

Doświadczenia spółki Fotoraporty w wykorzystaniu bezzałogowych statków powietrznych

# Wzdłuż dróg i kolei

Geodezyjna obsługa inwestycji liniowych stawia przed geodetami liczne wyzwania. Jest poligonem doświadczalnym dla technologii optymalizujących wiele zadań pomiarowych, w tym dla fotogrametrii.

**Adam Salach, Jan Sawicki,  
Michał Choromański,  
Karolina Woźniak**

**W** nalotach fotogrametrycznych nad obiektami liniowymi świetnie sprawdzają się bezzałogowe statki powietrzne (BSP). Są przydatne zarówno w cyklicznych pomiarach niewielkich fragmentów placu budowy, jak i inwentaryzacjach wielkoobszarowych inwestycji w bardzo krótkim czasie. BSP w dużo mniejszym stopniu niż samoloty załogowe są ograniczane przez warunki meteorologiczne i trudną do przewidzenia aktywność w różnych strefach przestrzeni powietrznej. Misje bezzałogowe daje się łatwo dostosować do tych warunków m.in. poprzez dobór odpowiedniej platformy, zwiększenie liczby dronów wykonujących nalot czy start w optymalnym momencie.

W spółce Fotoraporty przygodę z technologią bezzałogową rozpoczęliśmy w 2014 roku, a przez kolejne lata rozwijaliśmy działalność w obszarze geoinformatyki. Obecnie świadczymy usługi z zakresu pozyskiwania, przetwarzania i udostępniania danych przestrzennych. Fotogrametria niskopulapowa pozostała jednak ważną częścią naszej działalności.

W niniejszym artykule podzielimy się naszymi doświadczeniami z wykorzysta-

tania BSP w zakresie wsparcia geodezyjnej obsługi budowy na przykładzie dwóch inwestycji. Pierwszą jest modernizacja linii kolejowej nr 7 Warszawa – Lublin na odcinku Dęblin – Lublin, dla której w 2018 roku pozyskiwaliśmy cyklicznie dane fotogrametryczne. Drugą analizowana inwestycja to budowa drogi ekspresowej S8 od węzła Marki do węzła Kobyłka (fot. powyżej); tutaj nadal realizujemy obsługę fotogrametryczną.

Oba przedsięwzięcia łączy to, że ich wykonawcy w pewnym momencie odstąpili od dalszej realizacji prac, pozostawiając inwestora z pustym placem budowy. W przypadku linii kolejowej naszym zleceniodawcą był inwestor, czyli PKP PLK, a głównym zadaniem – inwentaryzacja placu budowy na potrzeby rozliczeń z podwykonawcami i przygotowania nowego przetargu. Na budowie drogi ekspresowej we współpracy z zaprzyjaźnioną firmą geodezyjną Geozet z Siedlec świadczymy usługi dla nowego wykonawcy – spółki Strabag.

## • Zanim przystąpimy do nalotów

BSP nie jest narzędziem pomiarowym samym w sobie – to wyłącznie nośnik sensora, w naszym przypadku kamery. Wobec tego parametry jakościowe i dokładnościowe opracowań fotogrametrycznych uzyskanych na podstawie zdjęć z drona i platform załogowych zależą od tych samych czynników. Nie

wolno o tym zapominać zarówno na etapie przygotowania prac terenowych i fotolotniczych, jak i podczas przetwarzania danych obrazowych.

Planując naloty fotogrametryczne, zawsze dobieramy parametry zdjęć do konkretnych potrzeb i charakterystyki danego zadania (rozmiaru i kształtu obszaru do obfotografowania czy struktury przestrzeni powietrznej). Jeżeli chodzi o rozdzielczość terenową (Ground Sampling Distance, GSD), to nasze opracowania prawie zawsze mieszczą się w przedziale od 1 do 5 cm. Oczywiście im mniejszy piksel, tym większe możliwości interpretacyjne zobrazowań lotniczych.

Jednocześnie pogoń za coraz niższym GSD może mieć negatywny wpływ na wyniki aerotriangulacji (szczególnie wysokościowej) lub niepotrzebnie zwiększać liczbę koniecznych do zamarkowania w terenie fotopunktów. Należy pamiętać, że większość opracowań fotogrametrycznych jest z góry obciążona kilkucentymetrowym błędem wynikającym z nawiązywania do fotopunktów lub uzyskania georeferencji przy użyciu metody GNSS RTN (za pomocą odbiornika zamontowanego na dronie). W opisywanych pracach pozyskaliśmy zdjęcia lotnicze o GSD = 3 cm, co zazwyczaj jest kompromisem między szczegółowością i dokładnością opracowania a kosztem pozyskania danych fotolotniczych.





Rys. 1. Pole testowe wykorzystywane do kalibracji kamer cyfrowych

Dla zapewnienia jak najwyższej jakości dostarczanych przez nas produktów wykonujemy kalibrację wszystkich wykorzystywanych kamer. W ubiegłym roku w siedzibie naszej firmy założyliśmy specjalistyczne pole testowe (rys. 1). Składa się ono z kilkudziesięciu znaczków fotogrametrycznych, których położenie wyznaczaliśmy w drodze ścisłego wyrównania przestrzennego wielokrotnych obserwacji tachimetrycznych z dokładnością do 0,2 mm.

## ● Inwentaryzacja

Plac budowy linii kolejowej nr 7 o powierzchni około 20 km<sup>2</sup> był przez nas cyklicznie monitorowany w ramach większego zlecenia. To właśnie dzięki często aktualizowanym produktom fotogrametrycznym inwestor odpowiednio wcześniej odkrył brak postępów prac. Po przerwaniu inwestycji spółka PKP PLK oczekiwała odwzorowania stanu budowy na materiale fotograficznym, na bazie którego następnie przygotowaliśmy szczegółowy raport inwentaryzacyjny. Mimo że zrealizowaliśmy już wiele mniejszych opracowań w ramach tego przedsięwzięcia, to ten ostatni nalot był dla nas nie lada wyzwaniem. Decyzja o jego przeprowadzeniu zapadła niemal z dnia na dzień, a dane fotolotnicze musiały zostać pozyskane w jak

najkrótszym czasie. Zaangażowaliśmy siedmiu niezależnych operatorów UAV, co pozwoliło na zebranie w ciągu zaledwie 2 godzin całości materiału dla linii o długości 70 km w 300-metrowym pasie.

Wynik naszych prac, czyli raport inwentaryzacyjny (rys. 2), obejmował m.in.:

- 235 580 m<sup>3</sup> materiałów sypkich składowanych na 363 hałdach różnicowanej wielkości,
- 6,798 mln sztuk betonowych prefabrykatów peronowych w ponad 100 lokalizacjach,
- 311 sztuk szpul kabli w 25 lokalizacjach,

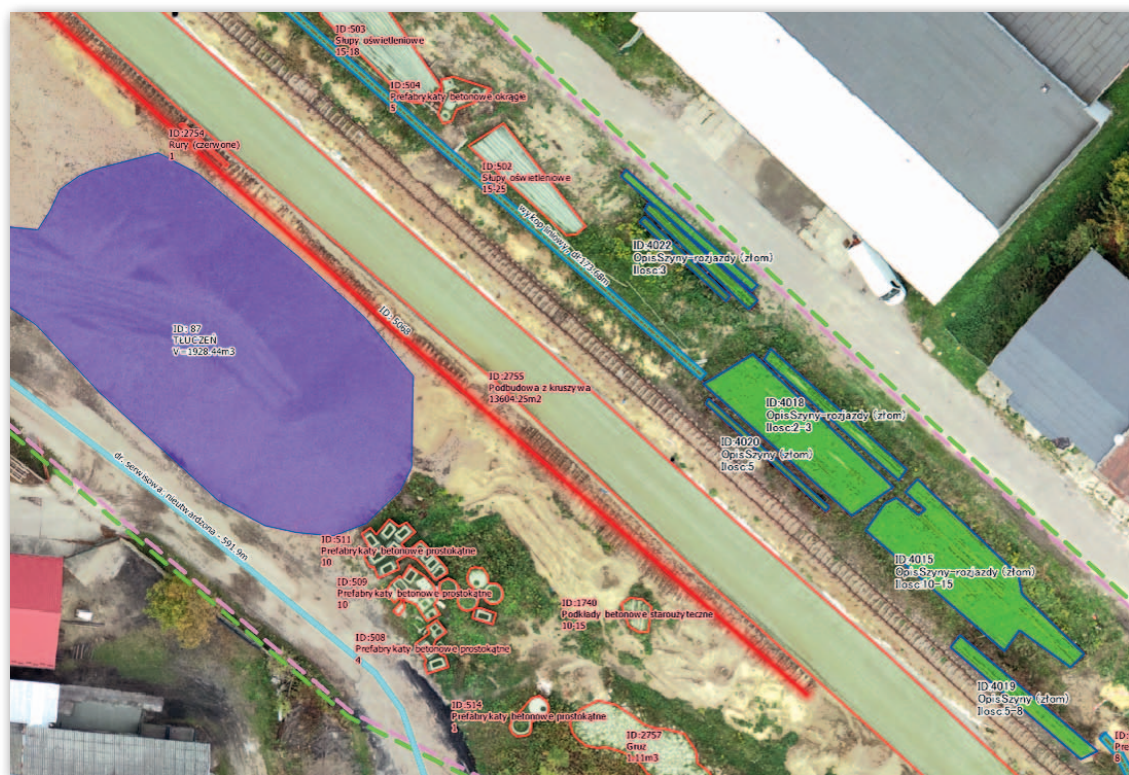
- 503 m<sup>3</sup> wyciętego drewna w 35 lokalizacjach,
- 1198 sztuk prefabrykowanych fundamentów słupów trakcyjnych w 200 lokalizacjach,
- 197 liniowych wykopów o łącznej długości prawie 18 km.

Poszczególne obiekty były inwentaryzowane na podstawie ortofotomapy, numerycznego modelu terenu, gęstej chmury punktów uzyskanej z dopasowania obrazów lub stereoskopowo. A ponieważ obiektów były tysiące, opracowaliśmy na potrzeby tego zlecenia wiele autorskich rozwiązań informatycznych automatyzujących pozyskiwanie danych geometrycznych i atrybutowych. Dzięki temu ograniczyliśmy liczbę błędów ludzkich do absolutnego minimum, oczywiście poddając ostateczne wyniki wnikliwej weryfikacji.

## ● Analiza metod pozyskiwania danych do NMT

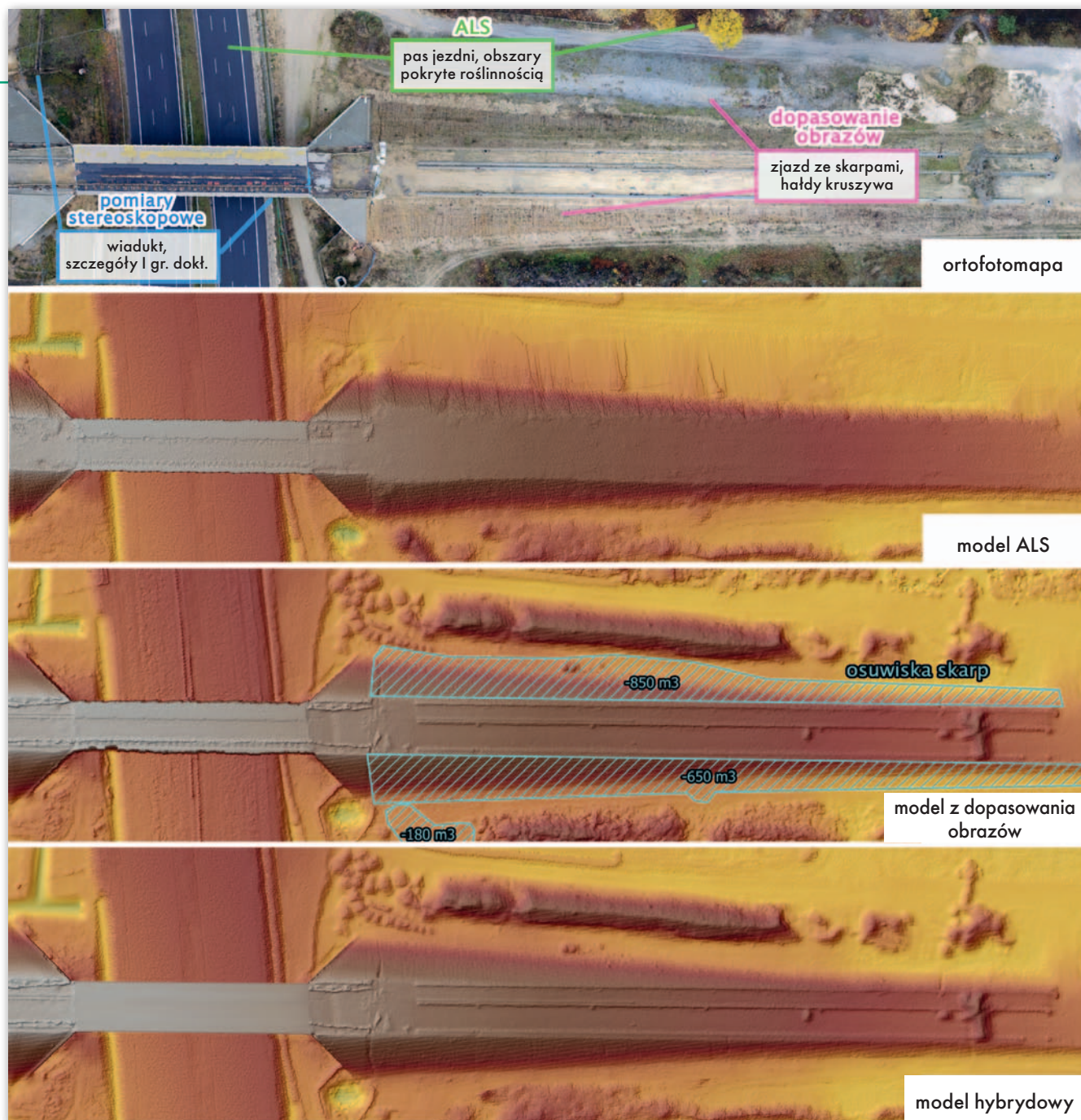
Z kolei inwentaryzacja placu budowy drogi ekspresowej, poza opracowaniem standardowej ortofotomapy (GSD = 3 cm), wymagała także przygotowania numerycznego modelu terenu. Był on następnie wykorzystywany przez projektantów generalnego wykonawcy jako rejestracja stanu zerowego, czyli zastanego w chwili przejścia placu budowy.

Prace nad modelem terenu rozpoczęliśmy od analizy porównawczej pomiarów wykonanych różnymi metodami



Rys. 2. Zinwentaryzowane obiekty placu budowy linii kolejowej nr 7 na tle ortofotomapy





Rys. 3. Ortofotomapa i modele terenu dla fragmentu obszaru opracowania

(patrz tabela na s. obok). Zestawiliśmy wysokości uzyskane z klasycznych pomiarów naziemnych, archiwalnego lotniczego skanowania laserowego (ALS) oraz własnych opracowań fotogrametrycznych (z pomiaru stereoskopowego i gęstego dopasowania obrazów). W przypadku powierzchni utwardzonych i niskiej roślinności dokładność pomiarów stereoskopowych jest porównywalna z ALS. Zestawienie błędów średnich dla niskiej i wysokiej roślinności pokazuje wyraźny spadek dokładności gęstego dopasowania obrazów względem pozostałych metod. Na terenach pokrytych wysoką roślinnością tylko dane ALS generują wyniki zbliżone do pomiarów naziemnych, natomiast próby modelowania rzeźby terenu wyłącznie na podstawie zdjęć (nawet stereoskopowo) nie przynoszą satysfakcjonujących rezultatów.

### • Model na podstawie fuzji danych

Przeprowadzona analiza pozwoliła nam na zbudowanie możliwie najdokładniejszego i najbardziej szczegółowego modelu terenu poprzez zaawansowaną fuzję danych z różnych źródeł.

Automatycznie wygenerowana z gęstego dopasowania zdjęć chmura punktów nie pozwala na uzyskanie poprawnego NMT dla terenu pokrytego roślinnością, ale sprawdzi się na otwartych przestrzeniach i utwardzonych powierzchniach. Dlatego w opracowaniu dla drogi ekspresowej chmurę ze zdjęć wykorzystaliśmy m.in. do weryfikacji aktualności danych ze skanowania laserowego na obszarach niepokrytych roślinnością. Porównanie modeli z dopasowania obrazów i ALS wykazało np. występowanie niezabezpieczonych osuwisk i niedokończonych skarp.

Bardzo pracochłonne okazało się wykonanie pomiarów stereoskopowych. Z wykorzystaniem fotogrametrycznej stacji 3D StereoCAD oraz wyrównanej sieci zdjęć pomierzyliśmy ponad 100 tys. pikiet (nie mylić z punktami wygenerowanymi automatycznie metodą gęstego dopasowania obrazów). Posłużyły one do narysowania wszystkich linii szkieletowych terenu oraz większości szczegółów I grupy dokładnościowej, zwłaszcza w bezpośrednim sąsiedztwie pasa drogowego. Dodatkowo obserwacje stereoskopowe wykorzystaliśmy do weryfikacji poprawności pozostałych źródeł danych wysokościowych.

Hybrydowy model terenu (rys. 3) wzbogacony liniami nieciągłości powstał w wyniku fuzji danych ALS, chmury punktów z gęstego dopasowania obrazów oraz obserwacji stereoskopowych. Dane



ALS wykorzystaliśmy dla powierzchni jezdni oraz obszarów pokrytych niską i wysoką roślinnością. Dla takich obiektów jak zjazdy z wiaduktów, skarpy czy hałdy kruszywa, które częściowo zmieniły rzeźbę terenu, przyjęliśmy punkty z gęstego dopasowania obrazów. Dla większości obiektów I grupy dokładnościowej (krawężniki, umocnione dna cieków, ściany oporowe itp.) zastosowaliśmy pomiar stereoskopowy.

Na podstawie opracowanych produktów fotogrametrycznych (ortofotomapy i NMT) jesteśmy w stanie wspierać zespół geodezyjny obsługujący budowę w codziennych obowiązkach, takich jak pomiary objętości mas ziemnych czy powierzchni umocnień skarp. Oczywiście wymienione produkty w razie konieczności podlegają lokalnej lub całościowej aktualizacji. Ortofotomapa, model terenu oraz obserwacje stereoskopowe są wystarczające do pozyskiwania trójwymiarowych współrzędnych większości szczegółów terenowych placu budowy.

## • Udostępnianie danych

Realizując projekty na zlecenie różnych klientów (jednostek samorządu terytorialnego, firm projektowych, wykonawców prac budowlanych, geodetów), zdajemy sobie sprawę, jak ważny jest pozornie najłatwiejszy etap zlecenia – dostarczenie danych zamawiającemu. Szczególnie w przypadku dużych inwestycji, gdzie uczestnikami procesu budowlanego jest wiele podmiotów, często zatrudniających dziesiątki pracowników, tworzenie kopii danych dla każdego z nich byłoby niezwykle uciążliwe. Spełniając oczekiwania coraz większej liczby odbiorców danych przestrzennych, poza fizyczną kopią danych (rastrów, chmur punktów, modeli 3D), dostarczamy również usługi WMS, dedykowane geoportale, rozwiązania chmurowe oraz aplikacje na urządzenia mobilne.

W przypadku opisywanych projektów dane fotogrametryczne zostały udostępnione w aplikacji webGIS, która stanowi wygodną płaszczyznę komunikacji dla inwestora, wykonawcy, projektanta oraz specjalistów z różnych branż. Dodatkowym atutem programu jest jego wersja na urządzenia mobilne (rys. 4), dzięki której z udostępnionych danych mogą

Rys. 4. Aplikacja webGIS na urządzeniu mobilnym

## Porównanie wyników pomiarów wysokościowych wykonanych różnymi metodami

| Typ obiektu       | Punkt                       | Wysokość [m]     |                      |                           |               |
|-------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|---------------------------|---------------|
|                   |                             | Pomiar klasyczny | Pomiar stereoskopowy | Gęste dopasowanie obrazów | ALS           |
| Asfalt            | 1. krawędź jezdni           | 85,29            | 85,24 (-0,05)        | 85,29 (0,00)              | 85,23 (-0,06) |
|                   | 2. krawędź jezdni           | 84,93            | 84,88 (-0,05)        | 84,88 (-0,05)             | 84,9 (-0,03)  |
|                   | 3. narożnik schodów         | 85,30            | 85,34 (+0,04)        | 85,37 (+0,07)             | 85,35 (+0,05) |
|                   | błędy średnie               | -                | 0,05                 | 0,05                      | 0,05          |
| Niska roślinność  | 4. krawędź rowu             | 84,90            | 84,85 (-0,05)        | 84,75 (-0,15)             | 84,86 (-0,04) |
|                   | 5. dół skarpy nieumocnionej | 85,00            | 85,04 (+0,04)        | 85,19 (+0,19)             | 85,06 (+0,06) |
|                   | 6. dół skarpy nieumocnionej | 85,10            | 85,16 (+0,06)        | 85,33 (+0,23)             | 85,18 (+0,08) |
|                   | błędy średnie               | -                | 0,05                 | 0,19                      | 0,06          |
| Wysoka roślinność | 7. rzędna terenu            | 85,20            | 85,46 (+0,26)        | 85,68 (+0,48)             | 85,38 (+0,18) |
|                   | 8. rzędna terenu            | 85,29            | 85,47 (+0,18)        | 85,70 (+0,41)             | 85,31 (+0,02) |
|                   | 9. rzędna terenu            | 85,35            | 85,46 (+0,11)        | 85,88 (+0,53)             | 85,38 (+0,03) |
|                   | błędy średnie               | -                | 0,19                 | 0,48                      | 0,11          |

również korzystać pracownicy terenowi, w tym geodeci.

Niejednokrotnie opracowanie metody udostępniania danych w sposób satysfakcjonujący klientów pochłania więcej czasu niż sam proces generowania produktów fotogrametrycznych. Wymaga to poszerzenia umiejętności programistycznych i tworzenia autorskich rozwiązań geoinformatycznych.

## • Umiejętne wykorzystanie

W artykule przedstawiliśmy tylko część prac, które realizowaliśmy na zlecenie inwestora, wykonawcy prac budowlanych czy zespołu geodezyjnego odpowiedzialnego za obsługę inwestycji. Niewątpliwie zdjęcia fotogrametryczne pozyskane z wykorzystaniem BSP mają duży potencjał. Jako zespół doświadczonych inżynierów staramy się uświadamiać swoim klientom, że pomiary fotogrametryczne są metodą szybką, bezinwazyjną, a w wielu przypadkach rów-

nie dokładną jak pomiary klasyczne. Duża popularność „dronowej fotogrametrii” (napędzana dostępnością coraz prostszego w obsłudze oprogramowania) może jednak doprowadzić do zrażenia się klientów do tej technologii, jeśli dostarczone produkty nie będą poparte rzetelną i profesjonalną analizą dokładności.

Jednocześnie walczymy z coraz częściej wyrażanym przekonaniem, że pomiary z wykorzystaniem dronów wyprą te naziemne praktykowane od lat. Mając świadomość istniejących ograniczeń, sądzimy jednak, że umiejętne wykorzystanie BSP na placu budowy pozwoli realizować coraz więcej zadań pomiarowych związanych z geodezyjną obsługą inwestycji, a także wiele dodatkowych usług, dotychczas niedostępnych finansowo, jak np. zliczanie składowanych materiałów.

Adam Salach, Jan Sawicki,  
Michał Choromański, Karolina Woźniak  
Fotoraporty Sp. z o.o. z Warszawy

