

Ocena możliwości zastosowania lotniczego skaningu laserowego do opracowania map kolejowych

Komplementarny

Nie należy postrzegać lotniczego skaningu laserowego jako głównego – i tym bardziej jedyne – źródła danych dla tworzenia map numerycznych 3D. Łatwiejsze w opracowaniu są tradycyjne zdjęcia lotnicze o dużej rozdzielczości. Jednym z atutów skaningu jest natomiast możliwość tworzenia precyzyjnego NMT, również w terenie zalesionym.

Zdzisław Kurczyński

Artur Adamek

Krzysztof Bratús

PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. rozpoczęły zakrojone na szeroką skalę prace modernizacyjne istniejących szlaków kolejowych oraz przygotowania do budowy kolei dużych prędkości. Pierwszym etapem jest opracowanie map dla celów projektowych. Od kilku lat tworzy się takie mapy dla odcinków linii kolejowych: Kraków–Medyka–granica państwa, Poznań–Świnoujście czy Warszawa Okęcie–Radom–Kielce. Zadanie to jest poważnym wyzwaniem dla wykonawców. Produkt końcowy – trójwymiarowa mapa dla celów projektowych w formie numerycznej – jest jednym z najbardziej precyzyjnych opracowań mapowych spośród rutynowych prac realizowanych przez geodezję, odpowiednikiem mapy zasadniczej uzupełnionej o elementy infrastruktury kolejowej.

Mapy te tworzone są za pomocą najnowszych technologii opartych na fotogrametrycznym opracowaniu zdjęć lotniczych o bardzo dużej rozdzielczości (lotnicza kamera cyfrowa, piksel terenowy 0,05 m). Dodatkowo powstają bardzo zaawansowane produkty pośrednie, pochodne zdjęć lotniczych: precyzyjny numeryczny model terenu oraz cyfrowa ortofotomapa o rozdzielczości (pikselu terenowym) 0,05 m. Praktyka potwierdza słuszność przyjęcia takiej technologii. Współczesna fotogrametria cyfrowa po-



Rys. 1. Lokalizacja testowego odcinka szlaku kolejowego

zwala opracować mapy do celów projektowych o wymaganej dokładności i szczegółowości. Doświadczenia produkcyjne pokazują, że 80% treści takiej mapy pochodzi ze zdjęć, a reszta z bezpośredniego pomiaru terenowego (tachimetria, GPS i niwelacja). Pozostaje problem na obszarach zalesionych, gdzie istnieje trudność pomiaru wysokości ze zdjęć lotniczych (około 30% pokrycia kraju).

Dotychczasowa praktyka PKP potwierdza, że osiągnięcie celu wymaga użycia kilku technik pomiarowych, które uzupełniają się wzajemnie, a integracja danych wieloźródłowych następuje w czasie opracowania. PKP PLK S.A. wykazuje więc duże zainteresowanie stosunkowo młodą na polskim rynku techniką pomiarową, jaką jest skaningu laserowy lotniczy (LiDAR) i naziemny. Potencjalnie może ona być bardzo przydatna dla przestrzennej inwentaryzacji infrastruktury kolejowej w pasie kolejowym, w tym do tworzenia precyzyjnych modeli wysokościowych: numerycznych modeli terenu (NMT) i numerycznych modeli pokrycia terenu (NMPT). Technika naziemnego skaningu laserowego mogłaby być wykorzystana m.in. do dynamicznej (w ruchu) inwentaryzacji obiektów dla potrzeb określania tzw. skrajni kolejowej.

W tym kontekście zostało zrealizowane eksperymentalne opracowanie, którego celem jest rozpoznanie możliwości lotniczego skaningu laserowego w zakresie przestrzennej inwentaryzacji obiektów infrastruktury kolejowej w pasie kolejowym, a konkretnie do oceny możliwości identyfikacji i dokładności pomiaru sytuacyjno-wysokościowego szczegółów do opracowania kolejowych map numerycznych 3D. Prace wykonano na odcinku szlaku kolejowego E30 Kraków–Rze-

szów: od stacji Grabiny, poprzez Dębicę, Sędziszów Małopolski do stacji Gościńiec. Łączna długość odcinka wynosi około 30 km (rys. 1).

• Prace fotolotnicze

Zadanie wymagało pokrycia szlaku kolejowego danymi LiDAR o dużej gęstości. Wykorzystano jeden z najbardziej zaawansowanych systemów skanujących LiteMapper LM6800i oparty na najnowszym skanerze Riegl Q680i. Sprzęt został zainstalowany na samolocie An-2, co umożliwiło lot z małą prędkością i pomiar większej liczby punktów. Testowy odcinek szlaku kolejowego zarejestrowano skanerem w dwóch niezależnych nalotach różniących się parametrami:

1. na wysokości 270 m z gęstością około 18 pkt/m²,
2. na wysokości 500 m z gęstością około 11 pkt/m².

Dodatkowo w locie na wyższym pułapie wykonano rejestrację średnioformatową kamerą cyfrową z matrycą 50 Mpx i pikselem około 0,07 m. Nalot wykonano latem (21 sierpnia 2011 r.) w okresie pełnej wegetacji. Szlak pokryto ciągiem łamanych szeregów, odpowiednio 10 szeregów z wysokości 270 m i 8 z wysokości 500 m. W obu przypadkach wykonano dodatkowo po 5 krótkich szeregów poprzecznych. W czasie nalotu wykorzystano obserwacje z 4 stacji referencyjnych ASG-EUPOS oraz dodatkowo uruchomiono dwie stacje referencyjne GPS pracujące z częstotliwością 2 Hz na punktach POLREF zlokalizowanych blisko mierzonego odcinka kolejowego.

• Georeferencja danych LIDAR

Elementem o kluczowym znaczeniu dla dokładności opracowania jest właściwie

dla zdjęć

wykonana georeferencja danych LiDAR. Ważne tu są:

- plan nalotu LiDAR,
- rozkład stacji referencyjnych,
- rozkład, liczba i jakość płaszczyzn referencyjnych,
- proces obliczeniowy i kontrola jakości.

Linia kolejowa jest tzw. obiektem korytarzowym pokrywanym ciągiem załamanych się szeregów LiDAR z niewielkim pokryciem podwójnym w obszarach załamania. Nie występuje tu klasyczny blok wzmocniony wewnątrz przez pokrycie poprzeczne szeregów. Czyni to konstrukcję „korytarzową” słabą geometrycznie. Dla jej wzmocnienia, a także dla kontroli i oceny dokładności zastosowano:

- krótkie szeregi poprzeczne (po 5 w obu nalotach),
- kilka blisko położonych stacji referencyjnych,
- pomiar terenowy płaszczyzn referencyjnych.

Płaszczyzny referencyjne pomierzono w 15 lokalizacjach, głównie na szeregach poprzecznych, w miejscach przecięć tych szeregów z szeregami podłużnymi, oraz w miejscach załamania szeregów podłużnych. W każdej z lokalizacji wystąpiły zwykle po 4 takie płaszczyzny. Stanowiły je najczęściej nachylone w różnych kierunkach połacie dachów lub fragmenty gładkich, poziomych płaszczyzn (place utwardzone, jezdnie asfaltowe). Płaszczyzny pomierzono w terenie poprzez kombinację metod GPS oraz tachimetrii bezreflektorowej (dla niedostępnych punktów konstrukcyjnych dachu). Rysunek 2 ilustruje jedną z lokalizacji. Trajektorię samolotu wyznaczono względem wszystkich stacji referencyjnych, a następnie, po analizie zgodności wyników, wykorzystano do dalszych obliczeń dwie z nich. Były to stacje POLREF położone najbliżej względem obiektu. Analiza wskazuje, że dokładność wyznaczenia pozycji samolotu wahała się w zakresie 0,02-0,08 m.

• Wyrównanie pozycji

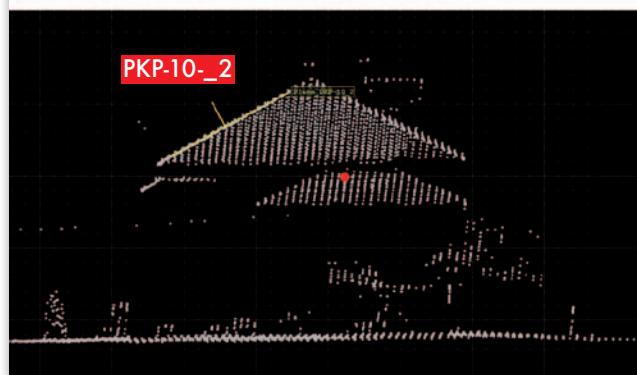
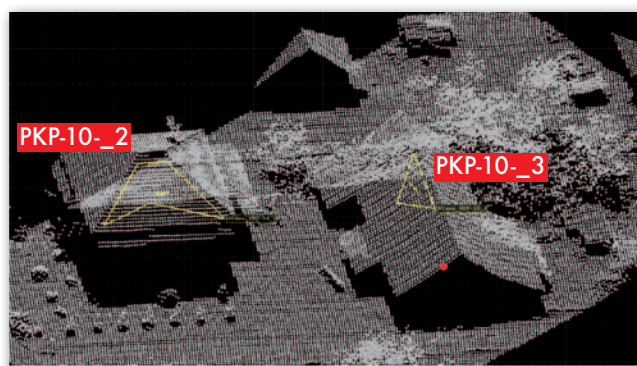
i wyznaczenie elementów orientacji

Obliczenie orientacji skanera (w tym wszystkie niezbędne redukcje mimośro-

dów położenia anteny GPS względem IMU – inercyjnej jednostki pomiarowej, oraz IMU względem skanera i kamery) zostało przeprowadzone w programie AEROoffice firmy IGI. Proces obliczeniowy dotyczył każdego z nalotów oddzielnie (osobne obliczenia dla AGL 270 m i 500 m). Wynikiem obliczeń było wyznaczenie pozycji i orientacji urządzenia skanującego (centrum propagacji sygnału LiDAR) z częstotliwością 250 Hz, tj. co 4 milisekundy, oraz wyznaczenie elementów orientacji zewnętrznej kamery w momentach ekspozycji zdjęć. Potwierdzeniem poprawności przeprowadzonego procesu jest porównanie pozycji pochodzących z GPS oraz IMU. Otrzymana wysoka zgodność pomiarów na poziomie $\pm 0,02$ m pozwala wykluczyć błąd rejestracji danych przez urządzenia, jak również błędy redukcji mimośrodków.

• Wzajemne wpasowanie i georeferencja szeregów

Wyrównanie chmur punktów zrealizowano w programie RiProcess. Szeregi łączone są w blok dzięki dopasowaniu płaszczyzn znajdujących się w pokrywających się partiach sąsiadujących szeregów – tzw. płaszczyzn przejściowych (inaczej: wiążących). Jest to odpowiednik punktów przejściowych w aerotriangulacji. Powierzchnie wiążące znajdują się automatycznie przez program. W chmurze punktów algorytm programu znajduje w pasie pokrycia szeregów fragmenty spełniające wymagania przynależności do płaszczyzny w terenie. Kolejnym krokiem jest wzajemne wpasowanie szeregów poprzez zmianę położenia poszczególnych skanów (szeregów) w kierunkach



Rys. 2. Przykłady widoku płaszczyzn referencyjnych lokalizacji PKP-10: na ortofotomapie, zdjęciach naziemnych i chmurach punktów

East, North oraz Height. Proces wzajemnego wpasowania i georeferencji chmury punktów odbywa się równolegle w kilku iteracjach. Pierwszą iteracją jest wyznaczenie poprawnych wartości kątów skręcenia skanera względem IMU, tj. poprawek do kątów roll, pitch, yaw.

W procesie wyrównania niewiadomymi są przesunięcia X, Y, Z (East, North, Height) każdego ze skanów. Dla nalotu z wysokości 270 m oznacza to $15 \times 3 = 45$ swobodnych parametrów (niewiadomych). W wyrównaniu żaden skan nie jest obracany ani jego kształt nie jest deformowany (np. nie jest zmieniana skala w poprzek skanowania względem ska-

li wzdłuż lotu). Innymi słowy, każdy skan (szereg LiDAR) traktowany jest jako „sztywna” całość. Takie podejście, ograniczające liczbę stopni swobody (tj. niewiadomych), zmniejsza ryzyko wprowadzenia w procesie wyrównawczym sztucznych deformacji szeregów, które mogłyby się pojawić przy gorszym zabezpieczeniu bloku przez płaszczyzny pomierzone w terenie. Jest to podejście metodycznie szczególnie uzasadnione na obiektach „korytarzowych”, jakimi są szlaki kolejowe. W takim przypadku lepiej polegać na geometrii podobieństw i nie zmieniać parametrów, które mogłyby zdeformować szeregi LiDAR.

Proces wyrównania polega na wzajemnym „dopasowaniu” szeregów oraz dopasowaniu do płaszczyzn referencyjnych (odpowiedniki fotopunktów w aerotriangulacji zdjęć lotniczych). Odbywa się to z wykorzystaniem automatycznie zlokalizowanych przez system płaszczyzn w pasach pokrycia wzajemnego szeregów. W nalocie z wysokości 270 m system zlokalizował automatycznie ponad 6 tys. takich płaszczyzn, a błąd średni wpasowania na tych płaszczyznach oszacowano na 0,019 m. Średni błąd wpasowania na płaszczyznach referencyjnych (pomierzonych w terenie) wyniósł 0,030 m. W nalocie z wysokości 500 m zlokalizowano odpowiednio ponad 19 tys. płaszczyzn, z błędem średnim wpasowania 0,026 m oraz 0,040 m na płaszczyznach referencyjnych. Wyniki te świadczą o wzajemnej zgodności danych oraz ich bezwzględnej dokładności. Mogą stanowić wskazówkę co do dokładności danych LiDAR osiąganą w warunkach produkcyjnych na obiektach zbliżonych do prezentowanego.

• Metodyka oceny skaningu laserowego dla pomiarów kolejowych

Celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości identyfikacji szczegółów i dokładności pomiaru sytuacyjno-wysokościowego dla opracowania kolejowych map numerycznych 3D metodami lotniczego skaningu laserowego. Wybrano wiele elementów infrastruktury kolejowej i szczegółów sytuacyjnych, typowych dla pasa kolejowego i występujących na szlaku będącym przedmiotem opracowania. Obiekty te stanowią zakres treści map numerycznych opracowywanych dla celów projektowych, jak np.: szyny, rozjazdy, budynki, wiaty, most, wiadukty, perony, kładki dla pieszych, przejazdy, szlabany, bramy trakcyjne, słupy trakcyjne, wskaźniki kolejowe, tablice, semafony, skrzynki, latarnie, słupy telegraficzne, przewody trakcyjne oraz maszty energetyczne. W każdej gru-

pie wybrano i pomierzono po kilka-kilkanaście obiektów równomiernie rozmieszczonych wzdłuż odcinka szlaku i skoncentrowanych w kilku „gniazdach”. Intencją był wybór i opracowanie obiektów znacznie od siebie oddalonych, znajdujących się w różnej odległości od punktów nawiązania geodezyjnego. Położenie przestrzenne elementów infrastruktury kolejowej i szczegółów sytuacyjnych wyznaczano metodą GPS RTK w nawiązaniu do punktów sieci ASG-EUPOS. Obiekty trudno dostępne dla pomiaru bezpośredniego wyznaczano z wykorzystaniem tachimetru elektronicznego umożliwiającego pomiar bezreflektorowy.

Ważniejsza od samej dokładności wyznaczenia pikety była identyfikacja mierzzonego obiektu i zgodność tej identyfikacji na etapie pomiaru terenowego oraz opracowania (na chmurze punktów). Stwarzało to wielokrotnie problemy, bo np. słup trakcyjny to nie punkt, ale fizycznie przestrzenna konstrukcja kratowa o przekroju kwadratowym. Dla zapewnienia zgodności identyfikacji pomiar terenowy był prowadzony przez grupę połową we współpracy z osobą uczestniczącą w późniejszym opracowaniu danych LiDAR na stacji cyfrowej. Dodatkowo pomiar terenowy dokumentowany był zdjęciami naziemnymi.

Odrębnym zadaniem pomiarowym była niwelacja szyn kolejowych (toków) wzdłuż mierzzonego odcinka szlaku. Wysokości główki szyny wyznaczono w około 60 miejscach, wykorzystując do tego dwie metody pomiaru: GPS RTK i niwelację geometryczną. W przypadku tej drugiej wykonywano niwelację techniczną automatycznym niwelatorem kodowym, nawiązując pomiary do najbliższych reperów osnowy wysokościowej I i II klasy. Niezamknięcia „oczek” nie przekroczyły 0,030 m. Lokalizację miejsca pomiaru wysokościowego główki szyny określano dodatkowo pomiarem GPS RTK.

• Dane źródłowe

Danymi źródłowymi do opracowania na stacji cyfrowej były:

- chmury punktów ze skaningu laserowego po georeferencji,
- zdjęcia lotnicze wykonane kamerą średnioformatową i ortofotomapa wygenerowana na ich podstawie,
- wyniki pomiaru terenowego.

Chmury punktów laserowych zostały poddane wstępnej klasyfikacji, tj. podzielone na kilka klas: grunt, roślinność niska, roślinność średnia, roślinność wysoka, budynki i budowle, linie napowietrzne (linie trakcji), wody. Punkty poddano klasyfikacji automatycznej za pomocą standardowego oprogramo-

wania. Oznacza to, że jej wiarygodność jest ograniczona. Uznano jednak, że taka wstępna klasyfikacja punktów może być pomocna na tym etapie opracowania.

Podstawowym parametrem jakościowym skaningu laserowego jest gęstość punktów oraz ich rozkład na powierzchni terenu. Wykorzystano skaner Riegl Q680i, którego wybieranie (skanowanie) w poprzek lotu jest realizowane przez obracający się pryzmat wielościenne. Oznacza to, że punkty laserowe układają się równoległymi liniami poprzecznymi do kierunku lotu. O odległości punktów w linii oraz odległości pomiędzy liniami w kierunku lotu decyduje dobór parametrów: częstotliwości wysyłanych impulsów laserowych, częstotliwość skanowania (liczba linii skanowania na sekundę), prędkość i wysokość lotu. Parametry te zostały tak dobrane, aby zachować równomierny rozkład punktów w terenie, tj. odległość punktów w linii skanowania jest w przybliżeniu równa odległości linii w kierunku lotu. Przy zachowaniu tych parametrów średnia odległość punktów wyniosła 0,24 m dla wysokości lotu 270 m oraz 0,30 m dla 500 m.

Punkt laserowy to fizycznie ślad promienia laserowego w terenie. Promień ten ma pewną rozbieżność, co daje w terenie plamkę o kołowym kształcie w części nadirowej i eliptyczną plamkę na brzegu pasa skanowania. Dla parametrów lotu jak w projekcie i maksymalnego kąta skanowania $\alpha=30^\circ$ rozmiar plamki wyniósł:

1. dla wysokości lotu 270 m – w nadirze około 8,1 cm i na brzegu 10,9 cm w kierunku skanowania oraz 9,4 cm w kierunku lotu,
2. dla wysokości lotu 500 m – w nadirze około 15 cm i na brzegu odpowiednio 20,0 cm, i 17,3 cm.

Powyższe dane odnoszą się do kształtu plamki w terenie na poziomej powierzchni. Dla powierzchni nachylonej ślad będzie odpowiednio większy. Oba parametry, tj. rozkład punktów laserowych na powierzchni terenu i wielkość śladu terenowego plamki laserowej, mają kluczowe znaczenie dla możliwości identyfikacji i pomiaru szczegółów terenowych, szczególnie elementów infrastruktury kolejowej o małych gabarytach.

Wraz ze skanowaniem laserowym z wysokości 500 m wykonane były zdjęcia kolorowe kamerą cyfrową Hasselblad o wielkości matrycy CCD 50 Mpx. Wielkość terenowego piksela tych zdjęć wynosiła około 7 cm. Zdjęcia poddano automatycznej aerotriangulacji, ortorektyfikacji oraz wytworzono na ich podstawie uproszczoną ortofotomapę

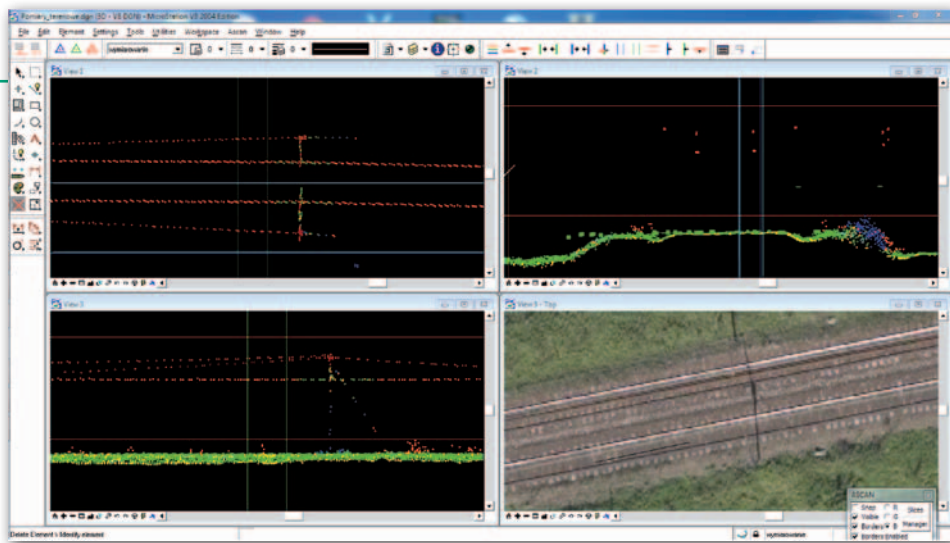
(tzw. *quick ortho*). Uproszczenie polegało na tym, że nie była mierzona połowa osnowa (fotopunkty) dla tych zdjęć. Ortorektyfikację przeprowadzono na podstawie punktów zidentyfikowanych na istniejącej ortofotomapie z pikselem 0,25 m oraz NMT pozyskanym ze skanowania LiDAR. Wygenerowano w ten sposób ortofotomapę z pikselem terenowym 0,12 m. Jej dokładność lokalizacyjną, uwarunkowaną dokładnością istniejącej ortofotomapy, która posłużyła za osnowę, można ocenić na około $\pm 0,50-0,70$ m (błąd średni).

Wytworzona ortofotomapa stanowiła „szkic” pozwalający interpretować punkty laserowe oraz lokalizować je względem obiektów terenowych. Nie była natomiast materiałem referencyjnym w rozumieniu odniesienia geometrycznego dla punktów laserowych.

• Metodyka pomiaru infrastruktury na chmurach punktów laserowych

Prace w zakresie identyfikacji oraz pomiaru położenia obiektów zostały wykonane w oprogramowaniu ASCAN firmy Astragis. Program jest „nakładką” na MicroStation v8 i może obsługiwać duże pliki z chmurami punktów zapisanymi m.in. w najbardziej znanym formacie LAS. ASCAN został wyposażony w wiele funkcji pozwalających na sprawne i szybkie wyświetlanie całego obiektu bez konieczności dzielenia na mniejsze fragmenty. Przestrzeń robocza na ekranie monitora podzielona jest na 4 okna – widoki. Typowy układ tych widoków prezentuje rysunek 3. Zrzut dotyczy wizualizacji trakcji kolejowej. Trzy z tych okien prezentują chmurę punktów w różnych widokach (w rzucie na trzy prostopadłe płaszczyzny), czwarty to widok fragmentu ortofotomapy. Punkty laserowe są wizualizowane w kolorze. Kolor – zależnie od potrzeb – może oznaczać wysokość punktów lub ich przynależność do klasy, zgodnie z przeprowadzoną klasyfikacją.

W oknach wyświetlane są punkty laserowe tylko z pewnego zakresu przestrzeni, ograniczonego przez dwie równoległe płaszczyzny, stanowiącego „plaster” wyświetlanych punktów. Zakres grubości i położenia „plastrów” można zmieniać, ograniczając wyświetlane punkty do tych, które są przedmiotem zainteresowania i pomiaru. W oknach, oprócz punktów laserowych, są zwizualizowane przestrzennie pomierzone w terenie punkty tachymetryczne. Dodatkowo, układ współrzędnych wyświetlanych widoków może być dowolnie zmieniany, zależnie od potrzeb, np. wzdłuż to-



Rys. 3. Typowy układ widoków na zrzucie ekranowym

rów (oś OX), w poprzek torów (oś OY) i w kierunku pionu (oś OZ).

• Ocena niwelacji szyn

W procesie opracowania danych lidarowych pomierzono na chmurach punktów wysokości główek szyn w miejscach odpowiadających pomiarowi terenowemu. Dotyczyło to danych pozyskanych z obu wysokości lotu, tj. 270 m i 500 m. Sam pomiar nie nastąpił problemowo.

Analiza wyników wskazuje, że wysokości uzyskane z chmur punktów są nieco wyższe od pomierzonych w terenie. Dla wysokości lotu 270 m ta różnica wyniosła średnio 0,044 m dla metody RTK i 0,025 m dla niwelacji geometrycznej. Dla wysokości lotu 500 m te różnice wyniosły odpowiednio 0,024 m i 0,007 m. Wskazuje to na obecność niewielkiego czynnika systematycznego we wszystkich seriach pomiarowych. Ta składowa systematyczna dla wyższego pułapu lotu jest nieco mniejsza od występującej na niższym pułapie. Trudno jest zinterpretować stwierdzony czynnik systematyczny ze względu na jego niewielką wartość. Można byłoby oczekiwać, że pomiary na chmurze punktów laserowych dadzą wysokości nieco niższe od pomierzonych w terenie ze względu na duży ślad plamki laserowej w terenie, która uderzając w główkę szyny, odbija się od niej, ale część energii odbija się również od podkładu leżącego poniżej, co sumarycznie może nieco obniżyć uzyskaną wysokość. Stwierdzone niewielkie różnice nie upoważniają do zbyt daleko idących wniosków. Natura danych lidarowych jest taka, że pewna składowa systematyczna może w nich wystąpić. Tak uwidocznia się szczerkowe błędy nawiązania do stacji referencyjnych czy błędy określenia wysokości płaszczyzn referencyjnych.

W obu przypadkach zwraca uwagę mały rozrzut wyników (różnic wysokości), co świadczy o wewnętrznej spójności danych na całej długości odcinka kole-

jowego. Dzieje się tak pomimo nawiązywania pomiarów terenowych do różnych stacji ASG-EUPOS (pomiar RTK) oraz różnych reperów wysokościowych (niwelacja). To pośrednio świadczy o prawidłowości pomiarów terenowych oraz wyrównania danych skanerowych (georeferencji danych LiDAR).

Reasumując, wyniki wskazują na bardzo duży potencjał danych lidarowych w zakresie niwelacji szyn oraz szerzej – pomiarów wysokościowych elementów infrastruktury kolejowej, o ile ich rozmiar pozwala na pomiar na chmurze punktów. W przypadku szyn pomiar ten jest dobry dla obu wysokości lotu i odpowiadającym im gęstościom punktów laserowych.

• Pomiar na chmurze

Identyfikację i pomiar obiektów na chmurze prowadzono dla danych z obu wysokości lotu, tj. chmurach o gęstości 18 pkt/m² i 11 pkt/m². W praktyce dane z niższego pułapu (o większej gęstości) okazały się bardziej przydatne dla identyfikacji i pomiaru elementów infrastruktury i szczegółów sytuacyjnych. Dotyczy to szczególnie obiektów o mniejszych rozmiarach.

Każdy obiekt był wizualizowany i mierzony na widokach (zrzutach ekranowych). Dla obiektu zwartego i małego starano się na chmurze zidentyfikować pikietę (punkt laserowy) reprezentujący ten obiekt, a następnie pomierzyć odległość pomiędzy tą pikietą a wyświetlonym punktem odpowiadającym pomiarowi terenowemu. W przypadku obiektu mającego wyraźne krawędzie, jak np. brzeg peronu, ściana budynku, pomiar terenowy odnoszono nie do najbliższej pikiety laserowej reprezentującej obiekt, lecz do krawędzi interpretowanej z wielu punktów. Pozwala to na dokładniejszą lokalizację krawędzi. Dotyczy to również narożników (peronu, budynku). Narożniki takie interpretowane są w pierwszej kolejności poprzez lokaliza-

cję na chmurze dwóch krawędzi obiektu, których przecięcie daje położenie szukanego punktu (narożnika).

Przy identyfikacji i pomiarze pomocna była hipsometria (mapa wysokości punktów laserowych) oraz – w mniejszym stopniu – klasyfikacja punktów laserowych. Przydatna okazywała się również ortofotomapa pozwalająca z dobrym przybliżeniem lokalizować mierzonego obiekt. Przy identyfikacji obiektu (czy jego mierzonego elementu) pomocne były zdjęcia naziemne wykonywane podczas pomiaru terenowego. Mimo tych możliwości części obiektów nie można było zidentyfikować na chmurach punktów, szczególnie obiektów bardzo małych lub niewyróżniających się wysokością z otoczenia.

• Wnioski z opracowania

Przeprowadzone eksperymenty pozwalają wyciągnąć liczne wnioski dotyczące zakresu przydatności skaningu laserowego do opracowania map kolejowych.

1. Z punktu widzenia potrzeb kolejnictwa optymalną porą wykonania lotniczego skaningu laserowego byłaby pora bez liści na drzewach. To w krajowych warunkach oznacza okres jesienno-zimowo-wiosenny, tj. od około października do końca kwietnia, wyłączając dni zalegania śniegu. Niezachowanie tego terminu (np. naloty w porze letniej) oznaczać będzie zmniejszenie gęstości punktów laserowych w terenie pod drzewami. Tego wymogu nie należy jednak traktować zbyt rygorystycznie, przy zalecanej gęstości punktów laserowych oraz rejestracji Full Waveform promień przebija się przez liście drzew i dociera do powierzchni ziemi, dzięki czemu – choć z utrudnieniem – opracowanie jest wciąż możliwe.

2. Szlak kolejowy jest zwykle kryty pojedynczym szeregiem LiDAR. Taka konstrukcja jest „słaba” geometrycznie i dla prawidłowej georeferencji danych lidarowych wymagana jest szczególna troska o właściwie dobrane i pomierzone płaszczyzny referencyjne.

3. Podczas terenowego pomiaru obiektów infrastruktury kolejowej bardzo ważne jest dokumentowanie mierzonych szczegółów i ich elementów tak, aby zagwarantować ich identyfikację na chmurze punktów lidarowych. Pomocne są tu zdjęcia naziemne uzupełniające tradycyjne dokumenty pomiarowe oraz obecność podczas prac terenowych osoby włączonej do opracowania (pomiarów na stacji fotogrametrycznej).

4. Sprawą o fundamentalnym znaczeniu jest odnalezienie mierzonego szcze-

gółu na chmurze punktów zobrazowanego często w postaci pojedynczych punktów laserowych. Pomocna okazuje się tu ortofotomapa (*quick ortho*). Doświadczenie pokazuje, że przydatność ortofotomapy byłaby jeszcze większa, gdyby jej rozdzielczość była wyższa (mniejszy piksel terenowy).

5. Analiza wyników pokazuje, że dokładność pomiaru obiektów na chmurze punktów wynosi średnio (błąd średni): błąd sytuacyjny $\pm 0,11$ m, błąd wysokościowy $\pm 0,13$ m. Jest to wysoka dokładność. Należy jednak dodać, że części obiektów nie dało się pomierzyć z powodu zbyt małych gabarytów (niektóre elementy armatury kolejowej) lub braku wyróżnienia wysokościowego z otoczenia (np. przejazd drogowy). Dodatkowo podana dokładność pomiaru jest nieco zawyżona z tego powodu, że pomiarowi na chmurze podlegały obiekty pomiarzone wcześniej w terenie. Obserwator na stacji fotogrametrycznej dokładnie wiedział, gdzie szukać obiektu na chmurze punktów. W warunkach realnych nie ma takiej „podpowiedzi”. Bez zdjęcia lotniczego oraz pomiaru w terenie szansa na zidentyfikowanie niektórych obiektów jest mała. Stosunkowo najtrudniej jest pomierzyć obiekt „punktowy” odwzorowany pojedynczym punktem laserowym (lub kilku punktami), np. ażurowy słup.

6. Przewody napowietrzne są dobrze widoczne bez względu na ich grubość. Możliwy jest pomiar geometrii przewodów i zwisów. Przewody pozwalają również na identyfikację położenia słupów i masztów.

7. Dysponowano dwoma komplectami danych LiDAR o gęstości 18 pkt/m² i 1 pkt/m². Bardziej przydatna okazała się wyższa gęstość pozyskana z niższego pułapu (270 m). Różnica dawała się odczuć przy pomiarze małych obiektów. Gęstość miała mniejsze znaczenie przy identyfikacji i pomiarze obiektów dużych (budynki, wiaty, perony). Doświadczenie pokazało, że gęstość 18 pkt/m² pozyskana z pułapu 270 m może być rekomendowana do przyszłych podobnych prac.

• Rekomendacje

Wyniki opracowania wskazują na dużą przydatność lotniczego skaningu laserowego dla pomiarów przestrzennych obiektów infrastruktury kolejowej i szczegółów sytuacyjnych w pasie kolejowym oraz opracowania numerycznych kolejowych map 3D. Należy jednak mocno podkreślić, że dane ze skaningu nie są ciągłe, tylko dyskretne, w formie odizolowanych punktów przestrzennych o współrzędnych x, y, h (tzw. chmur

punktów). Stwarza to określone trudności identyfikacji i pomiaru obiektów. Próba wytworzenia mapy sytuacyjno-wysokościowej dla celów projektowych o pełnej treści z takich danych byłaby bardzo czasochłonna i obciążona błędami wykazanymi powyżej.

Nie należy więc postrzegać lotniczego skaningu laserowego jako głównego – i tym bardziej jedyne – źródła danych dla tworzenia map numerycznych 3D. Pod tym względem łatwiejsze w opracowaniu są tradycyjne zdjęcia lotnicze o odpowiednio dużej rozdzielczości (piksel terenowy około 0,05 m). Zdjęcia takie mają jednak wiele ograniczeń, jak: duża zależność od warunków meteorologicznych czy maskowanie obiektów pod drzewami, wiatami. Autorzy opracowania postrzegają lotniczy skaningu laserowy jako technikę pomiarową komplementarną do zdjęć lotniczych. Dodatkową zaletą skaningu i przewagą nad zdjęciami jest możliwość tworzenia precyzyjnego numerycznego modelu terenu (NMT), również w terenie zalesionym.

Pomiary dla potrzeb kolejnictwa, a w tym mapy dla celów projektowych, są bardzo wymagającymi opracowaniami zarówno pod względem zasobu ich treści, jak i dokładności. Wszelkie działania mające na celu zmniejszenie zakresu kosztownych prac terenowych mają sens ekonomiczny. Przy obecnych kosztach prac fotolotniczych (zdjęcia oraz LiDAR) połączenie tych dwóch technik pomiarowych jest uzasadnione.

Na tym tle interesujące byłoby dodatkowe wykorzystanie skaningu mobilnego dostarczającego dane pozyskane z przejazdu platformy skanującej wzdłuż szlaku, nawet ze znaczną prędkością (rzędu 80 km/h). Pozwoliłoby to zarejestrować (i pomierzyć) obiekty niewidoczne z powietrza (pod wiatami, okapami, w tunelach itp.). Pojawiły się już rozwiązania pozwalające na łączenie – na etapie opracowania – danych skaningu lotniczego i mobilnego skaningu naziemnego.

Dr hab. Zdzisław Kurczyński
Artur Adamek
Krzysztof Bratusz

Zespół Rzeczoznawców SGP

Podziękowanie

Autorzy wyrażają podziękowanie Biuru Nieruchomości i Geodezji Kolejowej PKP PLK S.A. oraz Stowarzyszeniu Geodetów Polskich za umożliwienie realizacji opracowania, MGGP Aero Sp. z o.o. za szczególne potraktowanie prac fotolotniczych, a Tomaszowi Kundzierewiczowi za współpracę na etapie georeferencji danych LiDAR