

**Dr inż. Józef Brzęczek**

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa in. S. Pigonia w Krośnie

Instytut Politechniczny

Zakład Mechaniki i Budowy Maszyn

ul. Wyspiańskiego 20, 38 – 400 Krosno

E-mail: brzeczek@gmail.com

**Dr hab. inż. Sławomir Mikrut**

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska

Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

E-mail: [smikrut@agh.edu.pl](mailto:smikrut@agh.edu.pl)

## Wykorzystanie fotogrametrii do prób specjalnych w locie

**Słowa kluczowe:** próby w locie, fotogrametria, system odladzania, pomiary temperaturowe

**Streszczenie:** Prowadzenie prób w locie instalacji odlodzeniowych statków powietrznych w warunkach rzeczywistych lub sztucznych, oprócz pomiaru temperatury ogrzewanych powierzchni wymaga weryfikacji pracy instalacji w postaci oceny miejsc osadzania się tworów lodowych i ich rozmiarów. Do ich pomiaru w wymienionych próbach autorzy zastosowali metodę fotogrametryczną, a uzyskane wyniki zweryfikowali próbami w locie, w tym próbami certyfikacyjnymi. Zastosowanie metody fotogrametrycznej do takich analiz z przykładem przetwarzania uzyskiwanych obrazów daje podstawę do oceny jej przydatności oraz kierunków rozwoju w podobnych zastosowaniach.

### 1. Wstęp

Fotogrametria posiada szerokie zastosowanie zarówno w dokumentowaniu wielkości geometrycznych (zapisy konstrukcji), dokonywaniu pomiarów geometrycznych, badań crashowych w motoryzacji itp. Publikacja dotyczy zastosowania fotogrametrii do specyficznych badań statków powietrznych, jakimi jest potwierdzenie poprawności i niezawodności [1,3] pracy instalacji odlodzeniowej samolotu<sup>1</sup>, na poziomie akceptowalnym wymaganiami Przepisów Lotniczych, w tym konkretnym przypadku przepisów [2]<sup>2</sup>. Przedstawiona metoda fotogrametryczna dla takich specyficznych zastosowań, może być wykorzystywana pod warunkiem zachowania korelacji czasowej z pozostałymi parametrami lotu w tym atmosfery rzeczywistej<sup>3</sup>. Prezentowana w artykule metoda jest również przydatna przy okresowej weryfikacji instalacji odladzającej statku powietrznego np. po naprawie. Najważniejszą jej zaletą jest możliwość prowadzenia badań w pełnym zakresie realizowanych misji statków powietrznych tzn. od startu do lądowania. Zastosowanie innych metod rejestracji geometrii narostów lodowych i ich zmian w ruchu np. poprzez skanowanie z racji występujących dynamicznych zmian kształtu i położenia nie daje zadowalających wyników. Wspomniane, inne metody są trudne do realizacji głównie z racji wymagań sprzętowych. Metoda fotogrametryczna pozwala na wykonanie pomiarów w dowolnym momencie lotu i bez angażowania drogiego sprzętu.

---

<sup>1</sup> Dowodzenie zgodności z przepisami można prowadzić innymi metodami: np. tunele lodowe, loty w sztucznej atmosferze oblodzeniowej itp. co wprowadza błędy metody i określone warunki symulacji zjawiska

<sup>2</sup>Wymagania przepisów: CS 23. 1419 Ice protection i AMC 23.1419.

<sup>3</sup> Stosowane są dla tych celów skalibrowane sondy do pomiaru parametrów atmosferycznych takich jak: ciśnienie, temperatura, wilgotność, wodność, rozkład i wielkości kroplek wody, temperatura itp.

W publikacji przedstawiona jest analiza i dyskusja uzyskanych wyników, na podstawie przeprowadzonych badań dowodowych w zakresie poprawności pracy instalacji odlodzeniowej samolotu M28, wykonywanych w ramach współpracy AGH i PZL Mielec Sp. z o.o.[13]. Artykuł ma na celu wykazanie przydatności metody do wykrywania i geometryzacji (określenie położenia i charakterystyk geometrycznych) narostów lodowych powstających na strukturze samolotu w sztucznych lub naturalnych warunkach oblodzeniowych.

Stosowane w tego typu badaniach inne metody pomiarowe z uwagi na konieczność lądowania i związane z nimi zmiany parametrów lotu oraz zmiany wysokości i parametrów atmosferycznych powodują zmiany np. topienie oblodzenia, co istotnie zaburza ocenę pracy instalacji i wiarygodność danych dowodowych. Prezentowana metoda daje dodatkowo możliwość oceny prędkości narastania i topnienia oblodzenia na powierzchniach nieodladzanych statku powietrznego.

Przedstawione w artykule wyniki dotyczą wybranych, przeprowadzonych prób funkcjonowania instalacji odlodzeniowej oraz oceny geometrii narostów lodowych przy wykorzystaniu zaawansowanych metod analizy obrazu. Wykorzystane w artykule zdjęcia stanowią własność PZL Mielec [7].

## 2. Metodyka badań

Zaplanowany i przeprowadzony eksperyment badawczy i uzyskane wyniki stanowiły dowód poprawnej pracy instalacji odlodzeniowej samolotu. Materiałem dowodowym było udokumentowanie występowania narostów lodowych (lub ich brak) na określonych powierzchniach samolotu w locie w oblodzeniu sztucznym lub naturalnym<sup>4</sup>.

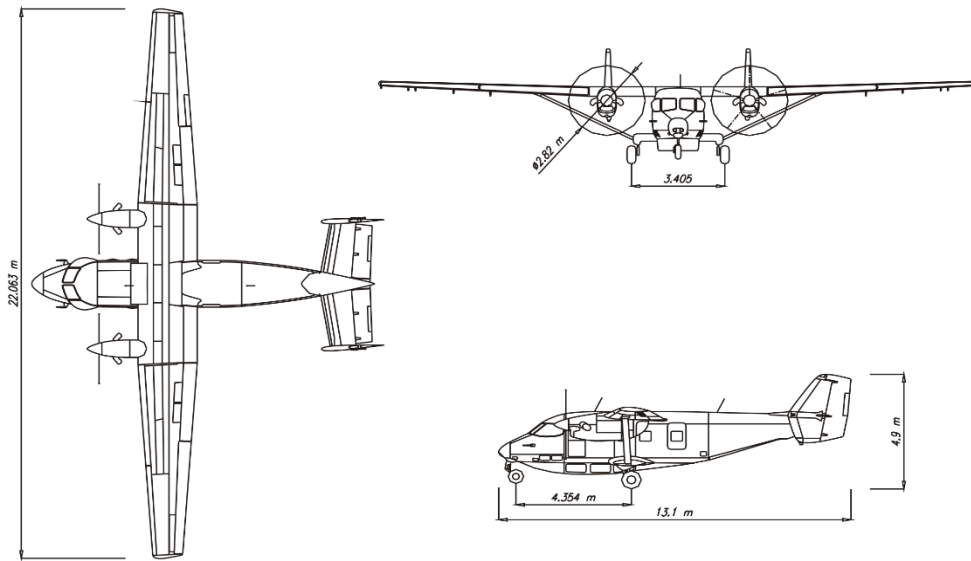
W analizowanym przypadku instalacja odlodzeniowa samolotu wykorzystuje upusty gorącego powietrza z silników turbinowych<sup>5</sup> które jest poprowadzana duktami wzdłuż ogrzewanych – odladzanych powierzchni płatowca. Zaproponowany i przeprowadzony eksperyment pozwolił na wykazanie poprawności pracy instalacji odlodzeniowej samolotu, w tym zmian termicznych wzdłuż ogrzewanych powierzchni oraz wyznaczenia charakterystycznych wielkości, a na ich podstawie opracowanie dokumentacji dowodowej.

Artykuł prezentuje wykorzystanie metod fotogrametrycznych bazujących na wykonanych pojedynczych zdjęciach i analizie zarejestrowanych zdjęć narostów lodowych i ich charakterystyk. Geometrię badanego samolotu opracowano na podstawie dostępnych modeli w postaci wektorowej CAD [12,13].

---

<sup>4</sup> Zarówno samolot towarzyszący jak i poddany badaniu posiadają możliwości zbierania rzeczywistych fizycznych parametrów atmosfery w trakcie prowadzenia badań.

<sup>5</sup> Zaprezentowana metoda może mieć zastosowanie do innych systemów odladzania statku powietrznego np. elektryczny lub mechaniczny.



Rys. 1. Na podstawie: <http://www.pzlmielec.pl>

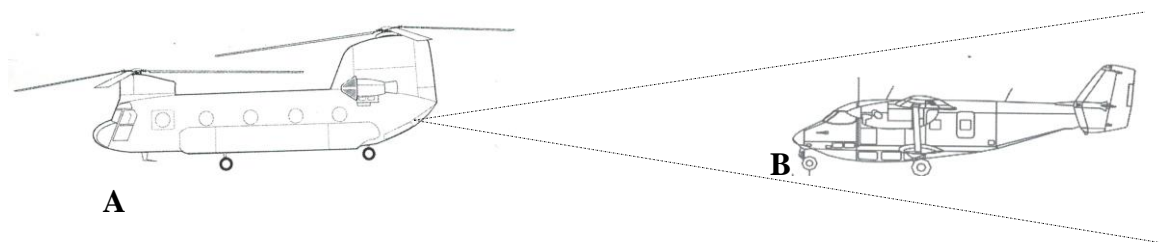
## 2.1 Pozyskanie obrazów

Zdjęcie fotogrametryczne powstaje w rzucie środkowym. Ponieważ na zdjęciu mogą występować zniekształcenia wynikające z przesunięć radialnych spowodowanych dystorsją obiektywu, oraz nachylenia kształtu, nie mogą być wykorzystywane jak mapa. Ich przekształcenia rzutowe mogą eliminować nachylenie, ale nie usuwać zniekształceń wynikających z deniwelacji czy niepłaskości fotografowanego obiektu. Zniekształcenia te nie mogą przekroczyć wymaganej dokładności pomiaru określonej charakterystyki. Odchyłki radialne mogą być zanedbywalne jedynie dla obiektów, których odchylenia od płaszczyznowości są niewielkie. W przypadkach innych, rozbudowanych przestrzennie brył jakimi są statki powietrzne, odchyłki radialne mogą być znaczące, wręcz uniemożliwiające pomiar na podstawie pojedynczego zdjęcia tzw. fotogrametrii jednoobrazowej.

Statki powietrzne A (lider) i B (samolot podlegający badaniom) (Rys. 2), biorące udział w eksperymentach podlegały w trakcie lotu niezależnym przemieszczeniom względnym spowodowanym podmuchami, wahaniami wynikającym ze stateczności ich ruchu i sterowania sięgającym do kilku metrów, w tym drganiom<sup>6</sup> ich struktur spowodowanych pracą zespołów napędowych i opływem powietrza. Zastosowanie bardzo krótkiego czasu otwarcia migawki pozwoliło na uniknięcie wpływu wymienionych czynników tj. dynamicznych zmian położenia na jakość zdjęć. Ugięcia struktury płatowca wynikające z obciążeń w locie zostały uwzględnione w analizach numerycznych.

W badaniach skupiono się na wykonaniu analizy na pojedynczym obrazie (fotogrametria jednoobrazowa), przy czym analizy dotyczyły prób prowadzonych w różnych warunkach atmosferycznych tj. w naturalnym oblodzeniu (narosty bezbarwne lub o charakterze białym i w sztucznym oblodzeniu). W próbach w oblodzeniu sztucznym dla lepszej identyfikacji zjawiska rozpylana woda była barwiona na żółto o neutralnym wpływie barwienia na wynik prób. Rys. 2 pokazuje schematyczny przebieg eksperymentu.

<sup>6</sup>Zwyczajnie zakresy drgań mieszczą się w zakresie częstotliwości od 4Hz do 60Hz, zależnie od prędkości lotu.



Rys. 2. Schematyczny przebieg eksperymentów i pozyskiwania danych. Statek powietrzny A (fotografia i ew. sztuczne oblodzenie), B badany samolot

## 2.2 Opis danych

Parametry oblodzenia (atmosfery, lotu, silników i gorącego powietrza) rejestrowano w lotach doświadczalnych zgodnie z zatwierdzonymi próbami w locie. Parametry atmosfery rzeczywistej i strug powierza ze sztucznie wytworzonymi warunkami lodzenia samolotu weryfikowane były w locie skalibrowanymi sondami meteorologicznymi. Rejestracja parametrów oblodzeniowych atmosfery naturalnej i sztucznej była prowadzona w czasowej korelacji z dokumentowaniem fotograficznym.

Analizy przedstawione w artykule przeprowadzono na zdjęciach wykonywanych amatorskimi aparatami fotograficznymi: Nikon D70 i Nikon D3100 z obiektywami o ogniskowych  $f = 18,70$  mm oraz  $f = 55,300$  mm. Bazą analiz była numeryczna geometria samolotu An-28 [5] (Rys. 1, 4.) opracowana w formacie \*. Igs. Do przeprowadzonych analiz wykorzystano zdjęcia wykonane w locie w próbach w oblodzeniu sztucznym, o następujących parametrach:

- obraz cyfrowy o wielkości 4304 x 2850 pikseli tj. około 13 Mega pikseli - (Test\_1, Test\_2, Test\_3) o rozdzielczości 72 dpi (Rys. 3.)
- obraz cyfrowy o wielkości 4677 x 3307 pikseli (Test\_4) o rozdzielczości 400 dpi (Rys. 3).

Zdjęcia wykonywano ze statku powietrznego towarzyszącego A, w trakcie prób w warunkach oblodzenia sztucznego i naturalnego zgodnie z Rys. 2. Zdjęcia zapisane zostały w formacie \*.jpg i poddane kompresji stratnej JPEG o niedużym stopniu kompresji. Szczegóły analizy przedstawione w artykule dotyczą zdjęć z oblodzenia sztucznego z uwagi na lepsze możliwości analizy, w tym prezentację możliwości obróbki z wykorzystaniem barwy.



Rys. 3. (Test\_1, Test\_2, Test\_3) Zdjęcia określone w analizie jako: Test\_1, Test\_2, Test\_3, (własność Polskich Zakładów Lotniczych Sp. z o.o.)

## Test\_4



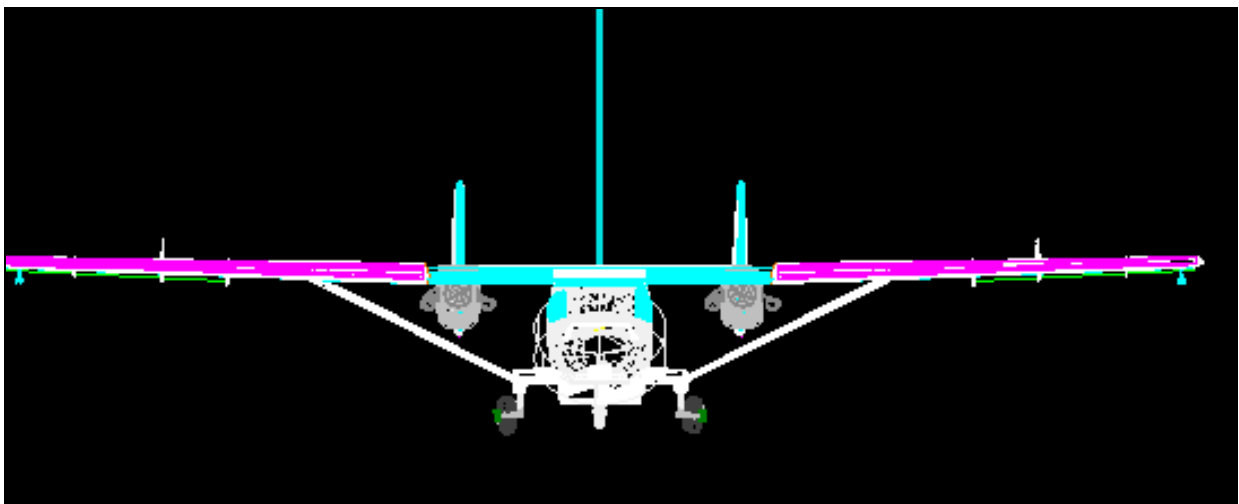
Rys.3. (Test 4) Zdjęcie wykorzystane w eksperymencie określone jako Test\_4 (własność Polskich Zakładów Lotniczych Sp. z o.o.)

### 3. Metodyka opracowania wyników

Przy opracowywaniu i weryfikacji metodyki analizowania danych w postaci obrazów cyfrowych oraz prezentacji wyników założono rozwiązanie następujących problemów:

- a. identyfikacja narostów lodowych odfotografowanych na strukturze samolotu (w przypadku prób w sztucznym oblodzeniu w kolorze żółtym),
- b. identyfikacja narostów lodu odfotografowanego na skrzydle samolotu w kolorze naturalnym w przypadku prób w warunkach naturalnych oblodzenia, przy uprzednio przygotowanej powierzchni skrzydła,
- c. określenie geometrii narostów lodowych (powierzchni narostu).

Pierwszym etapem prowadzonych analiz i opracowania była selekcja zdjęć do dalszej obróbki. Selekcja dotyczyła przydatności zdjęć pod względem konkretnych fragmentów samolotu w interesującym stanie i czasie lotu. W artykule zaprezentowano analizy i pomiary zgodnie z danymi zawartymi na zdjęciu (Rys. 3.) tj. przedstawiającym samolot B w widoku z przodu.



Rys.4. Wykorzystany w eksperymencie model CAD samolotu An-28.

#### 3.1 Przetwarzanie obrazu celem uwypuklenia koloru żółtego na skrzydle samolotu.

Przetwarzanie obrazów przeprowadzone zostało w środowisku Matlab oraz niezależnie w środowisku Adobe Photoshop. Eksperymenty dla lodzenia w warunkach sztucznych miały

między innymi na celu znalezienie informacji o kolorach w występujących na zespołach samolotu. W prezentowanym przypadku zadanie polegało na zdefiniowaniu występującego koloru żółtego, jako dowodu występowania lub nie oblodzenia w tym określenie tzw. mostków cieplnych. Oprócz wykazania istnienia oblodzenia zadanie polegało na określeniu rozmiarów jego narostów tj. powierzchni narostu, a posiadając czasowe różnice wykonanych fotografii zdefiniować prędkość narastania oblodzenia.

W celu uwypuklenia bary żółtej na zdjęciu, w pierwszym kroku dokonano prostej operacji zmian jasności, kontrastu oraz filtracji we wspomnianym wyżej specjalistycznym oprogramowaniu.

Zastosowanie tych operacji dało zadowalające efekty w postaci wyselekcjonowanych automatycznie miejsc występowania oblodzenia.

Na powiększeniu obrazu (Rys. 5.3) widać skrzydło lewe na obrazie oryginalnym oraz wyniki przetwarzania obrazu celem uwypuklenia koloru żółtego.

Poprawa jakości obrazów poprzez proste operacje na histogramie (zmiana kontrastu oraz składowych koloru analizowanego obrazu) pozwala uwypuklić miejsca, gdzie występują zabarwienia na żółto oraz określić rozmiary powierzchni i oblodzenia. Niezależnym eksperymentem było wyselekcjonowanie z całego obrazu obszarów o określonej składowej jasności dokonane w środowisku Matlab. W trakcie prowadzonych eksperymentów dokonano konwersji modelu barw RGB<sup>7</sup> na model CMYK<sup>8</sup> celem lepszego uwypuklenia barwy żółtej. Wyniki obróbki cyfrowej pokazano na Rys. 5. Jasne powierzchnie reprezentują składową żółtą. Matematyczne podstawy transformacji barw oraz implementację w środowisku Matlab można znaleźć w literaturze [4],[5]. Wyniki filtracji obrazu oryginalnego w programie Adobe Photoshop różnymi filtrami przedstawiono na Rys. 5 ( b - d). Żółty kolor jest najbardziej uwypuklony przy zastosowaniu filtru Unsharp Mask (Rys. 5d).



a) *Obraz oryginalny*



b) *Przetworzenie\_1*

<sup>7</sup> RGB - model barw RGB podstawowych: Red-czerwony, Green-zielony, Blue-niebieski.

<sup>8</sup> CMYK - model barw zawierający składowe dopełniające: C-cyan, Y-yellow, M-magenta, K-black.





c) *Przetworzenie\_2*



d) *Przetworzenie\_3*

Rys. 5. Wyniki filtracji obrazu oryginalnego.

Na obrazach przetwarzanych w programie Adobe Photoshop widać wyraźnie, że istnieją również inne miejsca o białym zabarwieniu, które są efektem odbicia światła, a nie oblodzeniem. Aby wyeliminować tę wadę, przeprowadzono kolejny eksperyment polegający na tym, że dokonano przejścia z modelu barw RGB na model CMY używając programu Matlab.

Transformacja z przestrzeni RGB do CMY (1) i wyraźne wyodrębnienie kanału żółtego pokazuje, że na analizowanym obrazie wyraźnie pojawiają się miejsca jasne, a więc o maksymalnym nasyceniu barwą żółtą. Nie ma za to miejsc wskazanych wcześniej w programie Adobe Photoshop jako efekt odbicia.

Przejście z modelu barw RGB na CMY odbywało się wg wzorów:

$$\begin{aligned} R &= 255 - C \\ G &= 255 - M \\ B &= 255 - Y \end{aligned} \tag{1}$$

gdzie:

RGB - składowe koloru odpowiednio R - czerwony, G - zielony, B - niebieski,  
CMY - składowe barwy dopełniającej (C - niebiesko-zielony, M - fioletowy, Y - żółty)

W wyniku analiz obrazów cyfrowych uzyskanych w próbach w odniesieniu do pomierzonych parametrów atmosferycznych udowodniono występowanie miejsc o zabarwieniu żółtym na obrazie, co świadczy o poprawności pracy instalacji odlodzeniowej i wykazanie istnienia narostów lodowych w obszarach nieogrzewanych samolotu.

### 3.2 Geometryzacja narostów lodowych.

Celem określenia położenia lodu na skrzydle oraz jego powierzchni dokonano transformacji geometrii obrazu (Rys. 3), zarejestrowanego ze statku powietrznego lecącego przed badanym samolotem. Transformacji dokonano w oparciu o model odniesienia, zawierający geometrię samolotu zapisaną w formacie wektorowym. Do przekształcenia wykorzystano transformację afiniczną, której podstawowym parametrem oceny dokładności jest jej średni błąd  $m_0$  wyznaczany wzorem (2):

$$m_0 = \sqrt{\frac{v^T p v}{r-u}} \quad (2)$$

gdzie:

$v$  - macierz poprawek ( $v^T$  – macierz transponowana)

$p$  - macierz wag

$r$  - liczba równań poprawek

$u$  - liczba niewiadomych

Po wykonaniu transformacji z układu obrazu rastrowego do układu samolotu (Rys.1., szczegóły definiowania w [6, 12, 13]), obliczona została wielkość piksela, która została zweryfikowana przepróbowaniem (*ang. resampling*)<sup>9</sup> obrazu wejściowego. Stanowiło to podstawę do określenia (wyliczenia) powierzchni lodu na nieodladzanych powierzchniach samolotu. Wykorzystano do tego celu środowisko CAD (aplikacja MicroStation<sup>10</sup>) oraz nakładkę do pracy z rastrami - Image Analyst<sup>11</sup>. Aby skorzystać z modelu CAD należało dokonać przejścia z modelu 3D samolotu (Rys. 1) na płaszczyznę równoległą do płaszczyzny wykonanego zdjęcia. Tak zdefiniowany układ 2D modelu posłużył jako baza geometryczna do transformacji rastra. Widok obrazu oraz płaszczyzny 2D modelu CAD, na którą transformowano obraz pokazano na Rys. 6. Poprzez wskazanie odpowiednich charakterystycznych punktów odniesienia - na modelu i obrazie cyfrowym dokonano zmiany geometrii całego zdjęcia. Celem podniesienia dokładności opracowania przetworzono również inne fragmenty zdjęcia samolotu. Zastosowana w transformacji metoda elementów skończonych<sup>12</sup> pozwoliła uzyskać dokładność wpasowania na poziomie 3,6 mm.

<sup>9</sup> resampling - ponowne próbkowanie obrazu, przeliczenie pikseli i nadanie im innej wielkości piksela

<sup>10</sup> Aplikacja MicroStation firmy Bentley

<sup>11</sup> Image Analyst - nakładka firmy Intergraph na środowisko MicroStation

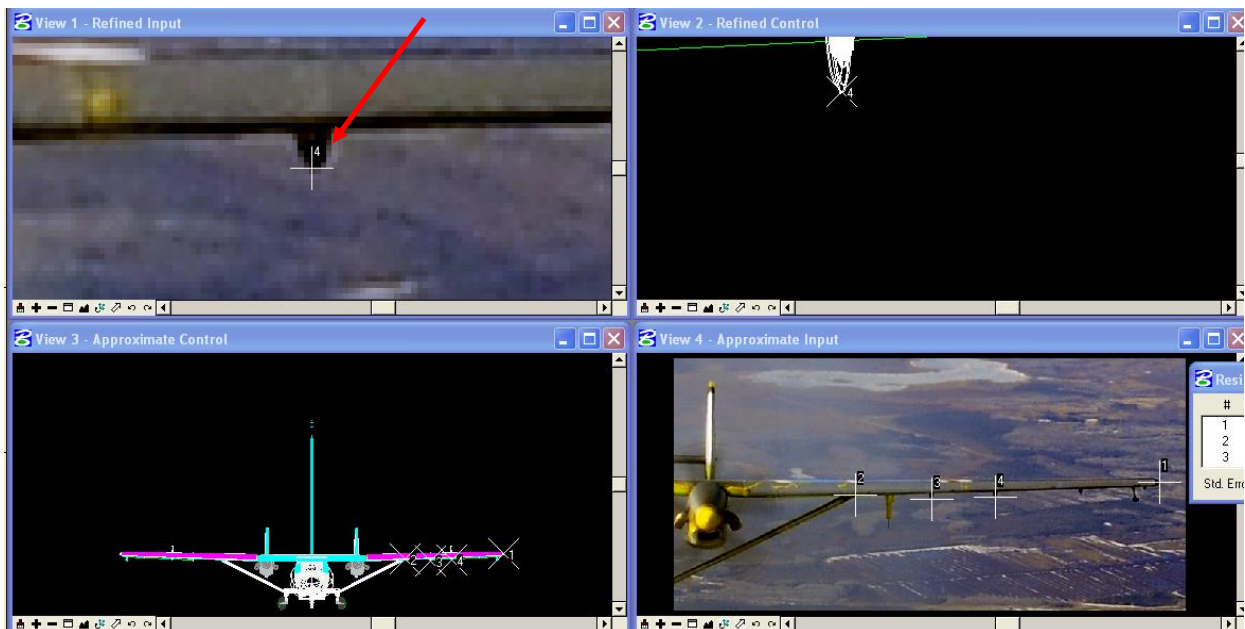
<sup>12</sup> transformacja elementów skończonych MES (*ang. finite elements method FEM*) polega na przetwarzaniu obrazu po wcześniejszym podziale na siatkę.





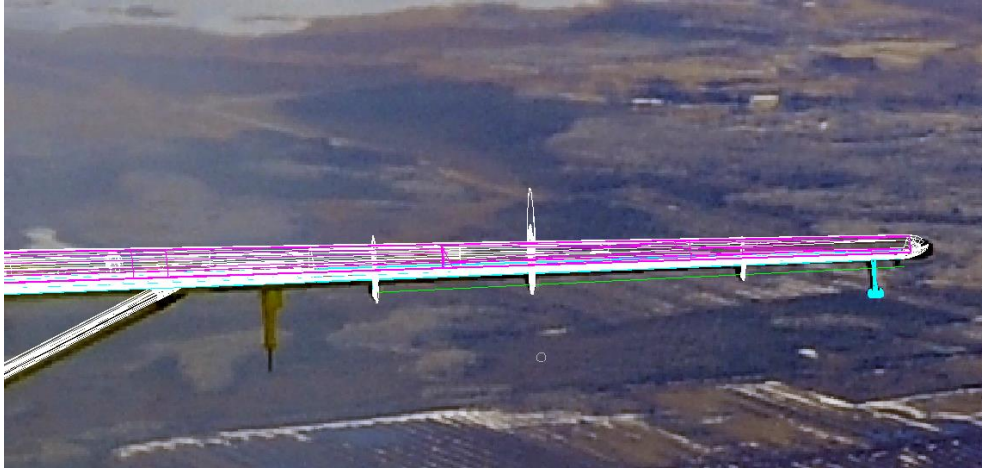
Rys. 6. Widok programu Image Analyst i MicroStation z modelem CAD oraz obrazem zarejestrowanym w trakcie nalogu.

Rys. 7. przedstawia fragment skrzydła jaki zostało poddane transformacji. Mimo bardzo niekorzystnej geometrii rozmieszczenia fotopunktów (wybrane do transformacji punkty znajdowały się prawie w jednej linii), uzyskano stosunkowo dobre wyniki, o czym świadczy fakt, że punkt nr 4 (Rys. 7a) został automatycznie „zaproponowany” przez program w miejscu, gdzie na obrazie znajduje się jego odpowiednik (program po wyliczeniu transformacji w oparciu o 3 punkty - podpowiada położenie kolejnych – które można zaakceptować lub odrzucić albo poprawić ręcznie).



Rys.7a. Rozmieszczenie punktów do transformacji. Czerwoną strzałką oznaczono wspomniany w tekście punkt nr 4.

Na Rys. 8 przedstawiono model CAD skrzydła w formie wektorowym, na który nałożony został obraz cyfrowy jako efekt transformacji, potwierdzający prawidłowość przyjętej metodyki.



Rys. 8. Nałożenie obrazu cyfrowego na model CAD.

Transformacja obrazu na punkty pozyskane z modelu CAD pozwoliła na przeprowadzenie eksperymentów związanych z pomiarem powierzchni elementów z wyraźną składową żółtą. Celem geometryzacji narostów lodowych wykonano przepróbowanie obrazu (ang. *re-sampling*) do piksela końcowego. Obliczenie pola powierzchni odbywa się automatycznie po wyznaczeniu granic obszaru wziętego do obliczenia. Na Rys. 9 - 1 piksel ma średnice 10 mm, pole powierzchni obszaru zaznaczonego na biało 4215 mm<sup>2</sup>. Na Rys. 10 - 1 piksel ma średnice 10 mm, pole powierzchni obszaru zaznaczonego na biało 8387 mm<sup>2</sup>.



Rys.9. Powiększenie fragmentu obrazu.



Rys.10. Powiększenie fragmentu obrazu.

Pomiar geometrii narostów lodowych przeprowadzono w sposób manualny. Wykorzystując podpikselową analizę obrazu i metody sztucznej inteligencji [7], można podnieść dokładność opracowywanych wyników nawet o rząd wielkości czyli poniżej 1 mm, przy założe-

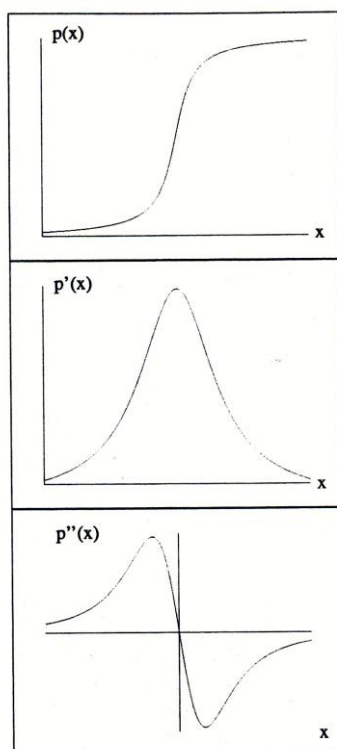
niu, że błędy metody przetwarzania nie będą większe. Dotychczasowe doświadczenia autorów pokazują zasadność użycia metod podpixelowych, które polegają na przypisaniu każdemu pikselowi obrazu wartości gradientu, który jest wektorem składającym się z amplitudy i kierunku. Przestrzenna amplituda gradientu jest wyznaczana wówczas z równania (3):

$$g(j,k) = \sqrt{g_r(j,k)^2 + g_c(j,k)^2} \quad (3)$$

gdzie  $g_r(j,k)$  oraz  $g_c(j,k)$  oznaczają kolejno gradient liczony w kierunku wierszy (r) oraz kolumn (c). Kierunek przestrzennego gradientu w odniesieniu do osi wierszy jest liczony następująco (4):

$$\theta(j,k) = \arctan \frac{g_c(j,k)}{g_r(j,k)} \quad (4)$$

Podpixelowa dokładność krawędzi jest osiągnana przez wpasowanie wielomianu drugiego stopnia w kierunku gradientu. Tam, gdzie funkcja osiągnie maksimum następuje podpixelowa lokalizacja. Istota podpixelowej analizy obrazu [8],[9] (zastosowania drugiej pochodnej jako metody wyznaczania położenia punktów na krawędzi) została przedstawiona na Rys. 11. gdzie: punkt przegięcia na przykładowej krawędzi jako funkcji  $p(x)$ , jego odpowiednik w pierwszej pochodnej (maksimum funkcji  $p'(x)$ ) i drugiej pochodnej (miejsce zera funkcji  $p''(x)$ ).



Rys.11. Istota podpixelowej analizy.

Wzory (5) i (6) definiują odpowiednio pierwszą i drugą pochodną liczoną na obrazie cyfrowym.

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie:

$\nabla f$  - jest pierwszą pochodną o składowych w kierunku x i y  $(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y})$ .

Obliczenie drugiej pochodnej przebiega wg wzoru:

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (6)$$

gdzie:

$\nabla^2 f(x, y)$  - ozn. obliczenie drugiej pochodnej w kierunku x i y w oparciu o składowe

$$(\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}).$$

Autorzy zamierzają w dalszych eksperymentach dokonać podniesienia dokładności opracowania poprzez zastosowanie koncepcji użycia pierwszej i drugiej pochodnej, co pozwoli podnieść jakość tego typu opracowań.

#### 4. Wnioski

W przeprowadzonych eksperymentach dokonano wizualnej oceny i manualnych pomiarów narostów lodowych dzięki poprawie jakości obrazów wejściowych (Rys. 2,3). Autorzy artykułu widzą możliwość automatyzacji pomiarów i podniesienia dokładności. Aplikacyjne wyniki przeprowadzonych analiz o charakterze dowodowym są w niepublikowanym dokumencie, którego właścicielem jest PZL Mielec Sp. z o.o. Sikorsky Company [12, 13].

W wyniku przeprowadzonych prób w locie oraz obróbki obrazów cyfrowych stwierdzono, że zastosowanie metod fotogrametrycznych do badania pracy instalacji odlodzeniowych samolotów jest miarodajne i akceptowalne z punktu widzenia dokładności uzyskiwanych informacji. Wykorzystanie obojętnych substancji barwiących zawieszinę wodną jaką spryskuje się statek powietrzny w trakcie prób w sztucznych warunkach oblodzeniowych jest akceptowalnym i wygodnym rozwiązaniem w rozumieniu dokładności uzyskiwanych wyników, na poziomie pojedynczych milimetrów (dokładność transformacji obliczono na poziomie  $\approx 0,5$  piksela i taką dokładność przyjęto jako dokładność manualnej wektoryzacji miejsc oblodzenia).

Porównanie z geometrią samolotu (pkt. 3.2) potwierdziło poprawność podejścia związanego z przetwarzaniem obrazu oraz geometryzacją jego szczegółów.

Uznano za celowe zastosowanie w przyszłości analizy podpikselowej obrazu co poprawi dokładność uzyskiwania wyników. Dla rozpatrywanego przypadku to dokładność poniżej 1 mm (0,1 piksela). Dotyczy to wszystkich elementów geometrii bryły i ich położenia na strukturze płatowca. Ważnym elementem przygotowania samolotu do prób w warunkach naturalnych jest pomalowanie interesujących powierzchni kolorami ciemnymi i matowymi, co poprawi zdecydowanie dokładność analizy. Kolejnym elementem zdecydowanie poprawiającym jakość uzyskiwanych wyników jest większa ilość zdjęć w tym wykonywanych z aparatów sprzężonych.

We wskazanych ulepszeniach autorzy artykułu widzą możliwość dalszego podniesienia dokładności wykonanych analiz poprzez rozwinięcie i zaimplementowanie metod sztucznej inteligencji [7] oraz podpikselowej analizy obrazu [8].

W kolejnych eksperymentach można zastosować aparaty fotograficzne z matrycą o wyższej rozdzielczości, co dodatkowo podnieść dokładność opracowania. Niezależnym badaniem można poddać optymalizację odległości fotografowania do badanego samolotu czy zastosowanie eksperymentów z technika UAV, która staje się coraz popularniejsza [10,11].

Oblodzenie na powierzchniach samolotu może występować pod kilkoma postaciami: lód biały porowaty, przezroczysty, popękany itp. Przez niektóre postaci oblodzenia będzie przebiegać malowanie samolotu, a inne będą odbijać światło. W przypadku prób pracy instalacji odlodzeniowej samolotu w warunkach naturalnych sugeruje się malowanie odladzanych powierzchni ciemnym matowym kolorem.

Autorzy widzą również zasadność badań poszerzających zakres stosowania sensorów o nowoczesne techniki skaningu laserowego, który w ostatnich latach zyskuje coraz większą popularność i zakres [11]. Autorzy dziękują Kierownictwu Polskich Zakładów Lotniczych Sp. z o.o. w Mielcu za udostępnienie wyników prób i zdjęć na potrzeby niniejszego artykułu.

### Literatura:

1. Brzeczek J., Pietruszka J., Polskie Zakłady Lotnicze Sp. z o.o.; Flemming R.J., Bernstein B.,C., Leading Edge Atmospheric. "Certification Flight Tests in Natural Icing of the PZL Mielec M28 Commuter Turboprop Airplane" Praha SAE 2015 International Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures 22-25 June 2015 Prague, Czech Republic.
2. Certification Specifications CS-23 (Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes) with AMC, GM, Amendment 4, 15 July 2015,
3. Golec P., Brzeczek J., *Meeting Reliability Requirements for Rotor Ice Protection Systems Design*, Diagnostyka 2014; 15 (1): 22-31.
4. Gonzalez R. C., Woods R. E. , Eddins S.L., *Digital Image Processing Using MATLAB*, 2nd edition, Gatesmark Publishing 2009.
5. Gonzalez R. C., Woods R. E. , *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey 2007
6. Instrukcja Użytkowania w Locie samolotu M 28
7. Mikrut S. (praca zbiorowa - Czechowicz A., , Gryboś P., Jachimski J., Mikrut S., Mikrut Z. , Pawlik P., Tadeusiewicz R. pod redakcją naukową dr inż. Sławomir Mikrut ) *Sieci neuronowe w procesach dopasowania zdjęć lotniczych*. 2010. Wydawnictwa AGH. Kraków
8. Mikrut S., 2009, *Przydatność algorytmów podpikselowej detekcji cech w wybranych zagadnieniach fotogrametrycznych*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 19, Kraków, s. 299-308.
9. Mikrut S., *Wpływ skanowania i kompresji według standardu JPEG na wykrywanie obiektów liniowych i punktowych na obrazach cyfrowych*. Rozprawa doktorska AGH, Kraków 2003.
10. Mikrut S., 2016, : *Classical Photogrammetry and UAV – Selected Aspects*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B1, 947-952
11. Mikrut S., Kohut P., Pyka K., Tokarczyk R., Barszcz T., Uhl T. : *Mobile Laser Scanning Systems for Measuring the Clearance Gauge of Railways: State of Play, Testing and Outlook*. Sensors 2016, 16(5), 683;
12. Opracowanie zbiorowe, Raport AGH, pt. "Analysis of Digital Images Concerning PZL-M28 SP-DAA Airplane" wykonany przez AGH dla PZL Mielec. Niepublikowany. 2014,

13. Opracowanie zbiorowe, Raport AGH, pt. "*Wykonanie testów i analiz w zakresie określania geometrii zewnętrznej płatowca metodami fotogrametrii i skaningu*" wykonany przez AGH dla PZL Mielec. Niepublikowany 2015.