

**BADANIE GEOMETRII ZEWNĘTRZNEJ PŁATOWCA METODAMI
FOTOGRAMETRII I SKANINGU LASEROWEGO NA WYBRANYM
PRZYKŁADZIE**

**STUDY OF AIRCRAFT EXTERIOR GEOMETRY BY
PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING USING A SELECTED
EXAMPLE**

Józef Brzęczek¹, Sławomir Mikrut², Tadeusz Szczutko²

¹Zakład Wytwarzania Komponentów i Organizacji Produkcji,
Wydział Mechaniczno-Technologiczny Politechniki Rzeszowskiej

²Katedra Fotogrametrii, Teledetekcji Środowiska i Inżynierii Przestrzennej, Wydział
Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo- Hutnicza im. Stanisława
Staszica w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria, skaning laserowy, badanie geometrii, płatowiec

STRESZCZENIE: Praca ma na celu przedstawienie wyników badań wybranych metod pomiarowych tj. fotogrametrii i skaningu laserowego wykorzystywanych do badania geometryzacji płatowców. Badanie prowadzone było na wybranym płatowcu udostępnionym dzięki uprzejmości firmy Margański & Mysłowski S.A. tj. samolot typu EM 11C "Orka". Autorzy w pracy skoncentrowali się na metodach pomiarowych takich jak: dokładny pomiar geodezyjny i skaning laserowy z wykonaniem zdjęć, które pozwoliły później na uzyskanie kompleksowej i dokładnej dokumentacji. Naziemny skaning laserowy wykonany został przy pomocy dwóch niezależnych urządzeń wspartych pomiarem geodezyjnym, z bardzo precyzyjnym wyznaczeniem fotopunktów. W celu odtworzenia rzeczywistego kształtu oraz wyglądu obiektu, pozyskaną chmurę punktów pokolorowano. W wyniku pozyskania i przetwarzania danych uzyskano trójwymiarowy model obiektu, składający się z wielomilionowej chmury punktów.

1. WPROWADZENIE

Badanie geometrii płatowca jest zagadnieniem, które wiąże się z bieżącą kontrolą faktycznego stanu użytkowania danego statku powietrznego. Analiza geometrii płatowców, ich zespołów i części prowadzona była (i jest) metodami pomiarów bezpośrednich odpowiednio do rozmiarów mierzonych wielkości. Dla powierzchni i krawędzi zadawanych parametrycznie pomiary prowadzono z wykorzystaniem metody szczeliny świetlnej i szablonów kontrolnych. W artykule przeanalizowano współczesne możliwości pomiarów geometrycznych takich obiektów przy pomocy bardziej nowoczesnych i dostępnych metod i narzędzi.

Autorzy artykułu podjęli próbę opracowania prostej i skutecznej metodyki takiego badania w ramach realizowanego projektu naukowo-badawczego w Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie. Głównym celem projektu było zatem:

- wykonanie testów i analiz w zakresie określania geometrii zewnętrznej wybranego płatowca trzema niezależnymi metodami tj. geodezyjnej, fotogrametrycznej i skaningu laserowego;
- wybór jako docelowej jednej z tych metod jako szybki i dokładny pomiar (poniżej 3 mm) służący do określenia geometrii płatowca.

Wspomniana dokładność dotyczy weryfikacji płatowca pod kątem zmian geometrycznych spowodowanych np. odkształceniami plastycznymi, a określana jest mianem niwelacji (geometria zespołów) i stabilizacji (wartości wychyleń powierzchni sterowych) płatowca. Wymagania dokładności wykonania i montażu części i zespołów płatowców zwykle są wyższe i w większości przypadków lokalnie błędy nie powinny przekraczać wartości ± 0.3 mm.

W ramach projektu wykonano pomiary testowe geometrii bryły płatowca, a na ich podstawie opracowano model 3D samolotu EM 11C "Orka"¹ trzema niezależnymi metodami:

- klasyczny pomiar geodezyjny metodą biegunową,
- pomiar metodą skaningu laserowego przy pomocy dwóch niezależnych skanerów, (FARO FOCUS 3D, SURPHASER 100 HSX),
- pomiar metodą fotogrametryczną (na podstawie wykonanych zdjęć fotogrametrycznych: naziemnych - Canon EOS 5D Mark II i z drona - aparat Sony EXMOR 1/2.3).

Wykonane eksperymenty badawcze miały w głównej mierze dać odpowiedź na pytanie czy testowane metody pomiarowe dadzą zadowalające rezultaty w przypadku opracowań dotyczących obiektu takiego jak płatowiec i czy założona dokładność (3 mm) jest realna do osiągnięcia tymi technikami pomiarowymi. Dotychczasowe eksperymenty badawcze prowadzone w ośrodkach na całym świecie w dziedzinie lotnictwa (w tym pomiary bieżące i kontrolne) obejmowały pomiary części i zespołów o mniejszych wymiarach. Korzystano z metod takich jak: pomiarów bezpośrednich, pomiarów optycznych, w tym pomiarów z wykorzystaniem szczeliny świetlnej. W przypadku kontroli geometrii całego płatowca korzystano głównie z metody geodezyjnej dla zdefiniowanych punktów struktury, zwykle na bazie wybranych punktów naniesionych na zespoły płatowca na przyrządach montażowych. W geodezji dominują pomiary raczej dużych obiektów, głównie budowlanych (np. geodezja czy fotogrametria w inwentaryzacji zabytków, badania geometrii obiektów inżynierskich itp.), z założenia z dużo mniejszych wymaganiami dokładnościowych pomiarów.

Przeprowadzony przez autorów eksperyment badawczy miał za zadanie znaleźć na bazie dostępnych współczesnych metod i narzędzi, dobre rozwiązanie stosując geodezyjne metody pomiarowe, ale dla obiektów tzw. średnio-kubaturowych jakimi niewątpliwie są statki powietrzne.

¹ Badania przeprowadzono dzięki uprzejmości firmy Margański & Mysłowski S.A. z Bielska Białej, właściciela projektu i certyfikatu samolotu EM 11C „Orka”.

1.1. Przegląd literatury

Dzisiejsze techniki pomiarowe oraz metody opracowania i prezentacji wyników dają szerokie możliwości zastosowań. W literaturze pojawiają się również pozycje obejmujące geometryzację całych obiektów (czy elementów obiektów) w zależności od dokładności i konkretnych zastosowań. Ma to miejsce również w przemyśle lotniczym. W literaturze spotykamy się z przykładami wykorzystywania ogólnie pojętych metod pomiarowych do rozwiązywania różnych zagadnień związanych z badaniem geometrii różnych elementów bezpośrednio lub pośrednio związanych z przemysłem lotniczym. Pomiar bezpośrednie stykowe lub bezstykowe pozwalają na uzyskanie akceptowalnych dokładności dla wymiarów gabarytowych rzędu 2 – 5 metrów, ale z wykorzystaniem dedykowanych maszyn czy doków pomiarowych. Przykładowo publikacja ([Rychlik et al., 2011](#)), dotyczy wykorzystania inżynierii odwrotnej (tzw. *Reverse Engineering*) do modelowania 3D technikami CAD w celu przeprowadzenia badań flatterowych. Autorzy użyli w badaniach skaner optyczny światła strukturalnego o rozdzielczości pomiarowej 0.05 mm. Pomiar obejmował jednak stosunkowo niewielki gabarytowo obiekt - fizyczny model samolotu (3.3 x 2.4 l m), a przy budowie modelu numerycznego bazowano na siatce trójkątów oraz powierzchniach NURBS na podstawie krzywych szkieletowych i krzywych prowadzących. W wyniku prac otrzymano błąd rekonstrukcji geometrii modelu samolotu na poziomie +/- 0.5 mm. Jak wspomniano pomiary geometrii zespołów i części płatowców (o rozmiarach zdecydowanie mniejszych) wykonywane są najczęściej przy pomocy współrzędnościowych maszyn pomiarowych (ang. *coordinate measuring machine* - CMM), rzadziej z wykorzystaniem szablonów i metody szczeliny świetlnej, czy w zasadzie już zarzuconą metodą strunową, czy z wykorzystaniem kolimatorów. Przykładowe badanie geometrii łopatki silnika można znaleźć w literaturze ([Budzik et al., 2014](#)). Autorzy wykonali badanie geometrii stosując dwa niezależne urządzenia tj. ZEISS ACCURA oraz WENZEL LH 87 właśnie typu CMM. Użyte przez autorów oprogramowanie pozwalało na późniejsze wykonanie analizy dokładności mierzonego elementu w odniesieniu do modelu nominalnego. Przy tak precyzyjnych urządzeniach i relatywnie małych wymiarach dokładności pomiaru są na poziomie kilkunastu do kilkudziesięciu mikrometrów. Takie rozwiązania są stosowane w praktyce przemysłowej. Wadą tych urządzeń jest niestety możliwość pomiaru dla elementów o relatywnie małych gabarytach.

Przy tak małych obiektach i takich urządzeniach uzyskanie dokładności pomiaru poniżej 0.1 mm nie stanowi problemu, co zostało potwierdzone i jest stosowane praktycznie oraz opublikowane w wielu pracach. W pracy [Budzik \(2010\)](#) podano wyniki badań dokładności geometrycznej łopatek silników lotniczych wytwarzanych przyrostowymi metodami szybkiego prototypowania FDM i SLA uzyskując założone dokładności.

Szerzej o technikach pomiarowych oraz współrzędnościowych maszynach pomiarowych stosowanych dla małych obiektów można znaleźć w literaturze: "Współrzędnościowa technika pomiarowa" ([Czechowicz et al., 2010](#)) oraz "Współrzędnościowe systemy pomiarowe" ([Ratajczyk & Woźniak, 2016](#)).

2. METODYKA POMIARÓW

W praktyce przemysłowej i związanej z nią literaturą, przywoływane i stosowane są w zakresie pomiaru obiektów średnio-kubaturowych (a za takie należy uważać samolot EM 11C "Orka", będący przedmiotem eksperymentów), następujące metody i narzędzia:

- a) klasyczny pomiar bezpośredni (wartość wielkości zmierzonej uzyskiwana jest bezpośrednio, bez konieczności wykonywania dodatkowych obliczeń opartych na funkcjonalnej zależności związanej z metodą lub przyrządem pomiarowym). Błędy pomiarowe definiowane są zwykle wzorami podanymi w literaturze ([Mikrut & Brzęczek, 2020](#); [Czechowicz et al., 2010](#)), co wynika wprost z zastosowanych wzorców inkrementalnych;
- b) pomiar geodezyjny optyczny, powszechnie stosowany wcześniej i obecnie w produkcji lotniczej (również z zastosowaniem instrumentów geodezyjnych laserowych) w zakresie większych wymiarów. Wielkości błędów odpowiednie do pomiarów niwelacyjnych i geometrycznych ([Wiśniewski, 2005](#));
- c) współrzędnościowe techniki pomiarowe;
- d) optoelektroniczne metody pomiarowe, które z kolei można podzielić na aktywne i pasywne.

Badania geometrii samolotu EM 11C "Orka" zostały zaprojektowane jako trzy niezależne eksperymenty pomiarowe wykonane w oparciu o ten sam zestaw fotopunktów (punktów odniesienia).

3. POZYSKANIE DANYCH

3.1 Założenie i pomiar osnowy fotogrametrycznej

Pierwszym etapem prac było odpowiednie rozmieszczenie punktów osnowy fotogrametrycznej w postaci biało-czarnych tarcz równomiernie na całej powierzchni obiektu. Następnie założono osnowę geodezyjną w lokalnym układzie współrzędnych, dokonując pomiaru rozmieszczonych tarcz (rysunek 1). Do tego celu wykorzystano tachimetr, który cechuje się wysoką dokładnością wyznaczania kątów oraz odległości.



Rys.1. Rysunek poglądowy rozmieszczenia tarcz i kul fotogrametrycznych

3.2 Pomiar współrzędnych fotopunktów

W celu wyznaczenia współrzędnych fotopunktów rozmieszczonych na kadłubie i skrzydłach samolotu założono pięć stanowisk: cztery stanowiska tworzyły ramę (nr 100-103) wewnątrz której znajdował się mierzony obiekt a punkt 99 znajdował się w osi samolotu od strony dzioba. Pomiar kierunków i długości wykonano za pomocą tachimetru Leica TS02 w trybie bezlustrowym. Z każdego stanowiska mierzono wszystkie widoczne fotopunkty i pozostałe punkty osnowy. Dla ułatwienia dalszego opracowania przyjęto lokalny układ współrzędnych tak, aby oś X była skierowana wzdłuż osi samolotu od ogona do dzioba, a oś Y wzdłuż linii skrzydeł. Jako punkt początkowy przyjęto stanowisko nr 100 co oznacza, że błąd średni położenia najdalszego mierzonego punktu będzie odpowiadał maksymalnemu błędowi długości odcinka między skrajnymi punktami.

Wyrównanie sieci wykonano za pomocą programu GEONET autorstwa prof. R. Kadaja. Przyjęto błędy średnie obserwacji:

- błąd średni kierunku $m_k = \pm 10''$,
- błąd pomiaru długości $m_d = \pm 1.9$ mm.

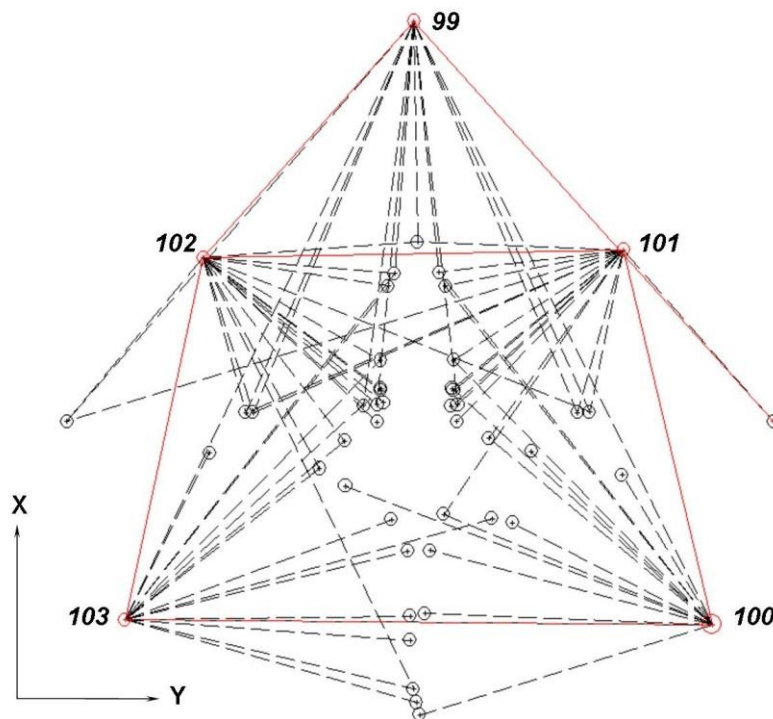
Wykorzystano dwie opcje wyrównania:

- metodę najmniejszych kwadratów (MNK);
- metodę ZWA (Zasada Wyboru Alternatywy).

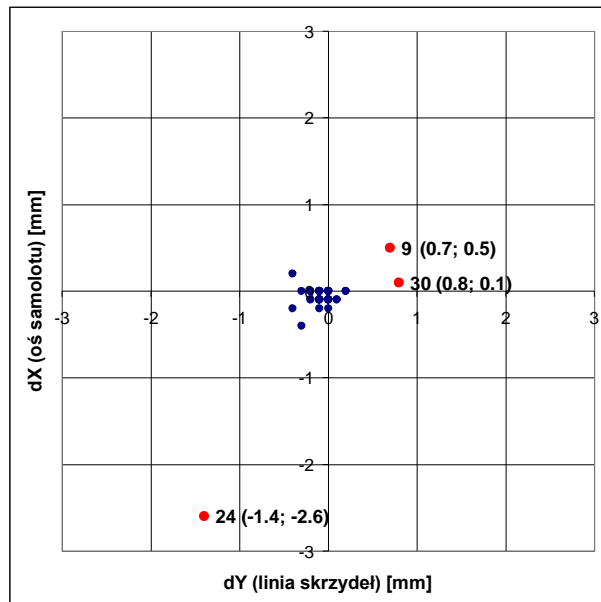
Metoda ZWA to wyrównanie z eliminacją obserwacji odstających ([Kadaj. 1978](#); [Kadaj 1988](#)). Jest to tzw. estymacja mocna zwana inaczej odporną. Wyrównanie według metody ZWA polega na iteracyjnym wyrównaniu z modyfikacją wag obserwacji po każdym procesie – obserwacje z większymi poprawkami otrzymują odpowiednio mniejsze wagi. Zatrzymanie obliczeń następuje po wykonaniu określonej przez użytkownika liczby iteracji lub po osiągnięciu odpowiedniej zbieżności wyników, czyli wtedy, kiedy zmiana

obliczanych niewiadomych nie przekroczy ustalonej wartości dx . Obserwacje odstające są skutecznie eliminowane ze zbioru danych bez pogorszenia stabilności numerycznej procesu. Do dalszego opracowania przyjęto wyniki z metody ZWA. Przeciętna wartość błędu średniego położenia punktu wynosi ± 0.3 mm przy maksymalnej wartości ± 1.4 mm. Dla oceny wiarygodności wyznaczenia współrzędnych punktów wykonano porównanie współrzędnych X_0, Y_0 (ozn. dla wyrównania ZWA), ze współrzędnymi X, Y (ozn. dla wyrównania MNK). W trakcie opracowania wyników okazało się, że różnice dX i dY mieszczą się w granicach błędów średnich m_p , tylko dla trzech punktów wyznaczonych biegunowo (bez kontroli). Różnice te są większe i wynoszą od 0.8 do 3.0 mm (wypadkowa dL) (rysunek 2). Są to punkty, gdzie powierzchnia samolotu jest ułożona ukośnie w stosunku do celowej. Porównanie takie jest istotne dla oceny wiarygodności wyznaczenia współrzędnych fotopunktów.

Wysokości punktów obliczono przyjmując wysokość osi celowej stanowiska nr 100 równą 2.000 m. Błędy średnie wysokości wyrównanych mieszczą się w zakresie $\pm (0.1 - 0.5)$ mm (rysunek 3).



Rys. 2. Szkic osnowy i pomiaru fotopunktów



Rys. 3. Graficznie przedstawienie błędów wyznaczenia współrzędnych poszczególnych fotopunktów

Problemy zauważone podczas pomiaru:

- możliwe jest wystąpienie większego błędu pomiaru długości przy celowaniu na ukośną w stosunku do pomiaru celowanego na powierzchnię kadłuba,
- duża zgodność wewnętrzna pomiaru jest możliwa do uzyskania przy jednokrotnym ustawieniu instrumentu na rozstawionych na punktach ramy statywach ze spodarkami,
- część fotopunktów była pomierzona bez kontroli tylko z jednego stanowiska, ze względu na przesłanianie przez skrzydła lub stateczniki.

3.3 Pomiar naziemnymi skanerami laserowymi oraz fotogrametryczny

Do prac zastosowano metodę pomiarową skanowania laserowego z wykorzystaniem dwóch skanerów laserowych tj. Z+F Imager 5010C oraz Surphaser 100HSX ([Jabłoński, 2013](#)). Pierwszy ze skanerów jest skanerem najwyższej klasy, wyróżnia się dużą precyzją, zakresem oraz sferycznym polem widzenia. Jego zasięg skanowania wynosi od 0.3 m do 187 m, a pole widzenia $320^{\circ} \times 360^{\circ}$. Dodatkowo posiada wbudowaną kamerę, dzięki której możliwe jest pozyskanie kolorowej chmury punktów. Jego maksymalna prędkość pomiaru wynosi ponad 1 mln punktów na sekundę. Natomiast jego dokładność pomiaru wynosi 0.2 mm na dystansie 10 m. Drugi ze skanerów ma zasięg pomiaru między 1 m a 50 m. Ponadto, nie posiada on wbudowanej kamery. Jego dokładność wyznaczenia odległości wynosi 0.7 mm na dystansie 15 m. Posiada on mniejszy zakres widzenia: $270^{\circ} \times 360^{\circ}$.

Cały płatowiec został zeskanowany z 15 stanowisk dla skanera Z+F oraz 16 dla skanera Surphaser. Stanowiska zostały rozlokowane równomiernie wokół badanego obiektu. Przed pomiarem, rozmieszczono 11 kul referencyjnych na samolocie oraz w jego najbliższym otoczeniu. Tego rodzaju sygnalizacja punktów odniesienia zapewnia wysoką efektywność zastosowanej technologii pomiaru automatyzacji procesu (automatyczne rozpoznawanie kul z każdej strony). Ma to znaczenie podczas procesu wzajemnej orientacji skanów na etapie opracowywania danych. Metoda skaningu laserowego dostarczyła danych w postaci chmur punktów (tj. punktów o znanych współrzędnych oraz znanej intensywności), a w przypadku pierwszego z wymienionych skanerów kolorowej chmury punktów (dzięki wbudowanej kamerze). Produkt pozyskany w kolorze może zostać zwizualizowany w bardziej atrakcyjny sposób dla obserwatora.

Zdjęcia zostały wykonane przy pomocy lustrzanki Canon EOS 5D Mark II z obiektywem o stałej ogniskowej o wartości 12 mm celem minimalizacji liczby zdjęć. Ten model lustrzanki charakteryzuje się 21-megapikselową matrycą oraz 3-calowym wyświetlaczem LCD oraz matrycą full-frame. Obiekt został odfotografowany na 700 zdjęciach. Zostały one wykonane ze stanowisk naziemnych. Fotografie cechowały się wysokim wzajemnym pokryciem.



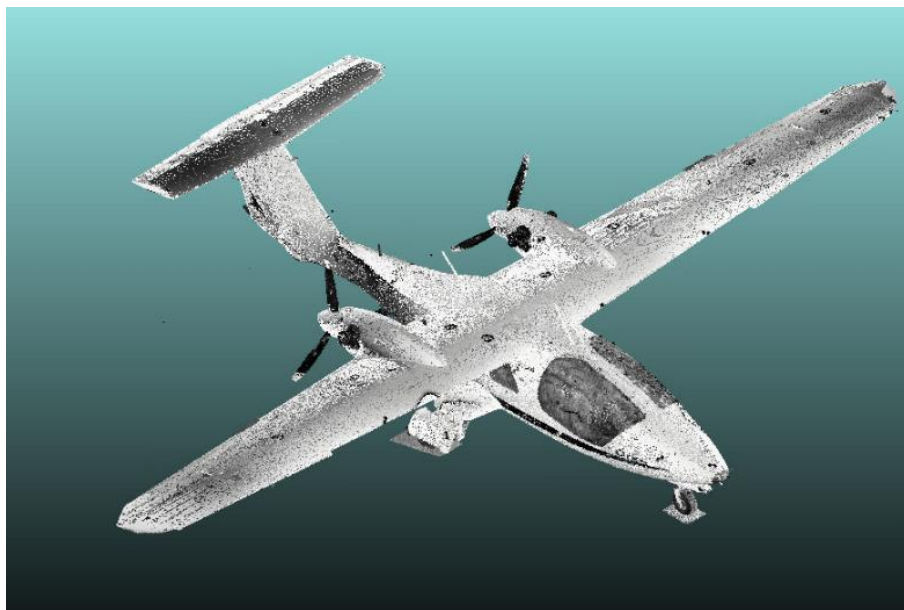
Rys.4. Rozmieszczenie skanerów w trakcie pomiaru

4. OPRACOWANIE DANYCH LASEROWYCH I FOTOGRAMETRYCZNYCH

Dane pozyskane ze skanerów laserowych zostały opracowane w oprogramowaniu *Trimble RealWorks*. To oprogramowanie umożliwia rejestrację, wizualizację, analizę i edycję chmur punktów pozyskanych przy użyciu praktycznie każdego skanera laserowego. To właśnie z jego zastosowaniem połączono pojedyncze skany w całość łącząc

je za pomocą automatycznie wykrywanych kul referencyjnych. W przypadku danych pochodzących ze skanera firmy Z+F należało w dedykowanym programie Z+F LaserControl utworzyć z wykonanych zdjęć panoramę dla każdego stanowiska skanującego. Zaimportowanie ich do programu Trimble RealWorks pozwoliło na utworzenie kolorowej chmury punktów. W wyniku łączenia skanów otrzymano średni błąd wpasowania chmur w granicy 0.5 mm dla obu skanerów.

Uzyskane chmury punktów w programie Trimble RealWorks wyeksportowano w formacie .e57 i zaimportowano do programu CloudCompare. Zredukowano w nim liczbę punktów poprzez usunięcie zbędnych danych (tj. podłoga, ściany itp.). Kolejny etap prac polegał na transformacji chmury punktów między układem lokalnym a układem związanym z osnową fotogrametryczną. Do tego celu wskazano 7 punktów tożsamyh na obu chmurach punktów. Punkty referencyjne stanowiły wybrane punkty osnowy fotogrametrycznej. Punkty wybrano równomiernie na całym kadłubie, aby geometria transformacji była jak najkorzystniejsza. Błąd transformacji wyniósł odpowiednio: 1.6 mm dla Z+F oraz 1.8 mm dla Surphaser.



Rys 5. Chmura punktów powstała ze skanera Surphaser 100HSX

5. ANALIZA WYNIKÓW

Jednym z celów prac było porównanie dokładności możliwych do uzyskania dla różnych urządzeń skanujących. Aby tego dokonać pomierzone geodezyjnie fotopunkty porównano z ich odpowiednikami na chmurze punktów pozyskanej zarówno ze skaningu jaki i fotogrametrii. W tym celu przetransformowano do wspólnego układu współrzędnych

chmury punktów pozyskane z urządzeń pomiarowych. Dla każdej chmury punktów osobno obliczono odległości fotopunktów pomierzonych geodezyjnie od punktów pomierzonych na chmurze. Do porównania wybrano 57 punktach charakterystycznych pomierzonych wcześniej metoda geodezyjną. Dla chmury punktów pozyskanej skanerem Z+F Imager 5010C uzyskano błędy RMSE 1.4 mm. Po usunięciu skrajnych 10 % uzyskano błąd RMSE o wartości 0.6 mm. Dla chmury punktów pozyskanej skanerem Surphaser 100HSX uzyskano błędy RMSE 1.8 mm. Po usunięciu skrajnych 10 % uzyskano błąd RMSE o wartości 1.0 mm. Dla chmury punktów pozyskanej aparatem fotograficznym uzyskano błąd RMSE 2 mm. Po usunięciu skrajnych 10 % uzyskano błąd RMSE o wartości 1.2 mm.

Na podstawie powyższych porównań można zauważyć, że zdecydowana większość fotopunktów znajduje się w odległości poniżej 1 mm od chmury punktów, czyli w zakresie dokładności pomiaru. Średnia kwadratowa błędów wyniosła odpowiednio 1.4 mm i 1.8 mm, a po odrzuceniu 10% skrajnych wyników 0.6 mm i 1.0 mm. Największe różnice można zauważyć na fotopunktach znajdujących się na skrzydłach samolotu. Wpływ na to mogła mieć m. in. niekorzystny kąt padania wiązki lasera.

W poniższej tabeli porównano otrzymane dokładności dla poszczególnych urządzeń pomiarowych.

Tab.1. Porównanie otrzymanych dokładności na fotopunktach dla obu skanerów oraz aparatu

	Z+F Imager 5010C	Surphaser 100HSX	Canon EOS 5D
Dokładność łączenia chmur punktów	0.5 mm	0.5 mm	0.8 mm-
Dokładność transformacji chmur punktów do wspólnego układu	1.6 mm	1.8 mm	2.1 mm
Błąd RMSE odległości fotopunktów do chmury punktów	1.4 mm	1.8 mm	2.0 mm
Błąd RMSE odległości fotopunktów do chmury punktów po odrzuceniu skrajnych 10 %	0.6 mm	1.0 mm	1.2 mm

Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że chmura punktów uzyskana z obu skanerów jest bardziej spójna i charakteryzuje się wyższą dokładnością niż z chmury punktów uzyskanej ze zdjęć fotogrametrycznych.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Celem artykułu było zaprezentowanie wyników badań polegających na testowaniu dostępnych na rynku metod do pomiaru geometrii płatowców pod kątem możliwości uzyskania wymaganych dokładności, ale jednocześnie przy stosunkowo szybkim pomiarze. Poprzednie badania autorów pokazały ([Brzęczek & Mikrut, 2017](#); [Mikrut & Brzęczek 2020](#)), że metoda geodezyjna daje co prawda wysokie dokładności, ale jest stosunkowo czasochłonna. Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, że najefektywniejsza była

metoda skaningu laserowego (stosunek czasu pozyskania danych do uzyskanej dokładności). W przeprowadzonych eksperymentach skupiono się zatem na porównaniu wybranych skanerów na testowym obiekcie jakim był samolot typu EM 11C "Orka". Badania wykazały, że przy precyzyjnie pomierzonej osnowie można uzyskać bardzo dobre rezultaty wybranymi skanerami (Z+F, Surphaser).

Uzyskane wartości błędu RMS liczone jako odległość między pomierzonymi fotopunktami a punktem pomierzonym na chmurze nie przekroczyły 2 mm co potwierdziło badania prowadzone w poprzednich latach na innych przykładach i opublikowane ([Mikrut & Brzęczek 2020](#)). Eliminując błędy skrajne (10 % punktów) można otrzymać dokładności na poziomie nawet 1 mm, co jest bardzo dobrym rezultatem, jeśli chodzi o metodykę pomiaru pod kątem badania geometrii obiektów średnio-kubaturowych.

Uzyskane rezultaty świadczą również o tym, że przyjęta metodyka może być wykorzystywana do oceny stabilności konstrukcji płatowców co było celem badań.

LITERATURA

- Brzęczek, J., Mikrut, S., (2017)., The use of photogrammetry for special flights tests. *Eksploatacja i Niezawodność*, 19(4), 597-603.
- Budzik, G., Kubiak, K., Zaborniak, M., Przeszłowski, Ł., Dziubek T., (2014). Analysis of Dimensional Accuracy of Blade of Aircraft Engine Using a Coordinate Measuring Machine., *Journal of KONES*, 21(2).
- Budzik, G., (2010), Geometric Accuracy of Aircraft Engine Blade Models Constructed By Means of The Generative Rapid prototyping Methods FDM and SLA. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 34(1), 33-43.
- Czechowicz, A., Gryboś, P., Jachimski, J., Mikrut, S., Mikrut, Z., Pawlik, P., & Tadeusiewicz, R. (2010). *Sieci neuronowe w procesach dopasowania zdjęć lotniczych*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Jabłoński R., (2013), *Laserowe Skanery pomiarowe*, OWPW Warszawa.
- Kadaj, R., (1978), Wyrównanie z obserwacjami odstającymi, *Przegląd Geodezyjny*, 8/1978, 252–253.
- Kadaj, R., (1988), *Ein Robuster Shatzer in der Deformationanalyse*, X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Munchen.
- Mikrut, S., & Brzęczek, J. (2020). Studies on external geometry of a plane with photogrammetric methods and laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 459-464.
- Ratajczyk, E., (2005). *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Wydawnictwo OWPW.
- Ratajczyk, E., Woźniak, A., (2016). *Współrzędnościowe systemy pomiarowe*. Wydawnictwo OWPW.
- Rychlik, M., Niezgódka, M., Hausa, H., Kotecki, K., (2011). Opracowanie komputerowej geometrii CAD modelu samolotu do badań flatterowych z zastosowaniem technik reverse engineering. *Prace Instytutu Lotnictwa*, 11(220), 125-134.
- Wiśniewski Z., (2005). *Rachunek wyrównawczy w geodezji (z przykładami)*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

**STUDY OF AIRCRAFT EXTERIOR GEOMETRY BY
PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING USING A SELECTED
EXAMPLE**

KEY WORDS: photogrammetry, laser scanning, geometry survey, aircraft

ABSTRACT: This paper aims to present the results of a study of selected measurement methods, i.e. photogrammetry and laser scanning, used to study aircraft geometrisation. The research was conducted on a selected aircraft made available courtesy of Margański & Mysłowski S.A., i.e. the EM 11C "Orka" type aircraft. The authors in this work focused on measurement methods such as: accurate geodetic measurement and laser scanning with taking photographs, which later allowed to obtain comprehensive and accurate documentation. The terrestrial laser scanning was carried out using two independent devices supported by the geodetic survey, with a very precise determination of the photopoints. In order to reproduce the actual shape and appearance of the object, the acquired point cloud was coloured. As a result of the data acquisition and processing, a three-dimensional (3D) solid was obtained, consisting of a multi-million point cloud.

Dane autorów/ Details of authors:

dr inż. Józef Brzęczek
e-mail: j.brzeczek@prz.edu.pl

dr hab. inż. Sławomir Mikrut, prof. AGH
e-mail: smikrut@agh.edu.pl
tel: +48 12 617 44 85

dr inż. Tadeusz Szczutko
e-mail: szczutko@agh.edu.pl

Submitted 1.12.2023
Accepted 31.12.2023

