

UGOTAVLJANJE SPREMEMB POVRŠJA TRIGLAVSKEGA LEDENIKA S FOTOGRAMetriJO

Mihaela Triglav*

Izveček

V članku je predstavljeno fotogrametrično delo na triglavskem ledeniku. Poudarek je na rekonstrukciji površja triglavskega ledenika z obdelavo starih panoramskih posnetkov kamere Horizont. S panoramsko kamero Horizont snemajo ledenik z dveh fiksnih stojišč enkrat mesečno že od leta 1976. Podrobno je opisana kalibracija kamere Horizont na Tehnični univerzi na Dunaju in skupna zunanja orientacija posnetkov Horizont in metričnih posnetkov Rolleimetric. Predstavljen je tudi predlog nadaljnje obdelave posnetkov, da bomo z njihovo pomočjo lahko pridobili zelene 3D-podatke.

Assessment of surface changes of the Triglav glacier with photogrammetry

53

Abstract

Photogrammetric work on Triglav glacier is presented. The emphasis is on the reconstruction of the surface of the glacier by processing the old panoramic Horizont pictures. With the panoramic camera Horizont the Triglav glacier is pictured from two standpoints every month since 1976. In detail is described the calibration of the Horizont camera made at the University of Technology in Vienna and the outer joint orientation of Horizont and metric Rolleimetric pictures. The way how to acquire requested 3D output is presented.

1. UVOD

Ko vam nekdo omeni ledenik, verjetno najprej pomislite na ogromne medledenodobne poledenitve in ledenike na polih. Vendar med ta skladišča ledu spadajo tudi veliko manjši ledeniki, ki jih najdemo največ v Alpah in drugih visokogorjih po svetu. So ostanki večjih poledenitev v zadnji ledeni dobi ali majhnih ledenikov, ki so nastali v malih ledenih dobah v krnicah ali okrešljjih. Ti zadnji ledeniki so imeli največji obseg v letih 1350, 1600 in 1850 (Gabrovec, 1996).

*Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana

Slovenci se lahko pohvalimo z dvema takšnima ledenikoma: triglavskim ledenikom in ledenikom pod Skuto.

V tem članku se bomo omejili na spremljanje triglavskega ledenika. Triglavski ledenik se obnaša enako kot ostali ledeniki v Alpah. Tako je za alpske ledenike značilno, da so se po koncu male ledene dobe (leta 1850), zlasti med leti 1860 in 1920, vztrajno krčili. V naslednjem desetletju so ledeniki rahlo rasli, po letu 1928 pa so se začeli enakomerno tanjšati vse do leta 1965. Nazadnje se je tanjšanje alpskih ledenikov upočasnilo v obdobju med 1965 in 1985 (Kuhn et al., 1997, Šifrer, 1986).

V tujini spremljajo ledenike z različnimi geodetskimi metodami in metodami daljinskega zaznavanja. Večje grenlandske, antarktične in norveške ledenike spremljajo s satelitskimi snemanji. Tako so že leta 1972 prvič začeli meriti robne linije islandskega ledenika Mýrdalsjökull na satelitskih scenah Landsata 1. Multispektralni senzor Landsat 1 ima prostorsko resolucijo slikovnega elementa 79 m (Williams idr., 1997). Kasneje so se ledenikov lotili tudi s sateliti z večjo resolucijo. V 90. letih 20. stoletja so začeli ledenike snemati z umetno odprtinskimi radarjem na satelitih ERS-1 in ERS-2 (npr. Austfonna Nordaustlandet na Norveškem velikosti 11 150 km²). Te satelitske interferometrične scene so velikosti 100 x 100 km (Unwin in Wingham, 1997). Za manjše in srednjevelike ledenike pa zadostuje laserski skener na letalu. Z letalskim laserskim višinomermstvom ter aerofotogrametrijo so posneli švicarske in avstrijske ledenike. Ob primerjavi rezultatov obeh metod so ugotovili, da sta oba sistema primerljiva po natančnosti (Favey et al., 2000). Zaradi nižje cene končnih izdelkov pa v Avstriji za inventarizacijo ledenikov uporabljajo predvsem fotogrametrijo.

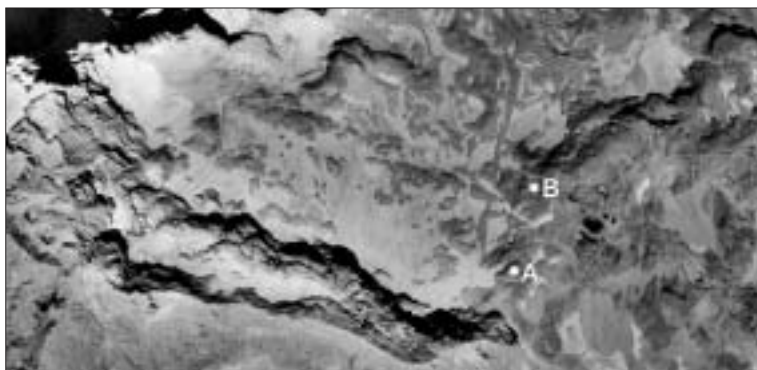
Na primeru triglavskega ledenika bomo predstavili fotogrametrične metode izmere.

2. PREGLED DOSEDANJIH MERITEV TRIGLAVSKEGA LEDENIKA

Prve geodetske meritve so na triglavskem ledeniku začeli izvajati na Geografskem inštitutu Antona Melika ZRC SAZU v letu 1946 (Šifrer, 1986). Na rob ledenika so postavili mrežo merilnih točk, od katerih so v naslednjih letih merili horizontalni in vertikalni umik ledenika. Vsako leto so tudi načrtali nove točke robu ledenika, od katerih so v prihodnjih letih prav tako merili umik ledenika (Gabrovec, 1996). Na osnovi teh merenj so dobili podatke o umikanju ledenika v dveh dimenzijah.

V letu 1976 so stabilizirali dve stojšči za panoramsko kamero Horizont, s katerih so ledenik od takrat naprej snemali skoraj vsak mesec (Slika 1). Lega

stojišč je določena z železnima cevema višine približno 1 m in premera približno 1 cm, na vrhu imata podstavek na katerega lahko naslonimo fotoaparata (Slika 2). Ti dve sta bili izpostavljeni meteorološkimi in drugim vplivom, zato lahko rečemo, da sta stojišči fiksni v radiju 1 m. Žal pa sta pogleda na ledenik s teh stojišč konvergentna, kar nam onemogoča neposredno stereogledanje parov posnetkov.



Slika 1: Stojišči A in B kamere Horizont na izrezu CAS 1998



Slika 2: Stojišče A kamere Horizont

Prvič je bil triglavski ledenik deležen pravega terestričnega in aerohelipterskega fotogrametričnega snemanja v letu 1999, ko je bila izvedena obsežna geodetska in fotogrametrična izmera ledenika. V njej so sodelovali strokovnjaki Geografskega inštituta Antona Melika, Geodetskega inštituta Slovenije, ekipe za georadarske meritve, slovenska vojska in drugi zunanji sodelavci. Na terenu smo določili poligonske in oslonilne točke ter

izvedli terestrična in helikopterska fotogrametrična snemanja s kamero Rolleimetric 6006. Te posnetke smo uporabili za meritve trenutnega oboda in površine ledenika.

V oktobru leta 2001 smo izvedli drugo fotogrametrično snemanje ledenika s helikopterjem, pri tem smo stabilizirali in z metodo GPS izmerili stalne oslonilne točke. Sodelovali so: Geografski inštitut Antona Melika, Geodetski inštitut Slovenije, 2B, d. o. o., ter slovenska vojska.

Ker pa nas ni zanimalo samo trenutno stanje ledenika, ampak tudi njegovo obnašanje v preteklosti, smo se lotili obdelave sistematičnih snemanj ledenika s kamero Horizont. Del naloge je bil obdelan v moji diplomski nalogi (Triglav 2001).

3. KAMERA HORIZONT

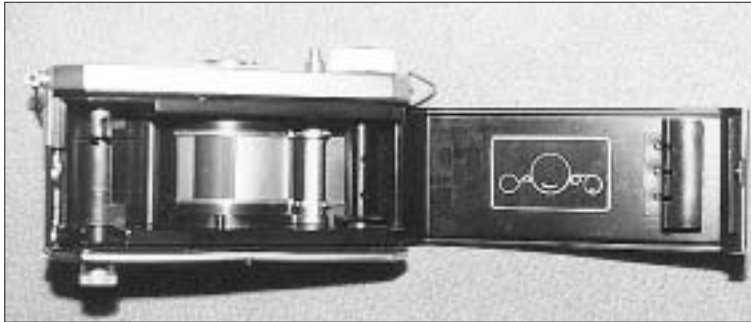
Med različnimi tipi starih posnetkov triglavskega ledenika, narejenimi z različnimi fotoaparati in z različnih stojišč, je bil najstarejši v lasti Geografskega inštituta in posnet z Begunjskega vrha konec septembra 1963.

Posamezni posnetki nam lahko dajo samo dvodimenzionalno sliko območja, ki ga pokriva ledenik v trenutku snemanja, ne moremo pa iz njih dobiti tridimenzionalnih podatkov. Z obdelavo posnetkov Horizont pa bomo lahko prišli do teh podatkov.

Za obdelavo posnetkov Horizont potrebujemo tudi metrična snemanja; zato smo uporabili še fotogrametrično izmero iz leta 1999 in dva izmed metričnih stereoposnetkov cikličnih aerosnemanj, ki pokrivajo to območje (CAS 92, CAS 94, posebno snemanje Posočje 98, CAS 98; dokaj neuporaben je CAS 75, ker je območje zasneženo). Uporabili smo leti 1994 in 1998.

3.1 Kalibracija

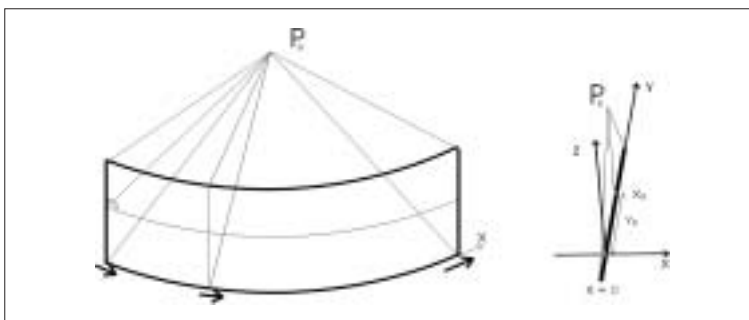
Kamera Horizont ni metrična, zato njene notranje orientacije ne poznamo. Določili smo jo v postopku kalibracije, ki smo ga izvedli na dunajski tehnični univerzi pod vodstvom prof. Helmuta Kagerja z Inštituta za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje. Kamera Horizont je panoramski fotoaparat s snemalnim kotom 180° in s teoretično goriščno razdaljo objektiva 28 mm. Takšen snemalni kot je dosežen s kombinacijo vrtečega se širokokotnega objektiva, ki se nahaja pred filmom, napetim na cilindrični nosilec (Slika 3). Reža, ki film osvetljuje, se v času ekspozicije zapelje čez celoten film in ga osvetli. Osvetljenost filma lahko spreminjamo s spreminjanjem širine reže.



Slika 3: Notranjost kamere Horizont z režo

Ker tu ne gre za tipičen perspektivni fotoaparatus, definiran z enačbami centralne projekcije, na katerih temeljijo vse fotogrametrične enačbe, je bilo za njegovo kalibracijo treba razviti poseben geometrični model preslikave. Prof. Helmut Kager je razvil nov model fotoaparata in ga implementiral v program ORIENT (zmogljiv fotogrametrični program, ki ga je začel prof. Kager razvijati že v 70. letih in ga še vedno nadgrajujejo, reši praktično vse znane probleme analitične fotogrametrije). Ta model je kombinacija perspektivnega modela in modela laserskega skenerja.

Na sliki 4 vidmo, da je slikovni koordinatni sistem kamere Horizont odvisen od časa. Za njegovo upodobitev smo uporabili matematični koordinatni sistem. Za vsako navpično linijo postavimo svoj lokalni koordinatni sistem, v katerem je vertikalna distorzija predstavljena na y-osi, v smeri osi x pa ima ta sistem dimenzijo 0 (tu tudi ni distorzije). Glavna točka, ki predstavlja projekcijo projekcijskega centra na filmu v lokalnem koordinatnem sistemu, je lahko rahlo premaknjena iz vertikalne linije. Koordinati glavne točke sta X_0 in Y_0 .



Slika 4: Slikovni koordinatni sistem kamere Horizont

Med različnimi metodami kalibracije (Kraus, 1997) smo v našem primeru uporabili metodo kalibracije v testnem polju z uporabo točk in znanih geometričnih rezmerij (nem. Gestalts). Te so bile v našem primeru vodoravne in navpične linije v testnem polju atrija dunajske tehnične univerze (Slika 5). Testno polje se razprostira na dveh fasadah atrija in je še posebej primerno za kalibracijo širokokotnih objektivov.

Slika 5: Testno polje.
Kalibracijske točke so razvrščene po vrsticah in stolpcih.



Točke testnega polja so signalizirane z retrorefleksivnimi točkami premera 5 mm, ki imajo z geodetskimi meritvami natančno izmerjene koordinate v lokalnem koordinatnem sistemu. Retrorefleksivne točke so vidne na posnetku le v primeru, ko so v trenutku ekspozicije osvetljene z močno svetlobo, ki prihaja iz točke snemanja.

Ker poznamo koordinate točk testnega polja, nam ni treba med snemanjem meriti koordinat stojišča, zato se takšno snemanje hitro izvede. S fotoaparatom, nameščenim na stativu, smo naredili serije posnetkov v portretnem in krajinskem položaju. Da bi dobili čim boljši rezultat, smo uporabili tudi različno dolge ekspozicije. Na analitičnem inštrumentu Sun Solaris BC3 smo izmerili slikovne koordinate 300 točkam na štirih posnetkih.

V postopku kalibracije sta bila definirana vertikalna distorzija in neperspektivni model posnetka tako, da je bil posnetek razdeljen na pravilno mrežo z velikostjo celice 1 mm². Vsak posnetek je bil razdeljen na 100 stolpcev in 52 vrstic. Za vsako točko preseka je bila izračunana vrednost brez distorzije. Tomaž Gvozdanovič, DFG Consulting, d. o. o., je napisal računalniški program za razpačenje rastrske slike, ki deluje po opisanem modelu. Za vseh 5200 točk presečišč program najprej izračuna nespačene vrednosti, ostale pa interpolira.

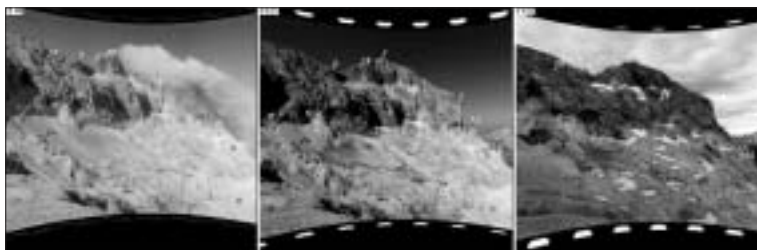
3.2 Stalnost notranje orientacije

Kljub temu da smo s kalibracijo dobili podatke o notranji orientaciji kamere Horizont, ne vemo kako stalna je le-ta. Ob izbiri vzorčnih posnetkov, na katerih smo razvijali metodo obdelave teh posnetkov, smo natančno pregledali vse razpoložljive posnetke. Na nekaj posnetkih iz celega vzorca smo odkrili prečne pasove, ki so bili različno osvetljeni (teh posnetkov nismo

uporabili). To kaže na morebitno nestalnost delovanja fotoaparata, zaradi česar bi bilo priporočljivo kamero v prihodnosti ponovno kalibrirati in primerjati rezultate z rezultati naše kalibracije.

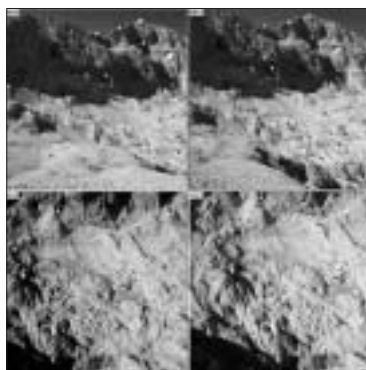
4. ORIENTACIJA POSNETKOV HORIZONT

Notranjo orientacijo posnetkov Horizont smo določili v postopku kalibracije kamere. Zunanjo orientacijo posnetkov pa smo izvedli s pomočjo navezave na metrične posnetke Rolleimetric iz leta 1999, kjer imamo izmerjene terenske oslonilne točke. Posnetke smo med sabo povezali s pomočjo veznih točk, ki pa jih je bilo velikokrat zelo težko identificirati (Slika 6). Dobro določitev veznih točk nam otežujejo: različna osvetljenost posnetkov, različne vrste posnetkov (barvni, črno-beli), različni vremenski pogoji na ledeniku (npr. megla, ki prekriva del posnetka), različne sence (zaradi različnih dnevnih in letnih časov snemanja).



Slika 6: Identifikacija veznih točk na posnetkih, narejenih s stojišča B

Programski paket Bingo, ki je namenjen skupni orientaciji fotogrametričnih in geodetskih merenj in izdelan na Gesellschaft für Industriephotoграмmetrie v Aalenu v Nemčiji (Kruck, 1999), smo izvedli skupno orientacijo 7 terenskih in 2 helikopterskih posnetkov Rolleimetric ter 22 posnetkov Horizont, narejenih na stojišču A, in 22 posnetkov Horizont s stojišča B. Najprej smo izvedli samo orientacijo natančnejših metričnih posnetkov Rolleimetric, potem pa skupno orientacijo obeh vrst posnetkov. V tabelah srednjih pogreškov projekcijskih centrov ter srednjih pogreškov na oslonilnih in veznih točkah lahko vidimo razliko med obema izravnava.



Slika 7: Oslonilne točke so temnejši kvadrati, vezne pa beli kvadrati na terestričnih (zgoraj) in helikopterskih (spodaj) posnetkih Rolleimetric iz leta 1999.

Preglednica 1: Srednji pogrešek projekcijskih centrov samo posnetkov Rolleimetric v lokalnih koordinatah in zasukih. Koordinate so podane v metrih, koti v gradih.

	X	Y	Z	Fi	Omega	Kapa
Srednji pogrešek	0.181	0.165	0.206	0.0347	0.0328	0.0290
Največji pogrešek	0.259	0.242	0.333	0.0544	0.0499	0.0429

Preglednica 2: Srednji pogreški samo posnetkov Rolleimetric na oslonilnih in veznih točkah

Srednji pogrešek	X [m]	Y [m]	Z [m]
Oslonilne točke	0.076	0.097	0.075
Vezne točke	0.905	2.463	0.684
Najv. pog. na veznih točkah	4.524	12.215	2.907

Preglednica 3: Srednji pogrešek vseh projekcijskih centrov v lokalnih koordinatah in zasukih. Koordinate so podane v metrih, koti pa v gradih.

	X	Y	Z	Fi	Omega	Kapa
Srednji pogrešek	0.263	0.453	0.281	0.0490	0.0395	0.0502
Največji pogrešek	0.476	1.638	0.532	0.1043	0.0690	0.0987

60

Preglednica 4: Srednji pogreški skupne izravnave vseh posnetkov na oslonilnih in veznih točkah.

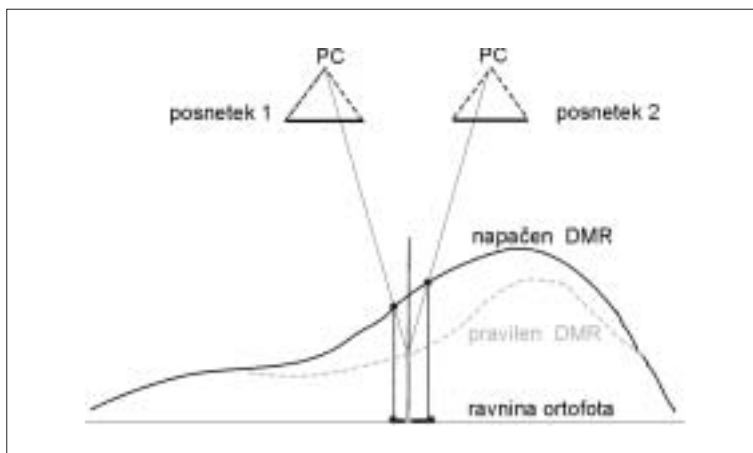
Srednji pogrešek	X [m]	Y [m]	Z [m]
Oslonilne točke	0.475	1.059	0.371
Vezne točke	0.471	1.047	0.368
Najv. pog. na veznih točkah	1.597	4.358	1.535

Če primerjamo skupno izravnavo vseh posnetkov z orientacijo samo posnetkov Rolleimetric, vidimo, da se je natančnost na oslonilnih točkah zmanjšala, in sicer zato, ker smo zdaj med oslonilne točke šteli tudi vezne točke, ki so bile izravnane v orientaciji samih metričnih posnetkov. To smo naredili, ker predvidevamo, da so točke, izmerjene na posnetkih Rolleimetric, bolj natančno določene kot tiste, izmerjene samo na posnetkih Horizont.

V obeh primerih izravnav vidimo, da so točke najslabše definirane v smeri Y lokalnega koordinatnega sistema, ki ustreza klasični smeri aerosnemanja Z, kjer so natančnosti ponavadi slabše. Srednji pogrešek v ostalih dveh smereh lokalnega koordinatnega sistema ne presega 0,5 m, kar je za nemetrične posnetke Horizont dober rezultat.

5. DIGITALNI MODEL VIŠIN IN PREDLOG NADALJNJE OBDELAVE

Ker pari posnetkov Horizont ne tvorijo stereomodelov za stereomeritve, bomo do višinskih podatkov prišli na naslednji način. Iz posnetkov cikličnega aerosnemanja iz let 1992 in 1998 smo tvorili področja DMR-ja. DMR iz leta 1998 bomo vzeli kot referenco za prevzorčenje posnetkov Horizont na DMR. Ker bomo vzeli samo en DMR, ta ne prikazuje realnega stanja na ledeniku v času snemanja s kamero Horizont, tako bomo s prevzorčenjem izdelali psevdoortofotografije območja. Z odpravo vertikalnih paralaks na psevdoortofotih bomo dobili prave ortofote.



Slika 8: Geometrični model izračuna razlik višin med napačnim in pravim DMR-jem na območju ledenika

6. ZAKLJUČEK

V članku je prikazana pot, kako lahko iz posnetkov, ki niso narejeni v centralni projekciji, za katero veljajo vse enačbe fotogrametrije, pridobimo metrične podatke. Najprej smo s pomočjo kalibracije kamere Horizont prevedli njene posnetke v centralno projekcijo, potem pa smo s pomočjo metričnih posnetkov Rolleimetric skupaj izvedli zunanjo orientacijo teh posnetkov. Izvedena je tudi analiza natančnosti zunanje orientacije vseh posnetkov.

7. ZAHVALA

Za pomoč pri diplomskem delu, ki je bilo predstavljeno v tem članku, se zahvaljujem Tomažu Gvozdanoviču (DFG Consulting, d. o. o.) za izdelavo programov, s katerimi smo se lahko te nestandardne fotogrametrične naloge lotili, Mojci Kosmatin Fras (Geodetski inštitut Slovenije) za koristne nasvete, prof. Karlu Krausu in prof. Helmutu Kagerju z Inštituta za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje za ideje in pomoč pri kalibraciji, Geodetskemu inštitutu

Slovenije, DFG Consultingu, Geografskemu inštitutu Antona Melika ZRC SAZU ter Avstrijskemu inštitutu za vzhodno in jugovzhodno Evropo za finančno podporo projekta.

Literatura

- Gabrovec, M.**, Triglavski ledenik - kako dolgo še? *Proteus*, 4/59, 1996, str. 167-171
- Šifrer, M.**, Triglavski ledenik v letih 1974-1985. *Geografski zbornik*, 1986, letnik 26, št. 3, Ljubljana
- Kuhn, M., Schlosser, E., Span, N.**, Eastern Alpine glacier activity and climatic records since 1860. *Annals of Glaciology*, 24, 1997, str. 164-168
- Kraus, K.**, *Photogrammetry, volume 2: Advanced Methods and Applications*, Ferd. Dummler's Verlag, Bonn, Poglavlje E: Calibration of photogrammetric systems, 1997, str.440-457
- Kruck, E.**, *Bingo-F 4.0, Bundle Triangulation for Aerial Photographs and Terrestrial Engineering Applications. Product Information*, GIP Aalen 1996-1999
- Williams, R.S., Hall, D.K., Sigurdsson, O., Chien, J.Y.L.**, Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973-92, *Annals of Glaciology* 24, 1997, str. 72-80
- Unwin, B., Wingham, D.**, Topography and dynamics of Austfonna, Nordaustlandet, Svalbard, from SAR interferometry, *Annals of Glaciology* 24, 1997, str. 403-408
- Favey, E., Pateraki, M., Baltsavias, E.P., Bauder, A., Bösch, H.**, Surface Modelling for Alpine Glacier Monitoring by Airborne Laser Scanning and Digital Photogrammetry, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.XXXIII, part B4, Amsterdam, 2000, str. 269-277*
- Triglav, M.**, Določitev sprememb površja Triglavskega ledenika s fotogrametrijo, *diplomska naloga (št. 540), Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, oddelek za geodezijo, Ljubljana, 2001*

Prispelo v objavo: 2001-10-30

Recenzija: Sandi Berk, Stane Cerar