

Modelowanie 3D obiektów budowlanych z wykorzystaniem drona

Creating 3d models of buildings using a drone



Dr inż. Wiesław Mika^{*)}



Mgr Andrzej Ferenc^{*)}



Inż. Sławomir Czaja^{*)}

Treść: Bezzałogowe statki powietrzne, nazywane potocznie dronami, od kilku lat znajdują coraz szersze zastosowanie w sferze cywilnej, w tym także w budownictwie. Dron umożliwia inwentaryzację i kontrolę stanu technicznego obiektów budowlanych, do których jest utrudniony dostęp lub części obiektów, niewidocznych lub słabo widocznych z poziomu terenu. W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania drona do modelowania 3D obiektów budowlanych. Zdjęcia obiektów wykonane z drona i opracowane na ich podstawie modele 3D pozwalają na dokładne udokumentowanie stanu technicznego wszystkich zewnętrznych elementów konstrukcji i wykończenia badanych obiektów. Przedstawiono zasady i wymagania dotyczące prowadzenia prac badawczych przy użyciu drona. Przedstawiono także możliwości programu Agisoft Photoscan Professional, który został wykorzystany do budowy modeli badanych obiektów budowlanych oraz ocenę dokładności zastosowanej metody modelowania w porównaniu do skanowania laserowego.

Abstract: Unmanned Aerial Vehicles, commonly known as drones, have been increasingly used in the civil sphere, including the construction industry, for a few years now. They make the stocktaking of building objects and undertaking a comprehensive survey of technical standards much more accessible, especially regarding the parts of the buildings with difficult access or those, which are not visible from the ground level. The article presents examples of using a drone for 3D modeling of building objects. Photographs of objects made by drone and 3D models developed on their basis allow obtaining accurate documentation of the technical condition of all external elements of the construction and finishing of the examined objects. There have also been presented the rules and requirements for conducting research works using a drone. Moreover, the article describes the capabilities of the Agisoft Photoscan Professional software, which was used to build models of examined buildings and an assessment of the accuracy of the modeling method compared to laser scanning.

Słowa kluczowe:

obiekt budowlany, dron, fotogrametria, modelowanie 3D, szkody górnicze

Keywords:

construction object, drone, photogrammetry, 3D modeling, mining damage

1. Wprowadzenie

Bezzałogowe statki powietrzne (ang. *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV), nazywane potocznie dronami, od kilku lat znajdują coraz szersze zastosowanie w sferze cywilnej (Chan 2015). Skala możliwości związanych z użyciem drona sprawia, że może on stanowić niezwykle pomocne narzędzie badawcze także w branży budowlanej (Szruba 2017). Dron może być wykorzystany do badań fotogrametrycznych obiektów budowlanych, które pozwalają na odtworzenie kształtu, rozmiarów i wzajemnego położenia obiektów w terenie na podstawie wykonanych zdjęć (Kostka 2014). Dron umożliwia inwentaryzację i kontrolę stanu technicznego obiektów

budowlanych, do których jest utrudniony dostęp lub części obiektów słabo widocznych z poziomu terenu.

W artykule przedstawiono przykłady wykorzystania drona do modelowania 3D obiektów budowlanych. Przedstawiono zasady i warunki wykonywania badań fotogrametrycznych przy użyciu drona. Omówiono możliwości programu Agisoft PhotoScan Professional, który został wykorzystany do budowy modeli oraz ocenę dokładności zastosowanej metody modelowania w porównaniu do skanowania laserowego.

2. Badania obiektów budowlanych przy użyciu drona

Do badań fotogrametrycznych modelowanych obiektów budowlanych został wykorzystany dron firmy DJI, model

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Phantom 4 Advanced (rys. 1). Dron jest wyposażony w niemetryczną kamerę z całą matrycą o rozdzielczości 20Mpix i polu widzenia FOV 84°, 8.8 mm/24 mm (ekwiwalent 35 mm). Umożliwia ona uzyskanie zdjęć formatu JPEG, DNG (RAW) w formacie 4/3 o rozdzielczości 4864x3648 pikseli i 10 bitowej głębi. Czulość matrycy ISO mieści się w przedziale 100 - 12800. Mechaniczna migawka umożliwia naświetlanie zdjęć w czasie od 8s - 1/2000s (DJI ...2017).

Modelowanie obiektów przy użyciu drona wymaga odpowiedniego przygotowania. Przed przystąpieniem do badań z użyciem drona należy dokładnie zaplanować trajektorię jego lotu, uwzględniając wszelkie przeszkody terenowe oraz czynniki, które mogą wpłynąć na jakość zdjęć. Badania dronem nie mogą stwarzać zagrożenia dla ludzi i mienia.

Operator drona musi posiadać odpowiednie uprawnienia. W Polsce jest wymagane Świadectwo Kwalifikacji wydawane przez Urząd Lotnictwa Cywilnego (Prawo ...2002) oraz aktualne ubezpieczenie od odpowiedzialności cywilnej. Na niektórych obszarach (strefach) użycie drona wymaga zgody organu zarządzającego. Ważne jest, aby badania dronem były wykonywane w dobrych warunkach pogodowych, tj. przy jak najmniejszych podmuchach wiatru i w warunkach braku opadów deszczu lub śniegu. Ma to duży wpływ na optykę aparatu i jakość wykonywanych zdjęć (krople wody na obiektywie dyskredytują późniejsze użycie zdjęć). Warto też sprawdzić Indeks KP, który określa aktywność promieniowania słonecznego, które wynika ze zwiększonej aktywności Słońca. Zbyt wysoka aktywność może zakłócić działanie modułu GPS, który służy do pozycjonowania drona, co z kolei może wpłynąć negatywnie na stabilność lotu i zakłócić działanie funkcji: Fail-safe, czyli awaryjnego powrotu drona do miejsca startu w wyniku utraty zasięgu lub uszkodzenia aparatury sterującej.

Podczas badań dronem należy stosować możliwie jak najkrótszy czas naświetlania zdjęć. Ogranicza to efekt rozmycia obrazu i w znaczący sposób poprawia jakość uzyskanych tekstur.

Podczas badań danego obiektu należy wykonywać zdjęcia rzędami, które zawierają co najmniej 8 zdjęć dookólnych, w zależności od kształtu i wysokości obiektu. Pełne pokrycie zdjęciami badanych powierzchni obiektu oraz jego otoczenia pozwala na uzyskanie odpowiedniej jakości modelu.

3. Przetwarzanie dokumentacji fotograficznej z drona

Do budowy modeli w oparciu o dokumentację fotograficzną z dokonanych nalołów dronem został wykorzystany program Agisoft PhotoScan Professional (Agisoft ...2018). W programie tym zakres prac związanych z przetwarzaniem zdjęć na finalny produkt obejmuje:

- definiowanie projektu wraz z wczytaniem zdjęć,
- georeferencję zdjęć metodą dopasowania obrazów (proces: *align photo*),
- tworzenie gęstej chmury 3D punktów metodą dopasowania obrazów (proces: *dense surface reconstruction*),
- budowę siatki trójkątów modelu obiektu – model szkieletowy (proces: *build mesh*),
- teksturowanie siatki modelu 3D (proces: *textured model*),
- udostępnianie produktów finalnych z opcją do standardowych formatów danych geoprzestrzennych (np. ortofotomozaiki, NMT, fotorealistyczny model 3D).

Przetwarzanie danych w programie PhotoScan (Agisoft ...2018) rozpoczyna się od utworzenia projektu i importu zdjęć cyfrowych z folderu wskazanego na dysku lub bezpośrednio z karty pamięci drona. Program sekwencyjnie tak dobiera kolejne zdjęcia, aby tworzyły stereogramy i docelowo zespół zdjęć, który będzie podlegał opracowaniu. Odczytywane są również metadane zdjęć osadzone w formacie Exif. Dane Exif zawierają parametry ogniskowej obiektywu kamery, którą sporządzono zdjęcia i dane geolokalizacyjne (GPS/INS). Program wykorzystuje te dane do utworzenia metryki kalibracji kamery i wprowadzenia przybliżonych parametrów orientacji zewnętrznej zdjęć w wybranym układzie odniesienia. Następnym etapem jest opracowanie zespołu zdjęć, wykorzystując algorytmy dopasowania obrazu na etapie odtwarzania georeferencji tych zdjęć oraz tworzenia gęstej chmury punktów obiektu i otaczającego go terenu. Podczas samokalibracji zdjęć niemetrycznych wykorzystujemy dodatkowe dane w postaci ich zarejestrowanych elementów orientacji zewnętrznej GPS/IMU (ang. *inertial measurement unit* - jednostka nawigacji inercyjnej) oraz ewentualne lokalizacje widocznych fotopunktów. Program umożliwia także wzajemne powiązanie zdjęć w jednolity blok, nawet wtedy, gdy nie posiadamy żadnych danych dodatkowych (tzw. wyrównanie



Rys. 1. Dron Phantom 4 Advanced
Fig. 1. Phantom 4 Advanced drone

swobodne – proces *generic*). Zarejestrowane pozycje zdjęć w systemie GPS pozwalają obliczyć pierwotną georeferencję w układzie odniesienia WGS 84. Docelowo wtórna georeferencja jest wyznaczana w przypadku zdjęć lotniczych w Państwowym Układzie Współrzędnych Geodezyjnych PUWG 2000 lub 1992. Program posiada bogatą bibliotekę algorytmów przeliczeniowych z układu WGS 84 do danego odwzorowania kartograficznego stosowanego na opracowywanym obszarze. Zawiera ona ponad 50 odwzorowań dla różnych krajów, w tym Polski. Dodatkowo przeliczenia rejestracji GPS dokonuje się wybierając docelowy układ odniesienia z listy oferowanej przez program. Dla opracowania zdjęć bliskiego zasięgu należy wybrać układ lokalny, który jest równoznaczny z przestrzennym układem ortometrycznym. Oczywiście układ odniesienia, w jakim ma być wyznaczana georeferencja zdjęć, musi być zdefiniowany przed rozpoczęciem obliczeń. W aplikacji wszystkie etapy opracowania danych fotogrametrycznych można realizować ręcznie, korzystając z interfejsu użytkownika lub automatycznie skryptami wsadowymi. W przypadku przetwarzania wsadowego uzyskujemy prawidłowe dane finalne, opracowując zdjęcia z zestawów rejestracyjnych z powtarzalną charakterystyką orientacji wewnętrznej i zewnętrznej zdjęć. Dla takich zestawów zdjęć możemy przyporządkowywać parametry sterujące procesem przetwarzania wyznaczone we wcześniejszych obliczeniach. W zależności od sposobu przeprowadzenia georeferencji program pozwala na utworzenie produktów finalnych o zróżnicowanej dokładnościowo charakterystyce geometrycznej (względnej i bezwzględnej). Realizując obliczenia w opcji *generic* modelujemy kształt zarejestrowanego obiektu bez jego lokalizacji w zewnętrznym układzie odniesienia. Typowym produktem o zróżnicowanej geometrycznie dokładności wzajemnej i bezwzględnej będzie ortofotomapa sporządzona

na podstawie zdjęć, dla których znane są jedynie pomierzone w locie środki rzutów techniką GPS/IMU.

Oprogramowanie Photoscan posiada szereg dodatkowych narzędzi dla obsługi zdjęć zapisanych w różnych formatach, edycji automatycznie generowanych modeli czy bogatej palety formatów danych eksportowanych do innych programów. W procesie przetwarzania możemy śledzić rezultaty wykonywanych kroków programowych poprzez bieżące wyświetlanie odchyłek analitycznych fotopunktów osnowy terenowej i środkach rzutów oraz graficzną prezentację konfiguracji zespołu zdjęć oraz wyznaczonych punktów dostosowania. Program umożliwia także wygenerowanie raportu z poszczególnych etapów przetwarzania zdjęć zaimportowanych z drona (Preuss 2014).

4. Przykłady modelowania obiektów budowlanych z wykorzystaniem drona

W Głównym Instytucie Górnictwa w oparciu o zdjęcia wykonane z drona i program PhotoScan opracowano modele budynku kościoła pw. św. Mikołaja w Tarnowskich Górach przy ul. Wincentego Witosa, wieży wyciągowej dawnego szybu Krystyna w Bytomiu przy ul. Zabrzeńskiej i wieży ciśnieniowej w Katowicach-Szopienicach przy ul. Ks. Majora Karola Woźniaka. Budowle te to obiekty zabytkowe (Wybraniec 1990). Wieża wyciągowa i wieża ciśnieniowa nie są użytkowane.

Budynek kościoła pw. św. Mikołaja (rys. 2) został wzniesiony w latach 1867-71 na planie krzyża, w stylu neogotyckim. Budynek ma trzy nawy, prezbiterium od strony wschodniej i wieżę z ostrą iglicą od strony zachodniej. Posiada konstrukcję nośną mурowaną, wykonaną z białego ciosanego kamienia i cegły.



Rys. 2. Kościół pw. św. Mikołaja w Tarnowskich Górach – widok ogólny
Fig. 2. St. Nicholas Church in Tarnowskie Góry - general view

Wieża wyciągowa dawnego szybu Krystyna (rys. 3) została wzniesiona w latach 1927-29 na terenie zlikwidowanej Kopalni Węgla Kamiennego Szombierki. Wieża ma wysokość około 57 m, przekrój prostokątny i została ukształtowana w formie młota. Jest to obiekt o stalowej konstrukcji nośnej ze ścianami o konstrukcji murowanej. Elewacje wykonano z cegły klinkierowej.

Wieża ciśnień w Katowicach-Szopienicach (rys. 4) jest usytuowana na terenie zabytkowego kompleksu Huty Metali Nieżelaznych i wchodzi w skład zespołu obiektów dawnej huty cynku Uthemanna, wzniesionych w latach 1908-1912. Wieża ma wysokość około 35 m, przekrój w kształcie ośmio-kąta foremnego i posiada ścianową, żelbetową konstrukcję nośną.



Rys. 3. Wieża wyciągowa szybu Krystyna w Bytomiu – widok ogólny
Fig. 3. Krystyna lift shaft tower in Bytom - general view



Rys. 4. Wieża ciśnień Huty Uthemanna w Katowicach-Szopienicach - widok ogólny
Fig. 4. Water tower of Uthemann steel mill in Katowice-Szopienice - general view

Modele 3D rozpatrywanych obiektów budowlanych opracowane w oparciu o zdjęcia wykonane z drona przedstawiono schematycznie na rys. 5-7.



Rys. 5. Kościół pw. św. Mikołaja w Tarnowskich Górach – model 3D
Fig. 5. St. Nicholas Church in Tarnowskie Góry – 3D model



Rys. 6. Wieża wyciągowa szybu Krystyna w Bytomiu – model 3D
Fig. 6. Krystyna lift shaft tower in Bytom – 3D model



Rys. 7. Wieża ciśnień Huty Uthemanna w Katowicach-Szopienicach – model 3D
 Fig. 7. Water tower of Uthemann steel mill in Katowice-Szopienice – 3D model

5. Ocena dokładności odwzorowania modelu w porównaniu do skanowania laserowego

Generując ze zdjęć w programie PhotoScan chmurę punktów największej gęstości (proces: *ultra high*) wyznacza się numeryczne dane przestrzenne i barwę praktycznie dla każdego piksela obrazowego badanego obiektu. Uzyskana gęstość chmury jest porównywalna z chmurą uzyskaną ze skaningu laserowego (Bednarz 2016), natomiast nie jest ona tak jednorodna geometrycznie, co w sposób oczywisty wynika z różnicy procesów jej pozyskania (Greiw 2013).

Podczas badań porównano chmurę punktów uzyskaną w programie PhotoScan ze zdjęć wykonanych dla wieży wyciągowej szybu Krystyna z referencyjną chmurą uzyskaną w wyniku skaningu laserowego wieży za pomocą robotycznego tachimetru skanującego Leica MS50, ściśle wyrównaną w oparciu o osnowę geodezyjną GPS.

Szczegółowej analizie poddano przekroje wyselekcjonowane z uzyskanych chmur punktów, mierząc odchyłki w wybranych tożsamyh miejscach obiektu. Otrzymane wyniki wskazują porównywalną dokładność modelowania przy użyciu drona z chmurą uzyskaną skanerem laserowym. Największe zniekształcenia występują na krawędziach konstrukcji i w miejscach jednorodnych kolorystycznie (pokrycie dachu, jednorodnie otynkowane fragmenty ścian). Odchyłki na krawędziach konstrukcji dochodzą do 9 cm, a w miejscach jednorodnych kolorystycznie do 4 cm. Kiedy powierzchnia obiektu ma fakturę zróżnicowaną kolorystycznie (np. nieotynkowany mur z cegły), generowana jest chmura punktów o znacznie większej gęstości, niż w przypadku powierzchni jednorodnej. Zwiększa się przez to również dokładność i odchyłki mieszczą się w przedziale do 3 cm na krawędziach i do 2 cm na powierzchniach płaskich.

6. Monitoring obiektów budowlanych z wykorzystaniem drona

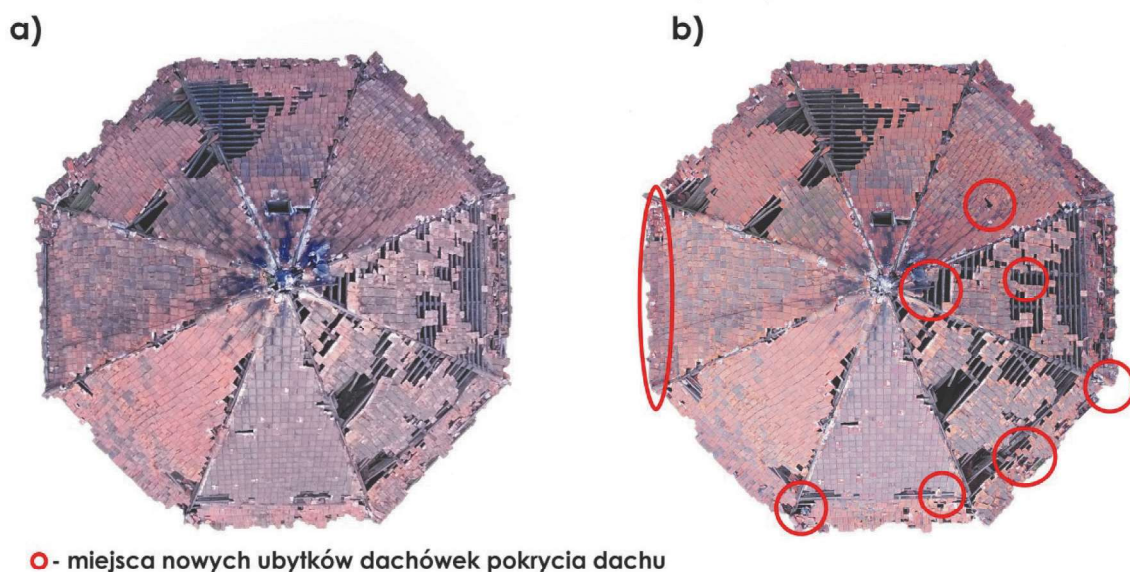
W ramach prac związanych z monitoringiem obiektów budowlanych wykonuje się przeglądy aktualnego stanu technicznego elementów konstrukcji i wykończenia, w tym także elewacji. Oględziny obiektów typu wieżowego oraz elewacji i dachów różnego typu budynków na ogół prowadzi się z poziomu terenu, z którego nie zawsze wszystkie części badanego obiektu są widoczne lub wyraźnie widoczne, nawet w przypadku użycia lornetki. Do niektórych obiektów lub ich części jest utrudniony dostęp. Prace związane z monitoringiem obiektów budowlanych można znacznie usprawnić poprzez wykorzystanie drona. (Szruba 2017, Mika i in. 2018).

Zdjęcia obiektów budowlanych wykonane z drona oraz opracowane na ich podstawie modele 3D monitorowanych obiektów budowlanych pozwalają na dokładne udokumentowanie stanu technicznego wszystkich zewnętrznych elementów konstrukcji i wykończenia badanego obiektu. Model cyfrowy obiektu umożliwia łatwe i szybkie wygenerowanie widoków ogólnych obiektu lub wyodrębnionych części, z hiperłączami do widoków szczegółowych, które mogą zawierać powiększone obrazy charakterystycznych miejsc i uszkodzeń konstrukcji. Modelowanie cyfrowe pozwala także na powiązanie wyodrębnionych widoków z odpowiednim komentarzem. Przykładowo na rys. 8 przedstawiono widok szczegółowy silnie uszkodzonego fragmentu ściany wieży ciśnień Uthemanna.

Analiza porównawcza modeli lub zdjęć uzyskanych z kilku nalotów dronem pozwala na szczegółową ocenę zakresu i skali zmian geometrii i stanu technicznego obiektu lub jego części. Na rys. 9 przedstawiono zmiany stanu technicznego pokrycia dachu wieży ciśnień Uthemann, które wystąpiły w okresie od 10.07.2016 do 18.04.2018 r. Miejsca nowych ubytków dachówek pokrycia dachu oznaczono na rys. 9b



Rys. 8. Widok szczegółowy fragmentu ściany wieży ciśnień Uthemann – model 3D
 Fig. 8. An example of a heavily damaged wall of the Uthemann pressure tower - 3D model



○ - miejsca nowych ubytków dachówek pokrycia dachu

Rys. 9. Zmiany stanu technicznego pokrycia dachu wieży ciśnień Uthemann:
 a) stan na dzień 10.07.2016 r., b) stan na dzień 18.04.2018 r.

Fig. 9. The technical changes in the condition of the Uthemann water tower roof:
 a) as at 10.07.2016, b) as at 18.04.2018

7. Podsumowanie

Doświadczenia z obserwacji skutków podziemnej eksploatacji górniczej w obiektach zabudowy powierzchni wskazują na duże możliwości wykorzystania drona w pracach związanych z monitoringiem obiektów budowlanych na terenach górniczych (Mika 2015, Mika i in. 2015, Mika i in. 2018). Wpływy prowadzonej eksploatacji górniczej po-

wodują deformacje i uszkodzenia obiektów, które są z reguły znacznie większe od spotykanych na terenach niegórnicych (Kawulok 2015). Niektóre uszkodzenia, np. pęknięcia ścian zewnętrznych lub innych elementów konstrukcji w górnych partiach obiektów, odspojenia tynku elewacji, uszkodzenia konstrukcji i pokrycia dachów budynków lub głowic kominów, z poziomu terenu są niewidoczne lub słabo widoczne. Uszkodzenia te mogą stwarzać zagrożenie dla bezpieczeń-

stwa użytkowania tych obiektów lub terenu w rejonie ich lokalizacji.

Zastosowanie drona umożliwia cyfrowe odwzorowanie badanego obiektu budowlanego z dokładnością zbliżoną do skaningu laserowego. Badania obiektów przy użyciu drona są znacznie tańsze od badań skanerem. Zdjęcia obiektów wykonane z drona oraz opracowane na ich podstawie modele 3D pozwalają na dokładne udokumentowanie stanu technicznego wszystkich zewnętrznych elementów konstrukcji i wykończenia. Na podstawie dokumentacji fotogrametrycznej z cyklicznych badań dronem można kontrolować zmiany geometrii i stanu technicznego obiektów i ich części w czasie. Kompleksowe i dokładne prace diagnostyczne w obiektach zabudowy powierzchni w czasie ujawniania wpływów prowadzonej eksploatacji górniczej i zalecane na ich podstawie prace naprawcze lub zabezpieczające pozwalają na uniknięcie awarii budowlanych.

Publikację wykonano w ramach działalności statutowej nr 11142028-172 Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach.

Literatura

- Agisoft 2018 PhotoScan Professional Edition. User Manual - version 1.4
- BEDNARZ Ł., JASIEŃKO J., KOGUT T., DOMINIAK Ł. 2016 - Przydatność chmury punktów do inwentaryzacji zabytku na podstawie kościoła pw. Wniebowzięcia Najświętszej Marii Panny w Nysie. „Wiadomości Konserwatorskie” nr 45, s 117-128.
- CHAN B., GUAN H., JUN JO, LUMENSTEIN M. 2015 - Towards UAV-based bridge inspection systems: a review and an application per-

spective. Structural Monitoring and Maintenance, vol. 2, no. 3/2015 p. 283-300.

- DJI 2017 Phantom 4 Advanced, Quick Start Guide v1.0,
- GREIWEA. 2013 - Auswertung von UAV-Bilddaten im Untersuchungsgebiet Bahnhof Holzminden, Geoinformatik, s. 1-17.
- KAWULOK M. 2015 - Szkody górnicze w budownictwie. Wyd. Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa.
- KOSTKA SZ. 2014 - Fotogrametria – stara technika w nowym wydaniu. „Jaskinie” nr 3(76), s. 13-14
- MIKA W. 2015 - Doświadczenia z obserwacji skutków eksploatacji górniczej w obiektach zabudowy śródmieścia Bytomia. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 3(247), s. 29-35.
- MIKA W., FERENC A., CZAJA S. 2018 - Monitoring obiektów budowlanych z zastosowaniem drona. „Przegląd Górniczy” nr 1, s. 21-26.
- MIKA W., KASZOWSKA O. 2015 - Kryteria dopuszczania eksploatacji górniczej pod terenami zabudowanymi. „Przegląd Górniczy” nr 3, s. 44-49.
- Prawo lotnicze. Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. (Dz. U z 2012r. poz. 933, z późn. zm.)
- PREUSS R. 2014 - Automatyzacja procesu przetwarzania danych obrazowych, vol.26, s.119 -127.
- SZRUBA M. 2017 - Przyszłość dronów w budownictwie. „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” nr 1(70).
- WYBRANIEC P. 1990 - Zabytki architektury przemysłowej w województwie katowickim. Centralny Ośrodek Informacji Turystycznej Oddział w Katowicach.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj 2019

Artykuł akceptowano do druku – 15 lipiec 2019