

OKREŚLANIE GRUBOŚCI POKRYWY ŚNIEŻNEJ NA PODSTAWIE FOTOGRAMETRYCZNYCH ZDJĘĆ NAZIEMNYCH

DETERMINATION OF SNOW DEPTH USING TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRIC IMAGES

Jakub Kolecki ¹, Natalia Kolecka ²

¹ Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska, Wydział Geodezji
Górnictwej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

² Zakład Systemów Informacji Geograficznej, Kartografii i Teledetekcji, Instytut Geografii
i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński

SŁOWA KLUCZOWE: zdjęcia naziemne, chmura punktów, pokrywa śnieżna, modele powierzchni terenu, modelowanie 3D

STRESZCZENIE: Określanie grubości pokrywy śnieżnej w terenie górskim ma duże znaczenie dla modelowania zagrożenia lawinowego, a także w analizach przyrodniczych, m.in. hydrologicznych. W niniejszym artykule przedstawiono prace mające na celu ocenę możliwości automatycznego generowania chmur punktów na podstawie naziemnych zdjęć fotogrametrycznych stoków górskich pokrytych śniegiem, w celu określenia przestrzennego rozkładu grubości pokrywy śnieżnej. Obszar badań znajduje się w Dolinie Pięciu Stawów Polskich w Tatrach Wysokich, na stokach pomiędzy Gładką Przełęczą a Walentkowym Wierchem. Zdjęcia wykonano w sezonie zimowym, przy zalegającej pokrywie śnieżnej, a następnie powtórzono w sezonie letnim. W tym celu wykorzystano lustrzankę cyfrową Nikon D5100 z obiektywem stałogniskowym 85 mm, wyposażoną w matrycę 16 Mpix. Na podstawie zdjęć w programie PhotoModeler Scanner wygenerowane zostały automatycznie chmury punktów reprezentujące odpowiednio powierzchnię śniegu i powierzchnię terenu. Chmury poddano triangulacji, przy czym chmura pochodząca ze zdjęć wykonanych w porze letniej posłużyła do budowy referencyjnej powierzchni terenu, i do niej odniesiono wysokości powierzchni utworzonej z chmury punktów wygenerowanej ze zdjęć wykonanych zimą. Różnice wysokości pomiędzy nimi stanowiły miarę grubości pokrywy śnieżnej. Na badanym obszarze maksymalna grubość pokrywy śnieżnej wynosiła 8.7 m, a średnia grubość była równa 2.9 m. Uzyskane wyniki pozwalają twierdzić, że naziemna fotogrametria cyfrowa może stanowić skuteczną metodę pozyskiwania informacji o grubości pokrywy śnieżnej dla niewielkich obszarów obejmujących górskie stoki i zbocza dolin.

1. WSTĘP

Przestrzenny rozkład grubości pokrywy śnieżnej na terenach wysokogórskich charakteryzuje bardzo duże zróżnicowanie przestrzenne, kształtowane przez wiele czynników morfologicznych i klimatycznych. Należą do nich między innymi: zmienna ekspozycja, nachylenie i krzywizna stoków, zróżnicowane oddziaływanie słońca i wiatru,

zacielenia, lawiny i osuwanie się śniegu (Evans *et al.*, 1989). Opady w postaci stałej (śnieg) na obszarach gór wysokich klimatu umiarkowanego stanowią znaczną część ogólnej ich ilości. Topienie się śniegu w okresie wiosennym w istotny sposób wpływa na poziom wody w górskich potokach, przy czym ilość spływających wód roztopowych zależy m.in. od grubości pokrywy śnieżnej. Precyzyjne określenie rozkładu przestrzennego grubości śniegu ma istotne znaczenie w procesie modelowania zjawisk hydrologicznych (Kimbauer *et al.*, 1991; Cline, 1993), podczas prognozowania zagrożenia lawinowego oraz w badaniach dynamiki lawin (Buhler *et al.*, 2009). W takich przypadkach niezbędne jest określanie grubości pokrywy śnieżnej na obszarach startowych oraz w rejonie toru lawiny przed i po jej zejściu (Vallet *et al.*, 2000, Vallet, 2001). Obecnie znaczną część takich prac wykonuje się w oparciu o skaniny laserowe lotnicze lub naziemne (Deems *et al.*, 2006, Prokop, 2008), jednak istotną alternatywą mogą być metody fotogrametryczne.

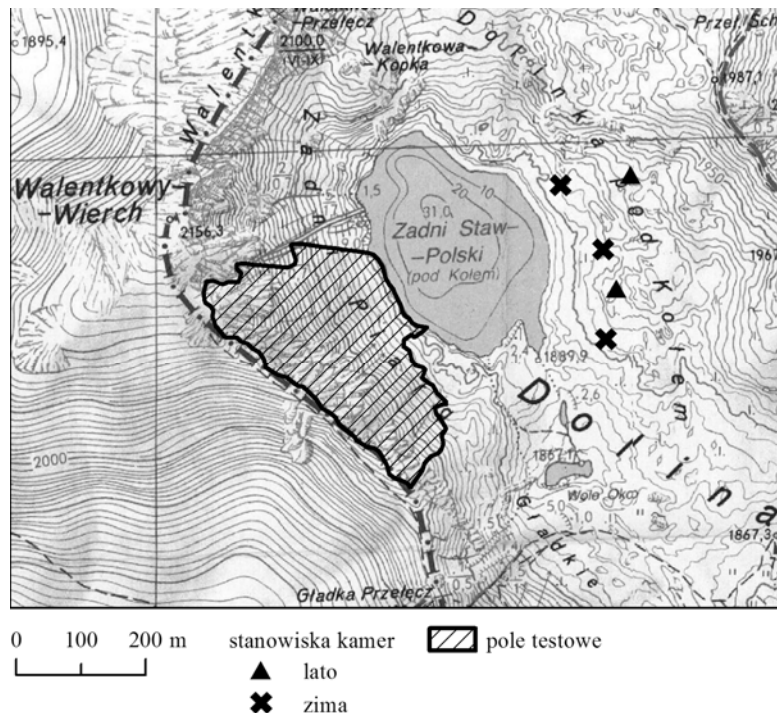
Fotogrametria jako metoda zdalna już od początku lat sześćdziesiątych rekomendowana była jako alternatywa dla pomiarów terenowych. Jako atut fotogrametrii wskazywano możliwość pomiaru dużej liczby punktów w krótkim czasie, bez konieczności wchodzenia w często trudny i niebezpieczny teren. Przykładowo Smith (Smith *et al.*, 1967) do określania grubości śniegu wykorzystywał pomiary realizowane na modelach zdjęć lotniczych w skalach 1:6 000 i 1:3 000. W drugim przypadku wykazane rozbieżności pomiędzy pomiarem terenowym a fotogrametrycznym mieściły się w granicach 50 cm przy czym dla większości próbek nie przekraczały 30 cm. Znane są również badania związane z wykorzystaniem zdjęć naziemnych. Blyth (Blyth *et al.*, 1973) wykonywał pomiary w oparciu o zdjęcia z metrycznej kamery UMK, otrzymując zgodność z pomiarami terenowymi na poziomie 1 cm, przy czym porównywane wartości dotyczyły średniej grubości pokrywy śnieżnej na fotografowanym obszarze testowym. Obecnie fotogrametryczne pomiary grubości pokrywy śnieżnej prowadzone są głównie dla potrzeb modelowania lawin. Wymagana dokładność uzyskanego wyniku określana jest na 10% grubości pokrywy śnieżnej (Vallet, 2001). W praktyce oznacza to, że dokładność pomiaru fotogrametrycznego powinna mieścić się w granicach 10 cm, zwłaszcza dla współrzędnej wysokościowej. Rozwój technologii GNSS i INS sprawił, że możliwe stało się określanie grubości pokrywy śnieżnej z wykorzystaniem fotogrametrycznych systemów mobilnego kartowania (Vallet *et al.*, 2000, Vallet, 2001). Ponadto algorytmy gęstego dopasowania zdjęć pozwalają na pomiar bardzo dużej liczby gęsto rozmieszczonych punktów, co również może podnieść dokładność uzyskiwanych wyników. Niewątpliwym ograniczeniem metody fotogrametrycznej wymienianym przez Smitha (Smith *et al.*, 1967) i Clinea (Cline, 1993) jest bardzo słaba tekstura powierzchni śniegu, utrudniająca zarówno manualny jak i automatyczny pomiar punktów.

Fotogrametryczne określanie grubości pokrywy śnieżnej wymaga wyznaczenia wysokości punktów reprezentujących powierzchnię śniegu ponad powierzchnią modelu terenu. Dlatego stosowany model referencyjny powinna cechować odpowiednio wysoka dokładność, która najczęściej nie może być zagwarantowana przez modele terenu produkowane na podstawie danych lotniczych w ramach opracowań wielkoobszarowych. Wynika to głównie z ich zbyt niskiej rozdzielczości oraz błędów zwiększających się w miarę wzrostu nachylenia zboczy, które w górach często przekracza 30°. Wyniki opracowania mogą być dodatkowo zaburzone przez błędy systematyczne takiego modelu. Dlatego dla określania grubości pokrywy śnieżnej na obszarach wysokogórskich,

w szczególności dla stromych i urwistych stoków, korzystniejsze okazać się może wykonanie pomiarów na podstawie zdjęć naziemnych (Buchroithner, 2002; Kolečka, 2011). Dotyczy to zarówno budowy modelu referencyjnego (modelu terenu), jak i pomiaru punktów na powierzchni śniegu. Ponadto sieć zdjęć zimowych, na których rejestrowana jest powierzchnia śniegu, może zostać wyrównana wspólnie z siecią zdjęć letnich, wykonanych w celu wygenerowania modelu terenu. Takie postępowanie może pozwolić na redukcję wpływu błędów systematycznych, różnych dla niezależnego opracowania zimowego i letniego.

Celem niniejszego opracowania jest ocena możliwości automatycznego generowania chmury punktów ze zdjęć naziemnych w celu określania grubości pokrywy śnieżnej. W prezentowanym podejściu zaproponowano wspólne wyrównanie sieci złożonej ze zdjęć wykonanych latem i zimą.

2. OBSZAR TESTOWY



Rys. 1. Zasięg pola testowego na podkładzie mapy topograficznej (skala 1:10 000, Zarząd Topograficzny Sztabu Generalnego WP, Warszawa 1992)

Obszar testowy, na którym prowadzone były prace terenowe, zlokalizowano w Tatrach Polskich. Obejmował on południowo-zachodnie zbocza Dolinki pod Kołem, stanowiącej górne piętro Doliny Pięciu Stawów Polskich, od Gładkiej Przełęczy po Walentkowy Wierch, od wysokości ok. 1920 m n.p.m. do 2120 m n.p.m. (rys. 1). Nachylenia terenu w obrębie pola testowego przekraczają nawet 80°. Na większej części

poła testowego brak roślinności, na niektórych fragmentach występują tylko trawy i porosty.

Według obserwacji prowadzonych przez IMGW w okresie 1994-2002, pokrywa śnieżna utrzymywała się w Dolinie Pięciu Stawów Polskich przez ponad 200 dni w roku, a średnio przez 96 dni rocznie jej grubość przekraczała 100 cm (IMGW, 2012).

3. METODYKA BADAŃ

Określenie grubości pokrywy śnieżnej metodą fotogrametryczną wymagało zbudowania modelu powierzchni pokrytego śniegiem terenu i porównania go z modelem uzyskanym w okresie bezśnieżnym. W ramach prowadzonych badań powierzchnia referencyjna – bez pokrywy śnieżnej, została wygenerowana również z wykorzystaniem metody fotogrametrycznej. Poniżej opisano kolejne etapy prac, mających na celu wyznaczenie grubości pokrywy śnieżnej dla obszaru badań.

3.1. Wykonanie zdjęć

Czynnikami, na które bezwzględnie należy zwrócić uwagę podczas planowania i wykonywania zdjęć fotogrametrycznych są przesłonięcia, zmienne oświetlenie i słaba tekstura obiektu (Remondino, El-Hakim, 2006). Dotyczy to w szczególności obszarów górskich i wysokogórskich, gdzie duża zmienność rzeźby terenu oraz zacielenia powodować mogą problemy w automatyzacji pomiarów. Dodatkowo z wykonywaniem zdjęć w porze zimowej wiąże się problem tekstury śniegu, która musi być na tyle wyrazista, aby pomiar fotogrametryczny mógł zostać wykonany precyzyjnie. Dotyczy to zarówno pomiaru automatycznego, jak i manualnego opracowania stereoskopowego (Smith *et al.*, 1967). Z literatury i z doświadczeń autorów wynika, że najgorsze warunki do wykonania zdjęć fotogrametrycznych, występują w pochmurny dzień tuż po świeżym opadzie śniegu. Powoduje to, że śnieg odwzorowuje się na zdjęciach jako jednolita, niekontrastowa powierzchnia, charakteryzująca się brakiem tekstury.

Dla obszaru testowego wykonano dwie serie zdjęć – pierwszą 24 marca 2012 w warunkach zimowych, drugą 1 lipca 2012 w warunkach letnich po stopieniu się pokrywy śnieżnej. Zdjęcia wykonano skalibrowaną lustrzanką cyfrową Nikon D5100 z matrycą 16 Mpix, wyposażoną w obiektyw stałogniskowy 85 mm. Serię zimową, złożoną z 38 zdjęć, zarejestrowano z trzech stanowisk. W przypadku 25 zdjęć letnich ograniczono się do dwóch stanowisk. Zdjęcia wykonano tak aby zapewnić korzystny kąt przecięcia się promieni jednoimiennych dla mierzonych punktów powierzchni terenu (stosunek bazy do odległości około 1:3). Co więcej, zdjęcia zimowe wykonano w pogodny dzień po dłuższym okresie bez opadów, kiedy słońce oświetlające fotografowane zbocze wzmocniło teksturę śniegu mozaiką cieni i światła. Wielkość piksela terenowego dla wykonanych zdjęć z obu serii wynosiła 3÷4 cm, co dla powierzchni o wyraźnej teksturze powinno zapewnić dokładność wyznaczenia położenia punktu terenowego w kierunku prostopadłym do zbocza na poziomie 10 cm.

3.2. Wyrównanie sieci zdjęć

Zdjęcia wykonane w okresie zimowym i letnim (łącznie 63 zdjęcia) utworzyły jedną sieć, którą w pierwszej kolejności poddano swobodnemu wyrównaniu metodą niezależnych wiązek korzystając z programu Photomodeler Scanner 2012 (Photomodeler, 2012). Wymagało to pomiaru punktów wiążących dla zdjęć z dwóch serii. Punkty te lokalizowano na wystających spod śniegu skalistych fragmentach stoku. Rozmieszczenie wspólnych dla zdjęć letnich i zimowych punktów wiążących na niemal całym obszarze zagwarantowało odpowiednią niezawodność estymowanych parametrów orientacji kamer.

W celu nadania geo-referencji i skali zarejestrowanym obrazom, dokonano pomiaru fotopunktów naturalnych, których współrzędne odczytano z orotofotomapy (piksel 25 cm, układ 1992, rok wykonania zdjęć 2009) i numerycznego modelu terenu w formacie TIN. Średnie błędy kwadratowe (RMSE) dla fotopunktów wyniosły: $m_x = 25$, $m_y = 25$ i $m_z = 139$ cm. Średni błąd kwadratowy obserwowanych współrzędnych obrazowych wyniósł 0.28 piksela.

3.3. Generowanie chmur punktów

Generowanie chmur punktów wykonano za pomocą automatycznych algorytmów działających na zasadzie *matchingu* obrazów w programie Photomodeler Scanner 2012 (Photomodeler, 2012). Wybrano w tym celu pary zdjęć o najlepszej geometrii (kąt wcinający, stosunek bazowy), pozwalające na rejestrację jak największej powierzchni obiektu bez przesłonięć, przy czym gęstość próbkowania terenu zdefiniowano na 0.5 m. Wielkość okna do korelacji zdefiniowano na 7×7 pikseli. W rezultacie ze zdjęć wykonanych w sezonie letnim pozyskano 21 chmur punktów zawierających łącznie 475 101 punkty, a ze zdjęć wykonanych w sezonie zimowym – 19 chmur liczących 297 061 punktów. Każdy punkt posiadał atrybut koloru w składowych RGB. Zarówno w obrębie chmur wygenerowanych ze zdjęć pochodzących z sezonu letniego, jak i zimowego występowały braki punktów, spowodowane przesłonięciami, a w przypadku zbiorów zimowych także silnym zacienieniem, niedostatecznym kontrastem lub prześwieczeniem obrazu.

3.4. Filtracja chmur punktów

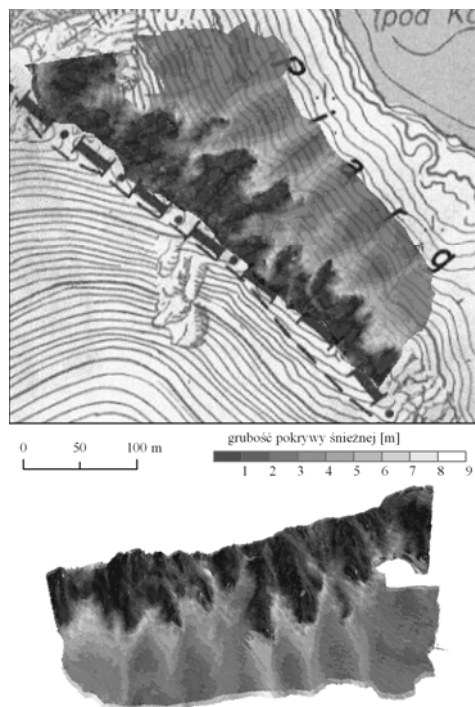
Chmury punktów przetwarzane były w oprogramowaniu do inżynierii odwrotnej VRMesh Studio (roczna licencja edukacyjna) (VRMesh, 2012) oraz GeoMagic Studio (30-dniowa wersja testowa) (GeoMagic, 2012), które pozwoliły na odtworzenie kształtu obiektu na podstawie danych pochodzących z pomiaru. W pierwszej kolejności w każdej z chmur punktów, wygenerowanych ze zdjęć pochodzących z sezonu letniego (21) i zimowego (19), manualnie usunięto punkty leżące poza obiektem. Następnie punkty wygenerowane ze zdjęć wykonanych latem połączono w jeden zbiór punktów, a punkty wygenerowane ze zdjęć wykonanych zimą w drugi. Na tych zbiorach prowadzone były dalsze etapy filtracji, które obejmowały automatyczne usunięcie błędów grubych, redukcję szumu, usunięcie nadmiarowych punktów i ujednoczenie gęstości chmury punktów. Zastosowano przy tym priorytet krzywizny, pozwalający na mniejszą redukcję liczby punktów w miejscach, gdzie powierzchnia terenu była bardziej urozmaicona, i na

zachowanie wyraźnych załamania i krawędzi. Drugim warunkiem był priorytet koloru, dzięki któremu punkty leżące blisko siebie różniące się atrybutami koloru były mniej wygładzane niż punkty o podobnej kolorystyce. Zapobiegło to usunięciu i wygładzeniu punktów na granicach skał i traw lub skał i śniegu. Po tych operacjach zbiór danych reprezentujący sezon letni składał się z ok. 318 tys. punktów, a zimowy z 257 tys. punktów.

3.5. Określenie grubości pokrywy śnieżnej

W celu określenia grubości pokrywy śnieżnej wykorzystano chmury punktów pozyskane ze zdjęć wykonanych w porze letniej i zimowej. Posłużyły one do wygenerowania powierzchni w postaci siatek trójkątów TIN, które następnie zostały skonwertowane do postaci rastrow o rozdzielczości 1 m. Otrzymano niewielką liczbę wartości ujemnych, wynikających najprawdopodobniej z błędów pomiaru punktów, które były zlokalizowane głównie na skalistych, urwistych fragmentach stoku. Były one wyłączone z dalszych analiz. Różnica rastrow odzwierciedlała grubość śniegu na obszarze testowym. Obliczenia wykonano w oprogramowaniu ArcGIS 10 (ESRI, 2012).

4. WYNIKI ANALIZY GRUBOŚCI POKRYWY ŚNIEŻNEJ



Rys. 2. Rozkład grubości pokrywy śnieżnej na podkładzie mapy topograficznej (ZTSG WP, 1992) i w rzucie perspektywicznym

Przeprowadzone analizy wykazały, że w obrębie pola testowego grubość pokrywy śnieżnej osiągała nawet 8.7 m, przy czym średnia grubość była równa 2.9 m (rys. 2).

Największą grubość pokrywy śnieżnej odnotowano w formacjach wklęsłych i u podnóży skalistych bardzo stromych fragmentów stoków, natomiast najmniejszą na skałach o dużym nachyleniu, a także na formacjach wypukłych. Część skalistych, urwistych stoków była zupełnie pozbawiona pokrywy śnieżnej.

Analiza dokładności opracowania dla wybranego pola testowego nie została wykonana ze względu na brak informacji kontrolnej. Z uwagi na ekstremalne trudności terenowe i potencjalne zagrożenie lawinowe wejście na pole testowe i manualne wykonanie pomiarów nie było możliwe.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone prace wykazały przydatność metody fotogrametrycznej w określaniu grubości pokrywy śnieżnej na obszarach wysokogórskich. Uzyskany rozkład grubości pokrywy śnieżnej wykazał, zgodnie z oczekiwaniami, że najwięcej śniegu gromadzi się w obrębie wklęsłych form powierzchni terenu. W takich miejscach grubość pokrywy śnieżnej przekraczała 6 m (maksymalnie 8.7 m).

Współczesne aparaty cyfrowe, w szczególności lustrzanki, zapewniają coraz wyższą rozdzielczość zdjęć pomiarowych. Automatyczne algorytmy pozwalają na generowanie gęstych chmur punktów przy niewielkim zaangażowaniu użytkownika. Wykonanie zdjęć w odpowiednich warunkach pogodowych i przy korzystnym oświetleniu, a także ich zapis w formacie RAW pozwala uwydatnić teksturę śniegu, zwiększając szansę na skuteczny i dokładny pomiar. Należy także zwrócić uwagę na rozmieszczenie stanowisk fotografowania, które powinny zapewnić rejestrację obszaru opracowania z jak najmniejszą powierzchnią martwych pól, z jednoczesnym zachowaniem korzystnego uwarunkowania geometrycznego sieci wiązek, co w terenie wysokogórskim o zróżnicowanej rzeźbie stanowi znaczącą trudność techniczną. Trudność może stanowić także nadanie georeferencji wykonanemu opracowaniu ze względu na ograniczone możliwości stosowania sztucznych lub naturalnych fotopunktów na obszarach wysokogórskich, w obrębie stromych i urwistych stoków, a tym bardziej w warunkach zimowych. Problem ten można rozwiązać wykonując zdjęcia z bezpośrednią geo-referencją uzyskiwaną za pomocą systemu mobilnego kartowania. Systemy takie pozwalają na pomiar elementów orientacji zewnętrznej zdjęć, a w rezultacie na redukcję liczby fotopunktów lub nawet ich wykluczenie z opracowania.

Dalsze badania będą prowadzone na większej liczbie pól testowych o zróżnicowanej charakterystyce, pozwalających na ocenę dokładności pomiaru, a także zbadanie zależności między grubością pokrywy śnieżnej a morfologicznymi parametrami terenu, m.in. nachyleniem, krzywizną i ekspozycją. Konieczne wydaje się być wykorzystanie mobilnego systemu kartowania (pomiar elementów orientacji zewnętrznej) a także przeprowadzenie pomiaru kontrolnego inną metodą dla potrzeb analizy dokładności.

6. LITERATURA

Blyth K., Painter R.B., 1973. Analysis of Snow Distribution Using Terrestrial Photogrammetry. *Advanced Concepts and Techniques in the Study of Snow and Ice Resources* [red. H.S. Santeford, J.L. Smith], s. 679-685.

- Buchroithner M.F., 2002. Creating the virtual Eiger North Face. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57 (1-2), s. 114-125.
- Bühler Y., Hüni A., Christen M., Meister R., Kellenberger T., 2009. Automated detection and mapping of avalanche deposits using airborne optical remote sensing data. *Cold Regions Science and Technology*, 57(2-3), s. 99-106.
- Cline D.W., 1993. Measuring Snow Depths by Digital Photogrammetry, *Proceedings of the 61st Western Snow Conference*, June 8-10, 1993, Quebec City, Quebec, s. 265-271.
- Deems J., Painter T. , 2006. LiDAR Measurement of Snow Depth: Accuracy and Error Sources. *Proceedings of the 2006 International Snow Science Workshop, Telluride, Colorado*. s. 330-338.
- ESRI, 2012: <http://www.esri.com>
- Evans B. M., Walker D. A., Benson C. S., Nordstrand E. A., Petersen G. W. , 1989. Spatial interrelationships between terrain, snow distribution and vegetation patterns at an arctic foothills site in Alaska. *Ecography*, 12, s. 270-278.
- GeoMagic. 2012: <http://www.geomagic.com>
- IMGW. 2012: http://www.imgw.pl/wl/internet/zz/oddzialy/krakow/lawiny/_pom_met/5staw.html
- Kirnbauer R., Blöschl G., Waldhäusl P., Hochstöger F., 1991. An analysis of snow cover patterns as derived from oblique aerial photographs, *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas (Proceedings of the Vienna Symposium)*, IAHS Publ. no. 205, s. 91-99.
- Kolecka N., 2011. Photo-based 3D Scanning vs. Laser Scanning – Competitive Data Acquisition Methods for Digital Terrain Modelling of Steep Mountain Slopes. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII – 4/W19.
- Photomodeler. 2012: <http://www.photomodeler.com>
- Prokop A., 2008. Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. *Cold Regions Science and Technology*, 54(3), s. 155-163.
- Remondino F., El-Hakim S. , 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The Photogrammetric Records*, 21(115), s. 269-291.
- Smith F.M., Cooper C.F., Chapman E.G., 1967. Measuring Snow Depths by Aerial Photogrammetry. *Proceedings of the 35th Western Snow Conference*, April 18-20, 1967, Boise, Idaho, s. 66-72.
- Vallet J., 2001. Handheld Mobile Mapping system for Helicopter-based Avalanche Monitoring, *OEEPE workshop "Integrated sensor Orientation"* 17-18 September, 2001. Hannover.
- Vallet J., Skaloud J., Koelbl O., Merminod B., 2000. Development of a Helicopter-Based Integrated System for Avalanche Mapping and Hazard Management, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Amsterdam*, Vol. XXXIII, Part B.2, s. 565-572.
- VRMesh. 2012: <http://www.vrmesh.com>
- Zarząd Topograficzny Sztabu Generalnego WP, Mapa topograficzna w skali 1:10 000 Warszawa, 1992.

EVALUATION OF PHOTOSYNTH APPLICATION FOR DIGITAL RELIEFF MODELING

KEY WORDS: digital surface models, terrestrial images, point cloud, snow cover

Summary

Determination of snow cover depth in mountainous terrain is of major importance for avalanche monitoring systems. Besides it is needed as an input information for environmental analysis, especially in hydrology. The aim of researches addressed in this paper was to evaluate the feasibility of using terrestrial photogrammetric images of mountain slopes for point cloud generation for snow cover mapping. The test area was located in the Pięć Stawów Valley in High Tatra in Poland. The image acquisition was carried out for slopes between Gładka Pass and Walentkowy Wierch. The first set of images was acquired during the winter season, when the deep snow cover reaches its highest annual values. Subsequently the second set of images was taken in summer, after the snow cover melted. The terrestrial image network was formed from all the images. The bundle adjustment was calculated and the winter and summer point clouds were generated using the dense matching algorithm. The mesh was built using the adjusted summer images. Created mesh was treated as a reference surface for measuring height of winter points. Calculated heights were used as a measures of snow depth. For some parts of test area the automatic generation of point clouds failed due to low-contrast snow texture. In the rest of the test area the calculated snow depth is highest for the concave terrain formations. The results show that the terrestrial photogrammetry may be an attractive approach for acquiring the information about the snow depth distribution at small areas comprising slopes of mountains and valleys.

Dane autorów:

Dr inż. Jakub Kolecki
e-mail: kolecki@agh.edu.pl

Dr inż. Natalia Kolecka
e-mail: nkolecka@gis.geo.uj.edu.pl

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych nr: 11.11.150.949 Katedry Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska WGGiŚ AGH oraz dotacji statutowej dla doktorantów IGiGP UJ nr K/DSC/000245.