

# Dron w praktyce geodezyjnej

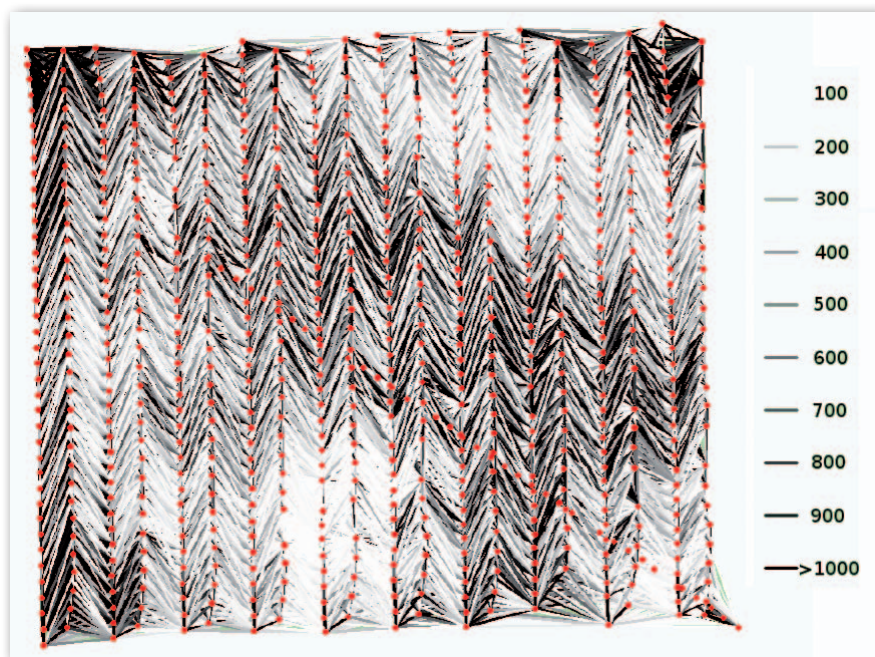
W ciągu ostatnich kilku lat bezpilotowe maszyny latające (UAV) zrobiły w teledetekcji błyskawiczną karierę, a zobrażenia lotnicze stały się dostępne jak nigdy dotąd. Na ile jednak dane z nich mogą być przydatne w pracy geodety?

Krzysztof Bosak,  
Łukasz Filipowski,  
Tomasz Maik

**Z**alążki nowej technologii pojawiły się wraz z powstaniem lotnictwa i fotogrametrii lotniczej. Już przed I wojną światową zbudowano pierwsze bezzałogowe samoloty, ale okazały się one nieudane, zatrzymując rozwój lotnictwa bezzałogowego na wiele lat. Kolejne próby i wdrożenia miały miejsce podczas II wojny, a najsłynniejszym ich rezultatem była latająca bomba V-1. Do przełomu XX i XXI wieku lotnictwo bezzałogowe kojarzyło się jednak wyłącznie z wojskiem.

Przejęcie tej technologii do świata cywilnego zajęło dużo czasu, a powodów było wiele: wysokie koszty, wysoka awaryjność, duże rozmiary sprzętu itd. Postęp przyniosła końcówka lat 90. XX w., kiedy to opracowano pierwsze miniaturowe autopiloty oparte na sensorach MEMS. W tym właśnie czasie w wielu ośrodkach akademickich naukowcy i firmy z branż nowych technologii zaczęły pracować nad małymi, cywilnymi samolotami bezzałogowymi. Od razu wskazali oni fotogrametrię lotniczą jako jedno z zastosowań latających robotów.

W teorii sprawa wyglądała prosto, jednak praktyka okazała się bardziej skomplikowana. Zdjęcia z małej wysokości pokrywają znacznie mniejszy teren, więc musi być ich znacznie więcej. Aparaty fotograficzne, które mieszczą się na ma-



Rys. 1. Automatycznie znalezione sieci powiązań pokazują ponad tysiąc wspólnych punktów pomiędzy najbliższymi sąsiadami z użyciem zdjęć zaledwie 10 Mpx [1]

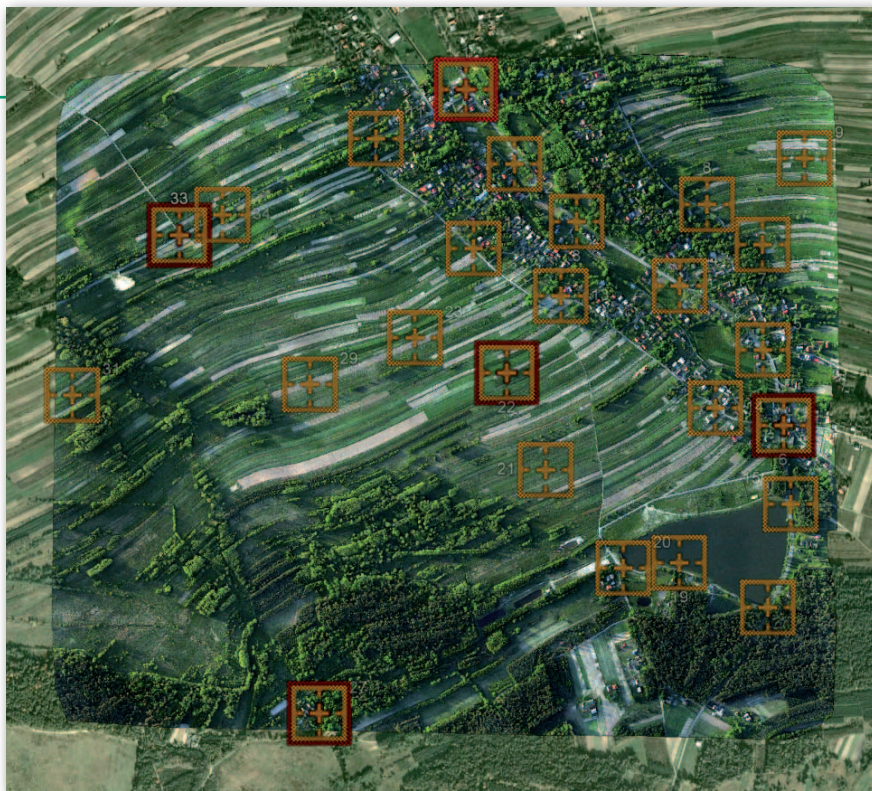
łych bezpilotowcach, mają prostą optykę, więc obrazy są zniekształcone. Kolejnym wyzwaniem jest mała stabilność platform w powietrzu (w końcu to nieduże obiekty, którymi rzuca wiatr) i relatywnie niska dokładność sensorów MEMS w określaniu współrzędnych aparatu.

Problemy te, w połączeniu z brakiem metod obróbki obrazu z UAV, powodowały zniechęcenie wśród niektórych specjalistów od fotogrametrii. Pojawiło się sporo wątpliwości, a nawet uprzedzeń wobec tej technologii. Sytuacja zmieniła się w ostatnich 5 latach wraz z postępem w tworzeniu systemów obróbki danych wykorzy-

stujących zalety materiału zdjęciowego pozyskanego z małego bezpilotowego samolotu.

W pracach nad nowymi systemami opracowania ortofotomap i samolotami bezzałogowymi do pozyskiwania zdjęć brała udział polska firma Trigger Composites. Jej specjaliści opracowali samolot Pteryx UAV wraz ze specjalnie zaprojektowanym autopilotem do zadań fotogrametrycznych (Flexipilot). Na bazie jej doświadczeń w 2012 r. powstała spółka Fotomapy, która jest jednym z pierwszych w Europie operatorów autonomicznych robotów aerofotogrametrycznych.





Rys. 2. Rozmieszczenie fotopunktów na ortofotomapie Grodziska Dolnego. Kolorem czerwonym zakreślono 5 wybranych fotopunktów spośród 25. Obszar objęty mapą: 2,2 x 2,2 km. Widoczna wysoka głębia tonalna pozwalająca np. na identyfikację gatunków drzew

## • Jak to działa?

Odpowiedź jest prosta: podobnie jak naloty fotogrametryczne z klasycznych samolotów, ale z kilkoma istotnymi różnicami. Na początku zamawiający musi określić wymagany obszar misji i dane techniczne ortofotomapy. Następnie trzeba tak zaplanować nalot, by zdjęcia miały odpowiednie pokrycie poprzeczne i podłużne oraz by można było osiągnąć żądaną rozdzielczość przestrzenną. Po wykonaniu nalotu zdjęcia należy za pomocą specjalistycznego oprogramowania uzupełnić o informacje zebrane przez autopilota (pozycja z pokładowego odbiornika GPS, kąty orientacji przestrzennej, wysokość lotu) i rozpocząć obróbkę.

Opracowanie ortofotomapy dzieli się na kilka etapów:

**1. Korekcja zdjęć.** Używając zwykłych aparatów fotograficznych, należy liczyć się z ich niedoskonałościami, które nie powinny jednak wpływać na jakość ostatecznego produktu. Dlatego wykorzystuje się dużą liczbę zdjęć, znajdując charakterystyczne, powtarzające się zniekształcenia. Odnosząc to do fotogrametrii klasycznej, można powiedzieć, że spina się zdjęcia w blok aerotriangulacji, co pozwala wyznaczyć nieznane elementy orientacji wewnętrznej (samokalibracja).

**2. Znalezienie punktów wspólnych na parach zdjęć.** Tych punktów jest zwykle kilkaset na parę obrazów, dlatego wszystkie współczesne systemy opracowania ortofotomapy dla samolotów bezzałogowych robią to automatycznie (rys. 1).

**3. Analiza wzajemnego położenia par punktów (budowanie modelu poprzez**

**dopasowanie punktów na sąsiednich zdjęciach).** Etap ten pozwala wprowadzić jednocześnie korekcję optyki i obliczyć numeryczny model terenu niezbędny do ortorektyfikacji zdjęć i zamiany ich w mapę.

**4. Związywanie tekstury ze zmodyfikowanych zdjęć z NMT (ortorektyfikacja i mozaikowanie ortozdjęć w ortoobraz).** Co istotne, obraz jest tu ściśle związany z geometrią uzyskaną w poprzednim etapie, a zaproponowane przez program linie podziału obrazu między zdjęciami można edytować ręcznie.

**5. Rzutowanie.** Program komputerowy wykonuje automatycznie rzutowanie ortogonalne uzyskanego modelu 3D.

Opisana w skrócie metoda opiera się na zdjęciach jako głównym źródle danych, a informacje z pokładowego GPS i IMU traktuje się pomocniczo. Jest to możliwe ze względu na dużą liczbę zdjęć i ich wysokie pokrycie podłużne (60-85%). W ten sposób niwelowane są wady materiału fotogrametrycznego pozyskanego z UAV.

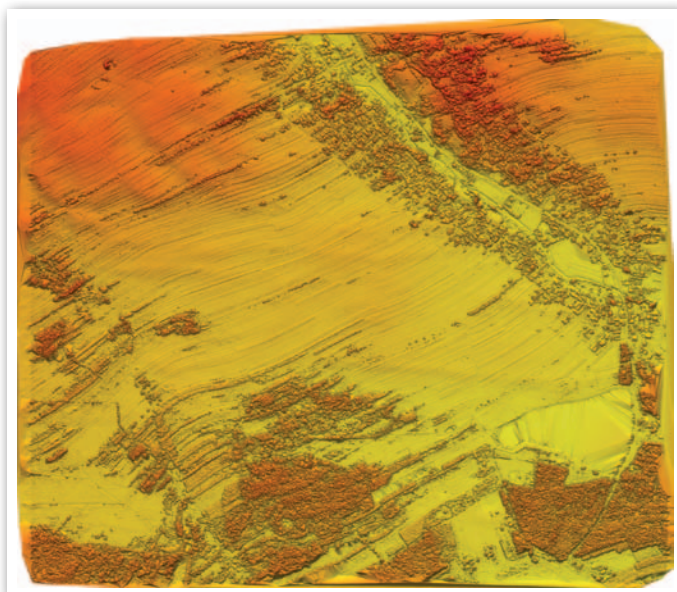
## • Możliwości

Głównym zastosowaniem fotogrametrycznych bezpilotowców są naloty na obszary o powierzch-

ni od 1 do 100 kilometrów kwadratowych. Nie chodzi tu przecież o konkutowanie z tradycyjnymi metodami czy o zastąpienie pracy geodetów. UAV należy traktować jako nowe narzędzie do pracy przy inwestycjach infrastrukturalnych, inwentaryzacji terenu, ocenie stanu środowiska, monitoringu hałd czy przy zapewnianiu bezpieczeństwa hydrologicznego. Istnieje możliwość łączenia wyników z wielu lotów lub wykonywanie mapy dla obiektów liniowych (korytarzowych) dzięki stabilizowanej głowicy sensorycznej samolotów bezzałogowych Pteryx UAV. Zakres oferowanych skal ortofotomapy (rzędu 1:500 do 1:2000) przekłada się na rozdzielczość od 5 do 20 cm.

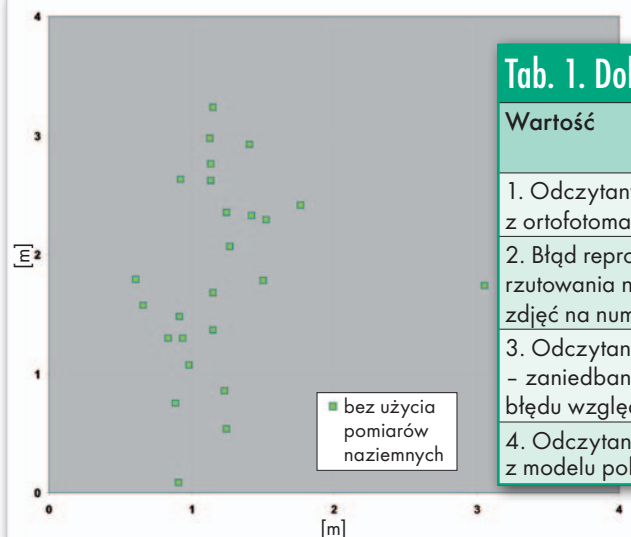
## • Analiza dokładności

W celu sprawdzenia dokładności ortofotomapy otrzymanej opisaną metodą zbadano opracowanie dla ok. 4 km<sup>2</sup> wykonane w miejscowości Grodzisko Dolne w województwie podkarpackim (rys. 2). Ortofotomapa obejmuje obszary rolnicze i zalesione oraz elementy infrastruktury drogowej i zabudowę jednorodziną. Nalot przeprowadzono w 2011 r. na wysokości 280 m. Nominalna wielkość piksela terenowego wynosi 11 cm. Ortofotomapę wygenerowano w oprogramowaniu Pix4D UAV. Do oceny dokładności użyto 25 charakterystycznych punktów w terenie (fotopunktów), które wykorzystano częściowo jako dane wejściowe, a częściowo jako punkty do oceny dokładności ortofotomapy (rys. 2). Fotopunkty pomierzyła firma EM-GEO za pomocą odbiornika Trimble SPS 882 z użyciem poprawek RTK z sieci ASG-EUPOS. Ponieważ każdy obiekt charakterystyczny mierzony był podwójnie, błąd śred-



Rys. 3. Numeryczny model pokrycia terenu dla ortofoto z rys. 2





Rys. 4. Błędy lokalizacji punktów referencyjnych

niokwadratowy (RMS) pomiaru fotopunktów był nie większy niż 3,5 cm (na późniejszym etapie obliczeń wprowadzono do analizy błąd odczytu pozycji fotopunktu – tab. 2 poz. 4 i 7). Na potrzeby analizy dokładności przyjęto trzy scenariusze: opracowanie ortofotomapy bez fotopunktów, opracowanie ortofotomapy przy użyciu wszystkich 25 dostępnych fotopunktów oraz przy użyciu 5 z nich.

## • Scenariusz A: bez fotopunktów

Zaskakująca jest dokładność modelu pokrycia terenu powstałego bez wykonywania nawet jednego pomiaru naziemnego. Wynika to stąd, iż błędy odbiornika GPS znajdującego się w UAV znoszą się wzajemnie podczas lotu w obie strony przy bardzo dobrej widoczności satelitów i kilkuset pomiarach niskiej dokładności w długim okresie. Po związaniu pomiarów ze sobą za pośrednictwem zdjęć otrzymujemy dokładności jak w tab. 1 oraz na rys. 4.

pokazuje przesunięcie w obu osiach o ok. 1-3 m dla wszystkich 25 pomiarów naziemnych. Oprócz tego w podobny sposób porównano odczyty wysokości. W ich przypadku nakładają się na siebie dwa błędy: przesunięcie mapy względem prawdziwej pozycji oraz błąd odczytu wynikający z wybrania sąsiedniego piksela podczas odczytu. Dodatkowo podano błąd reprojektacji (2), czyli geometryczną wartość błędu pozycji pikseli w stosunku do pozycji ustalonej w trakcie opracowywania ortofotomapy. Błąd ten informuje, jak dokładnie dane „pasują do siebie”. Z analizy jego wartości wnioskujemy, że zdjęcia pasują bardzo dobrze, co potwierdza obserwację, że tak uzyskana mapa jest geometrycznie wewnętrznie spójna, ale jej zewnętrzna dokładność jest słaba. Ponieważ błąd pozycji (1) tworzy chmurę punktów jak na rys. 4, a lot trwał ponad godzinę, co pozwoliło na uśrednienie pomiarów GPS w długim okresie, wnioskujemy, że orientacja kamery i/lub stały offset IMU odpowiadają za przesunięcie globalne o ok. 1,5 m (pozycje 1-3).

## • Scenariusz B: 25 fotopunktów

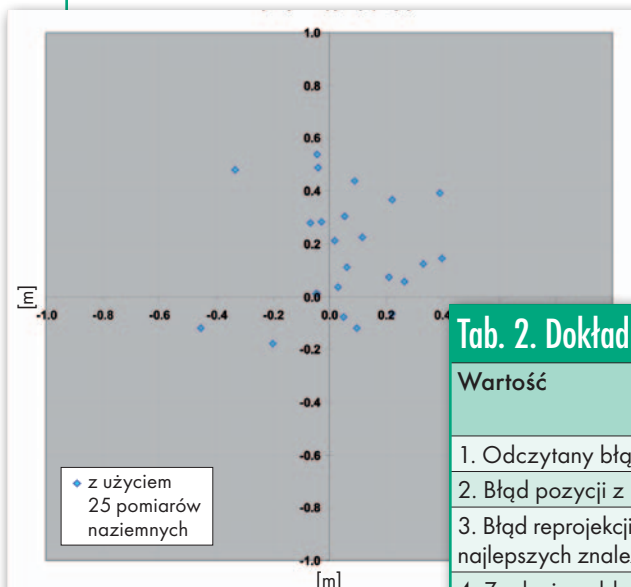
Wprowadzamy do programu wszystkie pomiary, których uprzednio użyliśmy

do weryfikacji, i zszytujemy mapę. Na rys. 5 i w tab. 2. widać, że podczas opracowywania mapy zadane pozycje osiągnęły z dokładnością prawie 1 piksela. Można powiedzieć, że program opracowania mapy zadziałał jak interpolator. W tym przypadku system użył punktów naziemnych jako danych wejściowych oraz wygenerował raport dokładności dla tych punktów. Ponieważ pozycje tych punktów wciąż możemy odczytać wizualnie z mapy, tak jak poprzednio możemy określić błąd samego odczytu używanego do weryfikacji metody (1). Błąd odczytu jest niezależny od błędu powstałego z powodu sztywności systemu generującego mapę, co oznacza, że odpowiednie kwadraty błędów się sumują  $(1)^2 = (2)^2 + (4)^2$ . Tak więc sam błąd odczytu weryfikowanych przez nas wartości z mapy (4) wynosi niemalże trzy piksele terenowe, a wszystko dlatego, że mierzone są głównie słupy rzucające cienie pod koniec okresu wegetacyjnego (a więc z częściowo przykrytą podstawą).

Z pozycji (5) i (6) analogicznie określamy błąd metody odczytu wysokości (7). Wynosi on orientacyjnie 2 piksele terenowe (poziomo). Należy pamiętać, że wysokości w wygenerowanym modelu mają praktycznie nieograniczoną rozdzielczość, są bowiem wynikiem obliczeń wykonywanych podczas opracowania na pikselach terenowych z 6-12 sąsiadujących zdjęć – pojęcie rozdzielczości pionowej nie ma w tej metodzie zastosowania, gdyż jest ona bardzo wysoka, niejednorodna i trudna do oszacowania analitycznie.

Tab. 1. Dokładność ortofotomapy wykonanej bez fotopunktów

| Wartość                                                                                                                                                                                | Odchylenie stand. |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|
|                                                                                                                                                                                        | [m]               | [px teren.] |
| 1. Odczytany błąd pozycji – różnica między pozycją odczytaną z ortofotomapy i pomiaru naziemnego RTK                                                                                   | 2,44              | 23          |
| 2. Błąd reprojektacji z raportu generatora – powstaje podczas rzutowania najlepszych znalezionych pozycji przekładających się zdjęć na numeryczny model terenu                         | 0,02              | 0,21        |
| 3. Odczytany błąd pozycji po zaniechaniu offsetu całej mapy – zaniechano przesunięcia mapy przez umieszczenie wartości (0,0) błędu względnego w wartości średniej błędów bezwzględnych | 0,95              | 9           |
| 4. Odczytany błąd wysokości – różnica między pozycją odczytaną z modelu pokrycia terenu i pomiaru naziemnego RTK                                                                       | 1,5               | 14          |



Rys. 5. Błędy lokalizacji punktów referencyjnych

Tab. 2. Dokładność ortofotomapy wykonanej z użyciem 25 fotopunktów

| Wartość                                                                                                                                    | Odchylenie stand. |             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|
|                                                                                                                                            | [m]               | [px teren.] |
| 1. Odczytany błąd pozycji                                                                                                                  | 0,36              | 3,3         |
| 2. Błąd pozycji z raportu generatora                                                                                                       | 0,16              | 1,5         |
| 3. Błąd reprojektacji z raportu generatora – powstaje podczas rzutowania najlepszych znalezionych pozycji przekładających się zdjęć na NMT | 0,017             | 0,16        |
| 4. Znaleziony błąd odczytu pozycji z ortofotomapy z (1) i (2)                                                                              | 0,32              | 2,9         |
| 5. Błąd wysokości z raportu generatora                                                                                                     | 0,28              | 2,6         |
| 6. Odczytany błąd wysokości – różnica pomiędzy pozycją odczytaną z modelu pokrycia terenu i pomiaru naziemnego RTK                         | 0,36              | 3,3         |
| 7. Znaleziony błąd odczytu wysokości z NMT z (6) i (5)                                                                                     | 0,23              | 2,1         |

**Tab. 3. Dokładność ortofotomapy wykonanej z użyciem 5 fotopunktów**

| Wartość                                               | Odchylenie stand. |             |
|-------------------------------------------------------|-------------------|-------------|
|                                                       | [m]               | [px teren.] |
| 1. Odczytany błąd pozycji                             | 0,48              | 4,4         |
| 2. Błąd reprojektacji z raportu generatora            | 0,015             | 0,14        |
| 3. Znany błąd metody odczytu pozycji – scenariusz B   | 0,32              | 2,9         |
| 4. Stwierdzony błąd pozycjonowania mapy z (1) i (3)   | 0,36              | 3,3         |
| 5. Odczytany błąd wysokości                           | 0,61              | 5,5         |
| 6. Znany błąd metody odczytu wysokości – scenariusz B | 0,23              | 2,1         |
| 7. Stwierdzony błąd wysokości mapy z (5) i (6)        | 0,56              | 5,1         |

### • Scenariusz C: 5 fotopunktów

Tym razem użyjemy 5 punktów pomiarowych na powierzchni jako danych do systemu generowania map: cztery w rogach i jeden w centrum mapy. Natomiast 25 punktów zostanie odnalezionych na mapie w celu porównania ich z dokładnymi pomiarami naziemnymi i stworzenia globalnej statystyki, nawet tam, gdzie żadne dane nie zostały dostarczone bezpośrednio (rys. 6, tab. 3). Ponieważ mapa obejmuje obszar ok. 2 x 2 km, odległości pomiędzy poszczególnymi punktami naziemnymi wynoszą aż 1 km.

### • Porównanie scenariuszy

Znamy błąd weryfikacji, a zatem eliminujemy jej wpływ i podsumujemy wyniki (tab. 4.). Należy przy tym pamiętać, że przykład z 5 punktami posiada właściwości weryfikacji krzyżowej, tzn. większość punktów użytych do stwierdzenia dokładności (20 spośród 25) nie była danymi wejściowymi. Dane uzyskane dla 25 punktów są zgodne z danymi twórców różnych systemów opracowania map, którzy generalnie deklarują błąd RMS ok. 1-2 pikseli w poziomie i ok. 3-5 pikseli w pionie. Wyniki te można zatem przeliczyć dla dowolnej rozdzielczości mapy, uzyskując lepsze lub gorsze dokładności metryczne, co też wykorzystujemy podczas planowania nalotów. Ponieważ obszar objęty mapą to ok. 2 x 2 km, wnioskujemy, że dokładności jak w scenariuszu dla 5 punktów uzyskujemy przy rozmieszczeniu punktów referencyjnych co ok. 1 km, a jak w scenariuszu dla 25 punktów – średnio co 400 m. Dla potrzeb tego testu nie wykładano znaków charakterystycznych na ziemi, a pomiary GPS przeprowadzono ponad rok po wykonaniu nalotu.

### • Wnioski

Bezpilotowce nie zastępują pomiarów naziemnych. Są raczej efektywnym sposobem na dostarczenie wiarygodnych danych pomiędzy pojedynczymi pomiarami naziemnym GPS, nawet na odległościach kilkusetmetrowych. Użycie naziemnych pomiarów satelitarnych lub innych technik z interwałem co 50 m jest teoretycznie możliwe, lecz niejednokrotnie dostęp do mierzonych obiektów bywa utrudniony, co z punk-

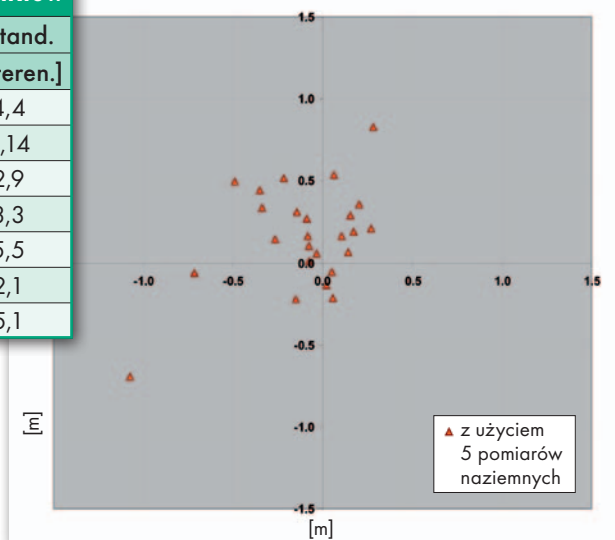
tu widzenia wykonawcy jest uciążliwe. Dodatkowo w przypadku UAV czas pomiaru jest nieporównywalnie krótszy niż przy zastosowaniu metod tradycyjnych. Dużo większa jest również ilość informacji, jakie uzyskujemy (barwa, wysokość obiektów oraz elementy, jakie zostałyby zgeneralizowane przy tradycyjnym pomiarze). Metoda ta nadaje się także dla takich obiektów jak autostrada czy linia kolejowa.

Jednocześnie możliwe są pomiary objętości, nawet w terenie niedostępnym, jak bagno czy płonąca hałda, ponieważ geometria obiektów względem podłoża jest zachowana nawet przy braku pomiarów naziemnych. Nie bez znaczenia jest również to, że tego rodzaju materiał kartograficzny może być wykorzystywany jako narzędzie kontroli. Za pomocą powtarzalnych pomiarów możemy monitorować zmiany ukształtowania terenu (np. na budowie dróg, w kopalniach kruszywa czy na składowiskach materiałów).

Z punktu widzenia zamawiającego korzystne jest wykonanie materiału kartograficznego, który w celu podwyższenia dokładności może zostać ponownie przetworzony w przyszłości z użyciem pomiarów naziemnych. Przykładem zastosowania jest mapa rejestrująca zmiany realizowanej inwestycji.

Z punktu widzenia geodezji jako dziedziny dostarczającej nie tylko opracowań kartograficznych, ale również wszelkiego rodzaju analiz i obliczeń (szczególnie w toku obsługi budowy czy przygotowania materiałów przedprojektowych), zastosowanie tego rodzaju map i pomiarów jest rewolucyjne. Do tej pory na taki kartometryczny materiał mogły sobie pozwolić jedynie duże przedsiębiorstwa. Wy-

Rys. 9. Porównanie błędów lokalizacji fotopunktów dla rozważanych scenariuszy obróbki danych



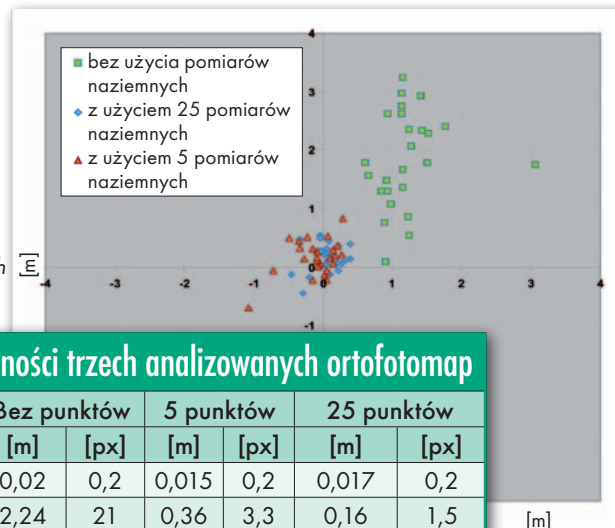
Rys. 6. Błędy lokalizacji punktów referencyjnych

magalo to sporych wydatków, co jednocześnie sprawiało, że technologia ta była nieopłacalna dla mniejszych inwestycji. Dokładności mapy uzyskane z bezpilotowców wg różnych producentów oprogramowania są na poziomie 1-2 pikseli terenowych w poziomie i 3-5 w pionie [2] [3] [4]. Przytoczone pomiary potwierdzają te wnioski dla sprzętu i oprogramowania używanego przez firmę Fotomapy.

mgr Krzysztof Bosak,  
mgr inż. Tomasz Maik,  
Fotomapy Sp. z o.o.  
mgr inż. Łukasz Filipowski,  
Kadex Geodezja Polska Sp. z o.o.

#### Literatura

- [1] Raport dokładności systemu Pix4D: [uav.pix4d.com/media/examples/ex5\\_new/output/gpsreport.pdf](http://uav.pix4d.com/media/examples/ex5_new/output/gpsreport.pdf);
- [2] Kung O., Strecha C., Beyeler A., Zufferey J.-C., Floreano D., Fua P., Gervais F.: The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery, „UAV-g 2011 – Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics”, Zürich, 2011;
- [3] Harwin S., Lucieer L.: Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, „Remote Sensing”, nr 4/2012, s. 1573-1599;
- [4] Stoermer P., Dronemapper Pinery Country Club accuracy assessment: <http://dronemapper.com/node/126>.



**Tab. 4. Porównanie dokładności trzech analizowanych ortofotomap**

| Błąd średniokwadratowy | Bez punktów |      | 5 punktów |      | 25 punktów |      |
|------------------------|-------------|------|-----------|------|------------|------|
|                        | [m]         | [px] | [m]       | [px] | [m]        | [px] |
| reprojektacji          | 0,02        | 0,2  | 0,015     | 0,2  | 0,017      | 0,2  |
| pozycji                | 2,24        | 21   | 0,36      | 3,3  | 0,16       | 1,5  |
| wysokości              | 1,5         | 13,7 | 0,56      | 5,1  | 0,28       | 2,6  |

[m]