



Matej Supej

Uporaba sistema RTK GNSS v slalomu za merjenje časa od vratc do vratc

Izvilleček

Za analizo uspešnosti se v alpskem smučanju najpogosteje meri čas s fotocelicami. Čeprav so časi s fotocelicami izmerjeni z visoko natančnostjo, ima metoda tudi nekaj pomembnih omejitev pri izvajanju podrobne časovne analize, ki je zelo dobrodošla v tekmovalnem alpskem smučanju. Zato je bil cilj študije pokazati natančnost in uporabnost metode za izračun časa iz trajektorij, izmerjenih z visokoločljivim globalnim satelitskim navigacijskim sistemom (RTK GNSS) v slalomu. V simuliranih tekmovalnih pogojih smo izmerili osem smučarjev in primerjali čase, pridobljene z metode RTK GNSS, s časi fotocelic. Rezultati so pokazali, da ni statistično značilnih odstopanj v času med fotocelicami in časi, izračunanimi z RTK GNSS. Časi od vratc do vratc, pridobljeni z uporabo RTK GNSS, so omogočili podrobno analizo uspešnosti v slalomu. S tem je študija pokazala uporabnost takega sistema za merjenje časov in tudi prednosti pred običajnim merjenjem časov s fotocelicami. Izračun časov z visokoločljivim RTK GNSS se je izkazal kot robustno orodje za natančno analizo uspešnosti v slalomu.

Ključne besede: biomehanika, GLONASS, GPS, globalni satelitski navigacijski sistem, uspešnost



Use of RTK GNSS in alpine slalom to measure gate-to-gate times

Abstract

Photocell times are most commonly measured in alpine skiing for performance analysis. Although photocell times are measured with high accuracy, the method also has some limitations in performing detailed time analysis, which is very welcome in alpine skiing. Therefore, the aim of the present study was to demonstrate a method for calculating time from trajectories measured with a high-resolution global navigation satellite system (RTK GNSS). Eight skiers were measured under simulated slalom competition conditions, and we compared the times obtained from the RTK GNSS system with the photocell times. The results showed no statistically significant time discrepancies between the photocells and the times calculated by RTK GNSS. The gate-to-gate times obtained with the RTK GNSS system allowed for a detailed performance analysis. Thus, the study demonstrated the usefulness of such a timing system as well as its advantages over conventional photocell timing. Calculating times from the high-resolution RTK GNSS trajectories has proven to be a robust tool for accurate performance analysis in slalom.

Key words: biomechanics, GLONASS, GPS, global satellite navigation system, performance

Uvod

Merjenje časa je v številnih športih ključni razvrstitveni parameter (Foster et al., 1993; Nevill in Whyte, 2005; Nevill, Whyte, Holder in Peyrebrune, 2007). Poleg končnega časa se med tekmovanji pogosto merijo tudi odseki, krogi ali vmesni časi, s čimer se pridobijo dodatne informacije o uspešnosti v različnih delih tekmovanja (Robertson, Pyne, Hopkins in Anson, 2009), ki so ob »profesionalni« analizi trenerjev in raziskovalcev zanimivi tudi za gledalce. V nekaterih športih, na primer plavanju, so časovne točke standardizirane na določene razdalje (vsak krog), medtem ko so vmesni časi pri alpskem smučanju določeni za vsako tekmovanje posebej.

Smučanje je zelo kompleksen šport, kjer se uporabljajo različni parametri merjenja uspešnosti (Hébert-Losier, Supej in Holmberg, 2014; Supej in Holmberg, 2019; Supej, Kipp in Holmberg, 2011), vendar lahko trdimo, da je za smučarske strokovnjake (trenerje) in tekmovalce najrazumljivejši način analize uspešnosti prek merjenja časov (Supej in Cernigoj, 2006). V nedavni študiji se je merjenje časa v alpskem smučanju uporabilo tudi za oceno vpliva gibanja smučarja na trenje med smučmi in snegom (Federolf et al., 2008). Druga študija v alpskem smučanju je pokazala, da en ali dva vmesna časa ne zadostujeta za analizo tehničnih in taktičnih sposobnosti smučarjev na progi oziroma za natančnejši prikaz, kje točno smučar izgubi ali pridobi čas (Supej in Cernigoj, 2006). Podobno so uspešnost preučevali tudi v več odsekih v drugih športih, kot so sprinterski tek (Smirniotou

et al., 2008), orientacijski tek (Larsson in Henriksson-Larsén, 2001) in tek na smučeh (Larsson in Henriksson-Larsén, 2005). Na podlagi tega lahko trdimo, da bi bilo za smučanje smiselno čas meriti med vsakimi vratci, saj bi na tako lahko dobili podroben vpogled v uspešnost smučanja.

Za merjenje časa od vratc do vratc je potreben natančen sistem merjenja časa z visoko zanesljivostjo. Na voljo je množica tehnoloških metod za merjenje časa, od najpreprostejših štoparic in fotocelic do naprednejših sistemov, kot so kontaktne preproge, radiofrekvenčni čipi in video-sistemi. Vendar imajo te metode omejitve pri natančnosti in možnostih uporabe, če želimo v alpskem smučanju meriti čas med vsakimi vratci, saj je vratc veliko, razdalje od starta do cilja pa ravno tako (Gilgien, Reid, Raschner, Supej in Holmberg, 2018).

Globalni satelitski navigacijski sistemi so se že pred časom uveljavili za različne analize v alpskem smučanju, kot je določitev trajektorije težišča telesa (Gilgien et al., 2015; Supej, Kugovnik in Nemec, 2008), ali pa za analizo tehnike v kombinaciji z inercialnimi sistemi (Brodie, Walmsley in Page, 2008; Krüger in Edelmann-Nusser, 2010; Supej, 2010). Izkazalo se je, da so diferencialni oziroma visokoločljivi ("real time kinematics" – RTK) globalni satelitski navigacijski sistemi (GNSS) najprimernejši za natančno analizo v alpskem smučanju (Gilgien, Spörri, Limpach, Geiger in Müller, 2014; Supej, Spörri in Holmberg, 2020). Zato je bil cilj te študije proučiti in pokazati uporabnost izračunavanja časov od vratc do vratc v slalomu z uporabo meritev sistema RTK GNSS.

Metode

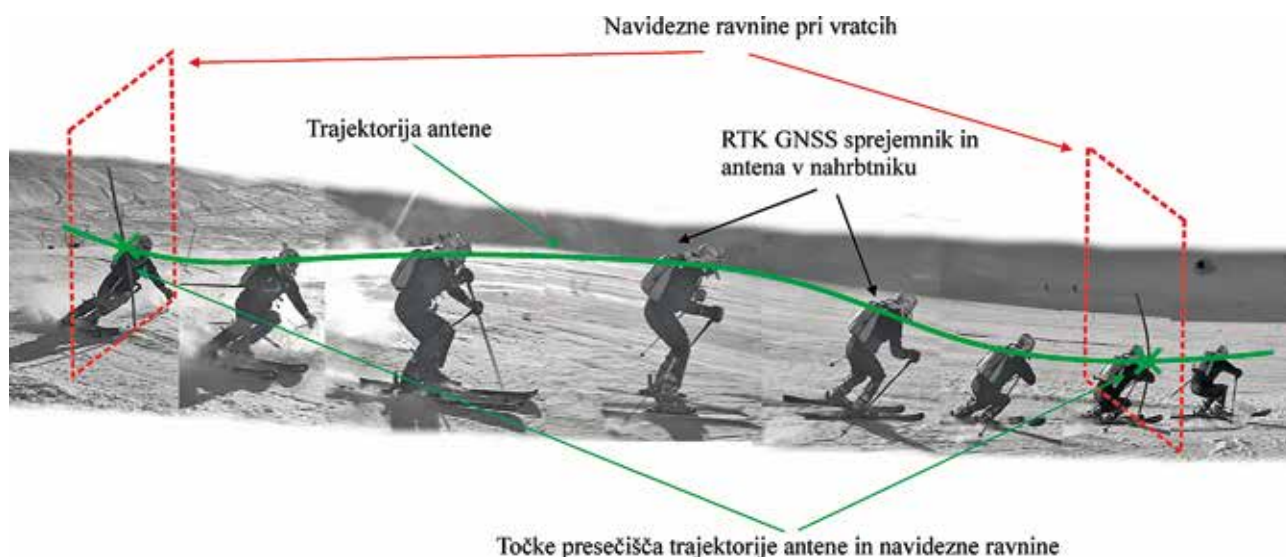
Merjenci

V študiji je sodelovalo 8 tekmovalcev alpskega smučanja, štiri ženske (starost: $22,8 \pm 4,9$ leta; telesna višina: $1,67 \pm ,03$ m; telesna teža: $57 \pm 3,5$ kg) in štiri moški (starost: $21,8 \pm 4,1$ let; telesna višina: $1,78 \pm ,08$ m; telesna teža: $78 \pm 4,3$ kg). Udeleženci so podpisali prostovoljno pisno soglasje, študijo pa je odobrila etična komisija Fakultete za šport Ljubljana.

Merilna tehnologija

Za meritve je bil uporabljen visokoločljivi in visokofrekvenčni ("Real time kinematics" – RTK) GNSS (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Švica), ki ima po podatkih proizvajalca 99,99-odstotno zanesljivost. Rover in referenčna postaja sta bila zgrajena iz enakih komponent strojne opreme: dvofrekvenčni L1/L2, geodetski, sprejemnik GNSS RTK Leica GX1230GG, antena Leica GLONASS/GPS AX1202 GG in radijski modemi Leica Satellite 3AS za popravke v realnem času. Sistem je za merjenje smučarjev deloval v načinu RTK s hitrostjo vzorčenja 20 Hz, ki po navodilih proizvajalca zagotavlja natančnost 10 mm horizontalno in 20 mm vertikalno.

V času meritev je referenčna postaja oddajala popravke v realnem času in je stala ob startu proge na trinožnem stativu, vkopanem v sneg. Merilni sprejemnik oz. rover je bil skupaj z anteno nameščen v majhnem nahrbtniku, ki ga je moral nositi merjenec. Antena je bila tako v višini ramenskega obroča (Slika 1). Kljub velikosti ($0,212 \times 0,166 \times 0,079$ m) in teži (1,64 kg) sprejemnika se



Slika 1. Trajektorija antene RTK GNSS in njena presečišča z navideznimi ravninami, ki predstavljajo točke merjenja časa pri vratcih.

športniki niso pritoževali, da bi jih merilna oprema kakorkoli motila.

Za zajem položaja vratc, ki so služila za referenčne točke, je bila antena pritrjena na 2 m visok karbonski geodetski drog in rover je bil nastavljen na statični način merjenja, ki po navodilih proizvajalca zagotavlja natančnost 5 mm horizontalno in 10 mm vertikalno. Zajete koordinate WGS84 so bile pretvorjene v lokalni koordinatni sistem. Mejni azimutni kot za uporabo satelitov v izračunu je bil na sistemu RTK GNSS nastavljen na 15° za vse meritve.

Za validacijo so bile uporabljene tri fotocelice Microgate Polyfemo in kronometrov Racetime 2 (Microgate Srl, Bolzano, Italija) z ločljivostjo $3,47 \cdot 10^{-5}$ oziroma $1,25 \cdot 10^{-4}$ s.

Izračun časa

Uporabljeni RTK GNSS zajema položaj točke antene v prostoru 20-krat na sekundo, iz česar je mogoče rekonstruirati trajektorijo gibanja antene. Ker je antena postavljena v višini ramen posteriorno (v nahrbtniku), njen položaj precej dobro leži na namišljeni premici, ki jo dobimo, če jo potegnemo prek prijemališča sile reakcije podlage in težišča telesa. Ta točka antene se zato v smeri naprej vede podobno kot težišče telesa in s tem pomeni dobro nadomestno izbiro za spremljanje gibanja težišča telesa.

Če želimo določiti čase na posameznih odsekih slalomske postavitve, je treba določiti navidezne ravnine vzdolž proge in izračunati, kdaj trajektorija antene prečka te navidezne ravnine. Te lahko enačimo s preходом smučarja prek žarka fotocelice, ki prekine merjenje časa.

Za izračun presečišča trajektorije antene z navideznimi ravninami je treba določiti presečišča in navidezne ravnine (Slika 1). Navidezne ravnine smo določili pri vsakih vratcih tako, da je normalni vektor ravnine določen s smernim vektorjem med dotičnimi in naslednjimi vratci. Točka, ki leži v navidezni ravnini in ob normali ravnine določi ravnino, pa je kar točka vratc. Čas se torej meri s trenutkom presečišča trajektorije s to navidezno ravnino. Za določitev takih presečišč je bila ustvarjena posebna rutina v Matlabu 7.4 (Mathworks, Natick, MA, ZDA), ki trajektorije antene najprej pogladi z dvosmernim Kalmanovim filtrom z mejnim pogojem, da ostane vsak filtriran izmerjeni položaj znotraj znane napake meritve položaja, ki jo za vsako točko določi sistem RTK GNSS. Presečišče smo izračunali tako, da se v rutini izračuna, kdaj se točka

trajektorije antene prvič pojavi za navidezno ravnino, nato pa se iterativno približuje navidezni ravnini, dokler iterativna točka na trajektoriji ne doseže oddaljenosti od ravnine, ki je manjša od 0,001 m.

Protokol meritev

Slalom postavitev je bila pripravljena na odprtem terenu, ki je bil rezerviran, ograjen in pripravljen za trening alpskega smučanja, da je bilo tveganje za smučarje čim manjše. Teren se je začel s strmim naklonom v prvi polovici, ki se je z razmeroma položnim preходом prevesil v položno naklonino. Postavljenih je bilo 30 slalomskih vrat z razdaljo vrat 12–13 m v prvi polovici in 10–11 m v drugi polovici proge, kjer sta bili postavljeni tudi dve vertikali z razdaljo vrat 5–6 m. Vse razdalje in nastavitve proge so bile v skladu s pravili Mednarodne smučarske zveze (FIS). Sneg je bil trd in po teptan, smučarji so imeli dobro vidljivost s temperaturo zraka okrog -5 °C. Za merjenje časa so bili uporabljeni trije kompleti fotocelic, ki so bili nameščeni pod višino kolen v skladu s pravili FIS. Prva fotocelica je bila postavljena meter pod startna vrata, druga pri 15. in tretja pri zadnjih, 30. vratcih. Tako so bili s fotocelicami zabeleženi tudi časi od »starta« do 15. in 30. vratc. Prvi položaj fotocelice in vsi položaji vratc so bili za potrebe izračuna časov (navideznih ravnin) pred smučanjem merjencev pomerjeni z napravo RTK GNSS.

Vsak od osmih udeležencev je opravil po eno vožnjo z merilnim nahrbtnikom RTK GNSS in je bil sočasno pomejen s fotocelicami. S fotocelicami smo izmerili čase med fotocelicami, iz meritev RTK GNSS so bili izračunani časi do vsakih vratc in nato časi med vsakimi vratci. Za preučitev časovnih razlik med dvema sistemoma – RTK GNSS in fotocelic – so bili iz sistema RTK GNSS izračunani isti odseki kot pri fotocelicah. Za dodatno časovno analizo so bile izbrane štiri smučarke. Izmed teh štirih smučark je bil za vsaka vratca izbran najkrajši čas do vratc, nato so bili izračunani t. i. kumulativni zaostanki, torej časovne razlike do najkrajšega časa do vsakih vratc.

Statistika

Za čase so bile izračunane povprečne vrednosti in njihovi standardni odkloni. Normalnost porazdelitve je bila preverjena s testom Kolmogorov-Smirnova za en vzorec. Razlike v časih, pridobljenih iz fotocelic in RTK GNSS, smo testirali s t-testom za neodvisne vzorce. Razlike med smučarji smo

primerjali z uporabo povprečnih časov in njihovih standardnih odklonov. Poleg tega so bile za vsakega smučarja izračunane absolutne in relativne razlike v časih od vrat do vrat glede na njihove srednje vrednosti. Ti so bili nato razdeljeni v štiri skupine: V1) časovne razlike prvih dveh vrat, V2) časovne razlike 14. in 16. vratc, V3) časovne razlike 26., 27., 29. in 30. vratc in V4) vse časovne razlike preostalih vrat. Ansari-Bradleyjev test je bil uporabljen za testiranje disperzijskih razlik med porazdelitvami skupin (Ansari in Bradley, 1960). Za statične teste natančnosti in za položaje, ki so bili raziskani med alpskim smučanjem, so bile izračunane empirične kumulativne porazdelitvene funkcije in 95-odstotni intervali zaupanja za vrednosti geometrijskega vpliva položaja satelitov na natančnost (GDOP) in za napako položaja. Vsi izračuni, statistike in izrisi so bili narejeni v programu Matlab.

Rezultati

Med meritvami alpskega smučanja je bilo število vidnih satelitov med 7 in 11, vpliv geometrije položaja satelitov (GDOP) je bil pod 2,6 z vidnimi 11 sateliti, 95 % vseh GDOP je bilo pod 5,7, in 95 % vseh izmerkov je bilo natančnejših od 0,013 m v vodoravnih koordinatah ter 0,032 m v vertikalni koordinati. Zato je bilo le 83 % izmerjenih položajev v obsegu napak, ki jih zagotavlja proizvajalec za zemljepisno širino in višino, ter 62 % v obsegu napak, ki jih zagotavlja proizvajalec za višino v dobrih satelitskih pogojih merjenja.

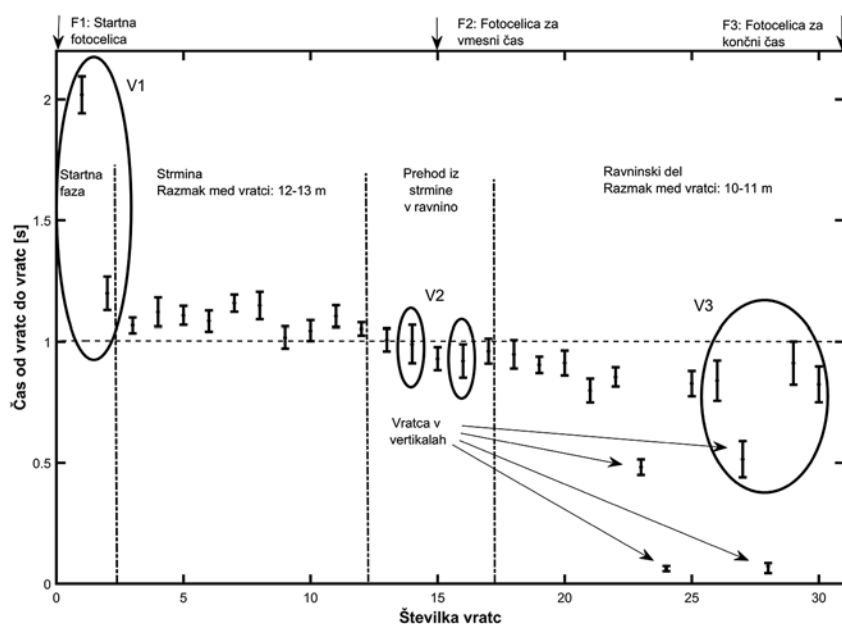
V Preglednici 1 so predstavljeni časi, dobljeni s fotocelicami, izračunani iz sistema RTK GNSS za iste časovne odseke, ter razlike v času med sistemoma. Povprečni vmesni čas (čas od startne fotocelice do 15. vratc) za vse smučarje je bil $17,05 \pm 0,068$ s, vmesni do končni čas (od 15. do 30. vratc) je bil $10,75 \pm 0,26$ s, končni čas (od startne fotocelice do 30. vratc) pa $27,8 \pm 0,28$ s. Med merilnima sistemoma ni bilo statističnih razlik v času ($p = 0,998$).

Časi od vrat do vrat za vse smučarje, merjeni z GNSS, so predstavljeni na Sliki 2. Podatki GNSS so omogočili razdelitev proge na štiri različne faze: začetna faza, ki se konča pri drugih vratcih, z najdaljšimi povprečnimi časi od vratc do vratc; faza na strmini z relativno dolgimi povprečnimi časi od vratc do vratc; prehodna faza, kjer so se povprečni časi od vratc do vratc zmanjšali; in na koncu položnejša (ravninska) faza z najkrajšimi povprečnimi časi od vratc do vratc. Analiza

Preglednica 1.

Časi, izračunani iz RTK GNSS in fotocelic: vmesni čas (čas od prve fotocelice na startu do druge fotocelice pri 15. vratcih), vmesni do končni čas (čas od druge fotocelice pri 15. vratcih do tretje fotocelice pri zadnjih 30. vratcih) in končni čas (čas od prve fotocelice na startu do tretje fotocelice pri zadnjih 30. vratcih) za vseh 8 smučarjev (A–H). SD – standardni odklon.

	Vmesni čas (s)			Vmesni do končni čas (s)			Končni čas (s)		
	Fotocelice	GNSS	Razlika	Fotocelice	GNSS	Razlika	Fotocelice	GNSS	Razlika
Smučar A	17.072	17.071	0.0008	10.633	10.635	-0.0017	27.705	27.706	-0.0009
Smučar B	17.104	17.104	0.0001	10.700	10.701	-0.0008	27.804	27.805	-0.0007
Smučar C	17.045	17.047	-0.0014	11.228	11.226	0.0021	28.273	28.273	0.0007
Smučar D	17.020	17.018	0.0022	10.984	10.981	0.0023	28.003	27.999	0.0045
Smučar E	16.920	16.924	-0.0041	10.441	10.439	0.0020	27.361	27.363	-0.0021
Smučar F	17.088	17.085	0.0031	10.653	10.657	-0.0040	27.741	27.742	-0.0009
Smučar G	17.140	17.144	-0.0041	10.807	10.803	0.0048	27.947	27.946	0.0007
Smučar H	17.016	17.012	0.0046	10.536	10.540	-0.0031	27.553	27.551	0.0015
Povprečje	17.051	17.050	0.00015	10.748	10.748	0.00020	27.798	27.798	0.00035
SD	0.068	0.068	0.00320	0.254	0.253	0.00306	0.281	0.280	0.00204



Slika 2: Časi od vratc do vratc za vseh osem smučarjev. Pri vsakih vratcih je prikazan povprečni čas in standardni odklon. Trajektorija antene RTK GNSS in njena presečišča z navideznimi ravninami, ki predstavljajo točke merjenja časa pri vratcih. Označeni so položaji fotocelic F1–3 in posebne skupine vratc V1–3 z višjimi standardnimi odkloni časov.

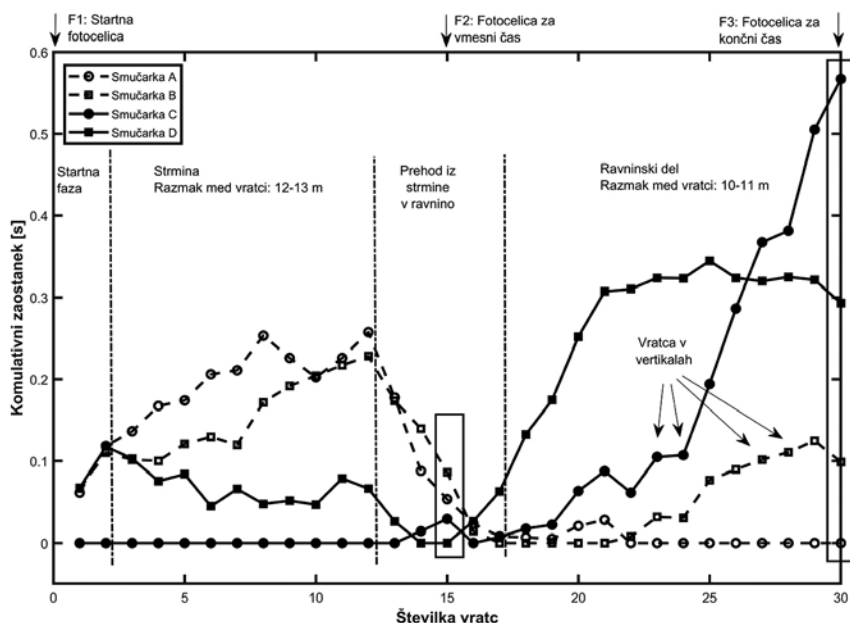
teh faz pokaže, da so bile največje absolutne časovne razlike med smučarji: i) v začetni fazi (V1), ii) v fazi prehoda (V2) in iii) v fazi ravne strmine po prvi vertikali (V3), v primerjavi z razlikami v časih od vratc do vratc v V4 ($p < 0,001$). Poleg tega je bila statistično značilna razlika v absolutnih časovnih razlikah med V1 in V2 ($p < 0,05$), ne pa med V1 in V3 ali med V2 in V3. Po drugi strani so bile relativne časovne razlike od vratc do vratc precej višje v V2 in V3 v primerjavi z V4 ($p < 0,001$). Značilna odstopanja v relativnih časovnih razlikah so bila opažena tudi med

V1 in V3 ($p < 0,05$), medtem ko se relativni časi V1–V2 in V2–V3 niso značilno razlikovali.

Vsi smučarji so bili analizirani tudi glede na njihove kumulativne zaostanke na progi. Rezultati GNSS in fotocelic za štiri smučarke (A–D; vse ženske) so kot primer predstavljeni na Sliki 3. Fotocelice pri vmesnem času kažejo le majhno razliko (F2; $< 0,085$ s) in veliko razliko v končnih časih (razpon 0,1–0,57 s). Poleg tega fotocelice pokažejo, da sta bili smučarki C in D hitrejši do vmesnega časa (F2), medtem ko sta bili A in B

hitrejši od vmesnega do končnega časa (F2 do F3).

Časi od vratc do vratc iz sistema RTK GNSS so postregli s podrobnim časovnim profilom vzdolž proge, kjer so bili najvišji časi kumulativnega zaostanka skoraj pri vseh posameznih vratcih vedno višji od razlik pri vmesnem času (vratca 15), dobljenih s fotocelicami (F2), razen pri vratcih 1, 16 in 17. Po drugi strani pa so bili kumulativni zaostanki, izmerjeni na vseh vratcih, manjši od najvišjih kumulativnih zaostankov ob koncu proge (F3). Analiza zaostankov iz RTK GNSS glede na definirane faze proge pokaže, da je bila smučarka C najhitrejša od štirih smučark v startni fazi, in sicer za $> 0,062$ s na prvih vratcih. Na strmih delih s krajšimi razdaljami vratc sta imeli smučarki C in D izrazito manjše časovne zaostanke kot smučarki A in B. V prehodni fazi sta smučarki A in B zmanjšali časovni zaostanek tako močno, da je bil nižje kot pri smučarkah B in C, kar sta dosegli v dobrih 3 s. Smučarka D je bila na začetku prehodne faze hitrejša od smučarke C, vendar je začela hitro povečevati svoj zaostanek od 15. do 22. vratc v ravninskem delu, nato pa je smučala podobno hitro kot najhitrejša smučarka A skozi zadnjih 9 vratc. Smučarka C je prav tako znatno povečala svoj zaostanek v ravninskem delu in na koncu dosegla najvišji zaostanek (najslabši čas), vendar je svoj zaostanek skozi celotni ravninski del postopoma povečevala, za najvišjimi prirastki po prvi vertikalni kombinaciji vratc (vratca 24).



Slika 3. Kumulativni zaostanki do vsakih vratc za štiri smučarke (A–D). Označeni so položaji fotocelic F1–3.

Razprava

Glavne ugotovitve te študije so, da metoda izračunavanja časov z meritvami RTK GNSS nima statistično značilnih razlik v primerjavi s fotocelicami v slalomu ter da sistem RTK GNSS omogoča natančno analizo časov od vratc do vratc na slalomski postavitvi.

Z metodo izračunavanja časov iz meritev RTK GNSS smo dobili čase na vseh izbranih odsekih, torej med vsakimi vratci, kar potrjuje robustnost metode. Iz primerjave časov med dvema sistemoma, fotocelice in izračuni iz RTK GNSS, lahko ugotovimo, da so razlike neznatne in tudi v praksi izjemno majhne (povprečne razlike manjše od 1 ms, najvišja absolutna razlika 4,8 ms), kar je natančneje, kot se zaradi zaokroževanja rezultatov uporablja na tekmovanjih vseh ravni v alpskem smučanju, tudi olimpijskih igrah. To potrjuje, da je uporaba sistema RTK GNSS natančna in uporabna za meritve v alpskem smučanju. Ugotovljene majhne neznatne razlike v času med sistemoma so po našem mnenju predvsem posledica tega, da lokalni premiki telesa (npr. roke ali noge) prekinajo fotocelico ob drugačnem času, kot potuje antena skozi navidezno ravnino, ki določi čas izračuna s sistemom RTK GNSS.

Rezultati analize razlik med smučarji dokazujejo pomen analize časa od vratc do vratc, ki ga omogoča RTK GNSS (Slika 2 in 3). Ta študija hkrati pokaže tudi, da je startna faza v slalomu zelo pomembna, kar je v

skladu z že znanimi ugotovitvami iz analize startnega pospeševanja v alpskem smučanju (Supej, Nedergaard, Nord in Holmberg, 2019). Podobno se kot pomembna izkažejo vrata v fazi prehoda iz strmine v ravnino (V2) ter vrata v vertikalih (V3) (Slika 2). Pri katerih vratcih ali v katerem zavoju je smučar začel izgubljati ali pridobivati čas, je mogoče nazorno videti iz kumulativnih zaostankov (Slika 3), kar še posebej nakazuje uporabo izračunanih časov pri vsakih vratcih iz sistema RTK GNSS. Po drugi strani študija prikaže tudi, kako pomanjkljiva je povratna informacija, ki jo zagotavljajo običajno postavljene fotocelice na sredini in na koncu postavitve. Poleg tega rezultati pokažejo, da se lahko v odvisnosti od terena ali postavitve zaostanki hitro začnejo povečevati ali zmanjševati (Slika 3). Iz rezultatov lahko opazimo, da je izguba oziroma napaka v prehodnem delu iz strmine v ravnino lahko »usodna« (smučarka C, Slika 3), saj je 6 vratc po »napaki« močno povečevala svoj zaostanek. To je v skladu s prejšnjimi ugotovitvami, da je na ravninskem delu izjemno težko nazaj pridobiti izgubljeno hitrost (Supej in Cernigoj, 2006), obnašanje zaostankov na položnih delih, kot je v tem primeru, in tudi na strmih pa je neposredno povezano z razpoložljivo potencialno energijo in energijskimi izgubami, kot je bilo že ugotovljeno (Supej, 2008).

Kljub temu, da je natančnost merjenja časov zelo dobra (Preglednica 1), je treba omeniti, da so bile pri meritvah napake

položaja v zemljepisni širini oziroma dolžini ter nadmorski višini in položaju precej višje od tistih, ki jih obljublja proizvajalec sistema RTK GNSS ob dobri vidljivosti satelitov. Razlog je v tem, da je antena z vgrajenim senzorjem, ki sprejema signale od satelitov, med zavoji nagnjena v več smereh ali včasih celo delno skrita za deli telesa. To zmanjša vidljivost satelitov in poveča GDOP, s čimer negativno vpliva na natančnost merjenja položaja. Poleg tega na meritve vpliva tudi nenehno spreminjanje konstellacije satelitov (Parkinson in Spilker, 1996).

Študija je pokazala, da meritev RTK GNSS zagotavlja natančne izračune o času in se lahko uporablja tako v znanstvene namene kot za trening v športih z visokimi tehničnimi zahtevami, ki jim koristijo podrobne informacije. Sistem RTK GNSS v primerjavi s fotocelicami omogoča veliko število vmesnih časov (npr. čas pri vsakih vratcih v slalomu), ki jih je mogoče brez dodatnih stroškov dodati ali prestaviti po opravljenih meritvah. Tega s fotocelicami ni mogoče storiti. Tako je lahko metoda RTK GNSS alternativa običajno uporabljenim fotocelicam. Poleg tega se je sistem izkazal kot uporaben v zahtevnem alpskem smučanju, kjer lahko zavoji trajajo tudi manj kot sekundo (Slika 2), gibanje smučarja pa je med smučanjem izrazito zavito levo-desno, kar se je izkazalo kot problematično pri manj zapletenih človeških gibanjih, kot sta hoja in kolesarjenje, z uporabo nizkocenovnega GNSS z 20-krat nižjo stopnjo vzorčenja položaja (Duncan, Badland in Mummery, 2009; Townshend et al., 2008).

Tudi ta študija ima določene omejitve. Uporaba sistemov GNSS je odvisna od vidljivosti satelitov, kar lahko pomeni, da v »zahtevnejših« pogojih merjenja v smislu slabše vidljivosti satelitov rezultati ne bi bili tako primerljivi. Meritve so bile opravljene v slalomu, česar ne moremo posplošiti na druge discipline, npr. smuk, kjer smučarji zavzemajo drugačne smučarske položaje, kar bi lahko vplivalo na sprejem signalov iz satelitov.

Zaključimo lahko, da metoda izračunavanja časa iz visokokakovostne GNSS RTK raziskane trajektorije zagotavlja natančne rezultate za meritve pri športih na prostem. GNSS RTK omogoča tudi merjenje velikega števila časov, kar je zelo pomembno za podrobnejšo analizo zmogljivosti zahtevnih človeških gibanj. Kadar je zaželeno pome-riti veliko količino vmesnih časov in je zaželeno visoka natančnost, so meritve časa z

uporabo RTK GNSS priporočljiva alternativa običajno uporabljenim fotocelicam. Čeprav je GNSS RTK še vedno cenovno drag merilni pripomoček, hkrati pa ima razmeroma visoko maso za uporabo v tekmovalnih pogojih, je za zdaj edini globalni satelitski navigacijski sistem, ki zagotavlja dovolj visoko natančnost merjenja ob visoki frekvenci vzorčenja položaja za ustrezen izračun časa v zahtevnih pogojih vrhunskih športnikov.

Zahvala

Zahvaljujemo se trenerjem in tekmovalcem, ki so sodelovali v meritvi.

Študija je bila sofinancirana s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS: P5-0147).

Literatura

1. Ansari, A. R. in Bradley, R. A. (1960). Rank sum tests for dispersions. *The Annals of Mathematical Statistics* 31(4), 1174–1184.
2. 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. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1002/jst.6>
3. Duncan, M. J., Badland, H. M. in Mummery, W. K. (2009). Applying GPS to enhance understanding of transport-related physical activity. *Journal of Science and Medicine in Sport*, doi:10.1016/j.jsams.2008.10.010. doi:S1440-2440(08)00210-7 [pii]
4. 10.1016/j.jsams.2008.10.010
5. Federolf, P., Scheiber, P., Rauscher, E., Schwameder, H., Luthi, A., Rhyner, H. U. in Müller, E. (2008). Impact of skier actions on the gliding times in alpine skiing. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 18(6), 790–797. doi:SMS745 [pii]
6. 10.1111/j.1600-0838.2007.00745.x
7. Foster, C., Snyder, A. C., Thompson, N. N., Green, M. A., Foley, M. in Schrager, M. (1993). Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(3), 383–388. Pridobljeno s http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=8455455
8. Gilgien, M., Reid, R., Raschner, C., Supej, M. in Holmberg, H. C. (2018). The Training of Olympic Alpine Ski Racers. *Front Physiol*, 9. doi:ARTN 1772 10.3389/fphys.2018.01772
9. Gilgien, M., Spörri, J., Chardonens, 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. Larsson, P. in Henriksson-Larsén, K. (2001). The use of dGPS and simultaneous metabolic measurements during orienteering. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(11), 1919–1924. Pridobljeno s http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=11689744
14. Larsson, P. in Henriksson-Larsén, K. (2005). Combined metabolic gas analyser and dGPS analysis of performance in cross-country skiing. *Journal of Sports Sciences*, 23(8), 861–870. Pridobljeno s http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=16195038
15. Nevill, A. M. in Whyte, G. (2005). Are there limits to running world records? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(10), 1785–1788. doi:00005768-200510000-00020 [pii]
16. Nevill, A. M., Whyte, G. P., Holder, R. L. in Peyrebrune, M. (2007). Are there limits to swimming world records? *International Journal of Sports Medicine*, 28(12), 1012–1017. doi:10.1055/s-2007-965088
17. 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.
18. Robertson, E., Pyne, D., Hopkins, W. in Anson, J. (2009). Analysis of lap times in international swimming competitions. *Journal of Sports Sciences*, 27(4), 387–395. doi:908683279 [pii]
19. 10.1080/02640410802641400
20. Smirniotou, A., Katsikas, C., Paradisis, G., Argeitaki, P., Zachariogiannis, E. in Tziortzis, S. (2008). Strength-power parameters as predictors of sprinting performance. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 48(4), 447–454. Pridobljeno s http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=18997647
21. Supej, M. (2008). Differential specific mechanical energy as a quality parameter in racing alpine skiing. *Journal of Applied Biomechanics*, 24(2), 121–129. Pridobljeno s http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=18579904
22. 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
23. Supej, M. in Cernigoj, M. (2006). Relations between different technical and tactical approaches and overall time at men's world cup giant slalom races. *Kinesiology Slovenica*, 12(1), 63–69.
24. 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
25. 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. Pridobljeno s <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01159.x>
26. Supej, M., Kugovnik, O. in Nemec, B. (2008). DGPS measurement system in alpine skiing track and center of mass estimation. In Y. Ji-ang, 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.
27. Supej, M., Nedergaard, N. J., Nord, J. in Holmberg, H. C. (2019). The impact of start strategy on start performance in alpine skiing exists on flat, but not on steep inclines. *J Sports Sci*, 37(6), 647–655. doi:10.1080/02640414.2018.1522698
28. 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
29. Terrier, P. in Schutz, Y. (2003). Variability of gait patterns during unconstrained walking assessed by satellite positioning (GPS). *European Journal of Applied Physiology*, 90(5–6), 554–561. doi:10.1007/s00421-003-0906-3
30. Townshend, A. D., Worringham, C. J. in Stewart, I. B. (2008). Assessment of speed and position during human locomotion using nondifferential GPS. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(1), 124–132. doi:10.1249/mss.0b013e3181590bc2

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