

Interaktivni sistemi kot orodje za trening športnega plezanja: pregled področja in oblikovanje novih vadbenih pristopov

Lina Mešič

Fakulteta za matematiko, naravoslovje in
informacijske tehnologije
Univerza na Primorskem
8924@student.upr.si

Abstract—Športno plezanje je v zadnjih letih doživelo hiter razvoj iz večinsko rekreativne dejavnosti v resen tekmovalni šport. Z uvrstitvijo na olimpijske igre, je popularnost športa hitro zrasla. Posledično se je povečala potreba po učinkovitih in strukturiranih metodah treniranja ne le za profesionalne tekmovalce, temveč tudi za rekreativne plezalce. V članku smo pregledali devet izbranih študij s področja človeško-računalniške interakcije (HCI) v športnem plezanju v obdobju 2014–2025 ter jih kategorizirali v štiri skupine: vizualna augmentacija in interaktivne igre, virtualna resničnost in mentalna priprava, sledenje gibanja in video vizualizacija ter senzorika, zvok in nosljive naprave. Ugotovili smo, da so sistemi vizualne augmentacije najboljše raziskani in so se izkazali za najučinkovitejše na področju povečanje motivacije pri rekreativcih. Medtem ko VR in nosljive naprave kažejo potencial pri zmanjševanju strahu pred padcem in izboljšanju zavedanja telesa na steni. Izkazalo se je, da interaktivni sistemi ne morejo v celoti nadomestiti človeškega trenerja, lahko pa prevzamejo repetitivne naloge in služijo kot učinkovit asistent, zlasti za začetnike. Rezultati kažejo na potrebo po robustnejših senzorjih, premišljeni časovni usklajenosti povratnih informacij in vmesnikih, ki ne odvrčajo trenerjeve pozornosti od plezalcev. Ugotovitve predstavljajo smernice za nadaljnji razvoj interaktivnih sistemov v treniranju športnega plezanja.

I. UVOD

Tako kot tehnologija je tudi plezanje, kot šport, skozi leta močno napredovalo. S tem so se posledično spremenili tudi načini treniranja, bodisi rekreativcev, bodisi profesionalnih športnikov. Potreba po analizi gibanja, kondicije, dinamike, koordinacije, moči do organizacije treningov čez teden, mesec, sezono je vedno pogostejša in vedno večjega pomena. Z uvrstitvijo na olimpijske igre leta 2020 se je povečalo zanimanje za ta šport in posledično tudi za treniranje. Trening športnega plezanja danes ni zgolj poplezavanje s soplezalcem, ampak zahteva ciklizacijo treningov, periodizacijo ter natančno spremljanje napredka, še izrecno na tekmovalnem nivoju treniranja.

Z vedno večjo popularizacijo športa so v osprednje stopili številni problemi v samem izvajanju treninga. Trenerji, še posebej na tekmovalnem oz. profesionalnem nivoju se lahko učinkovito posvetijo le dvema do maksimalno trem plezalcem na trening. Kajti opazovanje in popravljanje tehnike zahteva visoko stopnjo fokusa. Po drugi strani se pri začetnikih pogosto

pojavi težave z vizualizacijo gibanja ter strah pred padcem ali višino. Rekreativni plezalci, ki želijo napredovati, pogosto ne vedo, kje začeti in kaj delati za napredek, saj jim primanjkuje strukturiranih povratnih informacij. Vsi našeti problemi kažejo na potrebo po orodjih, ki bi lahko dopolnila delo trenerja in plezalcem omogočila učinkovitejše učenje.

Interaktivni sistemi s področja človek-računalniške interakcije (HCI) ponujajo potencialne rešitve. Raziskave so doslej preučevale več pristopov: vizualno augmentacijo s projektorji na plezalni steni, uporabo virtualne resničnosti za psihološki trening in zmanjševanje strahu, nosljive naprave in zvočno vodenje ter sledenje gibanju z vizualizacijami. Sistemi, ki se razlikujejo po tehnologiji, namenu in stopnji interaktivnosti.

Namen članka je pregled že obstoječih interaktivnih sistemov za treniranje športnega plezanja. Literaturo smo za lažjo predstavo razporedili v 4 kategorije: vizualno augmentacijo in interaktivne igre, virtualno resničnost in mentalna priprava, sledenje gibanja in video vizualizacijo ter senzoriko, zvok in nosljive naprave. Na podlagi analize bomo podrobneje pogledali prednosti in slabosti posamezne kategorije ter poskušali odgovoriti na naslednja raziskovalna vprašanja:

- 1) Kako optimizirati časovno usklajenost povratnih informacij med trenerjem in vadečim na steni?
- 2) Kako sistemi vplivajo na različne skupine uporabnikov (tekmovalni vs. rekreativni nivo)?
- 3) Ali je "virtualni trener" koristen pripomoček ali grožnja trenerski vlogi? Kje je meja?
- 4) Kako olajšati delo trenerja s pomočjo interaktivnih sistemov? Kako oblikovati vmesnik?

II. METODOLOGIJA

Pregled temelji na devetih delih, ki predstavljajo reprezentativen vzorec raziskav s področja človek-računalniške interakcije (HCI) v športnem plezanju v obdobju 2014–2025. Dela smo izbrali na podlagi njihove relevantnosti za trening plezanja.

Dela smo kategorizirali glede na uporabljeno prevladujočo tehnologijo in glavni namen uporabe. Tehnološke komponente sistema (projektor, HMD, kamera, senzorji) določajo vrsto interakcije med plezalcem in sistemom, medtem ko

se namen sistema razlikuje glede na to, ali cilja na motivacijo in zabavo (igre), mentalno pripravo (VR), analizo tehnike (sledenje gibanja) ali povratno informacijo med plezanjem (senzorika, zvok). Takšna kategorizacija nam prav tako omogoča jasno primerjavo podobnih pristopov in identifikacijo slabo raziskanih področij.

Na podlagi teh kriterijev smo dela razvrstili v štiri kategorije:

- 1) vizualna augmentacija in interaktivne igre,
- 2) virtualna resničnost in mentalna priprava,
- 3) sledenje gibanja in video vizualizacija ter
- 4) senzorika, zvok in nosljive naprave.

Vsako delo smo analizirali glede na tehnološke komponente, metodologijo evaluacije, vrsto uporabnikov (rekreativci ali tekmovalci) in identificirane omejitve. Cilj analize je bil identificirati skupne značilnosti sistemov znotraj posameznih kategorij ter opredeliti pomanjkljivosti in morebitne izboljšave, ki jih obstoječi pristopi ne naslavljaajo.

TABLE I
PREGLED INTERAKTIVNIH SISTEMOV KOT ORODJE ZA TRENING
ŠPORTNEGA PLEZANJA GLEDE NA UPORABLJENO TEHNOLOGIJO, NAMEN
IN IZZIVI

Sistem	Tehnologija	Glavni namen	Izzivi
Augmented Climbing [1]	Projektor, Kinect V2	Podpora treningu	Okluzija
Augmented Climbing Wall [2]	Projektor, Kinect V2	Motivacija in igrifikacija	Motnje zaradi magnezija in tresljajev
Shadowlings [3]	Projektor, Kinect	Spodbujanje sodelovanja in gibanja	Razumevanje 2D interakcije
Falling into Fears [4]	Meta Quest 3	Zmanjševanje strahu	Omejen realizem simulacije
Computer-Aided Imagery [5]	Kinect V2, 3D simulacija	Mentalna priprava	Poenostavljena simulacija prijemov
betaCube [6]	Projektor, Kinect V2	Analiza tehnike	Nezanesljivo skeletno sledenje
ClimbVis [7]	Kinect V2, Google Glass	Učenje tehnike	Okluzija in omejeno vidno polje
Sound-Assisted Climbing [8]	Kinect, LiDAR	Zvočno vodenje	Izguba sledenja rok
Wearables [9]	Haptične naprave	Haptična povratna informacija	Časovna neuskklajenost signalov

III. KATEGORIZACIJA SISTEMOV

A. Vizualna augmentacija in interaktivne igre (AR na steni)

Prva kategorija vključuje sisteme, ki z uporabo projektorjev in računalniškega vida spremenijo plezalno steno v interaktivno površino. Njihov namen je povečati motivacijo, zabavo in raznolikost gibov med treningom, ne pa nujno natančna analiza tehnike ali pridobivanje povratnih informacij o gibanju. Takšni sistemi so predvsem uporabni za rekreativce in začetnike, saj povečajo zanimanje in zmanjšajo monotonijo

ponavljajočih se balvanov in smeri ter spodbujajo sodelovanje med plezalci. V nadaljevanju bomo analizirali tri take sisteme iz člankov *"Augmented Climbing: Interacting With Projected Graphics on a Climbing Wall"* [1], *"The Augmented Climbing Wall: High-Exertion Proximity Interaction on a Wall-Sized Interactive Surface"* [2] in *"Designing Climbing Games: Creating Shadowlings for ValoClimb"* [3].

Augmented climbing in Augmented Climbing Wall:

Kajastila in sodelavci so v dveh člankih predstavili evolucijo sistema od prvih prototipov do komercialno dostopnega sistema "Augmented Climbing Wall" ali ACW. Oba prispevka temeljita na uporabi projektorja (od 4800 do 6000 lumnov) in globinskega senzorja Microsoft Kinect v2, ki sta povezana z računalniškim sistemom za analizo gibanja v realnem času. Medtem ko je prva študija iz leta 2014 preučevala osnovno izvedljivost interakcije človek-računalnik na steni z 8 izkušenimi plezalci v nadzorovanem okolju, je kasnejše delo leta 2016 že predstavilo tehnološko dokončan sistem z avtomatizirano kalibracijo projektorja in senzorja ter dodatnim vmesnikom na zaslonu na dotik, na voljo v komercialnem plezalnem centru.

Eksperimentalna metodologija se med deloma močno razlikuje po obsegu in okolju. Leta 2014 je bila izvedena preliminarne študija v kontroliranem laboratoriju z 8 izkušenimi plezalci po metodi "čarovnik iz Oza". Udeleženci so eksperiment izvajali v parih, da bi preizkusili sodelovalne prototipe. Vsaka testna seja je trajala približno 60 minut. Udeležence so prosili, naj preizkusijo prototipe in jih primerjajo s svojim običajnim plezalnimi treningom [1]. Prototipi so:

- 1) Projicirane smeri: projicirane smeri z osvetljenimi krožnimi oprimki in povezovalnimi črtami. Plezalec lahko naloži shranjene smeri in preklaplja med njimi.
- 2) Postavljanje smeri: nova smer se lahko določi s samim plezanjem. Vsi oprimki, ki se jih plezalec dotakne z rokami ali nogami, so vključeni v smer. Smer je mogoče shraniti za kasnejšo uporabo. To je bilo izvedeno tako, da je eksperimentator označil uporabljene oprimke.
- 3) Zakasnen video odziv: po preplezani smeri si lahko plezalec takoj ogleda posnetek svojega plezanja na zaslonu. Video predvajanje se samodejno sproži, če sistem zazna padec.
- 4) Oznake za roke: oseba, ki čaka na svoj poskus, z levim in desnim gumbom miške neprekinjeno določa cilje za plezalčevo levo in desno roko.
- 5) Avtomatizirana smer: nenehno napredujoča smer za trening vzdržljivosti. Sistem prikaže naslednji oprimek za roko, ko je dosežen prejšnji oprimek. Statistika prikazuje čas na steni in število izvedenih gibov. Eksperimentator je sprožil prikaz naslednjega oprimka, ki je bil naključno izbran med bližnjimi oprimki.
- 6) Animirana žaga: plezalci se izogibajo animiranim motornim žagam, ki jim sledijo po vnaprej določenih poteh.

Medtem ko je bila študija iz leta 2016 izvedena v komercialnem plezalnem centru, kjer je sistem štiri mesece brez nadzora uporabljalo več sto plezalcev. Evalvacija je vključevala

tri ločene študije, za vsako drugačna interakcija, s skupno 70 udeleženci, ki so vključevali tako otroke kot odrasle rekreativce. Naredili so 3 različne aplikacije: "The Spark game", "Route creation" in "Whack-a-bat game", vsaka z drugačno funkcijo.

Prva študija je potrdila, da bi plezalci tako plezalno steno uporabljali, ampak menijo, da bi bilo najbolje, če bi bila nameščena kot ločena stena od ostalih. Med najbolj uporabnimi funkcionalnostmi so izpostavili enostavno postavljanje smeri, deljenje smeri in takojšnjo video povratno informacijo. Pohvale sta prejela tudi družbeni vidik deljenja smeri ter možnost uporabe video zaslona za primerjavo lastne izvedbe z drugimi plezalci. Visoko je bil ocenjen tudi samodejni generator smeri za trening [1]. Druga študija pa je razkrila, da igrifikacija spodbuja hitrejše odločanje in premikanje izven cone udobja. Plezalci so ob igranju celo pozabili na svoj strah pred višino. Rezultati so pokazali tudi visoko stopnjo socialne interakcije, saj so tako lahko gledalci aktivno sodelovali z dajanjem navodil plezalcu.

Glede tehničnih parametrov oba sistema delujeta s frekvenco osveževanja 30 sličic na sekundo in pokrivata površino stene do približno 4,5 x 3,6 metra. Raziskovalci so za detekcijo padcev in dotikov razvili lastno programsko opremo za računalniški vid, saj standardno sledenje skeletu ni bilo dovolj robustno za določene plezalne položaje.

Kljub uspehu so avtorji izpostavili resne omejitve. Leta 2014 so bila v ospredju težave z okluzijo (senca plezalca zakriva oprimke) in nenatančnostjo sledenja okončinam preblizu stene. Druga študija pa je opozorila na nove izzive kot so, občutljivost elektronike na magnezij, katerega plezalci uporabljajo proti drsenju na oprimkih, tresljaje stene ob padcih plezalcev, ki povzročajo tresenje slike, in mentalne omejitve, saj plezalec blizu stene vidi le majhen del projicirane površine. Poleg tega so opazili primere goljufanja na lestvicah najboljših rezultatov, kar kaže na to, da zunanja motivacija (tekmovanje) lahko vpliva na integriteto športa.

Shadowlings: Lassi Vapaakallio v svojem magistrskem delu opisuje razvoj in evalvacijo kooperativne plezalne igre Shadowlings. Tehnološki pristop temelji na uveljavljeni platformi ValoClimb, ki uporablja Windows osebni računalnik, projektor, globinsko kamero Kinect ter zvočni sistem, vgrajenim v okvir stene za haptične povratne informacije. Programska oprema, razvita v okolju Unity, uporablja lasten algoritem za sledenje, ki plezalce pretvori v 2D silhuete, s čimer omogoča, da igralci z lastno senco na steni premikajo virtualna bitja. Namen sistema je bil ustvariti angažirano fizično aktivnost za otroke in mladostnike v aktivnih parkih, ki spodbuja kooperativno igranje več oseb hkrati in motivira k plezanju, ne da bi od igralcev zahtevala predhodno plezalno znanje. Končni rezultat je igra, v kateri morajo igralci z uporabo svoje sence pospremiti majhna črna bitja, imenovana "Shadowlings", do portala, pri tem pa se izogibati oviram. Ko vsa bitja dosežejo portal, igralec (ali igralci) zmaga(jo).

Podatki so bili zbrani v enem tednu januarja 2020 na 187 različnih lokacijah po svetu in so vključevali skupno 436 ur

aktivnega igranja. Uspešnost zasnove so evalvirali na podlagi vnaprej določenih smernic in ciljev, pri čemer so primerjali povprečne vrednosti vseh sej s tistimi, kjer so igralci uspešno zaključili nivo. Igra je kmalu po izidu postala druga najbolj priljubljena aplikacija na platformi ValoClimb s 25-odstotnim deležem celotnega svetovnega časa igranja. Analiza višine plezanja je pokazala, da igra učinkovito spodbuja plezanje, saj so igralci v povprečju dosegli višino, ki je bila za 1,76-krat večja od njihove telesne višine. V uspešnih sejah je bilo v povprečju na steni 1,56 igralca, kar kaže na uspeh kooperativnega cilja. Z igro Shadowlings je sistem uvedel pomembno spremembo v primerjavi s prejšnjimi igrami, saj je povečal interakcijsko razdaljo na 1,5 metra od stene, kar omogoča igranje s senco tudi tistim, ki ne stojijo neposredno ob plezalni površini. Dolžina posamezne seje je bila omejena na 2 do 4 minute, povprečen uspešen vzpon pa je trajal približno 65,6 sekund.

Kljub komercialnemu uspehu avtor izpostavlja več omejitev, ki ostajajo izziv za prihodnost. Največja težava je razumevanje 2D fizike sence, saj mnogi igralci sprva poskušajo bitja prijati z rokami ali pričakujejo bolj kompleksne 3D kretnje. Opazil je tudi velike variacije v trajanju igre, kjer so bili najlažji nivoji končani prehitro, kar lahko povzroči nezadovoljstvo v skupinah. Poudaril je tudi pomanjkljivo uvajanje v igro, saj navodilo "premikaj bitja s svojo senco" pogosto ni zadostovalo za takojšnje razumevanje načina interakcije.

B. Virtualna resničnost in mentalna priprava

Študije v tej kategoriji plezalca predstavijo v popolnoma digitalno okolje, bodisi s popolno imerzijo (VR s HMD) bodisi z interaktivnimi 3D simulacijami na zaslonu. Namen tega je predvsem mentalna priprava na vzpon, zmanjševanje strahu pred padcem in načrtovanje gibanja za sam vzpon. Za razliko od vizualne augmentacije, ki posega v realno okolje, ti sistemi delujejo ločeno od fizične plezalne stene. V nadaljevanju analiziramo dva pristopa omenjena v člankih "Falling into Fears: Exploring Virtual Reality as a Fear-Reduction Training Tool for Climbers" [4], kjer z uporabo VR očal prikažejo simulacijo padcev, in "Computer-Aided Imagery in Sport and Exercise: A Case Study of Indoor Wall Climbing" [5], kjer uporabniku omogočijo načrtovanje gibanja s pomočjo avatarja na zaslonu.

Falling into Fears: Rey in sodelavci so raziskovali uporabo virtualne resničnosti (VR) za soočanje z eno največjih psiholoških ovir v plezanju, strahom pred padcem. Sistem temelji na uporabi HMD (ang. Head-Mounted Display) naprave Meta Quest 3. Plezalec je postavljen v virtualno okolje pečine, približno 12 metrov nad virtualnimi tlemi, ki je bilo razvito v igralnem pogonu (ang. game engine) Unity. Posebnost sistema je programski mehanizem za dinamično skaliranje gibanja, ki omogoča ojačanje zaznane razdalje padca v virtualnem okolju. Sistem je bil narejen kot orodje za mentalni trening in pripravo, ki bi plezalcem pomagalo zmanjšati anksioznost in povečati zaupanje v varovalno opremo. Raziskovalci so želeli preveriti, ali lahko VR služi kot učinkovita oblika

izpostavitvene terapije, prilagojene plezanju, kjer izkušnja ni le vizualna, temveč globoko fizična in utelešena.

V raziskovalnem poskusu je sodelovalo 20 rekreativnih plezalcev z različnimi stopnjami predznanja, od začetnikov na nivoju 4C do naprednih plezalcev na nivoju 7A po francoski lestvici. Vsak udeleženec je opravil od tri do pet kontroliranih padcev z višine 5 metrov na previsni steni, pri čemer so primerjali pogoje z uporabo VR slušalk in brez njih. Podatke so zbirali prek polstrukturiranih intervjujev pred, med in po posameznih padcih, analizo pa opravili s pomočjo induktivne tematske analize.

Večina udeležencev je distrakcijo v VR okolju sprejela pozitivno, saj so zaradi izgube realnih referenc višine in občutka igranja video igre občutili manjši stres pred samim padcem. Študija je razkrila tudi, da je strah najbolj intenziven v trenutku pričakovanja, ko se mora plezalec spustiti s stene, a se z vsako ponovitvijo zmanjšuje.

Tekom raziskave so raziskovalci preizkušali različna razmerja skaliranja gibanja, od 1:1 do 1:5, kjer 1 meter fizičnega padca v virtualni resničnosti ustreza 5 metrom. Vendar pa digitalno povečevanje višine padca ni bilo učinkovito, saj so bili padci časovno prekratki (le 1-2 metra prostega pada), da bi udeleženci sploh zaznali razliko v skaliranju. Avtorji so izpostavili tudi tehnične izzive s sledenjem naprave Quest 3, ki je včasih zahtevala ponovno umerjanje sredi poskusa, ter fizično zahtevnost previsnih smeri, ki je povzročala hitro utrujenost udeležencev.

Avtorji zaključujejo, da VR omogoča varno izpostavljanje stresnim situacijam, ki jih je v realnem svetu težko ponoviti, vendar poudarjajo potrebo po prihodnjih longitudinalnih študijah, ki bi vključevale objektivne fiziološke meritve za potrditev dolgoročnih učinkov na zmanjšanje strahu.

Computer-Aided Imagery (CAI): Drugi pomemben prispevek v kategoriji virtualne resničnosti predstavlja raziskava avtorjev Naderija in sodelavcev, ki uvaja koncept računalniško podprte vizualizacije (Computer-Aided Imagery - CAI). Tehnološki pristop tega sistema se odmika od klasičnih športnih videoiger, saj temelji na visoki stopnji realizma in fizikalno utemeljeni simulaciji. Raziskovalci so s pomočjo fotogrametrije, z programsko opremo Autodesk ReCap 360, in serije 50 fotografij izdelali natančen 3D model plezalne stene. Za simulacijo gibanja humanoidnega avatarja so uporabili fizikalni pogon Open Dynamic Engine (ODE), za optimizacijo gibov v realnem času pa napreden algoritem C-PBP (Control Particle Belief Propagation). Z uporabo senzorja Microsoft Kinect V2, s katerim so izmerili dejanske telesne dimenzije plezalca, kot dolžino kosti in položaj sklepov, ter po njih prilagodili virtualnega avtarja. Sistem predvsem izstopa po tem, da avatar ni omejen na vnaprej animirane gibe, temveč z algoritmom C-PBP sproti izračunavajo fizikalno izvedljive poti težišča telesa in okončin. Uporaba Kinecta V2 zagotavlja visoko ločljivost sledenja skeletu pri 30 sličicah na sekundo, kar omogoča personalizacijo avtarja.

Izvedli so uporabniško študijo z 20 udeleženci (14 moških in 6 žensk), ki so bili po nivoju znanja srednje izkušeni plezalci

s povprečno tremi leti izkušenj in sposobnostjo plezanja do stopnje 6a/b. Raziskava je potekala po principu znotraj-skupinskega naključnega načrta, kjer je vsak posameznik preplezal osem smeri. Od tega štiri po pripravi s CAI in štiri po tradicionalni mentalni vizualizaciji (TI), pri kateri so si plezalci smer le ogledali ter si poskušali predstavljati gibe. Priprava za vsako smer je bila omejena na pet minut. Evalvacija je obsegala zbiranje kvantitativnih podatkov kot so število poskusov in čas na steni ter kvalitativno analizo prek polstrukturiranih intervjujev in anket o motivaciji (Intrinsic Motivation Inventory).

Raziskava je pokazala, da priprava s CAI plezalce spodbuja k bistveno bolj sistematičnemu načrtovanju in uporabi perspektive tretje osebe. Kljub temu pa so udeleženci po uporabi simulacije smer ocenili kot bolj kompleksno in bili pred plezanjem manj samozavestni kot pri tradicionalni pripravi, kar avtorji pripisujejo globljemu razumevanju izziva. Vendar pa se je po dejanskem plezanju situacija obrnila, kajti tisti, ki so uporabili CAI, so poročali o povečanem občutku kompetentnosti, višji samozavesti in boljšem zavedanju položaja svojih nog na steni. Čeprav statističnih razlik v fizični uspešnosti (število poskusov, število opravljenih smeri in čas na steni) med obema metodama niso zaznali, avtorji poudarjajo, da CAI izboljšuje mentalno pripravo plezalca.

Kljub inovativnosti je bilo izpostavljenih nekaj omejitev. Največja slabost je pomanjkanje realizma pri fino-motoričnih gibih, saj sistem oprimke obravnava le kot točke dotika, ne simulira pa dejanske moči prstov ali specifičnih načinov prijema različnih oblik oprimkov. Prav tako je bila identifikacija plezalca z avtarjem nizka zaradi nevtralnega, uniseks videza virtualnega lika. Nekateri udeleženci so opozorili tudi na dejstvo, da je takšna priprava časovno potratna v primerjavi s hitrim vizualnim pregledom stene. Nekaj udeležencev je izrazilo, da včasih ne želijo takoj videti pravilne rešitve plezalnega problema, temveč ga raje rešijo sami. Kljub temu so na splošno tehnologijo ocenili kot učinkovito predvsem za učenje začetnikov ali za prikaz zahtevnega dela smeri soplezalca, ki bi želel vedeti rešitev. Eden od udeležencev, ki dela kot inštruktor, je tudi specifično izpostavil potencial tehnologije pri razčlenjevanju kompleksnih motoričnih spretnosti na manjše, bolj razumljive sekcije za začetnike. Med drugim, pa so avtorji tudi izpostavili idejo, da bi v prihodnosti plezalci CAI lahko uporabljali kar doma za mentalni trening v dneh, ko počivajo.

C. Sledenje gibanja in video vizualizacija (Analiza tehnike)

Kategorija se osredotoča na zajem plezalčevega gibanja in njegov vizualni prikaz za izboljšanje tehnike in učenje motoričnih spretnosti. V študijah ponovno uporabljajo kamere in računalniški vid za sledenje telesa ter rezultate prikazujejo kar neposredno na steno ali na ločenem zaslonu. Za razliko od vizualne augmentacije, ki plezalca projicira naslednji oprimek, ti sistemi omogočajo primerjavo z lastnim ali tujim posnetkom in s tem omogočajo plezalca, da vidi svoje napake ali kopira gibe inštruktorja neposredno na steni. Takšni sistemi so uporabljeni v raziskavah "betaCube: Enhancing Training for Climbing by a Self-Calibrating Camera-Projection Unit"

[6] in "ClimbVis: Investigating In-situ Visualizations for Understanding Climbing Movements by Demonstration" [7].

betaCube: Wiehr in sodelavci v svojem članku predstavljajo sistem betaCube. Gre za mobilno in samoumerjevalno enoto, namenjeno izboljšanju plezalnega treninga prek projekcije in 3D sledenja. Sistem je zasnovan kot kompaktna lesena kocka s stranico 59 cm, ki vsebuje projektor s svetilnostjo 6000 lumnov, kar zadošča za jasno vidnost grafike v notranjih prostorih, kamero Microsoft Kinect V2, prenosni računalnik, WiFi usmerjevalnik in modul Arduino Fio za nadzor fizičnih gumbov na ohišju. Uporaba knjižnice Microsoft RoomAlive Toolkit omogoča avtomatsko umerjanje in preslikavo slike na steno z enim samim klikom. To omogoča projekcijo brez popačenj tudi na neravnih površinah in poljubnih plezalnih volumnih, ne da bi bilo treba v plezalnem centru izvajati trajne instalacije ali dodatno instrumentacijo.

Deluje kot interaktivna "pametna tabla" za plezalce, kar omogoča skupinsko iskanje rešitev za plezalne probleme in izmenjavo t.i. "bete". To v plezalnem slengu pomeni nasvet za uspešno izvedbo smeri ali giba. Ključne funkcije vključujejo ustvarjanje smeri v razširjeni resničnosti, kjer uporabnik preko telefona izbere oprimke sistem pa jih s pomočjo algoritmov za prepoznavanje objektov natančno preslika v fizični prostor in jih osvetli. Mogoča je tudi video analiza vzpona v naravni velikosti in inovativno metodo "Shadow Climbing", katera plezalcu omogoča, da neposredno posnema gibe drugega plezalca, ki so projicirani na steno, kar pomaga pri razumevanju specifičnih tehničnih gibov. Prav tako lahko uspešno spremlja težišče telesa plezalca in samodejno zabeleži uspešen vzpon v osebno zgodovino. Vključuje celo integracijo z nosljivo napravo Microsoft Band 2 za zajem fizioloških podatkov kot srčni utrip, galvanski odziv kože, temperatura kože, preko česa se lahko analizira plezalečev trud.

V tej fazi avtorji še niso izvedli obsežne formalne evalvacije z velikim številom udeležencev. Osredotočili so se na potrditev izvedljivosti v realnem okolju plezalnega centra. Kljub temu so potrdili, da avtomatiziran proces umerjanja uspešno omogoča projekcijo na poljubne stene v nekaj minutah. Glavna omejitev ostaja robustnost sledenja skeletu s Kinectom med plezanjem. Zaradi okluzije in specifičnih telesnih položajev, za katere standardni algoritmi niso bili naučeni, sledenje skeletu ostaja nezanesljivo. Plezalec se v globinskem pogledu pogosto "zlije" s steno, kar povzroča napake v podatkih o okončinah, čeprav je sledenje težišču dovolj natančno za osnovne analize.

Čeprav je bil sistem testiran in načrtovan za rekreative in začetnike, ki potrebujejo vizualna navodila, je hkrati lahko namenjen tudi profesionalnim tekmovalcem, ki analizirajo svojo tehniko pod vodstvom trenerjev. Avtorji omenijo celo njegovo potencialno uporabnost v zdravstvu, predvsem pri fizioterapiji hrbtnih mišic in jogi, saj sistem lahko vodi pacienta skozi natančno določena zaporedja gibov in preverja pravilnost njihove izvedbe.

ClimbVis: Leto kasneje je izšla podobna raziskava, avtorjev Kosmalle in sodelavcev, ki se ravno tako osredotoča na

sledenje gibanja in video vizualizacijo za analizo tehnike, s sistemom ClimbVis. Čeprav se uporabljena tehnologija ponovi, globinska kamera Microsoft Kinect V2, projektor (6000 lumnov) pa se ta raziskava razlikuje od prejšnje v dveh različnih medijih za prikaz in sicer, uporabljena so bila pametna očala Google Glass in zunanje projiciran zaslon na steni. Sam sistem omogoča snemanje in takojšnje predvajanje video posnetkov plezalnih gibov neposredno na mestu plezanja ("in-situ"). Pri tradicionalni demonstraciji inštruktorja si mora udeleženec zapomniti vsako podrobnost giba, saj ne more plezati hkrati z inštruktorjem. ClimbVis omogoča vizualizacijo gibanja prek treh metod: projekcije inštruktorja v naravni velikosti neposredno na steno, tretjepersonskega pogleda na Google Glass ali na projiciranem zaslonu ob strani.

V študiji je sodelovalo 12 udeležencev (8 moških in 4 ženske), ki so bili po nivoju znanja popolni začetniki brez predhodnih izkušenj s plezalnim treningom. Udeleženci so se učili štiri specifične plezalne tehnike:

- 1) Flagging - plezalcu pomaga ohraniti ravnotežje, kadar so oprimki na voljo le na eni strani telesa.
- 2) Outside Edge - plezalec zavrti boke tako, da je bok nasproti vlečne roke obrnjen proti steni.
- 3) Rockover - plezalec se premakne na oprimek s stranskim prenosom teže namesto z gibanjem navzgor.
- 4) Twistlock - plezalec z rotacijo okoli telesne osi in hkratnim zaklepanjem prijemalne roke lažje doseže višje ležeč oprimek.

Vsako tehniko so preizkusili z eno od štirih metod povratnih informacij: tremi digitalnimi metodami ClimbVis in klasično demonstracijo v živo, ki je služila kot referenčna točka. Študija je trajala približno 45 minut na udeleženca. Sistem je video prenašal z zakasnitvijo približno 250 ms. Posamezne video sekvence gibov (v zanki) so v povprečju trajale 3,1 sekunde.

Projekcija v naravni velikosti (Life-Size) je bila ocenjena kot najlažja za sledenje, saj je prostorsko ujemanje med posnetkom in realnim svetom popolno, kar plezalcu omogoča neposredno posnemanje drž. Kljub temu pa je analiza tehnike pokazala, da so udeleženci največji napredek dosegli pri klasičnem človeškem inštruktorju in projiciranem zaslonu ob strani. Google Glass se je izkazal za najmanj primerno metodo, saj so imeli plezalci velike težave s preklapljanjem fokusa med zaslonom očal in plezalno steno. Ločljivost Google Glass je bila 640 x 360 pikslov, medtem ko je projicirani zaslon ponujal višjo ločljivost 1024 x 768 pikslov.

Kot omejitev je bila ponovno izpostavljena okluzija pri projekciji v naravni velikosti, kjer plezalec s svojim telesom zakriva navodila na steni ter nezanesljivost Kinect V2, ki v neposredni bližini stene postane nezanesljiv, saj se plezalec v globinskem pogledu "zlije" s površino, kar povzroča napake v skeletnem sledenju. Poleg tega so udeleženci poročali o pomanjkanju globinske zaznave pri videu in težavah pri prepoznavanju rotacij telesa zaradi prenizkega kontrasta. Omenjen je bil tudi predlog hibridnega pristopa, kjer bi sistem inteligentno preklapljal med projekcijo v naravni velikosti (med vzponom) in projiciranim zaslonom (med pripravo na tleh), s

čimer bi združili prednosti obeh metod in zmanjšali mentalno obremenitev.

Avtorji zaključujejo, da čeprav tehnologija ne more v celoti nadomestiti trenerja zaradi njegove sposobnosti podajanja specifičnih verbalnih popravkov, ClimbVis predstavlja močno orodje za samostojen trening motoričnih spretnosti.

D. Senzorika, zvok in nosljive naprave

Zadnja skupina uporablja nevizualne kanale, kot sta zvok in dotik (preko vibracij), za podajanje informacij ali vodenje plezalca. Nosljive naprave (npr. na zapestjih, podlaketih) omogočajo diskretno povratno informacijo med samim plezanjem, ne da bi motile plezalčev vizualni fokus. Ti sistemi razbremenijo vidni kanal in uporabljajo zvočno sonifikacijo ali haptične dražljaje za izboljšanje zavedanja telesa (propriocepcije). Ta kategorija je pomembna predvsem za povratne informacije v realnem času, kjer je vizualni kanal pogosto že zaseden z iskanjem oprimkov ter načrtovanjem gibanja. V nadaljevanju predstavljamo dva sistema v člankih "Sound-Assisted Climbing: Exploring bouldering performance through auditory guidance" [8] in "Co-Designing Wearable Devices for Sports: The Case Study of Sport Climbing" [9].

Sound-Assisted Climbing: Študija avtorjev Sun in sodelavcev uvaja koncept zvočnega vodenja oziroma sonifikacije kot alternative tradicionalnemu vizualnemu vodenju. Za sledenje gibanju rok in glave plezalca v realnem času so uporabili senzor Microsoft Xbox One Kinect. Za natančno prostorsko mapiranje plezalne stene pa so uporabili iPhone s tehnologijo LiDAR, kar jim je omogočilo umerjanje fizičnih oprimkov v virtualno okolje Unity. Plezalci so zvočna navodila prejeli prek brezžičnih slušalk, pri čemer je sistem uporabljal spatializiran stereo zvok, torej da je bila smer vodenja nakazana prek levega ali desnega zvočnega kanala glede na to, katera roka je bila v tistem trenutku vodena. Sistem je dinamično prilagajal zvok glede na 2D razdaljo med roko in ciljnim oprimkom, pri čemer je za uspešen prijem štel kontakt, ki je trajal več kot 0,5 sekunde.

V nadzorovani študiji znotraj skupine je sodelovalo 12 plezalnih navdušencev. Večina udeležencev (več kot 91 odstotkov) je že imela predhodne izkušnje s plezanjem, skupina pa je bila uravnotežena po spolu in pretežno mlada (povprečna starost 27,9 let). Raziskovalci so primerjali dve metodi sonifikacije:

- 1) vodenje na podlagi glasnosti - bližje kot je roka oprimku, glasnejši je zvok.
- 2) vodenje na podlagi tempa - bližje kot je roka oprimku, hitreje je piskanje

Uspešnost so merili s časom zaključka naloge, sistemsko uporabnostjo in subjektivnimi preferencami.

Vodenje na podlagi tempa je statistično značilno skrajšalo čas plezanja v primerjavi z vodenjem na podlagi glasnosti. Udeleženci so tempo ocenili kot bolj informativen, intuitiven in lažje razločljiv, saj so ga povezali z mentalnim modelom parkirnih senzorjev v avtomobilih. Uporabniki s predhodnimi izkušnjami so z zvočnim vodenjem dosegali bistveno boljše

rezultate, kar nakazuje na pomembnost prilagodljivosti na avdio vmesnike.

Glavna tehnična slabost je bila ponovno nezanesljivost senzorja Kinect, ki je pogosto izgubil sledenje dlanem, ko so bile te nizko ob telesu, kar je povzročilo prekinitev zvočnih signalov in nedosledno uporabniško izkušnjo. Prav tako so nekateri udeleženci poročali, da hitri tempo zvoka povzroča občutek stresa in nepotrebne nujnosti. V hrupnih okoljih bi sistem zahteval uporabo slušalk z aktivnim dušenjem hrupa.

Co-Designing Wearable Devices: V okviru študije avtorjev Mencarini in sodelavcev so razvili osem namenskih nosljivih haptičnih naprav, od katerih vsaka vsebuje štiri vibracijske motorje. Te naprave upravlja inštruktor preko Bluetooth povezave s pomočjo vmesnika na tabličnem računalniku. Strojno opremo vsake enote sestavljajo Arduino združljiv modul Simblee in 110 mAh baterija, celotna elektronika pa je vstavljena v prilagodljive tekstilne vrečke s trakovi za namestitve na telo. Namen sistema je bil izboljšati komunikacijo med inštruktorjem na tleh in začetnikom na steni. Namesto zbiranja biometričnih podatkov so raziskovalci želeli uporabiti haptiko za usmerjanje pozornosti plezalca na specifične dele telesa (propriocepcija) in za podajanje navodil o pravilni drži v realnem času. Poleg tehničnega učenja je bil ključen cilj tudi psihološka podpora, saj vibracija plezalcu sporoča, da ga inštruktor pozorno opazuje, kar povečuje občutek varnosti in zaupanja.

Eksperimentalna metodologija je bila plod obsežnega procesa sooblikovanja, ki je vključeval pet zaporednih študij, od fokusnih skupin do delavnic "bodystorminga". Končna evalvacija je potekala v obliki t.i. "tehnološke sonde" (technology probe) med plezalno lekcijo v dvorani, kjer je sodelovalo 10 začetnikov in en gorski vodnik. Udeleženci so preizkušali dve različni konfiguraciji namestitve naprav: SET1 na zapestjih, gležnjih in okrog prsi ter SET2 na ramenih, stegnih in okrog pasu, da bi ugotovili optimalne lokacije za zaznavanje dražljajev. Plezalci so kot najboljše lokacije za nošenje naprav ocenili zapestja, gležnje in trebuh, saj so tam vibracije najbolj intuitivne in najmanj moteče. Uporaba sistema je znatno izboljšala zavedanje telesa plezalcev in jim pomagala pri takojšnjem popravljanju napak. Dvoumnost v signalih se je izkazala za koristno, saj je plezalce spodbudila k aktivnemu učenju in samostojnemu razmišljanju o napakah.

Največji izziv je predstavljala časovna usklajenost, kajti vibracije so bile v plezalnem toku pogosto posredovane prepozno, ko je plezalec že zaključil gib, ali pa so bile prezgodnje in so povzročile zmedo. Inštruktor je prav tako opozoril, da mu uporaba touchscreen vmesnika jemlje vizualno pozornost, ki bi jo moral posvečati plezalcu. Poleg tega haptični signali na telesu ne morejo posredovati informacij o zunanjem okolju, kot je npr. uporaba napačnega oprimka na steni.

Avtorji zaključujejo, da bi bil sistem v prihodnosti lahko uporabljen tudi v drugih športih, ki temeljijo na natančni drži (npr. joga), a zahteva razvoj dvosmerne komunikacije, da bi tudi inštruktor prejel povratno informacijo o tem, ali je bil signal sploh zaznan.

IV. DISKUSIJA

Pregled literature je pokazal, da interaktivni sistemi za trening športnega plezanja segajo od vizualne augmentacije s projektorji prek virtualne resničnosti in mentalne priprave do sledenja gibanja in video vizualizacije ter nosljivih naprav z zvočno ali haptično povratno informacijo. Vizualna augmentacija je najbolj raziskana, saj je bila uporabljena kar v petih od devetih študij, medtem ko sta VR in senzorika manj zastopani. V nadaljevanju bomo obravnavali raziskovalna vprašanja, zastavljena v uvodu.

Vprašanje optimizacije časovne usklajenosti (timing) povratnih informacij v plezanju predstavlja enega največjih izzivov, saj mora sistem upoštevati plezalčevo trenutno mentalno obremenitev in hitrost gibanja. Študija o sooblikovanju nosljivih naprav kaže, da so haptične povratne informacije, kot so vibracije, lahko dvorezen meč. Kajti če so posredovane prezgodaj, plezalcu onemogočijo samostojno reševanje problema, če pa pridejo prepozno, povzročijo zmedo, saj je gib že zaključen [9]. Raziskovalci ugotavljajo, da je idealen trenutek za signal takrat, ko je plezalec "zataknen" ali ko naredi napako, ki se je ne zaveda, pri čemer se mora sistem prilagajati plezalnemu toku. Pri zvočnem vodenju se je kot najbolj učinkovito izkazalo vodenje na podlagi tempa (frekvence piskanja), ki plezalcu intuitivno sporoča bližino cilja, podobno kot parkirni senzorji, vendar lahko previsoka frekvenca povzroči nepotreben stres in občutek nujnosti [8]. Pri vizualnih sistemih, kot je Augmented Climbing Wall, pa je ključno, da se grafika ne premika prehitro, saj plezalec zaradi neposredne bližine stene in osredotočenosti na oprimke zlahka spregleda hitre spremembe izven svojega vidnega polja [1]. Sicer pa v pregledani literaturi na splošno ni bilo veliko poročanja o zakasnitvah sistemov, z izjemo dveh del, kar nakazuje da je to še dokaj neraziskana omejitev.

Vpliv teh sistemov se močno razlikuje glede na vrsto uporabnikov, saj rekreativci in tekmovalci v tehnologiji iščejo različne vrednosti. Za rekreativne plezalce in otroke so se sistemi z vizualno augmentacijo in igrifikacijo, kot Shadowlings, izkazali za izjemno motivacijski, saj jim pomagajo pozabiti na strah pred višino in jih spodbudijo k večjemu številu ponovitev, kljub morebitni utrujenosti. Za njih je najbolj ustrezna kombinacija učenja in zabave. Medtem ko izkušeni in tekmovalni plezalci tehnologijo sprejemajo še bolj zadržano. Njim je pomembna predvsem objektivna analiza tehnike, kot so gibanje težišča telesa, vrsta prijema in uporaba specifičnih "bet" za reševanje težkih smeri, tako kot tudi pravilna in učinkovita struktura treningov. Stvari, ki jih zaenkrat še vedno najbolj opravljajo izkušeni trenerji. Poleg tega pa je potrebno upoštevati, da se dandanes plezalci ne delijo le na začetnike in izkušene, temveč tudi na plezalce, ki v večini plezajo na umetnih stenah in plezalce, ki raje izberejo skalo za svoj trening. V raziskavi o nosljivih napravah, so za mnenje vprašali tudi skupino izključno skalnih plezalcev, za katere se je izkazalo, da neradi uvajajo nosljive tehnologije v svojo prakso, saj menijo, da bi takšne naprave lahko nasprotovale temeljnim vrednotam plezanja, kot so samoučinkovitost, medsebojno zaupanje med

partnerji in občutek avanture. Na splošno je tematska analiza razprav pokazala, da na sprejemanje prenosne oziroma nosljive tehnologije med plezalci pomembno vplivata športna kultura in naravno okolje, v katerem poteka športna dejavnost [9]. Naše ugotovitve kažejo, da so v splošnem pregledani sistemi koristni bolj za začetnike, ki se s športom še spoznavajo, kot pa za izkušene plezalce. Glede na to, da je bila večina študij izvedenih v plezalnih centrih na umetnih stenah in da je zelo verjetno da večina sodelujočih v študijah več pleza na umetnih kot naravnih stenah je vpliv na tako začetnike kot že izkušene plezalce težko posplošiti na vse. To bi izpostavili tudi kot smernico za bodoče raziskave, in sicer da se pri študijah več upošteva tudi plezalce, ki trenirajo izključno v naravi ali celo naredijo samostojne študije izključno za skalno plezanje.

Razprava o tem, ali je "virtualni trener" koristen pripomoček ali grožnja trenerskim službam, se glede na pregledano literaturo zagotovo nagiba k prvi možnosti, vendar z jasno določeno mejo. Študija sistema ClimbVis eksplicitno navaja, da digitalni sistemi ne morejo v celoti nadomestiti človeškega inštruktorja, predvsem zaradi nezmožnosti strojev, da bi razumeli pomen napake in podali specifičen verbalni popravek (npr. "spusti desno koleno") [7]. Meja se vzpostavi pri presoji situacije. Medtem ko sistem lahko zagotavlja neskončno število objektivnih ponovitev in vizualizacij, je trener tisti, ki plezalca pozna in mu nudi psihološko podporo in prilagaja vaje njegovemu trenutnemu fizičnemu in čustvenemu stanju. Plezalci si dejansko ne želijo, da bi jim sistem vedno podal končno rešitev smeri, saj navsezadnje reševanje "problemov" na steni predstavlja bistvo tega športa. Virtualni trener bi moral torej delovati kot asistent, ki zgolj spodbuja plezalčevo lastno razmišljanje in zavedanje.

Da bi interaktivni sistemi plezalcem in trenerjem zares olajšali delo, morajo biti vmesniki zasnovani tako, da ne motijo njihovega primarnega fokusa. V raziskavi o nosljivih napravah so udeleženci celo opozorili, da so trenutni vmesniki na tabličnih računalnikih za trenerje lahko bolj distrakcija kot pomoč, saj zahtevajo, da trener odmakne pogled s plezalca, da bi poslal signal. Za prihodnji razvoj se predlagajo tangibilni vmesniki, kot so krmilne palice (ang. joystick) ali gumbi, ki omogočajo "slepo" upravljanje, s čimer trener kljub pošiljanju popravkov ves čas ohranja vizualno pozornost na plezalčevi tehniki. Sistemi, kot je betaCube, olajšajo delo trenerja tako, da delujejo kot "pametna tabla", ki omogoča video analizo v naravni velikosti neposredno na steni, kar odpravlja potrebo, da bi moral trener isto smer ali gib pokazati večkrat za demonstracijo. Menimo, da je na koncu ključno in tudi najbolj koristno za dober sistem, da tehnologija prevzame repetitivne in administrativne naloge, kot so beleženje vzponov, označevanje smeri, prikaz posnetkov, medtem ko naj odločanje o vsebini treninga ostane v rokah trenerjev.

Sicer pa večina študij uporablja dokaj majhne vzorce, pogosto $n < 20$, kar zmanjšuje statistično moč. Primanjkuje tudi kontrolnih skupin, saj jih večina uporablja znotraj-skupinske načrte brez primerjave s skupino, ki ne bi uporabljala sistema. Nobene od pregledanih del ne moremo označiti za longitudinalno študijo, saj evalvacije v povprečju trajajo od nekaj minut

do nekaj ur, z izjemo Augmented Climbing Wall študije, ki so sistem imeli v uporabi štiri mesece [2]. Vendar žal tudi tam niso zbirali podatkov o dolgoročnih učinkih na učenje. Zaradi teh metodoloških pomanjkljivosti je posplošitev ugotovitev nekoliko omejena, hkrati pa je to lahko smernica za nadaljnje študije.

Tudi ta pregled ima svoje omejitve. Ne gre za sistematičen pregled literature, temveč za narativni pregled na podlagi devetih izbranih del, ki za nas predstavljajo reprezentativen vzorec, vendar ne zajemajo vseh obstoječih raziskav. Morda smo izpustili nekatere zgodnejše študije, ki bi bile lahko temeljne. Izbrali smo si nekoliko modernejši časovni okvir študij, od 2014 do 2025, saj menimo da se je v zadnjih letih plezanje kot šport začelo razvijati hitreje kot v zgodnejših letih. Kljub temu pa menimo, da izbranih devet del zadovoljivo pokriva glavne pristope na področju HCI v športnem plezanju v zadnjem desetletju in na podlagi teh izpeljemo nekaj praktičnih implikacij. Za trenerje predpostavljamo, da bi bili najbolj uporabni sistemi za sledenje gibanja, kot sta betaCube in ClimbVis, za rekreativce sistemi vizualne augmentacije in igre, ki povečajo motivacijo in zmanjšajo strah pred višino, za začetnike pa zvočno vodenje in haptične vibracije, ki povečajo občutek varnosti. Razvijalcem prihodnjih sistemov priporočamo integracijo več modalitet, uporabo robustnejših senzorjev in oblikovanje vmesnikov, ki trenerja ne odvrčajo od opazovanja.

V. ZAKLJUČEK

V članku smo pregledali devet interaktivnih sistemov za trening športnega plezanja in jih razvrstili v štiri kategorije. Ugotovili smo, da so sistemi vizualne augmentacije najbolj primerni za motivacijo rekreativcev in začetnikov, sledenje gibanja za analizo tehnike pri tekmovalcih, virtualna resničnost za premagovanje strahu pred višino ter zvočno vodenje in haptične vibracije za izboljšanje propriocepcije na steni. Identificirali smo več raziskovalnih vrzeli, predvsem pomanjkanje raziskav na tekmovalnem nivoju, neupoštevanje trenerjevih potreb in odsotnost sistemov, ki bi združevali več povratnih modalitet. Čeprav so predstavljeni sistemi lahko koristni, pa z njimi kljub napredni tehnologiji ne moremo nadomestiti človeškega doprinosa. Prihodnje raziskave bi se morale osredotočiti na razvoj sistemov, zasnovanih v sodelovanju s trenerji in športnimi strokovnjaki, kjer bi tehnologija delovala predvsem kot podpora pri treningu in ne kot nadomestilo človeškega strokovnega znanja. Pregled kaže, da športno plezanje predstavlja zanimivo raziskovalno okolje za razvoj interaktivnih sistemov, saj zahteva usklajevanje fizičnih in psiholoških vidikov uporabniške izkušnje.

VI. REFERENCE

REFERENCES

- [1] R. Kajastila and P. Hämäläinen, "Augmented climbing: Interacting with projected graphics on a climbing wall," in *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. Association for Computing Machinery, 2014, pp. 1279–1284. [Online]. Available: <https://doi.org>
- [2] R. Kajastila, L. Holsti, and P. Hämäläinen, "The augmented climbing wall: High-exertion proximity interaction on a wall-sized interactive surface," in *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ser. CHI '16. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016, pp. 758–769.
- [3] L. Vapaakallio, "Designing climbing games - creating shadowlings for valoclimb," Master's thesis, Aalto University, Espoo, Finland, 2020. [Online]. Available: <https://aaltodoc.aalto.fi/items/75468a08-158a-4405-9c66-1e04240207fb>
- [4] R. Rey, F. Müller, F. Chiossi, and A. Matvienko, "Falling into fears: Exploring virtual reality as a fear-reduction training tool for climbers," in *Proceedings of the First Annual Conference on Human-Computer Interaction and Sports*. Association for Computing Machinery, 2025, pp. 1–7.
- [5] K. Naderi, J. Takatalo, J. Lipsanen, and P. Hämäläinen, "Computer-aided imagery in sport and exercise: A case study of indoor wall climbing," in *Proceedings of Graphics Interface 2018*. Graphics Interface, 2018, pp. 105–112.
- [6] F. Wiehr, F. Kosmalla, F. Daiber, and A. Krüger, "betacube: Enhancing training for climbing by a self-calibrating camera-projection unit," in *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2016, pp. 3772–3775.
- [7] F. Kosmalla, F. Daiber, F. Wiehr, and A. Krüger, "Climbvis: Investigating in-situ visualizations for understanding climbing movements by demonstration," in *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*. Brighton, United Kingdom: Association for Computing Machinery, 2017, pp. 270–279.
- [8] L. Sun, Y. Zheng, Q. Jiang, X. Shi, M. Romero, and R. L. M. Guarese, "Sound-assisted climbing: Exploring bouldering performance through auditory guidance," in *Proceedings of the First Annual Conference on Human-Computer Interaction and Sports*, ser. SportsHCI '25. Association for Computing Machinery, 2025, pp. 1–8.
- [9] E. Mencarini, C. Leonardi, A. Cappelletti, D. Giovanelli, A. De Angeli, and M. Zancanaro, "Co-designing wearable devices for sports: The case study of sport climbing," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 124, pp. 26–43, 2019.