



Bezzałogowy system kontroli stanu oświetlenia drogi startowej

Mateusz Graja, Juliusz Wierbiłowicz, Radosław Górzeński

Streszczenie:

Regularne inspekcje oświetlenia drogi startowej są kluczowe dla bezpieczeństwa i ciągłości operacji lotniczych. Pojawienie się bezzałogowych statków powietrznych (BSP) przyniosło ze sobą szereg sposobów optymalizacji tego procesu. W artykule przedstawiono bezzałogowy system weryfikacji stanu lamp krawędziowych pasa startowego oparty na dwóch platformach: stałopłacie własnej konstrukcji oraz wielowirnikowca DJI Mavic 3T z modułem RTK. Trzonem pracy jest projekt i integracja stałopłatu do tego zadania. Płatowiec tego typu musi być w stanie unieść sprzęt do rejestrowania obrazu i utrzymać stabilny tor ruchu. Jednocześnie powinien być łatwy w transporcie i przechowywaniu oraz w miarę możliwości energooszczędny. Sprostanie tym wymaganiom umożliwia długi czas przebywania nad pasem i efektywne pokrycie obszaru, podczas gdy platforma wielowirnikowa zapewnia precyzję pozycjonowania i elastyczność operacyjną. Porównanie tych dwóch klas BSP stanowi podstawę eksperymentu porównawczego. W celu wykrycia świecących lamp zastosowano algorytm lokalizujący najjaśniejszy obszar kadru i wycinający stały obszar zainteresowania (ROI). Następnie w przestrzeni HSV, przez progowanie kanału V z tolerancją nasycenia, ocenia udział bardzo jasnych pikseli, co pozwala jednoznacznie rozstrzygnąć stan oświetlenia.

Wprowadzenie teoretyczne:

Bezzałogowe stałopłaty to statki powietrzne, w których siła nośna jest generowana przez nieruchome skrzydła, a ciąg zapewnia układ napędowy. Pod względem konstrukcyjnym odpowiadają one zasadom znanym z lotnictwa załogowego. Składają się z kadłuba (nośnik wyposażenia i ładunku użytecznego), skrzydeł (źródło siły nośnej i miejsce instalacji lotek, klap, ewentualnie spoilerów), usterzenia (statecznik poziomy i pionowy z powierzchniami sterowymi), zespołu napędowego oraz systemów sterowania i zasilania. W praktyce projektowej wyróżnia się układ klasyczny (usterzenie na ogonie), delta (skrzydło trójkątne, często bez oddzielnego usterzenia) oraz VTOL (vertical take-off and landing) - hybrydy łączące cechy stałopłata i wielowirnikowca (start/ lądowanie pionowe, lot postępowy jak w stałopłacie). Taksonomie te są standardem literatury z projektowania statków powietrznych [1].

Geometria skrzydła opisuje m.in. profil (kształt przekroju), cięciwę (odległość krawędź natarcia–spływu), obrys (rzut z góry), rozpiętość oraz powierzchnię. Z tych wielkości wynika wydłużenie (aspect ratio), które silnie wpływa na opór indukowany i charakterystykę nośną: skrzydła o większym wydłużeniu generują przy tej samej sile nośnej mniejszy opór indukowany, co poprawia efektywność lotu przelotowego [1],[2].



Kąt natarcia α to kąt między cięciwą profilu a kierunkiem napływu strug powietrza. Wpływa bezpośrednio na współczynnik siły nośnej C_Z z równania $P_Z = C_Z \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v^2}{2}$ informujący o efektywności generowania siły nośnej przez dany profil lub ciało. Po przekroczeniu kąta krytycznego następuje oderwanie przepływu i spadek C_Z . [2]

Oświetlenie krawędziowe pasa jest elementem wzrokowych pomocy nawigacyjnych, zapewniającym orientację geometryczną pasa w nocy i przy ograniczonej widzialności. Zgodnie z powszechnie stosowanymi przepisami, światła krawędziowe są białe. Wyjątek stanowią lotniska z przyrządowym podejściem, gdzie w końcowym odcinku stosuje się ostrzegawczą barwę żółtą - w kierunku lądowania [3].

W warunkach nocnych różnica luminancji między punktowym źródłem oświetlenia a ciemnym tłem jest wysoka. Z punktu widzenia przetwarzania obrazu najprostszym i odpornym na zakłócenia sposobem separacji takiego obiektu jest analiza w przestrzeni HSV, która rozdziela składową jasności (V) od informacji barwnej (H, S) ułatwiając binarne wyodrębnienie jasnych pikseli lampy [4].

Skuteczność progowania rośnie, gdy maskę buduje się w precyzyjnie wyciętym regionie zainteresowania (ROI), zamiast w całym kadrze. Jedną z metod lokalizacji ROI jest analiza projekcji jasności. Po wstępnym odsumieniu i ewentualnym wzmocnieniu kontrastu oblicza się profil poziomy i pionowy, wygładza filtrem Gaussa, a następnie wybiera maksimum w obu kierunkach - ich przecięcie wskazuje środek jasnego punktu [5].



Budowa płatowca

Informacje ogólne			
Układ płatowca		Klasyczny	
Rodzaj podwozia		Trójpodporowe	
Konfiguracja skrzydeł		Górnopłat	
Układ ogona		Klasyczny	
Długość (bez uwzględnienia silnika i śmigła)		228.4 cm	
Wysokość		126.3 cm	
Masa całkowita		8.664 kg	
Skrzydło i stery			
	Skrzydło	Ster kierunku	Ster wysokości
Profil	Selig 9104*	NACA 0008	Clark Y
Średnia cięciwa	50.8 cm	30 cm	35.3 cm
Obrys	Prostokątno-trapezowy	Trapezowy	Prostokątny
Rozpiętość	457.2 cm	40 cm	120 cm
Powierzchnia	2.2 m ²	-	-
Układ napędowy			
Silnik		Dualsky GA2000R. 14 MKII	
Śmigło		APC 27x13 E	
Bateria		GENS ACE 3300 mAh 6s	
ESC**		Hobbywing Platinum 60A	
Moc		1440 W	

*Zastosowano zmodyfikowaną wersję profilu Selig 9104, ułatwiającą proces konstruowania.

**Electronic speed control - urządzenie regulujące prędkość obrotową silnika elektrycznego.

Badania były prowadzone w ramach projektu „Bezzałogowy system kontroli stanu oświetlenia drogi startowej” (UMOWA Nr SKN/SP/603336/2024), realizowanego w programie Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Do projektu statopłatu wybrany został układ klasyczny, ze względu na prostotę konstrukcji. Wykorzystano konfigurację skrzydeł górnopłatu, co zapewniało łatwość montażu i demontażu do transportu płatowca oraz zmniejszało ryzyko kontaktu skrzydła z podłożem przy starcie i lądowaniu. Skrzydło o obrysie prostokątno-trapezowym zapewnia maksymalizację powierzchni nośnej przy jednoczesnym zmniejszeniu oporu. Klasyczne usterzenie ogonowe, umiejscowione znacznie wyżej niż skrzydło, ma na celu zminimalizowanie wpływu wirów od śmigła na sterowność. Usterzenie składa się z lotek, steru kierunku, steru wysokości oraz spoilerów wspomagających lotki i ułatwiających lądowanie.

Głównym materiałem konstrukcyjnym jest sklejka o grubości 2 mm, zapewniająca odpowiednią wytrzymałość przy stosunkowo niewielkiej masie. Elementy wykonane ze sklejki zostały wycięte przy pomocy lasera CNC. Dla dodatkowego wzmocnienia niektóre części wykonano z aluminium, w tym dźwigary i belkę ogonową. Poszycie wykonano z folii Oracover Light, dodatkowo wzmocnionej deską balsową w rejonie krawędzi natarcia i krawędzi spływu.



Zdj. 1. Fragment skrzydła w trakcie konstruowania

Elementy sklejkowe połączone są klejem cyjanoakrylowym, a do łączeń typu sklejka-aluminium wykorzystano żywicę epoksydową. Do połączenia gotowych części statku powietrznego zastosowano połączenia gwintowe.

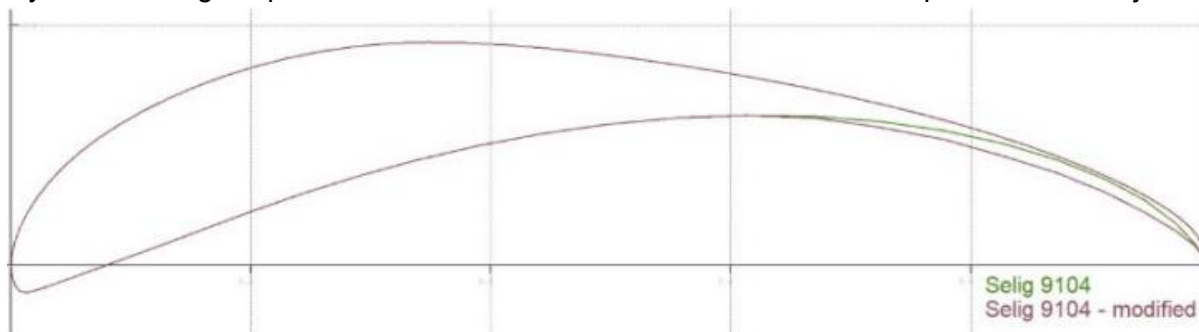
Za poruszanie usterzeniem i przednim podwoziem odpowiedzialne są serwomechanizmy, do których wykonano odpowiedniej długości popychacze, przymocowane do poruszanych części za pomocą wydruków 3D.

Jako podwozie główne wykorzystano dostępne na rynku podwozie z włókna węglowego, natomiast goleń podwozia przedniego wykonano z aluminium. Zdj. 2.



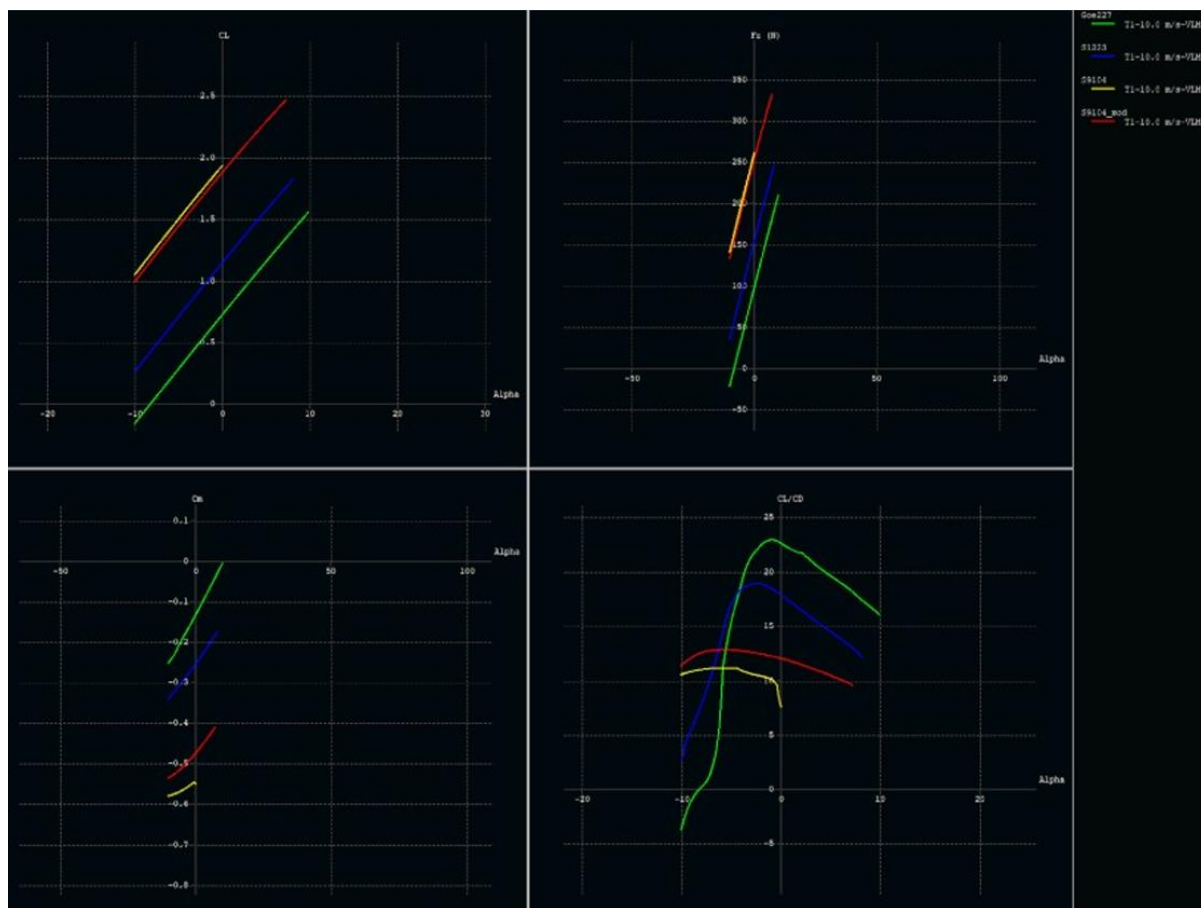
Zdj. 2. Podwozie przymocowane do kadłuba

Podczas wybierania profilu skrzydła rozważano profile Goe 227, Selig 1223, Selig 9104 i zmodyfikowaną wersję Selig 9104. Celem wprowadzonych modyfikacji było ułatwienie wycinania tego profilu na laserze CNC. Porównanie profili na Zdj. 3.



Zdj. 3. Porównanie profilu Selig 9104 i zmodyfikowanej wersji

Zestaw wykresów na Zdj. 4 ilustruje przebiegi: współczynnika siły nośnej C_L , siły nośnej F_z , momentu pochylającego C_m oraz sprawności aerodynamicznej C_L/C_D w funkcji kąta natarcia α . Pożądany profil powinien w użytecznym zakresie kąta α wykazywać niemal liniowy wzrost C_L umożliwiając łatwą i przewidywalną regulację siły nośnej; umiarkowany przyrost siły nośnej; łagodny i stabilny przebieg C_m - bez gwałtownych zmian, które stawiałyby większe wymagania usterzeniu. Istotne jest również szerokie, płaskie maksimum C_L/C_D zapewniające dobrą efektywność w szerszym zakresie kątów. Dodatkowym atutem jest wytwarzalność wynikająca z niewielkiego pogrubienia krawędzi spływu, co upraszcza technologię wykonania. Na podstawie przeprowadzonych analiz wybrano zmodyfikowaną wersję profilu Selig 9104.



Zdj. 4. Porównawcza analiza wybranych profili - zależności siły współczynnika siły nośnej i oporu od kąta natarcia



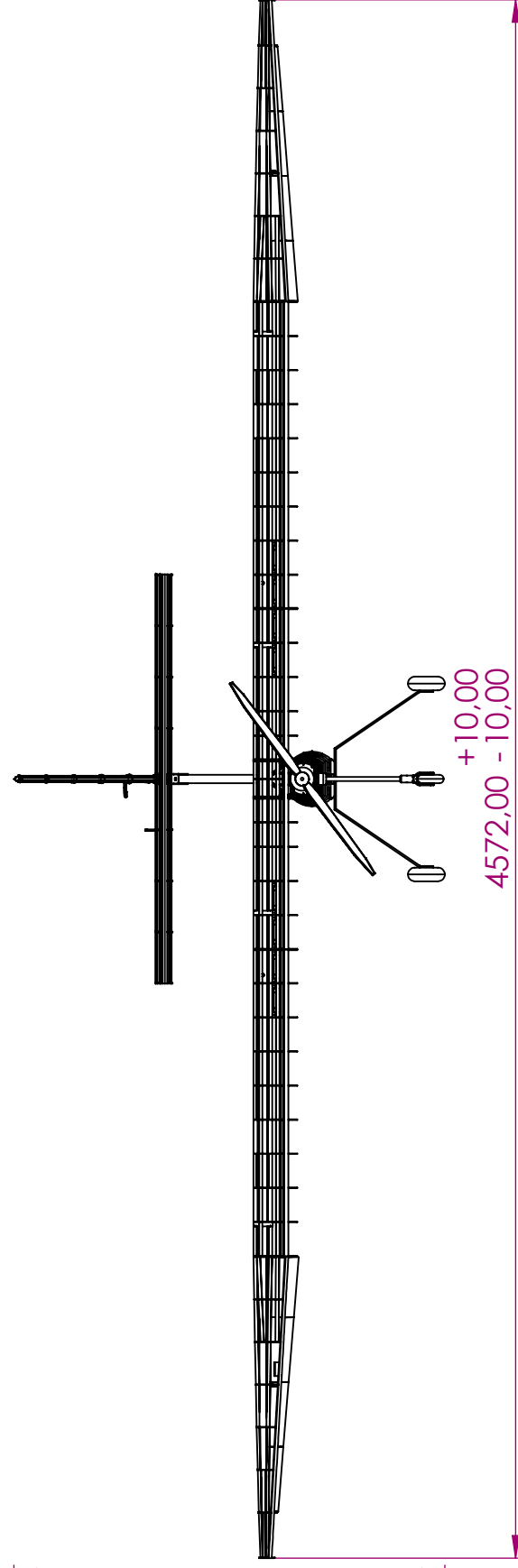
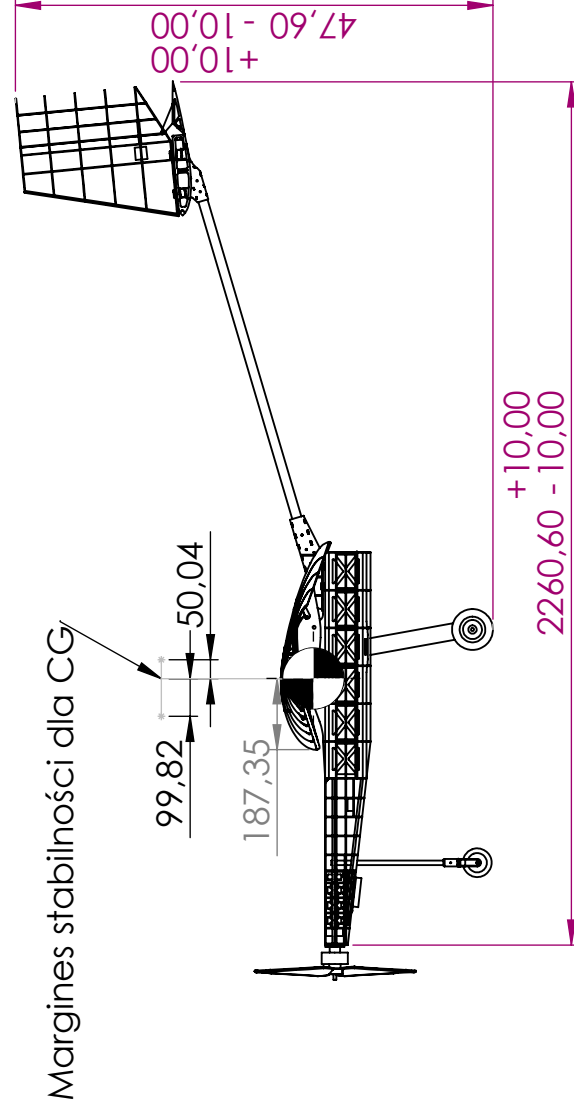
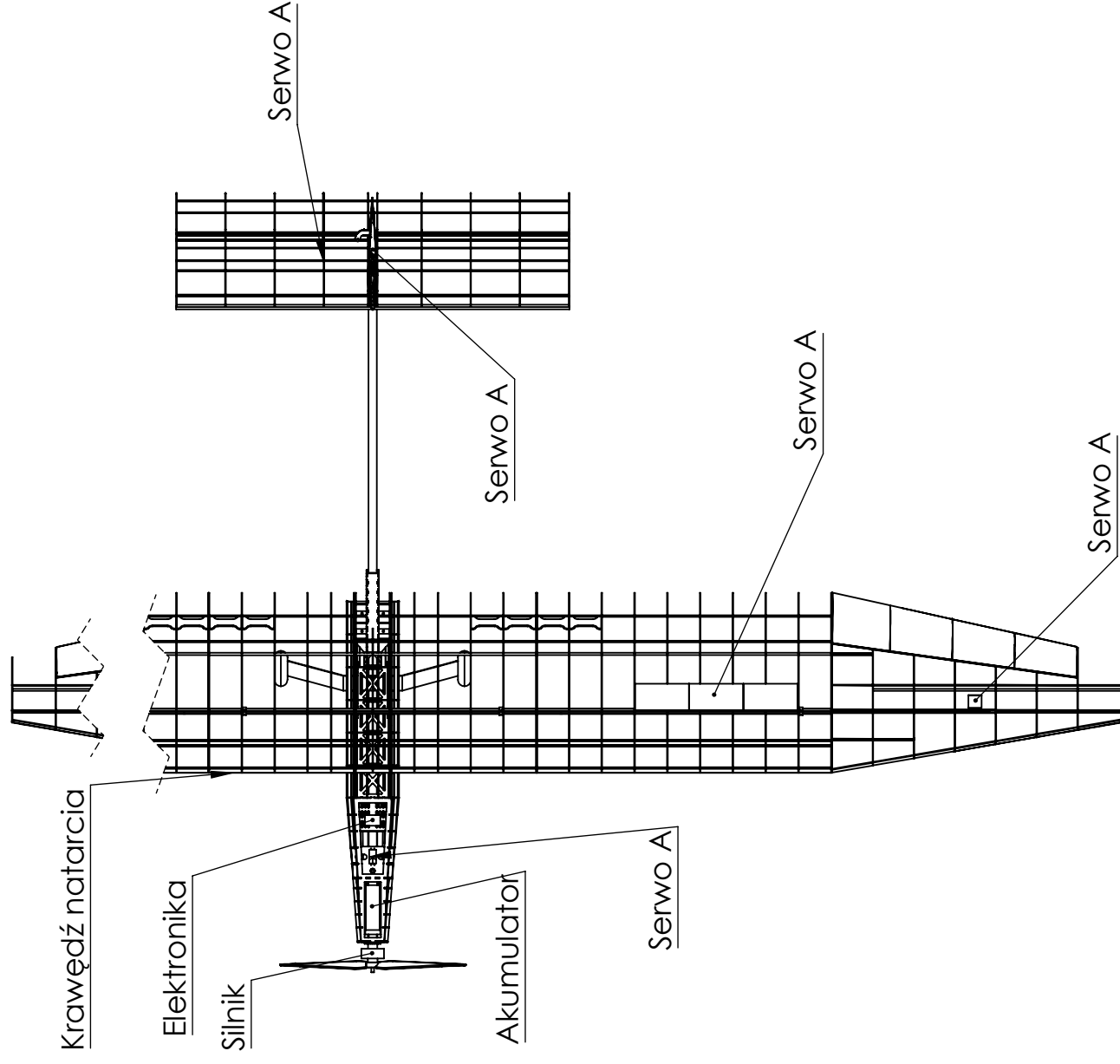
Zdj. 5. Gotowy stałopłat na lotnisku w Kąkolewie

Badania były prowadzone w ramach projektu „Bezzałogowy system kontroli stanu oświetlenia drogi startowej” (UMOWA Nr SKN/SP/603336/2024), realizowanego w programie Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

**Studenckie Kóło
Naukowe Tworzą
Innowacje**

Badania były prowadzone w ramach projektu „Bezzatogowy system kontroli stanu oświetlenia drogi startowej” (UMOWA Nr SKN/SP/603336/2024), realizowanego w programie Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.



Skala: 1:20

Algorytm oceny stanu oświetlenia krawędziowego pasa startowego

Badania przeprowadzono w warunkach nocnych na lotnisku EPPG Kąkolewo, wykorzystując dwa odmienne bezzałogowe statki powietrzne (BSP): stałopłat własnej konstrukcji oraz wielowirnikowiec DJI Mavic 3 T wyposażony w moduł RTK.

W ciągu kilkunastu serii lotów inspekcyjnych zgromadzono łącznie 9 694 obrazy (tab. 1). Wszystkie obrazy prezentują lampy krawędziowe pasa startowego w pełnym zaciemnieniu, bez dodatkowych źródeł światła. Każde zdjęcie zaklasyfikowano ręcznie jako ON (lampa świeci) lub OFF (lampa wygaszona). Wyniki adnotacji zestawiono w tabeli 1, natomiast przykładowe ujęcia z obu platform przedstawiono na zdj. 6a–b.

Platforma	Obrazy ON	Obrazy OFF	Razem
Mavic 3T	5 855	1 042	6 807
Stałopłat	2 597	1 042	3 639

Tabela 1. Liczebność zbioru danych z podziałem na platformy i klasy jasności



Zdj. 6a. Zapalona lampa - Mavic 3T

Zdj. 6b. Zapalona lampa - Stałopłat

Ekstrakcja regionu zainteresowania (ROI)

Aby algorytm był całkowicie niezależny od niepewności RTK i dryfu kamery, dla każdego obrazu automatycznie wycięto region zainteresowania (ROI) o rozmiarze 600x700 px, centrowany na globalnym maksimum jasności obrazu. Wstępna lokalizacja lampy opiera się na wzmocnieniu jej kontrastu względem tła. W tym celu oryginalny obraz konwertowano do skali szarości I_{gray} , a następnie poddawano filtracji medianowej (jądro 5×5), co redukuje szum impulsowy. Wynikowy obraz podnoszono punktowo do kwadratu, otrzymując $I_{boost} = \left(\text{medianBlur}(I_{gray}, 5) \right)^2$, dzięki czemu pojedyncze jasne piksele stają się relatywnie jeszcze

jaśniejsze, podczas gdy ciemne tło pozostaje prawie niezmienione. Suma jasności pikseli po kolumnach i wierszach I_{boost} po wygładzeniu filtrem Gaussa 31 px tworzy jednowymiarowe projekcje, których maksima wyznaczają środek ROI.

Klasyfikacja ON/OFF

Wycięte ROI konwertowano do przestrzeni HSV. Piksele spełniające następujące progowe: $H \in [0, 180], S \geq 50, V \geq 230$ oznaczono maską binarną. Stosunek liczby pikseli spełniających powyższe warunki do całkowitej liczby pikseli w ROI oznaczono jako współczynnik r gdzie

$$r = \frac{\#\{(x,y): (H,S,V) \in \text{mask}\}}{ROI_{\text{area}}}$$

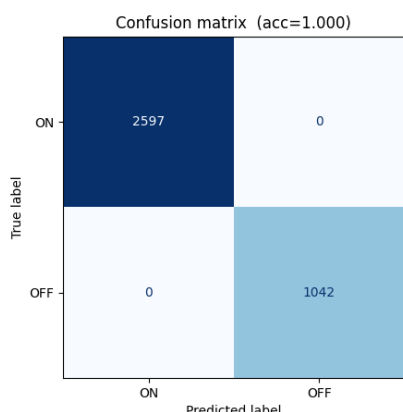
Przy wartości granicznej $r = 10^{-4}$ współczynnik ten jednoznacznie rozróżniał stany ON i OFF lampy. Parametry progowe dobrano empirycznie na podzbiorze walidacyjnym obejmującym oba typy platform.

Wyniki

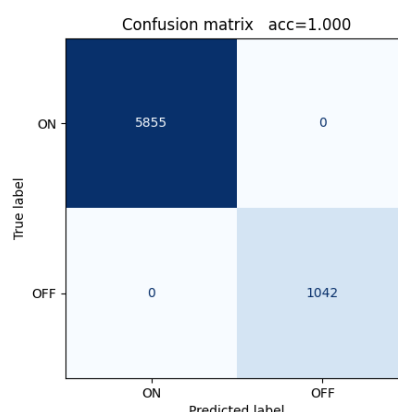
Po przetworzeniu wszystkich obrazów wynik binarny porównano z adnotacją referencyjną. Macierze pomyłek dla obu platform przedstawiono na Zdj. 7a-b i Tabeli 2.

Platforma	TP	FN	FP	TN	Dokładność
Mavic 3T	5 855	0	0	1 042	1.0
Stałopłat	2 597	0	0	1 042	1.0

Tabela 2. Podsumowanie metryk



Zdj. 7a. Macierz pomyłek - stałopłat



Zdj. 7b. Macierz pomyłek - Mavic 3T

Zarówno dla platformy wielowirnikowej, jak i stałopłata nie odnotowano żadnych błędów klasyfikacji. Brak fałszywych klasyfikacji oznacza precyzję i czułość równe 1 dla obu klas.



Wnioski:

Wysoki margines między prawidłowo działającą lampą a niskim poziomem tła pozwala na zastosowanie bardzo prostych poziomów progowych, co przekłada się na niską złożoność obliczeniową.

Skuteczność algorytmu była identyczna dla obu platform (stałopłat i wielowirnikowiec), co wskazuje, że o poprawności rozstrzygnięcia stanów lampy decyduje przede wszystkim kontrast fotometryczny sceny i logika przetwarzania, a nie nośnik obrazów. Algorytm jest więc platformowo niezależny i łatwo przenośny.

Różnice między platformami BSP dotyczą przede wszystkim organizacji misji. Stałopłat wymaga dłuższego przygotowania do lotu, ale szybciej pokrywa trasę dzięki ciągłemu przelotowi bez postojów nad punktami. Wielowirnikowiec startuje szybciej i umożliwia precyzyjny zawis nad każdym punktem oświetlenia, jednak wydłuża to czas misji.

W kolejnych etapach planuje się rozszerzyć badania o detektory oparte na metodach uczenia maszynowego, które umożliwią rozróżnianie poziomu luminancji każdej lampy. Taka, bardziej szczegółowa klasyfikacja jasności pozwoli wychwycić subtelne odchylenia od wartości referencyjnych i w rezultacie wcześniej sygnalizować anomalie, które mogą świadczyć o postępującym zużyciu lub zbliżającej się awarii źródła światła.

Literatura i źródła:

- [1] Raymer, D. P. Aircraft Design: A Conceptual Approach.
- [2] Abłamowicz, A.; Nowakowski, W. Podstawy aerodynamiki i mechaniki lotu.
- [3] ICAO Annex 14, Vol. I, rozdz. 5, § 5.3.9.7(b)
- [4] OpenCV Developers. "Changing Colorspaces" oraz "Thresholding Operations using inRange", OpenCV 4.x Documentation.
- [5] Fisher, R.; Perkins, S.; Walker, A.; Wolfart, E. "Gaussian Smoothing." HIPR2 – University of Edinburgh