za večjo natančnost bi morali imeti markerje po celotnem telesu in nato glede na položaje delov telesa določiti masno središče. Zavedati se je treba, da so premiki vrednosti COP in COM zelo majhni, zgodijo se v rangu nekaj milimetrov. Pri merjenju smo imeli na levi strani samo eno kamero za zajem gibanja in posledično se lahko izgubi vidljivost aktivnih markerjev. Zaradi tega



Slika 7: COP srednje vrednosti z oknjenjem 5 s. Diagrami levo prikazujejo srednjo vrednost na višini 0,8 m, desno pa vrednosti na višini 3,2 m. Označene so srednje vrednosti in standardna napaka srednje vrednosti. Razlika je očitna v smeri AP. Na nižji višini (zgoraj levo) je človek stal bolj mirno, zato se tudi vrednost ne spreminja. Po dvigu na višino 3,2 m se na začetku opazi odklon vrednosti v smeri AP v negativno smer (zgoraj desno). S časom se povprečna vrednost ustali. Center pritiskovnih plošč je lociran na 0 mm, premik v negativno smer AP pomeni nagib stran od roba.

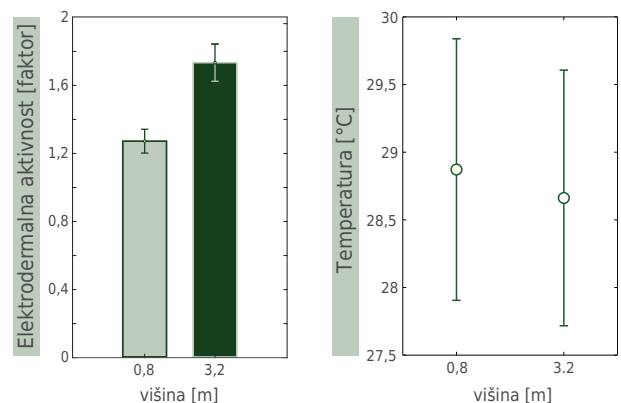


Slika 8: COM srednje vrednosti z oknjenjem 5 s. Diagrami levo prikazujejo srednjo vrednost na višini 0,8 m, desno pa vrednosti na višini 3,2 m. Označene so srednje vrednosti in standardna napaka srednje vrednosti. Razlika je očitna v smeri AP. Na nižji višini (zgoraj levo) je človek stal bolj mirno, zato se tudi vrednost ne spreminja. Po dvigu na višino 3,2 m se na začetku opazi odklon vrednosti v smeri AP v negativno smer (zgoraj desno). S časom se povprečna vrednost ustali. Center pritiskovnih plošč je lociran na 0 mm, premik v negativno smer AP pomeni nagib stran od roba.

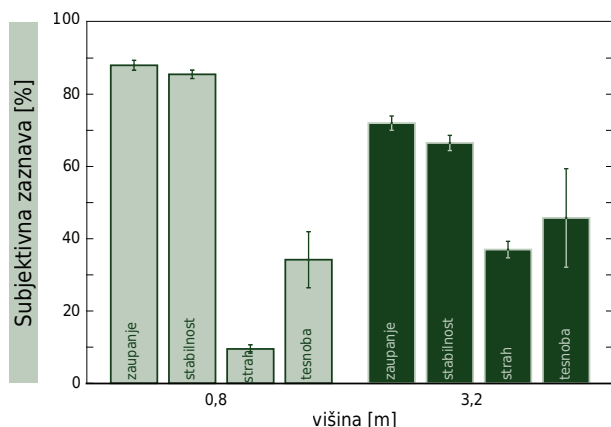
je večja možnost odstopanja vrednosti v smeri ML.

S tem ko se kri koncentrira v mišicah, ki vzdržujejo mirno stoji, se zmanjšata pretok krvi skozi okončine in temperatura na površini kože [5]. Povišanje EDA je najverjetneje posledica tudi drugih dejavnikov, kot sta potenje prstov zaradi zalepljenih elektrod in odziv na virtualno okolje. Pretirana ocena višine pomeni, da so imeli udeleženci močan občutek prisotnosti v virtualnem okolju, kar je primerljivo z dosedanjimi raziskavami [8], [14]. Ni jasno, zakaj obstaja signifikantna razlika med višinama. Za pojasnitev bi bilo treba izvesti dodatne namenske raziskave.

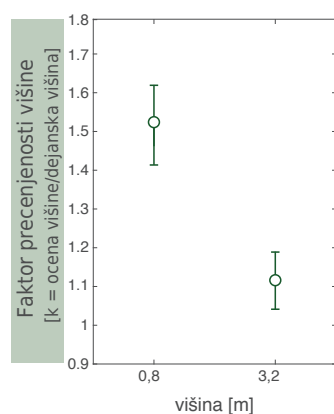
Z raziskavo smo pokazali, da so rezultati primerljivi z rezultati prejšnjih raziskav o učinkih višine na nadzor drže in anksioznost posameznikov v realnih pogojih, in s tem potrdili primernost uporabe okrepljenega navideznega okolja v raziskavah o nadzoru človekove drže in ravnotežja. Poleg tega smo pokazali še, da se tudi pri posameznikih, ki se ne bojijo višine, s posturalno



Slika 9: Rezultati odziva prevodnosti in temperature kože. Na levem diagramu je prikaz primerjave elektrodermalne aktivnosti kože na obeh višinah, desno pa je prikazana primerjava temperaturnega odziva kože. Označene so srednje vrednosti in standardna napaka srednje vrednosti.



Slika 10: Rezultati vprašalnikov. Na diagramu je grafično prikazana primerjava ocen zaupanja, stabilnosti, strahu in tesnobe na obeh višinah. Označene so srednje vrednosti in standardna napaka srednje vrednosti.



Slika 11: Faktor precenjenosti višine. Na diagramu je prikazana primerjava ocen višine na obeh položajih (nizko in visoko). Označene so srednji vrednosti in standardni napaki srednje vrednosti.

grožnjo pojavijo spremembe v čustvenem in fiziološkem stanju, hkrati pa se poostri nadzor drže.

## ZAHVALA

Delo je bilo financirano iz programa EU za raziskave in inovacije H2020 (št. 731540, An.Dy).

## LITERATURA

- [1] A. L. Adkin, J. S. Frank, M. G. Carpenter, G. W. Peysar, *Postural control is scaled to level of postural threat*, *Gait Posture*, vol. 12, no.1 2, pp. 87–93, Oct. 2000.
- [2] A. L. Adkin, J. S. Frank, M. G. Carpenter, in G. W. Peysar, *Fear of falling modifies anticipatory postural control*, *Exp. Brain Res.*, vol. 143, no. 2, pp. 160–170, 2002.
- [3] L. A. Brown, J. S. Frank, *Postural compensations to the potential consequences of instability: kinematics*, *Gait Posture*, vol. 6, no. 2, pp. 89–97, Oct. 1997.
- [4] L. A. Brown, M. A. Polych, and J. B. Doan, *The effect of anxiety on the regulation of upright standing among younger and older adults*, *Gait Posture*, vol. 24, no. 4, pp. 397–405, Dec. 2006.

- [5] W. Boucsein, *Electrodermal Activity*. Boston, MA: Springer US, 2012.
- [6] M. Carpenter, J. Frank, C. Silcher, and G. Peysar, *The influence of postural threat on the control of upright stance*, *Exp. Brain Res.*, vol. 138, no. 2, pp. 210–218, May 2001.
- [7] C.-L. L. Chen, S.-Z. Z. Lou, H.-W. W. Wu, S.-K. K. Wu, K.-T. T. Yeung, and F.-C. C. Su, *Effects of the type and direction of support surface perturbation on postural responses*, *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 11, no. 1, p. 50, 2014.
- [8] T. W. Cleworth, B. C. Horslen, M. G. Carpenter, *Influence of real and virtual heights on standing balance.*, *Gait Posture*, vol. 36, no. 2, pp. 172–176, Jun. 2012.
- [9] C. M. Coelho, A. M. Waters, T. J. Hine, and G. Wallis, *The use of virtual reality in acrophobia research and treatment*, *J. Anxiety Disord.*, vol. 23, no. 5, pp. 563–574, Jun. 2009.
- [10] J. R. Davis, A. D. Campbell, A. L. Adkin, and M. G. Carpenter, *The relationship between fear of falling and human postural control.*, *Gait Posture*, vol. 29, no. 2, pp. 275–279, Feb. 2009.
- [11] K. J. Johnson, M. Zaback, C. D. Tokuno, M. G. Carpenter, and A. L. Adkin, *Exploring the relationship between threat-related changes in anxiety, attention focus, and postural control*, *Psychol. Res.*, vol. 83, no. 3, pp. 445–458, Apr. 2019.
- [12] S. Kezić, *Vpliv navidezne višine na posturalni nadzor človeka*, 2019.
- [13] Z. Potocanac, R. Goljat, J. Babic, *A robotic system for delivering novel real-time, movement dependent perturbations*, *Gait Posture*, vol. 58, no. August, pp. 386–389, Oct. 2017.
- [14] P. I. Simeonov, H. Hsiao, B. W. Dotson, D. E. Ammons, B. W. Dotson, D. E. Ammons, *Height Effects in Real and Virtual Environments*, *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.*, vol. 47, no. 2, pp. 430–438, Jun. 2005.
- [15] P. Skapinakis, *Spielberger State-Trait Anxiety Inventory*, in *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research*, A. C. Michalos, Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, pp. 6261–6264.
- [16] D. A. Winter, *Human balance and posture control during standing and walking*, *Gait Posture*, vol. 3, no. 4, pp. 193–214, 1995.
- [17] M. Zaback, A. L. Adkin, M. G. Carpenter, *Adaptation of emotional state and standing balance parameters following repeated exposure to height-induced postural threat*, *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 12449, Dec. 2019.

**Jernej Čamerik** je leta 2007 diplomiral na Fakulteti za šport Univerze v Ljubljani, leta 2020 pa doktoriral na Mednarodni podiplomski šoli Jožefa Stefana v Ljubljani. Njegova raziskovalna dejavnost se nanaša na raziskovanje človekovih gibalnih sposobnosti: upravljanje gibanja in gibalno učenje. Še zlasti se osredotoča na raznovrstne stike človeka s predmeti v njegovi okolici, ki lahko služijo ohranjanju ravnotežja in preprečevanju padcev ali zgolj za bolj ekonomično gibanje.

**Sanja Kezić** je leta 2016 diplomirala na Fakulteti za elektrotehniko, po tem je nadaljevala študij na smeri robotika in magistrirala leta 2019. Raziskovalno področje magistrske naloge je bilo opazovanje posturalnega nadzora pri spremembi virtualne višine. Po končanem študiju se je zaposlila kot testna inženirka v SIQ Ljubljana.

**Jan Babič** je diplomiral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani v letih 1999 in 2004. Njegova raziskovalna dejavnost obsega splošne raziskave motorične kontrole pri ljudeh in uporabo bioloških dognanj pri razvoju robustnih robotskih sistemov za fizično interakcijo s človekom in okoljem.