Fot. Katarzyna Sawicka

Analiza porównawcza numerycznych modeli terenu i dokładności ortofotomapy na przykładzie otuliny Poleskiego Parku Narodowego

Skalkulować NMT

Pierwszym krokiem w wyborze sposobu tworzenia NMT i ortofotomapy jest zdefiniowanie celu, któremu mają one służyć. Trzeba mieć świadomość, że wraz ze wzrostem żądanej dokładności wzrasta nakład czasowy i finansowy pomiaru terenowego i kameralnego opracowania danych.

Paulina Cierpich,
Justyna Ruchała

W ramach badań przeprowadzonych dla obszaru testowego pozyskano i opracowano trzy zbiory danych: obserwacje z pomiarów tachimetrycznych, sklasyfikowaną chmurę punktów z lotniczego skanowania laserowego (ISOK) oraz zdjęcia z nalotu fotogrametrycznego bezzałogowym statkiem latającym (BSL). Posłużyły one do wygenerowania numerycznych modeli terenu oraz ortofotomapy (z danych BSL). Dokładności otrzymanych produktów obliczono w stosunku do punktów referencyjnych wzdłuż profili kontrolnych. Warto dodać, że większość tych punktów znajdowała się na nieutwardzonej drodze gruntowej, a tylko co piąty zlokalizowany był wśród niskiej roślinności. Wykonano także wzajemne porównanie NMT bez uwzględniania modelu referencyjnego. Ponadto zwrócono uwagę na rolę poszczególnych czynników wpływających na wynik końcowy. Aby ocena dokładności nie zależała w głównej mierze od zróżnicowania terenu, jednoznacznie określono jego zakres. Wybrano także tylko jeden algorytm generowania NMT (nieregularna siatka trójkątów – TIN), opierający się bezpośrednio na danych pomiarowych.

Badania prowadzono na terenie otuliny Poleskiego Parku Narodowego, gdzie wytypowano tzw. pole porównawcze o powierzchni około 54 ha, zlokalizowane w jej południowej części. Szczegółowe wyniki badań zaprezentowano w dalszej części artykułu.

Metoda tachimetryczna

Inwentaryzację (na fot. powyżej) wybranego obszaru w dniach 15-22 lipca 2016 r. wykonała grupa 12 członków Koła Naukowego Geodetów Dahlta z AGH w Krakowie pod opieką dr inż. Edyty Puniach oraz dr. inż. Pawła Ćwiąkały [więcej o samych pomiarach w GEODECIE 9/2016 – red.]. Tachimetrię przeprowadzono, bazując na założonej osnowie pomiarowej składającej się z 15 punktów. Do pomiaru wykorzystano dwa instrumenty Topcon OS103 oraz jeden Geomax Zipp 20. Średnia wielkość oczka siatki pomiarowej wynosiła około 30 m. W miejscach o większych deniwelacjach siatkę zagęszczano (do boku o długości 15 m), tam zaś, gdzie teren wydawał się płaski, stosowano większe odległości. Szczególną uwagę zwracano na punkty charakterystyczne oraz linie nieciągłości, aby jak najlepiej oddać charakter badanego obszaru.

Obliczenie wysokości pikiet terenowych wykonano w module „Tachimetria" programu C-Geo, uzyskując średni błąd wysokości około 3 cm, a błąd sytuacyjny 4 cm. Na podstawie przygotowanych danych wygenerowano numeryczny model terenu w postaci siatki TIN, który następnie przekonwertowano do

Fot. Katarzyna Sowicka

1. Dron DJI Spreading Wings S1000

Fot. Paulina Cierpich

2. Stabilizacja fotopunktu w terenie

obrazu rastrowego o komórce wielkości 3,5 x 3,5 m. Wspomniane operacje wykonano w programie ArcMap.

Dane z ISOK i naloty bezzałogowym statkiem latającym

Do wygenerowania kolejnego NMT wykorzystano dane z lotniczego skaningu laserowego pozyskane w ramach projektu ISOK. Z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej otrzymano sklasyfikowaną chmurę punktów w formacie LAS o gęstości 4 pkt/m^2. Dane charakteryzowały się dokładnością wysokościową rzędu 20 cm (wg CODGiK). Opracowanie uzyskanych materiałów przeprowadzono w programie ArcMap przy użyciu nakładki LP360 Standard, która służy do klasyfikacji i edycji chmur punktów LiDAR. Wygenerowano plik rastrowy TIFF reprezentujący numeryczny model terenu w postaci siatki trójkątów TIN.

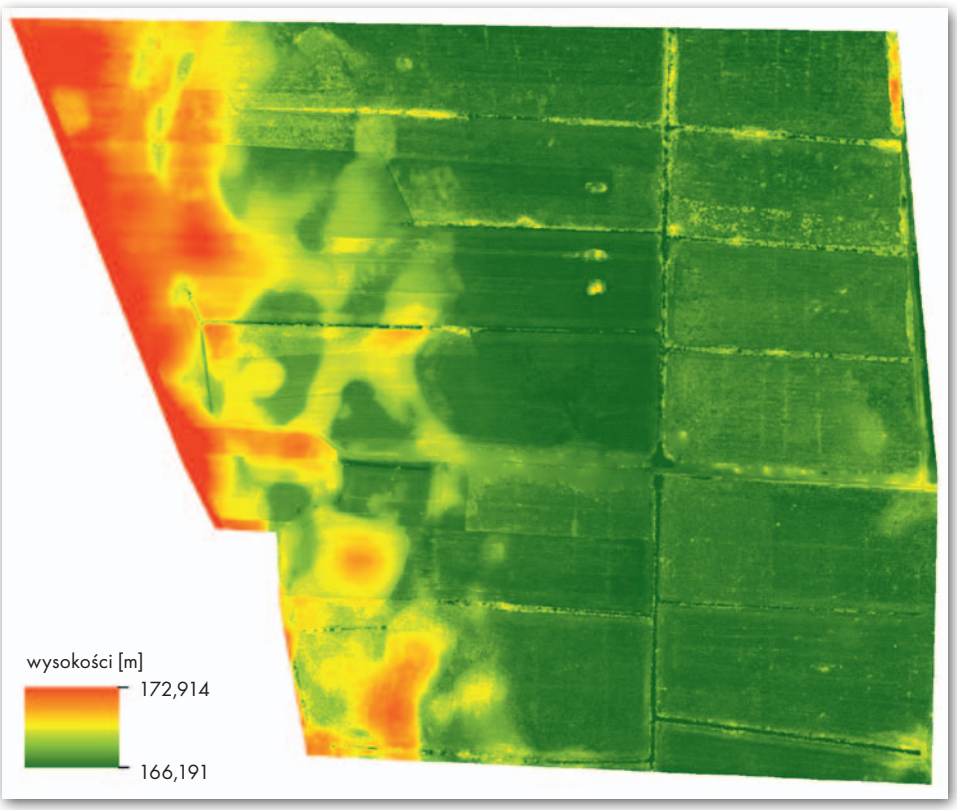
Trzeci NMT utworzono na podstawie danych z nalotów fotogrametrycznych. Pomiar wykonano przy użyciu bezzałogowego statku latającego DJI Spreading Wings S1000 (fot. 1) będącego własnością Akademii Górniczo-Hutniczej z zamontowanym aparatem fotograficznym Sony Alpha A7R. Na wytypowanym do pomiaru obszarze zaprojektowano osnowę fotogrametryczną (24 punkty; fot. 2), której współrzędne terenowe wyznaczone zostały w czasie pomiaru tachimetrycznego.

Zaplanowano i wykonano trzy naloty, charakteryzujące się tą samą ogniskową (35 mm) oraz różnym rozmiarem piksela terenowego. W omawianym przypadku było to 1,5 cm (nalot z pułapu 100 m), 2 cm (pułap 140 m; fot. 3) oraz 3 cm (pułap 200 m). Podstawowym założeniem było przyjęcie takiego samego pokrycia podłużnego i poprzecznego dla każdego z wariantów nalotu, tj. p = 80% (pokrycie podłużne), q = 60% (pokrycie poprzeczne). Ponadto wybrana została największa dostępna rozdzielczość wykonywanych zdjęć (7360 x 4912 px).

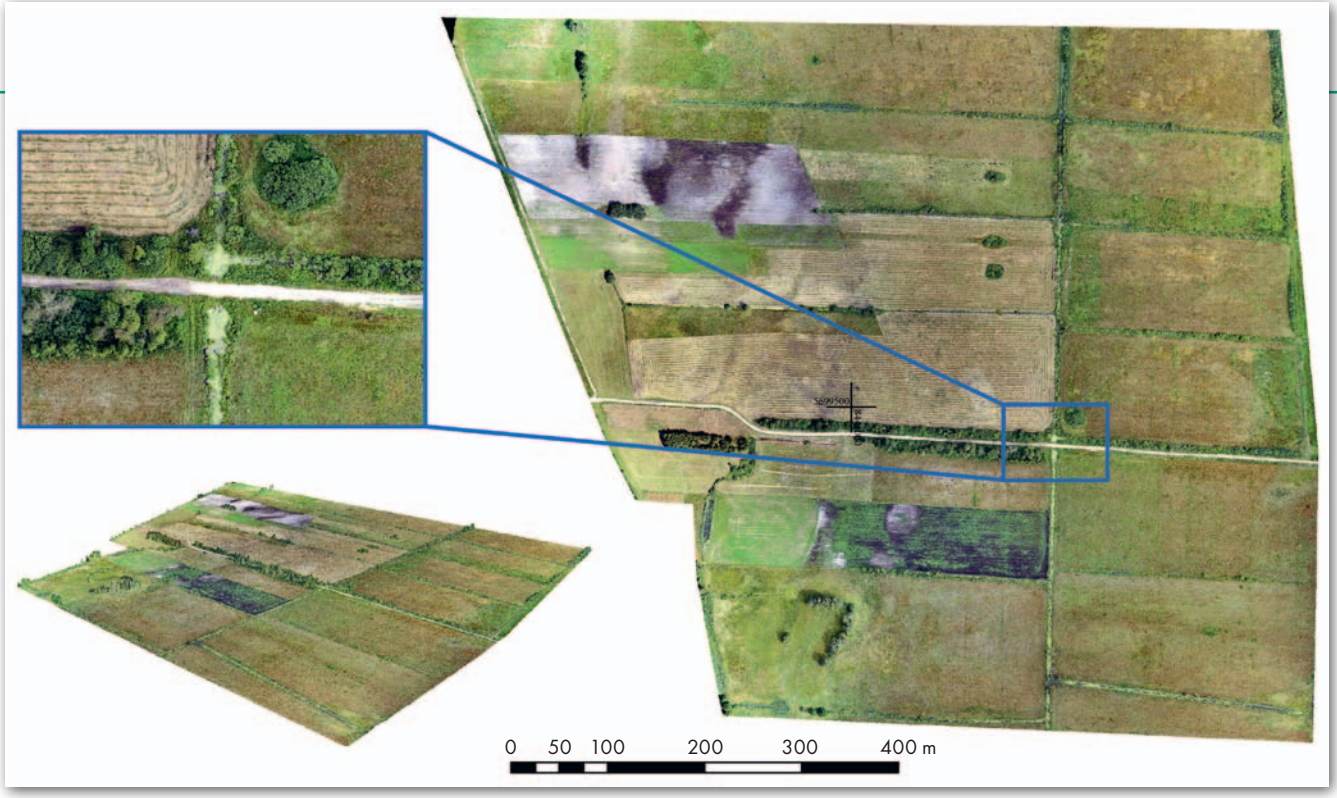
Pozyskanymi danymi pomiarowymi były zdjęcia cyfrowe, które następnie poddano obróbce w programie Agisoft PhotoScan. Po połączeniu fotografii oraz wskazaniu punktów osnowy fotogrametrycznej wygenerowano gęstą chmurę punktów. Następnie dokonano jej automatycznej i manualnej klasyfikacji oraz przystąpiono do procesu tworzenia NMT i NMPT. Wspomniane czynności wykonano analogicznie dla każdego nalotu.

Cyfrowa ortofotomapa

Generowanie ortofotomapy było ostatnim procesem przeprowadzo-



3. Numeryczny model terenu z fotogrametrycznego opracowania zdjęć z pułapu 140 m



4. Ortofotomapa o pikselu 1,5 cm wykonana w układzie PL-2000

5. Dokumentacja fotograficzna fragmentu przekroju poprzecznego

nym w programie Agisoft PhotoScan. Na podstawie wyrównanych zdjęć oraz zbudowanego wcześniej numerycznego modelu pokrycia terenu utworzono jej trzy wersje charakteryzujące się różną wielkością piksela terenowego: 1,5 cm (fot. 4), 2,0 cm, 3,0 cm. Jako metodę teksturowania wybrano domyślną mozaikę (Mosaic), która nie powoduje wzajemnego mieszania się zdjęć, a wybiera tę fotografię, dla której badane piksele znajdują się najbliżej geometrycznego środka obrazu. Sposób ten jest zalecany, gdy ortofotomapa generowana jest na podstawie NMPT, tak jak to miało miejsce w tym przypadku. Pod względem wizualnym otrzymane produkty okazały się łudząco podobne. Jedynym elementem różnicującym była nieco odmienna kolorystyka oraz jasność produktu finalnego spowodowana wykonywaniem zdjęć o różnych porach dnia oraz podczas zmiennych warunków atmosferycznych.

• Analiza porównawcza NMT

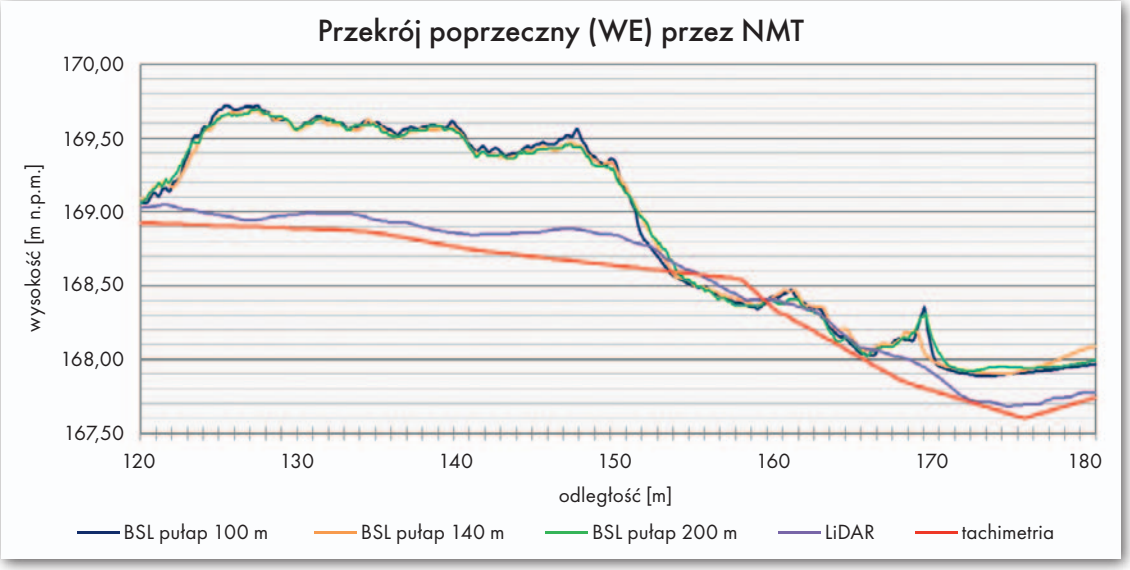
Etap ten obejmował porównanie przekrojów poprowadzonych przez uzyskane numeryczne modele terenu (fot. 5). Należy podkreślić, że w tym celu przeprowadzono resampling rastra. Dzięki tej operacji wszystkie modele otrzymały taką samą rozdzielczość. Umożliwiło to przedstawienie odpowiadających sobie odcinków profilu kontrolnego na jednym wykresie.

Przekroje o sumarycznej długości 1,4 km wygenerowano za pomocą paska narzędziowego 3D Analyst programu ArcMap w kierunku zachód-wschód oraz północ-południe. Prowadząc prze-

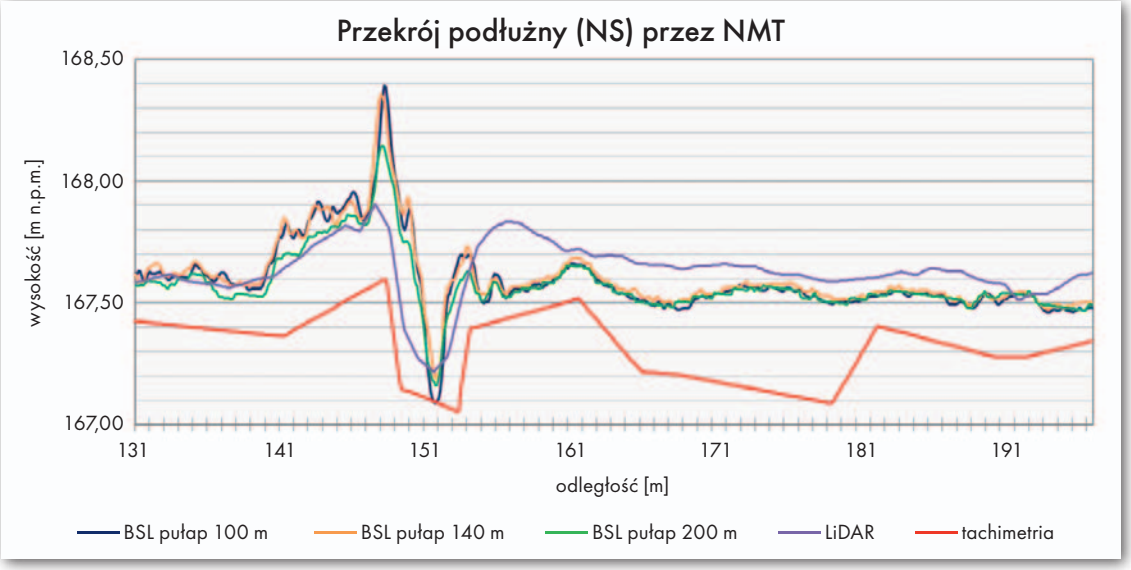
kroje przez NMT, otrzymywano wysokości punktów znajdujących się w odległościach równych wielkości zaproponowanej komórki rastra. Na ich podstawie stworzono łącznie 22 wykresy liniowe.

Jako pierwsze analizie poddano przekroje poprzeczne przechodzące przez środek opracowania z zachodu na wschód. Przebiegały one w okolicy drogi gruntowej. W miejscach, gdzie był to teren odkryty, wszystkie wykresy zachowują zbliżony przebieg. Różnica między NMT z metod fotogrametrycznej i skaningu laserowego to średnio 5 cm, a odchyłka między nimi a modelem z pomiaru tachimetrycznego – 15 cm.

Na ciekawy przypadek odstępstwa od tej reguły natrafiono, analizując fragment przekroju (fot. 6). Zauważono mianowicie, że na odcinku 30 m zachodzi 50-centymetrowa różnica wysokości między modelami z nalotu BSL a pozostałymi. Powodem jej wystąpienia jest najprawdopodobniej średnia roślinność porastająca fragment badanego terenu, która nie została poprawnie odfiltrowana.



6. Wpływ błędnie odfiltrowanej roślinności na modele z metody fotogrametrycznej



7. Struktura linii reprezentujących badane numeryczne modele terenu

Drugi rodzaj przekrojów pochodzi z podłużnego profilu kontrolnego przebiegającego z południa na północ. Występuje tutaj odmienna charakterystyka terenu, porośnięty jest on niską bądź średnią roślinnością. Skutkuje to większymi różnicami wysokości pomiędzy modelem pozyskanym z metody tachimetrycznej a pozostałymi. Na rys. 7 widoczna jest także specyficzna struktura linii reprezentującej NMT z metody:

- tachimetrycznej – mocno łamana,
- skanowania laserowego – łagodny przebieg,
- fotogrametrycznej bliskiego zasięgu – „postrzępiona".

Zależności te wynikają ze stopnia zagęszczenia punktów pomiarowych. Dla modeli z metody fotogrametrycznej i skaningu laserowego różnice wynoszą w przybliżeniu 10 cm, zaś odchyłka między nimi a modelem z pomiaru tachimetrycznego dochodzi do 25-30 cm.

Generalnie na wszystkich wykonanych przekrojach – zarówno poprzecznych, jak i podłużnych – utrzymuje się spodziewana tendencja niskiego umiejscowienia modelu z pomiaru tachimetrycznego (kolor czerwony), wyśrodkowanego przebiegu modelu ze skanowania laserowego (kolor fioletowy) oraz wyższego położenia punktów modelu pozyskanego w wyniku opracowania fotogrametrycznego (kolor niebieski – nalot na wysokości 100 m, żółty – 140 m, zielony – 200 m). Dane pomiarowe z metody tachimetrycznej najlepiej oddają wysokość terenu, ponieważ pomiar wykonywany jest w terenie poprzez postawienie tyczki z reflektorem bezpośrednio na powierzchni gruntu. W przypadku skaningu laserowego i metod fotogrametrycznych istnieje duże prawdopodobieństwo, że w procesie klasyfikacji i filtracji, niska roślinność (np. trawa) zostanie przez program zinterpretowana jako powierzchnia terenu. Dlatego modele powstałe z tych metod zazwyczaj umiejscowione są wyżej w stosunku do produktu z tachimetrii.

Analiza dokładnościowa NMT

Przed przystąpieniem do właściwej analizy otrzymanych wyników pomiarów oszacowano spodziewane wartości błędów za pomocą wybranych zależności empirycznych. Dla metody skanowania laserowego skorzystano ze wzoru Krausa uwzględniającego stopień zagęszczenia punktów pomiarowych oraz charakter badanego terenu. W ten sposób uzyskano szacunkową dokładność modelu na poziomie 7 cm.

Kolejna zależność empiryczna, autorstwa J. Wysockiego, bierze pod uwagę błąd wysokościowy punktów oraz średnią odległość między nimi, a także na-

chylenie i chropowatość obszaru. Została ona wykorzystana do oszacowania dokładności modeli z metody tachimetrycznej i fotogrametrycznej. Otrzymano następujące wartości:

- tachimetria – 14 cm,
- nalot bliskiego zasięgu z pułapów: 100 m – 3 cm, 140 m – 4 cm, 200 m – 6 cm.

W celu zbadania faktycznej dokładności poszczególnych NMT obliczono błąd RMSE. Jest to pierwiastek sumy kwadratów różnic wysokości między punktami kontrolnymi na modelu a referencyjnymi, dzielonych przez ich liczbę. Ze względu na użycie danych referencyjnych (70 punktów) o wysokiej dokładności pochodzących z bezpośredniego pomiaru terenowego, zastosowanie tego wzoru wydaje się wiarygodną metodą oceny NMT. Wartość RMSE jest wynikiem wpasowania modelu w punkty, na podstawie których był generowany. Okazuje się, że dla uzyskanych modeli nie przekracza ona 10 cm. Należy jednak podkreślić, że wynik ten zachowuje swoją prawidłowość w przypadku konkretnego terenu o niewielkich deniwelacjach oraz braku roślinności.

Najmniejszym błędem charakteryzują się modele wygenerowane na podstawie danych z nalotu fotogrametrycznego na niskim pułapie (100 m – 6,1 cm, 140 m – 6,6 cm, 200 m – 7,0 cm). Co ciekawe, różnice między zaprezentowanymi wartościami nie odbiegają od siebie znacząco, mimo iż naloty wykonywane były na różnych wysokościach (z różną wielkością piksela terenowego). W przypadku metody wykorzystującej dane ze skaningu wartości szacowane przed pomiarem okazały się bardzo zbliżone do uzyskanych błędów (7,8 cm).

Z kolei zastosowanie metody klasycznej daje w praktyce lepsze rezultaty, niż zakładano przed pomiarem. Warto jednak podkreślić, że błędność opracowania modelu z pomiaru tachimetrycznego (9,7 cm) jest największa ze wszystkich badanych metod. Mimo że dane pomiarowe z tachimetrii mają najwyższą dokładność wysokościową (około 3 cm), model charakteryzuje się gorszą jakością. Bez wątpienia wpływ na to miała zastosowana wielkość oczka siatki pomiarowej, która miejscami dochodziła do 50 x 50 m.

Przeanalizowano również najbardziej popularne parametry statystyczne dla wygenerowanych modeli. Uzyskane wartości pozwoliły wnioskować, że dane pomiarowe wykorzystane do budowy numerycznych modeli terenu pozbawione są obserwacji odstających i błędów grubych.

Analiza dokładnościowa ortofotomapy

Ocena dokładności ortofotomapy polegała przede wszystkim na sprawdzeniu jakości geometrycznej, czyli zweryfikowaniu jej wewnętrznej zgodności i przeprowadzeniu bezwzględnej oceny dokładności odniesionej do niezależnego pomiaru kontrolnego. Do tego celu wykorzystano punkty profilów poprzecznych i podłużnych, których współrzędne pozyskano podczas pomiaru referencyjnego (są to te same punkty, których użyto do oceny dokładności numerycznego modelu terenu). Punkty te nie brały udziału w procesie wyrównania. Bezwzględną ocenę dokładności produktu wynikowego przeprowadzono za pomocą wzoru na pierwiastek błędu średniokwadratowego. Jego składowa wysokościowa pochodziła z analizy NMT, a błąd dla współrzędnych płaskich wyznaczany był osobno dla każdej ortofotomapy poprzez manualną identyfikację punktów w programie Agisoft PhotoScan. Całkowita miara bezwzględnej dokładności terenowej dla modeli pozyskanych z różnym pikselem terenowym wynosi około 9 cm, a różnica między skrajnymi wartościami otrzymanych błędów to jedynie 5 mm. Wynik ten może świadczyć, że wysokość nalotu nie jest w tej sytuacji parametrem determinującym dokładność ortofotomapy. Należałoby rozpatrzyć również czynniki wpływające na całościową ocenę produktu, np. pora wykonywania nalotu czy warunki atmosferyczne. Ponadto na podkreślenie zasługuje to, że dokładność fotomapy zależy w głównej mierze od dokładności numerycznego modelu terenu.

Co wybrać?

Przeprowadzone analizy potwierdziły, że największy wpływ na wynikowy model ma zastosowana metoda pomiarowa. Należy przez to również rozumieć przyjęte parametry i założenia projektowe, którymi się charakteryzowała. Aby odpowiedzieć sobie na pytanie: „W jaki sposób mierzyć, by osiągnąć zadowalający wynikowy numeryczny model terenu?", w pierwszej kolejności należy jasno zdefiniować cel, a co za tym idzie, określić oczekiwaną dokładność sytuacyjną i wysokościową produktu. Dopiero po przyjęciu tych wytycznych można wybrać optymalną metodę pomiaru.

Podsumowanie przydatności NMT dla fragmentu otuliny PPN (rozległy, odkryty obszar, linie nieciągłości, niska roślinność oraz zadrzewienie) przeprowadzono w dwóch wariantach dokładnościowych.

1. Oczekiwany produkt musi charakteryzować się wysoką dokładnością (błąd wysokościowy do 5 cm).

Bez wątpienia najlepszą charakterystykę wysokościową prezentowałby model z pomiaru tachimetrycznego. Jednak czynności terenowe musiałyby sprostać następującym warunkom:

- bardzo gęsta siatka pomiarowa,
- dokładna inwentaryzacja występujących nieciągłości.

Dla analizowanego terenu wymagałoby to bardzo dużego nakładu pracy, a później przeprowadzenia mozolnego procesu opracowania kameralnego. Aby przyspieszyć prace terenowe, można skorzystać z metody mieszanej, czyli z użycia pomiaru tachimetrycznego jako uzupełnienia wybranej, nowoczesnej technologii. Przeprowadzone badania wykazały, że wyniki zarówno ze skanowania laserowego, jak i opracowania fotogrametrycznego, nie oddają w sposób wystarczający charakterystycznych linii nieciągłości oraz powierzchni gruntu. Dlatego obecnie nie stanowią one realnego „zagrożenia" dla pomiarów klasycznych w tym wariancie dokładnościowym.

2. Oczekiwany produkt może charakteryzować się niższą dokładnością (błąd wysokościowy w zakresie 5-20 cm).

Jeżeli spodziewana dokładność modelu ma mieścić się w 20 cm, warto rozważyć użycie szybkich, innowacyjnych technologii. Nalot fotogrametryczny i skanowanie laserowe bez wątpienia pochłaniają znacznie mniej czasu, angażując przy tym niewielką liczbę osób. Jeżeli nalot jest optymalnie zaprojektowany, można oczekiwać wysokiej dokładności. Znaczącą zaletą jest także penetracja miejsc niedostępnych. Gdyby opracowywany teren był podmokły, pomiary klasyczne w żaden sposób nie pozwoliłyby na jego inwentaryzację. Kolejnym plusem stosowania tych technologii jest ilość informacji, jakie uzyskujemy (wysokość obiektów, kolor, obraz intensywności). Oczywiście nakład finansowy, jaki trzeba ponieść przy zakupie niezbędnego sprzętu i oprogramowania, jest znacznie wyższy niż w przypadku opracowania pomiarów klasycznych. Jednak już po wykonaniu kilkunastu opracowań na rozległym terenie sposób ten może się okazać znacznie bardziej opłacalny.

Paulina Cierpich, Justyna Ruchała

Artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego przez autorki i nagrodzonego (II miejsce) podczas 57. Konferencji Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH – Sekcja Geodezji
(więcej na s. 5)