



Matej Supej

Analiza hitrosti v veleslalomu s pomočjo RTK GNSS

Izvleček

Cilj te študije je bil razviti novo metodologijo za sinhronizirano in neposredno primerjavo hitrosti smučarjev vzdolž proge, ki temelji na meritvah trajektorije, pridobljene z uporabo globalnega satelitskega navigacijskega sistema (GNSS). Devet smučarjev, članov mladinske reprezentance, je bilo izmerjenih z GNSS-napravo na veleslalomski progi. Izračunani so bili časi pri vsakih vratcih in časi od vratc do vratc ter hitrost smučanja. Hitrosti so bile sinhronizirane med vsakim parom sosednjih vrat z uporabo časov, ko smučarjeva trajektorija seka navidežno ravnino pri vratcih. Analiza je pokazala vrsto informacij, povezanih z analizo časa in hitrosti smučarjev. Poleg tega je iz rezultatov mogoče zaključiti, da najkrajši čas ni bil popolnoma usklajen z največjimi hitrostmi, in obrnjen, kar je izjemnega pomena za natančno analizo. Skratka, nova metodologija izboljšuje analizo in jo je mogoče uporabiti: 1) v vsakodnevni praksi za primerjavo smučarjev, 2) samodejno s programskimi rutinami, rezultate pa je mogoče pridobiti takoj po treningu, da se izboljšajo povratne informacije.

Ključne besede: alpsko smučanje, biomehanika, čas, globalni satelitski navigacijski sistem, GPS, GLONASS, uspešnost.



Foto: Janez Šmitek.

Speed analysis in giant slalom employing RTK GNSS

Abstract

The purpose of this study was to develop a new method for synchronized and direct comparison of skiers' speed along a track based on trajectory measurements utilizing Global Navigation Satellite System (GNSS). Nine skiers, members of the national youth team, were measured on the giant slalom course using a GNSS device. Times at each gate and times from gate to gate, as well as skiing speed, were calculated. Speeds were synchronized between each pair of adjacent gates based on the times at which the skier's trajectory crossed the virtual plane at the gates. The analysis yielded a number of information related to the analysis of the skier's time and speed. Moreover, it can be concluded from the results that the shortest time did not perfectly coincide with the highest speeds and vice versa, which is of utmost importance for an accurate analysis. In conclusion, the new methodology improves the analysis and can be used 1) in daily practice to compare skiers, 2) automatically with program routines and results can be obtained immediately after training session to enhance feedback.

Keywords: Alpine skiing, biomechanics, time, global navigation satellite system, GPS, GLONASS, performance.

■ Uvod

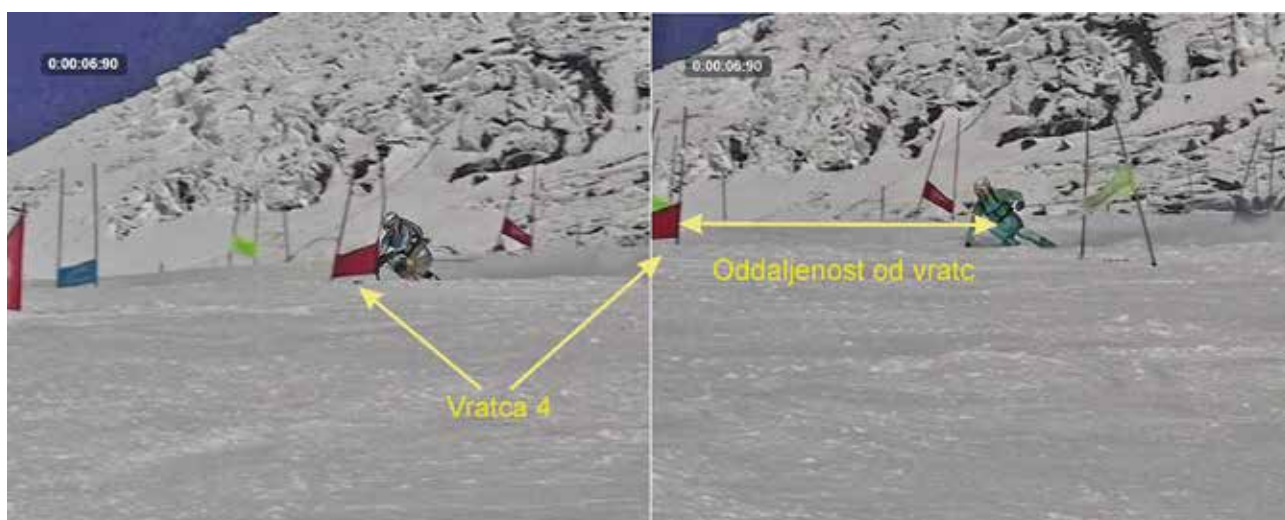
Alpsko smučanje je telesno, tehnično in taktično kompleksen in zahteven šport v spremenljivih pogojih snega, terena, postavitev in vremena. Je olimpijski šport vse od prvih zimskih iger v Garmisch-Partenkirchnu v Nemčiji leta 1936. Naprednejši »suhi in snežni« treninki ter napredek v opremi in pripravi snega so močno prispevali k razvoju športa. Razlike med najboljšimi smučarji, ki se borijo za odličja, so pogosto le stotinka (Supej in Cernigoj, 2006), čemur smo bili priča tudi na zadnjem svetovnem prvenstvu leta 2023 v moškem superveleslalomu. Alpsko smučanje je sestavljeno iz štirih osnovnih disciplin, ki se razlikujejo po trajanju, številu vrata (zavojev), terenu in skokih. Spust v slalomu v povprečju traja 52 s, veleslalom 77 s, superveleslalom 93 s in smuk 121 s (Gilgien, Reid, Raschner, Supej in Holmberg, 2018). Hitrosti, ki jih v povprečju dosegajo smučarji v tehničnih disciplinah, pa so med 54 km/h (slalom) in 65 km/h (veleslalom), v hitrih disciplinah pa so povprečne hitrosti med 86 km/h (superveleslalom) in 94 km/h (smuk) (Erdmann, Giovanis, Aschenbrenner, Kiriakis in Suchanowski, 2017; Gilgien, Crivelli, Spörri, Kröll in Müller, 2015; Gilgien, Reid idr., 2018; Gilgien, Spörri idr., 2015; Supej, Hébert-Losier in Holmberg, 2015).

Znano je, da mora smučar za dosego najkrajšega skupnega časa na celotni progi in s tem za zmago izgubiti čim manj časa na svojih najšibkejših odsekih in pridobiti čim več prednosti na odsekih, kjer se najbolje znajde (Hébert-Losier, Supej in Holmberg,

2014; Supej in Cernigoj, 2006). Za take analize vrhunskih smučarjev je potrebna ustrežna merilna in programska oprema. Najpogostejše se za take analize dnevno uporabljajo fotocelice ali pa videokamere in programska oprema, enostavne za uporabo (Supej in Cernigoj, 2006). Vse več pa je nosljivih naprav (inercialni senzorji in obleke, globalni satelitski navigacijski sistemi GNSS), s katerimi lahko merimo čas, hitrost, tehniko smučanja ipd. (Brodie, Walmsley in Page, 2008; Fasel, Gilgien, Spörri in Aminian, 2018; Fasel idr., 2016; Fasel, Spörri, Kröll, Müller in Aminian, 2019; Gilgien, Kröll, Spörri, Crivelli in Müller, 2018; Krüger in Edelmann-Nusser, 2010; Supej, 2009, 2010; Supej in Cuk, 2014; Supej in Holmberg, 2011).

Razlog za vse večjo uporabo GNSS je v velikem razmahu te tehnologije v zadnjih dveh desetletjih, predvsem po prihodu pametnih telefonov, ki imajo praviloma vgrajen sprejemnik GNSS. V preteklosti je v globalnem določanju položaja kraljeval ameriški GPS (»Global Positioning System«), naprave, proizvedene v zadnjem času, pa pogosto uporabljajo sinhrono več različnih GNSS-sistemov, kot je ruski sistem GLONASS (»Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja System«), evropski sistem Galileo, kitajski Beidou itn. (Gilgien, Spörri, Limpach, Geiger in Müller, 2014; Supej in Holmberg, 2011). Uporaba več GNSS-sistemov sočasno poveča verjetnost natančnih meritev položaja in hkrati omogoči sprejemniku izključitev satelitov s slabim signalom, to pa izboljša natančnost in zanesljivost določanja položaja (Gilgien idr., 2014; Parkinson in Spilker, 1996; Supej in Holmberg, 2011).

Zaradi dinamike smučarskega športa, že prej omenjene kompleksnosti in majhnih razlik med smučarji trenerji potrebujejo podrobne analize smučanja v realnem času ali pa v razmeroma kratkem času po smučanju (Supej in Holmberg, 2019). Merjenje časa s fotocelicami sicer postreže z informacijo v realnem času, vendar omogoča le informacijo o času. Posebne vrste GNSS-sistemov, ki uporabljajo korekcije v realnem času s pomočjo namenske bazne postaje (»real time kinematic« – RTK), v centimetrski natančnosti izmerijo položaj (Gilgien idr., 2014; Supej, Spörri in Holmberg, 2020), ob tem so se že izkazali kot koristni pri pridobivanju časov od vratc do vratc v alpskem smučanju (Supej in Holmberg, 2011). Ker pa je bilo dokazano, da je čas kratkega odseka močno odvisen od uspešnosti v prejšnjem odseku (Supej, Kipp in Holmberg, 2011) in da je vzdrževanje visoke hitrosti brez izgube razpoložljive mehanske energije nujno potrebno za doseganje vrhunškega rezultata (Supej, 2008), je zmožnost merjenja časa in neposredne primerjave hitrosti med tekmovalci bistvenega pomena za podrobno povratno informacijo športnikom. Ob tem je vredno poudariti, da GNSS-sistemi zelo natančno merijo tudi hitrost (Supej in Cuk, 2014). Treba pa se je zavedati, da je hitrost v odvisnosti od časa med smučarji težko primerjati, saj so smučarji ob istem času smučanja na različnem mestu (Slika 1). Zato je bil cilj te študije razviti metodologijo, ki temelji na meritvah GNSS za sinhronizacijo hitrosti vzdolž postavitve proge, s čimer bi omogočili neposredno primerjavo hitrosti med analiziranimi smučarji.



Slika 1. Primer dobro vidne razlike, kje sta dva smučarja ob istem času (6,90 s) od starta (v bližini 4. vratc). Smučar na desni sliki »zaostaja« za smučarjem na levi sliki.

Metode

V raziskavi je sodelovalo devet smučarjev in smučark, članov slovenske mladinske reprezentance (starost: 16–17 let, kategorija U18). Vsi postopki so bili merjencem podrobno razloženi, preden so udeleženci in njihovi starši podpisali pisno informirano soglasje. Vse postopke je odobrila Komisija za etična vprašanja v športu na Fakulteti za šport v Ljubljani, Slovenija, študija pa je bila izvedena v skladu s Helsinško deklaracijo.

Veleslalomski proga s 36 vratci je bila postavljena na ledeniku v poznojesenskem predsezonskem obdobju. Teren je bil razgiban z različnimi nakloni. Vsak od udeležencev je bil posnet s sistemom RTK GNSS. Tako rover (merilna enota) kot referenčna (bazna) postaja sta bila od istega proizvajalca Leica Geosystems AG (Sankt Gallen, Švica) in imela sta 72-kanalni in dvofrekvenčni L1/L2 sprejemnik Leica GX1230 GG, anteno Leica AX1202 GG in radijski modem Leica GFU14 Satelline 3AS. Sistem sočasno sprejema signale iz ameriškega in ruskega globalnega navigacijskega sistema (GPS in GLONASS) ter meri položaje z $1\text{ cm} + 1\text{ ppm}$ (ppm – »parts per million« = enot na milijon) oziroma $2\text{ cm} + 1\text{ ppm}$ vodoravno in navpično natančnostjo pri 20 Hz frekvenci vzorčenja v načinu RTK (99,99-odstotna zanesljivost), v ugodnih razmerah pa je lahko natančnost položaja še boljša (Takac in Walford, 2006). Med meritvami je referenčna postaja stala na nepremičnem geodetskem trinožniku, postavljenem ob startu proge. Rover je bil v spodnjem delu majhnega nahrbtnika, ki so ga nosili smučarji (skupna teža ~1,64 kg), antena pa je bila nameščena na vrhu nahrbtnika v višini zgornjega dela hrbta, da smo sočasno zagotovili čim manjši vpliv na smučarja in dobro vidljivost satelitov.

Za zajem položajev smučarskih vratc je bila antena GNSS pritrjena na 2 m dolg karbonski geodetski drog z vgrajenim inklinometrom (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Švica). Poleg vseh vratc je bil izmerjen tudi položaj približno 1 m pod startom, ki je predstavljal točko »leteče startne pozicije«. Med meritvijo je bilo vidnih 10–17 satelitov nad kotom azimuta 15° . Smučarje smo za lažjo analizo posneli tudi z videokamero (GR-DV4000E, JVC, Yokohama, Japonska). Podatki iz GNSS-sistema in z videoposnetka so bili časovno sinhronizirani s hitrim navpičnim počepom, posnetim na startu pred vsako meritvijo. Pred vsako meritvijo smo preverili tudi natančnost merjenja sistema,

meritev smo začeli, če je bila horizontalna natančnost boljša od 1 cm.

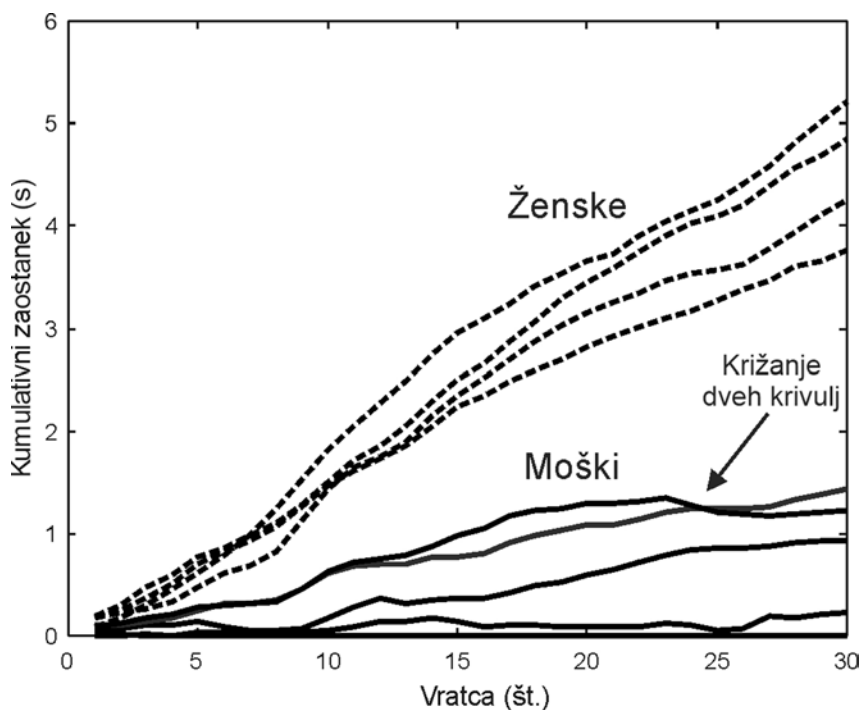
Podatke, zajete z GNSS-sprejemnikom, smo najprej filtrirali z algoritmom Rauch-Tung-Striebel (Rauch, Tung in Striebel, 1965), ki uporablja dvomerni Kalmanov filter. Za nastavitev filtra smo uporabili natančnost merjenja točk trajektorije, ki jih vrne GNSS, s pogojem mejnega filtra, ki ne bo nobene od zgledjenih točk premaknil več, kot je natančnost njenega položaja. Postopek Kalmanovega filtriranja optimalno oceni tudi nemerljiva stanja, kar je bilo uporabljeno za določitev hitrosti. Optimalno ocenjena hitrost in filtriran položaj sta omogočila izračun velikosti hitrosti in časov od vratc do vratc s primerljivo natančnostjo, kot jo dobimo s pomočjo fotocelic (Supej in Holmberg, 2011). Časi od vratc do vratc so bili dobljeni iz matematičnega izračuna časov, kdaj smučarjeva izmerjena trajektorija prečka navidezno ravnino, napeto na vsaka od vratc proge (Supej in Holmberg, 2011). Ti časi prečkanja vratc oziroma navideznih ravnin so bili nato uporabljeni za sinhronizacijo podatkov med vsakim parom sosednjih vratc vzdolž proge, kjer smo definirali sto vrednosti hitrosti, enakomerno porazdeljenih v času med vsakim parom vratc. Taka transformacija je omogočala izrisati smučarjevo hitrost v odvisnosti od zaporedne številke vratc namesto v odvisnosti od

časa. Zaradi jasnosti diagramov časov od vratc do vratc in hitrosti so bili za analizo izbrani samo štirje moški smučarji. Podatke, pridobljene iz GNSS, smo za lažjo analizo sinhronizirali tudi z videoposnetki, in sicer s prilagojeno lastno razvito aplikacijo DGP-Sana. Vse obdelave podatkov so bile izvedene v okolju Matlab 2021b (Mathworks, Natick, Massachusetts, ZDA).

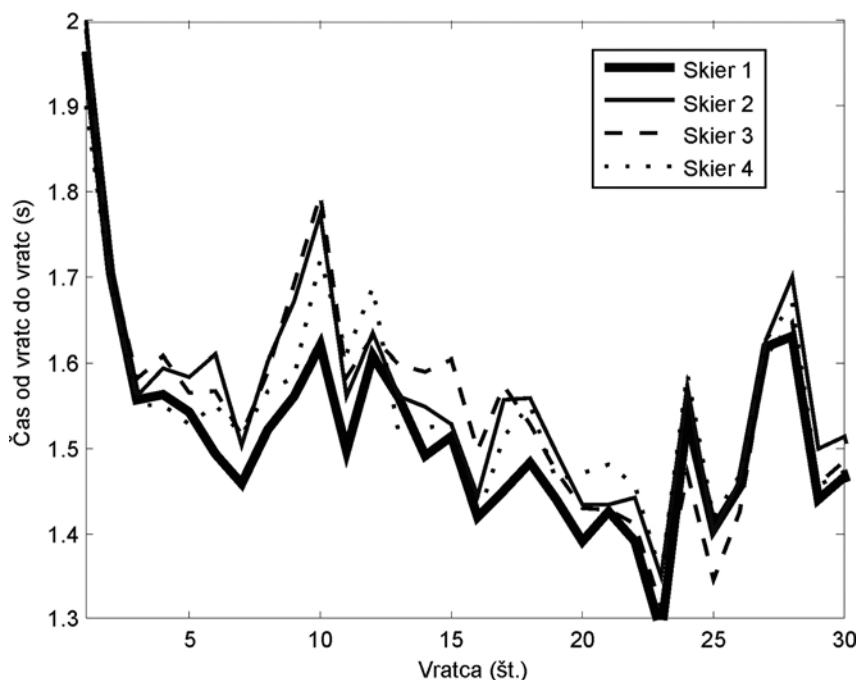
Rezultati

Skupni zaostanek, ki so si ga smučarji »nabrali« za najhitrejšim smučarjem, je prikazan na Sliki 2. Zelo dobro je vidna razlika med moškimi in ženskami. Razlike v skupnem končnem času so za najpočasnejšega moškega 1,43 s, najhitrejša smučarka je za njim zaostala že 3,76 s, najpočasnejša pa celo 5,21 s. Časovne krivulje zaostanka so razmeroma stalno naraščajoče in se le redko križajo; nasproten primer, kjer se križata dve krivulji moških smučarjev z najvišjimi zaostanki približno pri vratcih 24, je označen na sliki.

Časi od vratc do vratc so za štiri izbrane smučarje moškega spola predstavljeni na Sliki 3. Krivulje časov od vratc do vratc smučarjev prikazujejo spreminjanje časa, potrebnega za različna vratca na progi, in razlike v času med smučarji. V povpre-



Slika 2. Kumulativni zaostanek smučarjev pri vsakih vratcih za najboljšim (moški polna črta, ženske črtkana črta). Posebej je označeno mesto v bližini vratc 24, kjer se križata dve krivulji – takrat sta dva smučarja ob istem času na istem mestu.



Slika 3. Časi od vratc do vratc za štiri izbrane smučarje moškega spola za 30 vratc

čju je bila tendenca upadanje teh časov do vratc 23 in nato naraščanje teh časov do vratc 30. Posebej je vredno omeniti zmanjšanje časa pri prvih treh vratcih (z ~1,95 s na ~1,57 s), zmanjšanje od vratc 5 do 7 (z ~1,57 s na ~1,48 s), povečanje časa od vratc 7 do 10 (z ~1,5 s na ~1,7 s), počasnejše, vendar precej stalno zmanjševanje časa od vratc 10 do 23 (z ~1,7 s na ~1,35 s). Poleg skupnih sprememb v času je prihajalo tudi do sprememb, kjer je en ali drug smučar dosegal najkrajši čas. Na primer, smučar 1 je imel najkrajši čas med vratci 5 in 12, 13 in 14, 21 in 23 ter 28 in 36 z največjim »dobičkom« v času skoraj 0,18 s na vratca med vratci 9 in 10 v primerjavi s smučarjem 3. Po drugi strani pa so razlike med smučarji v času od vratc do vratc najmanjše do tretjih vratc in nato še pri vratcih 26 in 27.

Izračunani časi prečkanja zajete trajektorije prek virtualnih ravnin pri vsakih vratcih so omogočili sinhronizacijo hitrosti med smučarji in izris diagramov na Sliki 3. Analiza hitrosti v odvisnosti od vratc na Sliki 3 za dva izbrana odseka razkrije nove podrobnosti v primerjavi z diagrami časov od vratc do vratc na Sliki 2. Smučar 1 ima v primerjavi s preostalimi smučarji največjo hitrost od sredine med 2. in 3. vratci, in to v večji meri vzdržuje na celotnem odseku do vratc 9 (Slika 3A). Nekoliko večjo hitrost ima le smučar 4 med vratci 3 in 4. Po drugi strani pa je

imel npr. smučar 4 enako hitrost pri vratcih 4, nato pa se je njegova hitrost nenadno zmanjšala z 18,26 m/s na 16,6 m/s. Po tem zmanjšanju hitrosti smučar 4 ne ujame več hitrosti smučarja 1, se pa po dveh vratcih približa preostalima dvema analiziranima smučarjema.

Če se osredotočimo še na hitrost smučarja 1 za odsek med vratci 21 in 24 (Slika 2B), lahko opazimo, da je smučar 1 dosegel največjo hitrost približno 0,2 zavoja po prehodu vratc 21 in ohranil najvišjo hitrost skoraj do točke, ko je pri vratcih 23. Smučar 1 je imel ~0,5 m/s večjo hitrost tik pred vratci 23 in ~1,1 m/s manjšo v okolici vratc 24 v primerjavi s smučarjem 3. Smučar 3 je smučal z največjo hitrostjo med vratci 23 in 26, pred tem (od vratc 20 do 23) pa je bil od njega hitrejši smučar 1.

Diskusija

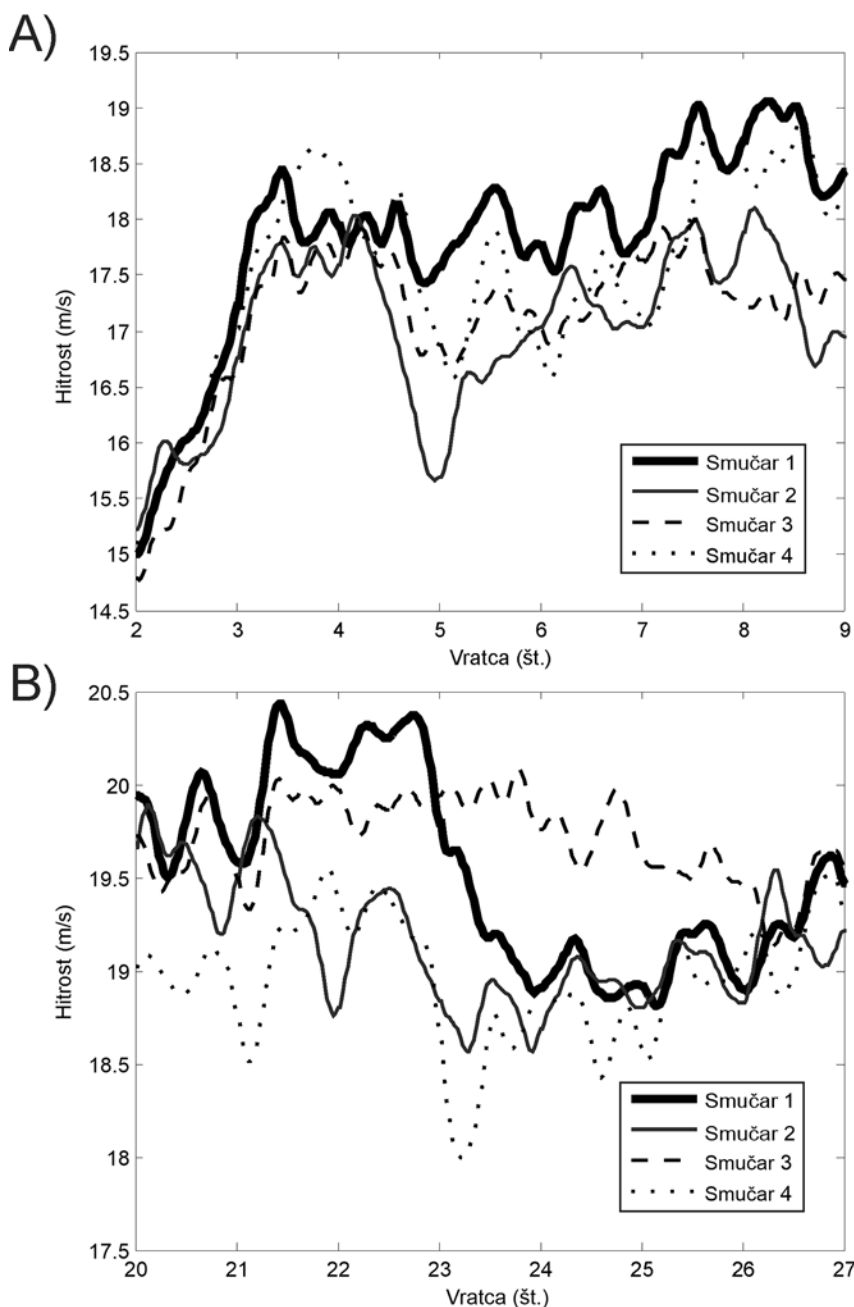
Cilj te študije je bil razviti metodologijo, ki omogoča neposredno oziroma sinhronizirano primerjavo hitrosti smučarjev vzdolž celotne proge. Glavni rezultat te študije je, da je s pomočjo pomerjenih položajev vratc in trajektorij smučarjev z RTK GNSS hitrost mogoče sinhronizirati in tako učinkovito analizirati smučarje na veleslalomski progi (Slika 4).

Krivulje zaostankov časov za bolj ali manj vse smučarje enakomerno naraščajo od začetka do cilja, kar pomeni, da se le red-

ko zgodi, da bi slabšemu smučarju uspelo smučarja na progi »ujeti« in »prehiteti« (Slika 2). To je sicer nekoliko v nasprotju s študijami, ki so proučevale slalom, še posebej pa tekmovalca za svetovni pokal (Supej in Cernigoj, 2006; Supej in Holmberg, 2011), kjer so razlike manjše, že razmeroma majhne razlike na posameznih odsekih pa lahko odločajo o spremembi vrstnega reda. Na tem istem diagramu je zanimivo videti tudi razlike med moškimi in ženskami v isti starostni kategoriji, ki so presenetljivo velike in znašajo celo prek 5 s.

Natančnejša analiza časov od vratc do vratc je vzdolž proge pokazala (Slika 3), da se pojavljajo različno velike razlike v časih med tekmovalci, ki se na koncu lahko akumulirajo v velike zaostanke (Slika 2). Ti časi od vratc do vratc so pokazali, da isti smučar ni imel najkrajšega časa na celotni progi, kar je v skladu s preteklimi študijami (Supej in Cernigoj, 2006; Supej in Holmberg, 2011). Spremembe v tem, kdo ima najkrajši čas, so se pogosto pojavljale ob spremembah ritma, tj. ko se je čas za vse smučarje nenedoma zmanjšal ali povečal (npr. od vratc 4 do 7 in od vratc 7 do 10), kar je v skladu s prejšnjimi ugotovitvami.

Analiza hitrosti, sinhronizirane od vratc do vratc, postreže še z natančnejšimi informacijami (Slika 4). Tu je treba poudariti, da opažene razlike v hitrosti niso bile neposredno usklajene s časovnimi razlikami med smučarji. Na primer, smučar 1 je že pridobil največjo hitrost med vratci 4 in 5, vendar je bil najkrajši čas dosežen šele po vratcih 5. Poleg tega smučar 1 ni smučal z največjo hitrostjo skozi vratca 21 do 23, vendar je kljub temu tam dosegel najkrajši čas. To se zdi na prvi pogled nelogično, vendar je razlaga razmeroma preprosta. Če smučar pridobi ali izgubi hitrost tik pred naslednjimi vratci, se to pri času ne bo kaj dosti poznalo do teh vratc, temveč šele v naslednjih. Še posebej pri večjih izgubah hitrosti smučar pogosto izgublja čas še nekaj vratc po tem, ko je hitrost izgubil, saj ne more hitro nadomestiti izgubljene energije (Hébert-Losier idr., 2014; Supej, 2008; Supej in Holmberg, 2019). Na podlagi tega lahko sklenemo, da je analiza hitrosti od vratc do vratc še bolj podrobna in neposredna kot analiza časov od vratc do vratc. Taka povratna informacija je ključnega pomena za natančno analizo. Na podlagi te študije vidimo, da se analize lahko lotimo na dva načina. Ali začnemo pri časovni analizi in – ko ugotovimo, kje so se naredile razlike v času – poiščemo razloge v spremembah hitrosti. Druga možnost pa



Slika 4. Hitrosti smučarjev v odvisnosti od vratca za območje od vratca 2 do 9 (A) in od vratca 20 do 27 (B). Opomba: do vratca 2 podatki niso prikazani zaradi boljše preglednosti oziroma večje skale grafa.

je, da pogledamo, kje so se zgodile razlike v hitrosti, in nato preverimo, ali so te razlike pomembne tudi za čas, ki je glavni razvrstilni dejavnik v tekmovalnem smučanju (Supej in Cernigoj, 2006). Če take analize sinhroniziramo še z videoposnetkom, lahko naredimo še vizualno analizo (Slika 5) ali pa si pomagamo z analizo trajektorij, ki jih taki navigacijski sistemi RTK GNSS tudi omogočajo.

Omejitev nove predlagane metodologije je bila, da je sistem GNSS meril položaj ante-

ne, in ne težišča telesa, ki je najbolj merodajna točka za analizo (Gilgien, Spörri idr., 2015; Nemec, Petric, Babić in Supej, 2014; Supej, Kugovnik in Nemec, 2008; Supej idr., 2020). Vendar je bila antena glede na veleslalomске dimenzije postavljena relativno blizu težišča telesa in to vseeno predstavlja zelo dobro oceno gibanja smučarja. To je sicer z ustreznim biomehanskim modeliranjem (Gilgien, Spörri idr., 2015; Supej idr., 2008; Supej idr., 2013) ali pa umetno inteligenco (Nemec idr., 2014) mogoče odpraviti

brez dodatnih senzorjev, je pa za dnevne meritve smučarjev to s stališča zajema podatkov in priprave bolj zamudno.

Zaključek

Študija je pokazala, da nova razvita metodologija omogoča sinhronizacijo hitrosti vzdolž proge pri uporabi globalnega satelitskega navigacijskega sistema in je zelo uporabna v vsakodnevni praksi za natančno analizo uspešnosti smučarjev. Ker gre za analizo hitrosti, je razmeroma preprosta za razumevanje tako za trenerje kot za tekmovalce. Z uporabo ustreznih rutin računalniškega programiranja je mogoče novo metodologijo avtomatizirati in rezultate pridobiti takoj po treningu ali po vsakem spustu smučarja, da se izboljšajo povratne informacije. Poleg tega se lahko ista metodologija uporablja tudi za sinhronizacijo drugih parametrov zmogljivosti vzdolž proge, kot je diferencialna specifična mehanska energija (Supej, 2008), in se lahko uporablja v drugih športih, npr. teku na smučeh. V praksi pa je treba biti pazljiv, da se za take analize uporabljajo GNSS-sistemi najvišjih ločljivosti (Gilgien idr., 2014; Supej idr., 2020), ki omogočajo natančno pozicioniranje zaradi potrebne sinhronizacije, in ni dovolj, da sistem omogoča le natančno merjenje hitrosti, kar omogočajo tudi cenejši GNSS-sistemi (Supej in Cuk, 2014).

Zahvala

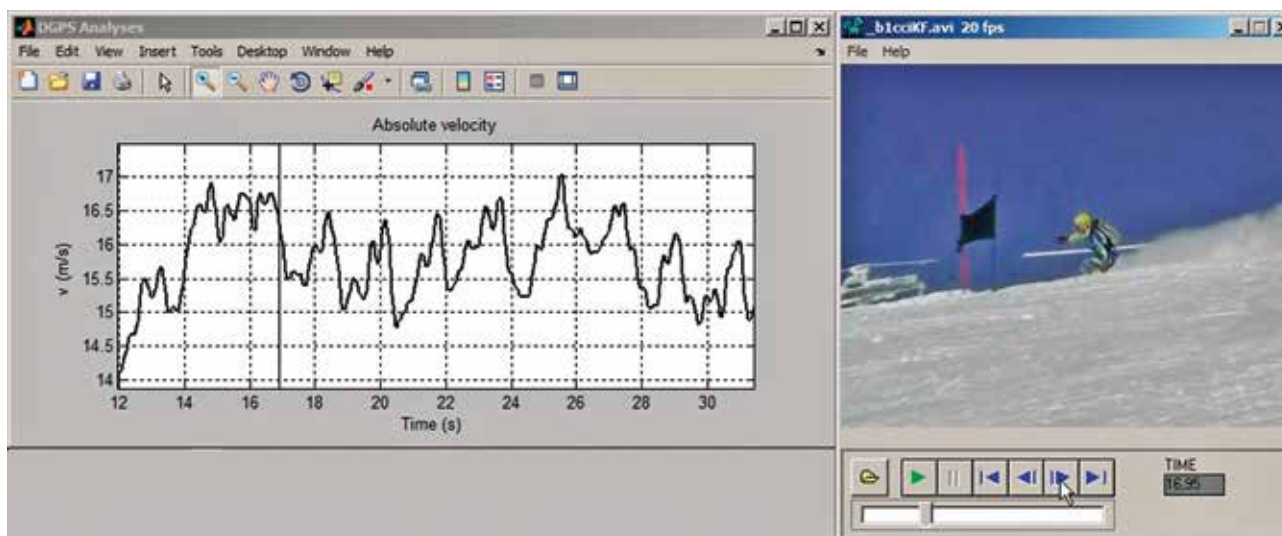
Zahvaljujemo se tekmovalcem in trenerjem, ki so sodelovali pri meritvah.

Financiranje

Finančno je raziskavo podpirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS (P5-0147).

Literatura

1. Brodie, M., Walmsley, A. in Page, W. (2008). Fusion motion capture: a prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing. *Sports Technol.* 1(1), 17–28. <http://dx.doi.org/10.1002/jst.6>
2. Erdmann, W. S., Giovanis, V., Aschenbrenner, P., Kiriakis, V. in Suchanowski, A. (2017). Methods for acquiring data on terrain geomorphology, course geometry and kinematics of competitors' runs in alpine skiing: a



Slika 5. Hitrost smučarjev v odvisnosti od časa, sinhronizirana z videoposnetkom. Vertikalna črna črta prikazuje hitrost, ki ustreza smučarju na sliki. Smučar v tem trenutku izgublja hitrost (vidno na grafu), s posnetka pa je vidno, da se za smučarjem praši veliko snega, kar pomeni oddrsavanje.

- historical review. *Acta Bioeng Biomech*, 19(1), 69–79.
3. Fasel, B., Gilgien, M., Spörri, J. in Aminian, K. (2018). A new training assessment method for alpine ski racing: estimating center of mass trajectory by fusing inertial sensors with periodically available position anchor points. *Front Physiol*, 9, 1203. doi:10.3389/fphys.2018.01203
4. Fasel, B., Spörri, J., Gilgien, M., Boffi, G., Chardonnens, J., Müller, E. in Aminian, K. (2016). Three-dimensional body and centre of mass kinematics in alpine ski racing using differential GNSS and inertial sensors. *Remote Sens*, 8(8). doi:ARTN 67110.3390/rs8080671
5. Fasel, B., Spörri, J., Kröll, J., Müller, E. in Aminian, K. (2019). A Magnet-Based Timing System to Detect Gate Crossings in Alpine Ski Racing. *Sensors*, 19(4). doi:ARTN 940 10.3390/s19040940
6. Gilgien, M., Crivelli, P., Spörri, J., Kröll, J. in Müller, E. (2015). Characterization of course and terrain and their effect on skier speed in World Cup alpine ski racing. *PLoS ONE*, 10(3), e0118119. doi:10.1371/journal.pone.0118119
7. Gilgien, M., Kröll, J., Spörri, J., Crivelli, P. in Müller, E. (2018). Application of dGNSS in alpine ski racing: basis for evaluating physical demands and safety. *Front Physiol*, 9, 145. doi:10.3389/fphys.2018.00145
8. Gilgien, M., Reid, R., Raschner, C., Supej, M. in Holmberg, H. C. (2018). The Training of Olympic Alpine Ski Racers. *Front Physiol*, 9(1772). doi:10.3389/fphys.2018.01772
9. Gilgien, M., Spörri, J., Chardonnens, J., Kröll, J., Limpach, P. in Müller, E. (2015). Determination of the centre of mass kinematics in alpine skiing using differential global navigation satellite systems. *J Sport Sci*, 33(9), 960–969. doi:10.1080/02640414.2014.977934
10. Gilgien, M., Spörri, J., Limpach, P., Geiger, A. in Müller, E. (2014). The effect of different global navigation satellite system methods on positioning accuracy in elite alpine skiing. *Sensors*, 14(10), 18433–18453. doi:10.3390/s141018433
11. Hébert-Losier, K., Supej, M. in Holmberg, H. C. (2014). Biomechanical factors influencing the performance of elite alpine ski racers. *Sports Med*, 44(4), 519–533. doi:10.1007/s40279-013-0132-z
12. Krüger, A. in Edelmann-Nusser, J. (2010). Application of a full body inertial measurement system in alpine skiing: A comparison with an optical video based system. *J Appl Biomech*, 26(4), 516–521.
13. Nemec, B., Petric, T., Babic, J. in Supej, M. (2014). Estimation of alpine skier posture using machine learning techniques. *Sensors (Basel)*, 14(10), 18898–18914. doi:10.3390/s141018898
14. Parkinson, B. W. in Spilker, J. J. (1996). *Global positioning system : theory and application. Vol.1*. Washington, D.C.: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
15. Rauch, H. E., Tung, F. in Striebel, C. T. (1965). Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems. *AIAA Journal*, 3(8), 1445–1450.
16. Supej, M. (2008). Differential specific mechanical energy as a quality parameter in racing alpine skiing. *J Appl Biomech*, 24(2), 121–129.
17. Supej, M. (2009). A step forward in 3D measurements in Alpine skiing: a combination of an inertial suit and dGPS technology. V S. L. E. Müller, T. Stöggl (Ed.), *Science and Skiing IV* (pp. 497–504). Aspen Snowmass: Maidenhead: Meyer & Meyer Sport (UK) Ltd.
18. Supej, M. (2010). 3D measurements of alpine skiing with an inertial sensor motion capture suit and GNSS RTK system. *J Sports Sci*, 28(7), 759–769. doi:10.1080/02640411003716934
19. Supej, M. in Cernigoj, M. (2006). Relations between different technical and tactical approaches and overall time at men's world cup giant slalom races. *Kinesiol Slov*, 12(1), 63–69.
20. Supej, M. in Cuk, I. (2014). Comparison of global navigation satellite system devices on speed tracking in road (tran)SPORT applications. *Sensors (Basel)*, 14(12), 23490–23508. doi:10.3390/s141223490
21. Supej, M., Hébert-Losier, K. in Holmberg, H. C. (2015). Impact of the steepness of the slope on the biomechanics of World Cup slalom skiers. *Int J Sports Physiol Perform*, 10(3), 361–368. doi:10.1123/ijspp.2014-0200
22. Supej, M. in Holmberg, H.-C. (2019). Recent Kinematic and Kinetic Advances in Olympic Alpine Skiing: Pyeongchang and Beyond. *Front Physiol*, 10(111). doi:10.3389/fphys.2019.00111
23. Supej, M. in Holmberg, H. C. (2011). A new time measurement method using a high-end global navigation satellite system to analyze alpine skiing. *Res Q Exerc Sport*, 82(3), 400–411. doi:10.1080/02701367.2011.10599772
24. Supej, M., Kipp, R. in Holmberg, H.-C. (2011). Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing. *Scand J Med Sci Sports*, 21(6), e72–e81. http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01159.x
25. Supej, M., Kugovnik, O. in Nemec, B. (2008). DGPS measurement system in alpine skiing track and center of mass estimation. In Y. Jiang, A. Baca, & H. Zhang (Eds.), *Proceedings of First Joint International Pre-Olympic Conference of Sports Sciences and Sports Engineering. Vol. 1, Computer Science in Sports* (pp. 120–125). Liverpool: World Academic Union.

26. Supej, M., Sætran, L., Oggiano, L., Ettema, G., Šarabon, N., Nemec, B. in Holmberg, H. C. (2013). Aerodynamic drag is not the major determinant of performance during giant slalom skiing at the elite level. *Scand J Med Sci Sports*, 23(1), e38–e47.
27. Supej, M., Spörri, J. in Holmberg, H. C. (2020). Methodological and practical considerations associated with assessment of alpine skiing performance using global navigation satellite systems. *Front Sports Act Living*, 1(74). doi:10.3389/fspor.2019.00074
28. Takac, F. in Walford, J. (2006, September 26–29). *Leica System 1200 – High Performance GNSS Technology for RTK Applications*. Paper presented at the Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2006), Fort Worth, TX.

prof. dr. Matej Supej
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za šport
matej.supej@fsp.uni-lj.si