

# Kamera termowizyjna wspomagająca nawigację pojazdów UAV

Grzegorz Bieszczad, Krzysztof Sawicki, Sławomir Gogler, Andrzej Ligienza, Mariusz Mścichowski

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, Zakład Techniki Podczerwieni i Termowizji, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46

**Streszczenie:** Tematem artykułu jest ocena skuteczności opracowanego czujnika przeznaczonego do wspomagania nawigacji bezałogowych statków powietrznych (BSP). Jego działanie opiera się na przetwarzaniu obrazów pozyskiwanych z kamery termowizyjnej pracującej w paśmie długofalowej podczerwieni (LWIR) umieszczonej pod podwoziem pojazdu. Przemieszczenie przestrzenne pojazdu określane jest poprzez analizę ruchu charakterystycznych punktów promieniowania cieplnego (grunt, las, budynki itp.) na zdjęciach uzyskanych za pomocą kamery termowizyjnej. Zakres i kierunek przemieszczenia uzyskuje się poprzez przetwarzanie strumienia kolejnych obrazów za pomocą algorytmu opartego na przepływie optycznym wyznaczanym w czasie rzeczywistym. Analiza rozkładu promieniowania pozwala na obliczenie wektora translacji kamery w przestrzeni. Zaletami systemów pomiarowych opartych na analizie obrazu termicznego, w porównaniu z tradycyjnymi inercyjnymi czujnikami nawigacyjnymi, jest brak efektu dryftu, odporność na zmiany pola magnetycznego, mała podatność na zakłócenia elektromagnetyczne oraz na zmiany warunków atmosferycznych. W przeciwieństwie do czujników czułych na światło widzialne, czujnik termowizyjny oferuje pracę w całkowitej ciemności (noce o złej pogodzie i w pomieszczeniach).

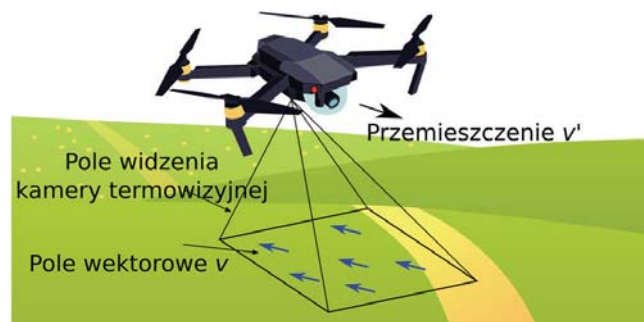
**Słowa kluczowe:** termowizja, nawigacja, analiza obrazu, przetwarzanie obrazu, UAV, przepływ optyczny

## 1. Wprowadzenie

Czujnikami nawigacyjnymi dla pojazdów bezałogowych obecnie są czujniki GPS, barometryczne, akcelerometry i żyroskopy. Czujniki, które czerpią informacje o położeniu z ruchu względnego, przyspieszenia lub momentu pędu, są nazywane czujnikami bezwładnościowymi. Okazuje się jednak, że powszechnie instalowane na pojazdach typu BSP kamery mogą być również bogatym źródłem informacji o ruchu względnym pojazdu, na którym są zainstalowane. Coraz powszechniejsze są czujniki świadomości sytuacyjnej, przeznaczone do wykrywania przeszkód i unikania kolizji [4]. Takie systemy są często tworzone przy użyciu algorytmów przetwarzania obrazu i uczenia maszynowego do analizy sygnału z kamer stereoskopowych. Czujniki wizyjne dostarczają dodatkowych informacji do systemu nawigacyjnego, zwiększając w ten sposób precyzję szacowania pozycji BSP. Takie systemy często wykorzystują kamery pracujące w widzialnej części widma promieniowania elektromagnetycznego. Jednym z pierwszych udanych wdrożeń takiego czujnika

jest PX4FLOW [5]. Termowizyjny, inercyjny czujnik opracowywany w Wojskowej Akademii Technicznej, to nowy typ czujnika pozycjonującego, który ma na celu nie tylko zwiększenie dokładności i niezawodności systemu nawigacyjnego, ale dodatkowo umożliwi akwizycję obrazów termowizyjnych jako danych uzupełniających świadomość sytuacyjną. Obrazowanie termowizyjne umożliwia nawigację w całkowitej ciemności, trudnych warunkach pogodowych lub w pomieszczeniach. Dodatkowe informacje wizualne mogą zwiększyć niezawodność systemu wykrywania przeszkód i nawigacji. Szkic koncepcyjny opracowanego czujnika zainstalowanego na BSP pokazano na rys. 1.

Niezależnie od użytego źródła obrazu, możliwe jest wyodrębnienie ruchu punktów na obrazie za pomocą algorytmów przepływu optycznego. Pole wektorowe zawierające informacje



Rys. 1. Koncepcja czujnika inercyjnego opracowanego w ramach projektu

Fig. 1. Concept image of motion flow camera on the drone

**Autor korespondujący:**

Grzegorz Bieszczad, grzegorz.bieszczad@wat.edu.pl

**Artykuł recenzowany**

nadesłany 09.07.2021 r., przyjęty do druku 18.08.2021 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

o ruchu nazywane jest polem ruchu. Pole ruchu jest tworzone przez rzutowanie trójwymiarowego pola wektorowego prędkości na płaszczyznę obrazu. Niech  $p = [x, y, z]$  będzie punktem w przestrzeni obiektu kamery, oś optyczna będzie osią  $z$ , a  $f$  oznacza ogniskową obiektywu kamery. Środek rzutowania wyznacza punkt przecięcia osi optycznej z główną płaszczyzną obrazu (lub tylnym punktem węzłowym). Projekcja  $p' = [x', y', z']$  punktu  $p$  na ognisku dana jest wzorem:

$$\frac{p'}{f} = \frac{p}{z} \rightarrow p' = \frac{fp}{z} \quad (1)$$

Ponieważ długość ogniskowej  $f$  jest odległością od głównej płaszczyzny obrazu do płaszczyzny obrazu, trzecia współrzędna  $p'$  jest stała:  $p' = [x', y', f]$ . Zakładając klasyczny perspektywiczny model kamery, transformację można modelować równaniem macierzowym:

$$p' = K \cdot T \cdot M \cdot p \quad (2)$$

gdzie:  $K$  – wewnętrzne parametry kamery,  $T$  – macierz transformacji perspektywy kamery,  $M$  – macierz transformacji geometrii. Równanie transformacji perspektywicznej daje wynik trójwymiarowy. Aby otrzymać położenie na płaszczyźnie obrazu należy zredukować składową  $z$  i obliczyć składowe  $x, y$  równaniami:

$$x' \rightarrow \frac{p'_x}{p'_z}, \quad y' \rightarrow \frac{p'_y}{p'_z} \quad (3)$$

Macierz transformacji geometrii  $M$  może być uwzględniona w macierzach transformacji różnych typów ruchu, które mogą być użyte do modelowania ruchów kamery, takich jak śledzenie i wyginanie przez translację równoległą do płaszczyzny obrazu, obrót przez translację w płaszczyźnie normalnej do płaszczyzny obrazu, toczenie się, obracanie wokół osi obrazu oraz pochylanie przez obracanie w dwóch innych osiach. Nie wszystkie ruchy muszą być uwzględniane w czujniku nawigacyjnym, skuteczność wspomagania nawigacji jest możliwa nawet dla czujnika wyznaczającego jedynie translację jak to opisano w [8], gdzie uwzględniono jedynie przesunięcie w płaszczyźnie równoległej do podłoża. W takim przypadku ruch względny kamery i punktu  $p$  sprowadza się do:

$$v = -v_T - \omega p \quad (4)$$

gdzie  $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]$  jest prędkością kątową, a  $v_T = [v_{Tx}, v_{Ty}, v_{Tz}]$  składową translacyjną ruchu. Obliczenie pochodnej po czasie obu stron równania (1) prowadzi do związku między prędkością w ramce odniesienia kamery a prędkością przepływu  $p'$  w płaszczyźnie obrazu:

$$v' = \frac{dp'}{dt} = f \frac{\frac{dp}{dt} - \frac{dz}{dt} \frac{p}{z}}{z^2} = f \frac{zv - v_z p}{z^2} = [v'_x, v'_y, v'_z] \quad (5)$$

Składowe  $x$  i  $y$  pola ruchu po podstawieniu (5) i uwzględnieniu geometrii płaszczyzny obrazu (4) można zapisać jako:

$$v'_x = \frac{v_{Tz}x - v_{Tx}f}{z} - \omega_y f + \omega_z y + \frac{\omega_x xy - \omega_y x^2}{f} \quad (6)$$

$$v'_y = \frac{v_{Tz}y - v_{Ty}f}{z} - \omega_x f + \omega_z x + \frac{\omega_x y^2 - \omega_y xy}{f} \quad (7)$$

Części obrotowe nie są zależne od współrzędnej  $Z$ , a zatem prędkość kątowna nie zawiera informacji o głębokości sceny. Składowe translacyjne w (6) i (7) są skalowane w zależności od wartości ogniskowej obiektywu oraz wraz z aktualną odległością (współrzędna  $Z$ ) od sceny, co wynika z zależności (3). Jeśli znana jest odległość  $Z$  (np. z barometru lub dalmierza) oraz znana i skompensowana prędkość obrotowa, można obliczyć prędkość translacyjną w skali rzeczywistej ze wzoru:

$$V_m = v' \frac{z}{f} \quad (8)$$

Przedstawione obliczenia są prawidłowe, jeśli odległość od sceny jest stała w polu widzenia. Sytuacja taka jest typowa dla większości misji pojazdu latającego, o ile kamera jest skierowana prostopadle do podłoża. W przeprowadzonym eksperymencie zastosowano obiektyw podczerwieni o ogniskowej 19 mm dostosowanej do pracy z matrycą o rozmiarze 640 oraz rozmiarze detektora 12. Wnioskowanie o położeniu kamery jest możliwe tylko przy zadanym ruchu obserwowanej sceny w płaszczyźnie obrazu. Prędkość obiektów na płaszczyźnie obrazu można określić za pomocą metod przepływu optycznego, gdzie jest ona wyprowadzana z przemieszczenia obrazu do obrazu w czasie. Podstawowe podejście do estymacji prędkości uwzględnia analizę dwóch kolejnych ramek, gdzie ramka przeszła jest traktowana jako ramka odniesienia. W kamerze o stałej szybkości generowania klatek obrazu, takiej jak mikrobolometryczna kamera termowizyjna, można założyć stały odstęp między ramkami, o ile moc obliczeniowa systemu jest wystarczająca do przeprowadzenia wszystkich obliczeń w czasie mniejszym niż ten odstęp. W przeciwnym przypadku mogą nastąpić straty ramek obrazu i odstęp między kolejnymi analizowanymi obrazami będzie odpowiednio zwielokrotniony. W przyjętym rozwiązaniu czas między ramkami jest sprawdzany dzięki zaimplementowanemu mechanizmowi numerowania ramek. Dzięki temu w przypadku chwilowego spadku wydajności systemu obliczeniowego, algorytm wyznaczania dynamiki ruchu uwzględnia dodatkowy odstęp czasowy wynikający z utraconych ramek obrazu.

## 2. Tor przetwarzania danych

Detektory podczerwieni mają o wiele niższe rozdzielczości i cechują się złożoną konstrukcją w porównaniu do tych stosowanych w fotografii. Wymagają stosowania specjalistycznych i nietypowych metod przetwarzania obrazu w celu uzyskania dobrej jakości termogramu. Dodatkowo na podstawie otrzymanego obrazu należy przeprowadzić wnioskowanie na temat względnych przesunięć pojazdu, na którym owa kamera się znajduje. Takie dane są zbierane w dronie przez system obliczeniowy autopilota i są uwzględniane wraz z danymi z innych typów czujników do wiarygodnego wyznaczenia położenia pojazdu. Następuje tu tzw. synteza danych w systemie wieloczułnikowym, z uwzględnieniem jakości i wiarygodności danych z każdego czujnika z osobna.

W kamerze termowizyjnej wysokiej rozdzielczości będącej kluczowym elementem czujnika inercyjnego zastosowano moduł matrycy detektorów mikrobolometrycznych o wymiarach  $640 \times 480$ , która może być w całości odczytywana 60 razy na sekundę. System przetwarzania danych z takiej matrycy musi przetworzyć  $640 \times 480 \times 60 = 18\,432\,000$  odczytanych wartości sygnału z matrycy na sekundę.

System obliczeniowy zintegrowany z modulem sensora termowizyjnego został zaprezentowany na rys. 2.



Rys. 2. Układ obliczeniowy zintegrowany z termowizyjnym modułem sensorowym

Fig. 2. Computing system integrated with the thermal imaging sensor module

W celu przeprowadzenia obliczeń związanych z przetwarzaniem obrazu skonstruowano hybrydowy system obliczeniowy składający się ze specjalizowanych układów zaimplementowanych w strukturze układu FPGA oraz z mikroprocesora zgodnie z opracowaną autorską architekturą systemu przetwarzania obrazu w czasie rzeczywistym [1]. System opracowano w układzie typu Cyclone V SoC-FPGA firmy Intel. Część związana z przetwarzaniem sygnału z matrycy mikrobolometrycznej na użyteczny obraz termowizyjny została w całości zrealizowana w części FPGA układu scalonego. Część związana z realizacją algorytmu wyznaczania przepływu optycznego i wyznaczania wektora przesunięcia pojazdu została zrealizowana w części mikroprocesorowej układu w postaci programu pracującego pod kontrolą systemu Linux. Połączenie umożliwiające wymianę danych między częścią osadzoną w układzie FPGA a mikroprocesorem zostało zrealizowane za pomocą specjalizowanego układu DMA do transmisji sygnałów obrazowych.

System do cyfrowego przetwarzania obrazu w kamerze wysokiej rozdzielczości wykonuje następujące zadania przygotowujące obraz do wyznaczania przepływu optycznego:

- cyfrowa korekcja niejednorodności charakterystyk detektorów,
- zastąpienie sygnałów z wadliwych detektorów w matrycy,
- filtracja obrazu w celu uwydatnienia istotnych cech obiektów na obrazie termowizyjnym,
- skalowanie obrazu,
- kompresja dynamiki sygnału,
- przekształcenie jednopunktowe w celu przygotowania do dalszego przetwarzania lub zobrazowania.

Powyższe operacje są wykonywane w specjalizowanym układzie cyfrowego przetwarzania danych zrealizowanym w układzie FPGA. Operacje są realizowane przez opracowany

autorski układ pracujący w architekturze *pipeline* i powoduje opóźnienie w torze przetwarzania danych wynoszące sumarycznie dwie linie obrazu i 11 cykli zegarowych. Opóźnienie rzędu 150  $\mu$ s ma znikome znaczenie w zadaniu nawigacji inercyjnej. Specjalizowany układ DMA przekazuje strumień danych do dalszego przetwarzania do pamięci dostępnej dla systemu mikroprocesorowego i synchronizuje przepływ danych między strumieniem obrazowym i oprogramowaniem procesora dzięki mechanizmowi sprzętowego przerwania i odpowiedniej jego obsługi w specjalnie napisanym sterowniku pracującym pod kontrolą jądra systemu Linux. Dalej przedstawiono kluczowe etapy przetwarzania danych niezbędne do realizacji zadania nawigacji za pomocą czujnika obrazowego z zastosowaniem czujnika podczerwieni.

## 2.1. Korekcja niejednorodności

Mikrobolometryczne FPA i detektory fotonowe charakteryzują się niepożądaną niejednorodnością odpowiedzi detektora pobudzonego jednorodnym promieniowaniem optycznym. Przyczyną tych odchyśleń są niedoskonałości poszczególnych detektorów i układu odczytowego, wynikające z procesu technologicznego. Niewielkie różnice w parametrach detektora, wynikające z rozrzutu technologicznego, powodują powstanie losowej niejednorodności odpowiedzi detektora na jednorodne promieniowanie [10]. Tolerancje produkcyjne ślepego bolometru i wzmacniacza całkującego powodują powstanie charakterystycznego wzoru kolumnowego. Z powodu różnych niedoskonałości w matrycy detektorów, kamera na podczerwień wytwarza niejednorodny obraz z nałożonym stałym wzorem szumu (FPN), nawet gdy oświetlone jest jednorodnym promieniowaniem podczerwonym. Należy więc zastosować w kamerze termowizyjnej tzw. algorytm korekcji niejednorodności. W prezentowanym rozwiązaniu zastosowano dwupunktową korekcję niejednorodności (TPNUC [10]) oraz specjalizowany moduł obliczeniowy zrealizowany w układzie FPGA pracujący w czasie rzeczywistym, służący do obliczenia wyników korekcji sygnału z matrycy. Współczynniki korekcyjne nachylenia charakterystyki (Gain) są stałe dla urządzenia i danego egzemplarza matrycy i są wyznaczone na stanowisku laboratoryjnym z dwoma referencyjnymi ciałami czarnymi. Natomiast współczynniki przesunięcia (offsetu) są wyznaczone za każdym razem, gdy pojazd BSP startuje i są one wyznaczone na podstawie jednorodnego promieniowania specjalnie przygotowanej powierzchni lądowiska, z której startuje pojazd BSP.

## 2.2. Usuwanie sygnału wadliwych pikseli

W urządzeniu zastosowano metodę usuwania sygnału z wadliwych detektorów [11] i polegającą na zastąpieniu sygnału wadliwego detektora sygnałem detektora, który był odczytany bezpośrednio przed nim. Takie rozwiązanie zrealizowane w układzie FPGA ma najmniejsze możliwe opóźnienie przetwarzania danych (dokładnie jeden cykl zegarowy) i zużywa najmniejszą ilość zasobów (wymaga zastosowania jednego rejestru pamiętającego na każdy bit szerokości magistrali danych) spośród stosowanych metod usuwania wadliwych pikseli.

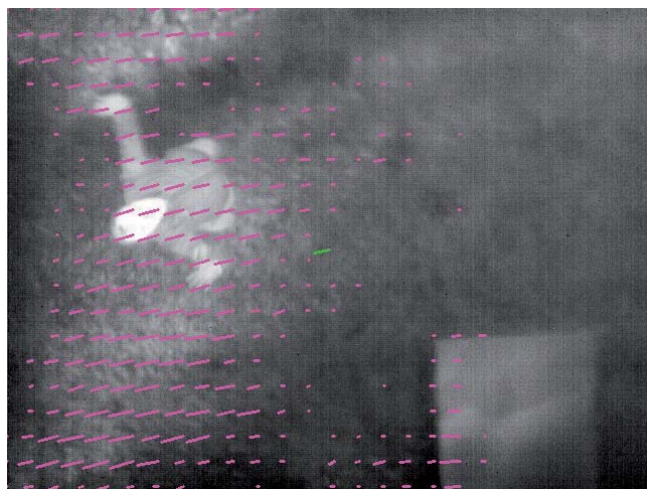
## 2.3. Skalowanie obrazu

Skalowanie obrazu zastosowane w urządzeniu powoduje dwukrotne zmniejszenie rozdzielczości przestrzennej obrazu. Zmniejszenie rozdzielczości obrazu jest wymagane w urządzeniu z dwóch powodów: zmniejszenia liczby danych do przetworzenia w układzie mikroprocesorowym oraz zwiększenia rozdzielczości termicznej urządzenia. Obliczona wartość piksela w obrazie poddanym skalowaniu wyliczana jest jako średnia z czterech pikseli obrazu pierwotnego. Ponieważ szum czasowy we wszystkich detektorach jest nieskorelowany, to w ten sposób

zgodnie z teorią uśredniania [7] stosunek sygnału do szumu zwiększa się dwukrotnie.

## 2.4. Algorytm przepływu optycznego

W urzędzeniu do wyznaczania przepływu optycznego w obrazie zastosowano algorytm Farnebacka oraz implementację tego algorytmu występującą w udostępnionej publicznie bibliotece OpenCV [3]. Metoda Farnebacka polega na lokalnej aproksymacji obrazu odniesienia oraz aktualnie analizowanego za pomocą odpowiednich dwuwymiarowych wielomianów trzeciego stopnia, a następnie analitycznym obliczeniu przesunięcia między funkcjami wielomianowymi. Lokalne aproksymacje są dokonywane dla otoczenia każdego piksela na obrazie. W wyniku przeprowadzenia obliczeń metodą Farnebacka powstaje tak zwane gęste pole wektorowe przepływu optycznego, to znaczy, dla każdego piksela w obrazie przypisany jest dokładnie jeden wektor przesunięcia. Przykładowe pole wektorowe uzyskane dla obrazu termowizyjnego z czujnika inercyjnego zainstalowanego na pojeździe latającym zaprezentowano na rys. 3.



Rys. 3. Wyznaczone pole wektorowe metodą Farnebacka dla wybranej ramki obrazu z sekwencji obrazów termowizyjnych

Fig. 3. Determined vector field using the Farnebeck method for a selected image frame from an infrared image sequence

Praktycznie wykonane pomiary przesunięć obiektów na obrazie charakteryzują się zróżnicowaną i zależną od czasu i przestrzeni dokładnością spowodowaną szumami na obrazie i fragmentami obrazu o jednorodnej temperaturze, gdzie znalezienie charakterystycznych cech obiektów jest niemożliwe. W tego typu obszarach wykrycie ruchu obarczone jest dużym błędem. W urzędzeniu opracowano specjalną technikę filtracji danych pomiarowych, która dokonywana jest na etapie syntezy informacji, prowadzącej do wyznaczania trajektorii z pola wektorowego.

## 2.5. Wyznaczenie trajektorii

W celu wyznaczenia danych nawigacyjnych niezbędne jest dokonanie syntezy informacji, w wyniku której powinno uzyskać się jeden wektor przesunięcia całego obrazu z ramki na ramkę. W teoretycznym przypadku wyznaczenie przesunięcia całego obrazu sprowadzałoby się do wyznaczenia wartości średniej wektorów przesunięcia z całego obrazu [2]. W rzeczywistym obrazie konieczna jest jednak dodatkowa procedura pozwalająca na eliminację nieprawidłowo wyznaczonych przesunięć obrazu, na przykład w miejscach, w których obraz jest zbyt jednolity lub zaszumiony.

W opisanym rozwiązaniu zastosowano mapę absolutnych różnic między obrazami, pełniącą funkcję wagi, dyskryminującą wiarygodne punkty danych od danych niewiarygodnych. Za jej

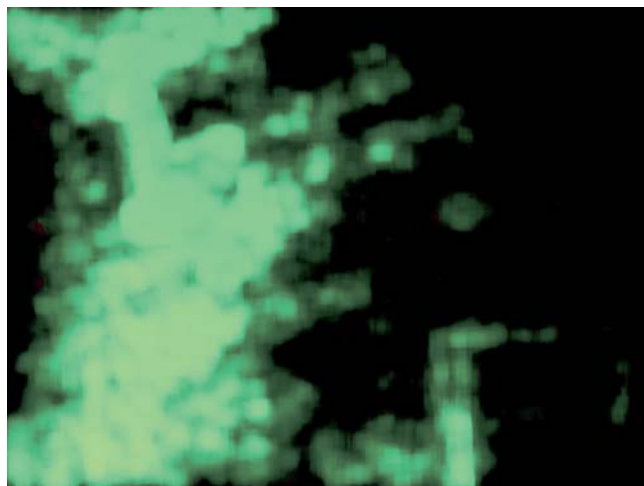
pomocą obliczana jest ostateczna wartość wektora ruchu. Rozwiązanie przyjęto wychodząc z założenia, że wektory ruchu będą wyznaczone dla fragmentów obrazu prezentujących największy kontrast oraz dla takich sekwencji ruchu, które powodują największą zmianę w obrazie. Obraz różnicowy służący do eliminacji niewiarygodnych danych jest obliczany za pomocą wzoru (9), a obliczony w ten sposób przykładowy obraz został zaprezentowany na rys. 4.

$$d(x, y) = |f_t(x, y) - f_{t+\Delta t}(x, y)| \quad (9)$$

Przykładowy obraz, na którym zaprezentowano efekt filtracji pola wektorowego względem obrazu różnicowego zaprezentowano na rys. 5.

Trajektoria pojazdu składa się z sekwencji wyznaczonych wektorów przesunięcia pojazdu. Rzeczywiste przesunięcie pojazdu, uwzględniając niezbędną do obliczeń wysokość, na której znajduje się pojazd, wyznaczone jest w module sterującym pracą drona. Wyznaczoną tą metodą trajektorię zaprezentowano na rys. 6.

Oprogramowanie do przetwarzania danych jest zaprojektowane w postaci zbioru programów pracujących pod kontrolą systemu Linux i napisane w sposób uniwersalny, pozwalający na pracę na systemie wbudowanym SoC-FPGA lub w serwerze



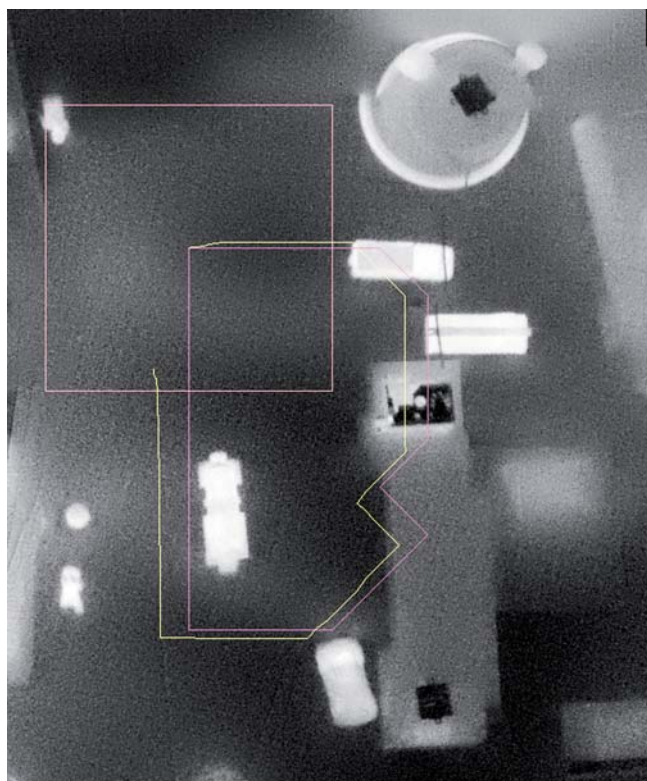
Rys. 4. Obraz różnicowy wyznaczony dla dwóch kolejnych ramek obrazu termowizyjnego wyznaczony według wzoru (9)

Fig. 4. The differential image determined for two consecutive frames of the thermal image determined according to the formula (9)



Rys. 5. Zaznaczone wektory ruchu uwzględnione do obliczenia całkowitego przesunięcia pojazdu

Fig. 5. Marked motion vectors taken into account in the calculation of the total vehicle displacement



Rys. 6. Trajektoria pojazdu UAV wyznaczona z sekwencji obrazów zarejestrowanych za pomocą czujnika zainstalowanego na pojeździe  
Fig. 6. The trajectory of the UAV determined from the sequence of images recorded with the sensor installed on the vehicle

obliczeniowym w chmurze, w przypadku obliczeń on-line do celów szybkiego prototypownia i testowania rozwiązań algorytmicznych.

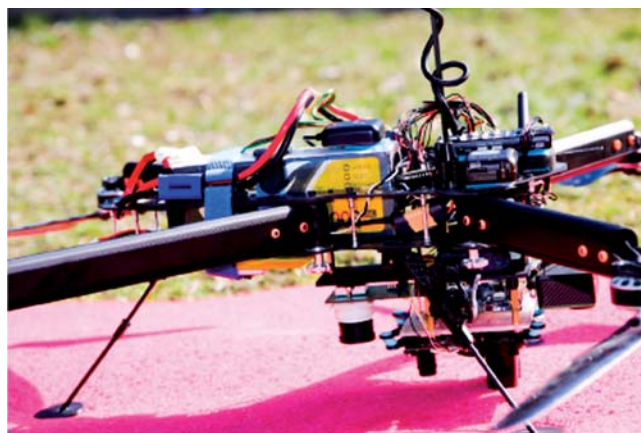
### 3. Platforma testowa

Do budowy platformy testowej – pojazdu latającego BSP – zastosowano moduły realizujące oprogramowanie kontrolera lotu wykorzystujące otwarte źródłowe oprogramowanie PX4 [9]. PX4 składa się z trzech głównych warstw – stosu lotniczego, warstwy komunikacyjnej i warstwy sprzętowej (kontroler lotu). Oprogramowanie PX4 zostało wybrane ze względu na otwarto-źródłowy charakter oraz jego uniwersalność. Odpowiednio dostosowane może zostać użyte do kontroli różnego typu autonomicznych platform mobilnych jak latające, pływające, jeżdżące etc. Wszystkie typy pojazdów wspierane przez PX4 współdzieloną bazę programową, dzięki czemu funkcjonalność jest podzielona na wymienne moduły, połączone asynchronicznym systemem komunikacji. Moduły komunikują się ze sobą za pomocą magistrali  $\mu$ ORB, przez co system jest reaktywny. Oznacza to, że jest asynchroniczny i aktualizuje swój stan, kiedy tylko dostępne są nowe dane z urządzeń pomiarowych. Wszystkie funkcje i komunikacja odbywają się równolegle. Taka architektura umożliwia wymianę poszczególnych modułów, niekiedy nawet w czasie działania systemu. Dzięki dostosowaniu projektowanego czujnika do modułowego systemu PX4 możliwe jest zastosowanie go nie tylko na platformach latających.

W układzie kontrolera lotu występuje moduł szacujący pozycję i stan dynamiczny pojazdu na podstawie danych z czujników zintegrowanych w kontrolerze lotu lub z czujników peryferyjnych. Następuje tu synteza danych gdzie na przykład dane z akcelerometrów, barometru i lidarów służą jednocześnie do

obliczenia wysokości lotu. Układ kontrolera pobiera z układu nawigacyjnego lub zdalnego sterowania informacje o wymuszonej pozycji oraz o szacowanym stanie chwilowym platformy latającej. Zadaniem kontrolera jest dopasowanie wartości chwilowego stanu platformy do wartości wymuszenia z ustaloną dokładnością. Wartością wyjściową z kontrolera jest wartość korekcy potrzebnej do osiągnięcia stanu wymuszonego. Mikser pobiera informacje o korekcy z układu kontrolera i tłumaczy je na sygnały dostosowane do układu wykonawczego, oraz dba o to by wartości wymuszeń nie przekraczały wartości granicznych. W przypadku platform latających są to najczęściej sygnały z modulacją szerokości impulsów, sterujące prędkością obrotów poszczególnych silników. Dynamika wartości poszczególnych sygnałów jest zależna od układu silników względem środka ciężkości platformy i momentu bezwładności całej konstrukcji.

Skonstruowany czujnik termowizyjny za pomocą interfejsu I<sup>2</sup>C wysyła do kontrolera lotu dane na temat względnych przesunięć obrazu, natomiast kontroler przetwarza te dane z uwzględnieniem, znanej z syntezy danych z innych czujników, wysokości drona, a następnie uwzględnia obliczone przesunięcie względne w module syntezy danych dynamicznych, zrealizowanym za pomocą Rozszerzonego Filtru Kalmana (EKF).



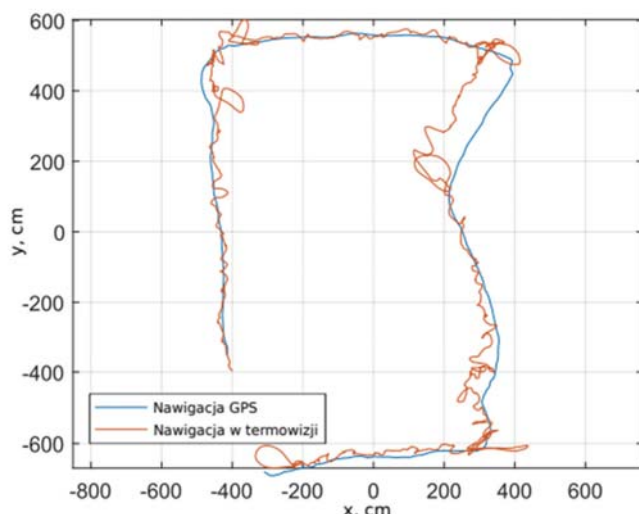
Rys. 7. Czujnik zainstalowany na dronie w trakcie przygotowania do lotu  
Fig. 7. The sensor is installed on the drone during preparation for flight

Kontroler lotu PX4 dostarcza za pomocą systemu telemetrii danych z każdego czujnika zainstalowanego w systemie oraz wyniki wyznaczania pozycji. Dzięki temu w łatwy sposób można porównać jakość sygnału nawigacyjnego pochodzącego z zaprojektowanego czujnika z innymi elementami nawigacyjnymi systemu. Podłączony do systemu czujnik (zaprezentowany na rysunku 7) dostarczał informacji o pozycji z częstotliwością 15 Hz. Częstotliwość żądań pozycji z kontrolera lotu była niższa niż częstotliwość pracy układu analizy obrazu termowizyjnego, układ czujnika nawigacyjnego działał jednak na zasadzie akumulacji wyników i w momencie żądania odczytu pozycji zwracał skumulowaną wartość wyliczoną z całego okresu między zapytaniami. Dane służyły do przeprowadzenia analizy porównawczej z danymi uzyskanymi z precyzyjnego układu A-GPS bazującym na zintegrowanym wielosystemowym odbiorniku typu ZED-F9P firmy U-Blox osiągającym dokładność do 1 cm działając w trybie różnicowym z zastosowaniem referencyjnej nieruchomej stacji bazowej [6].

### 4. Analiza danych i wnioski

Zebrane przez system telemetryczny dane posłużyły następnie do analizy porównawczej pozwalając na ocenę dokładności

skonstruowanego czujnika inercyjnego. Na rysunku 8 zaprezentowano zarejestrowane trajektorie lotu z dwóch czujników nawigacyjnych: GPS (kolorem niebieskim) i zaprojektowanego (kolorem czerwonym). Trasa lotu obejmującego obwód obszaru prostokątnej o wymiarach około  $12\text{ m} \times 8\text{ m}$  została poprawnie odwzorowana zarówno przez czujnik GPS jak i skonstruowane urządzenie. Przykładowa trasa obejmowała lot trwający około 2 minut. Do analizy porównawczej wybrano fragment trasy, w którym pojazd znajdował się na wysokości ok 6 metrów. Pominięto fragmenty rejestracji obejmujące wznoszenie i lądowanie, gdyż poniżej wysokości 3 m kamera termowizyjna nie była w stanie ostro zobrazować szczegółów obserwowanego



Rys. 8. Przykładowa ścieżka lotu wyznaczona w module GPS oraz w prezentowanym module Nawigacji analizującej obraz termowizyjny  
Fig. 8. An exemplary flight path determined in the GPS module and in the presented module that analyzes the thermal image

terenu z powodu ograniczeń głębi ostrości. Maksymalna różnica w wyznaczonej pozycji przekraczała 1 m, szczególnie w momentach zmiany kierunku lotu, gdy występowały silne przechyły pojazdu. Średnio jednak różnica w wyznaczeniu pozycji trasy zawierała się w zakresie 25 cm RMS.

Zaprezentowana metoda nawigacji z zastosowaniem techniki analizy przepływu optycznego pozwala na wspomaganie nawigacji pojazdu latającego w warunkach ograniczonego dostępu do systemu GPS. Zastosowanie czujnika termowizyjnego umożliwia pracę takiego czujnika w warunkach ograniczonej widoczności lub zupełnej ciemności. Przeprowadzono integrację czujnika z otwarto-źródłowym systemem sterowania dronem PX4, co pozwoliło na przetestowanie rozwiązania w warunkach rzeczywistych. Integracja z systemem nawigacyjnym drona pozwoliła na bezpośrednie porównanie wiarygodności pozyskiwanej z niego informacji nawigacyjnej z opracowanego czujnika z istniejącymi systemami nawigacji inercyjnej i bezwzględnej jak GPS. Przeprowadzone badania porównawcze wykazały średnio-kwadratową dokładność czujnika rzędu 25 cm względem nawigacji GPS. Opracowany czujnik wyposażono w interfejs oraz oprogramowano w sposób pozwalający na komunikację z systemem PX4 i łatwą integrację czujnika z systemami nawigacji w dronach. Dalsze prace nad czujnikiem mogą obejmować miniaturyzację czujnika oraz zwiększenie czułości i szybkości modułu detekcyjnego.

## Podziękowania

Projekt jest rozwijany w ramach pracy naukowej finansowanej przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu nr DOB-2P/02/09/2017.

## Bibliografia

1. Bieszczad G., *SoC-FPGA Embedded System for Real-Time Thermal Image Processing*. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2016, 469–473, DOI: 10.1109/MIXDES.2016.7529788.
2. Bieszczad G.T., Gogler S., Krupiński M., Ligienza A., Sawicki K., *The Concept of Thermovision Sensor Supporting the Navigation of Unmanned Aerial Platforms*. "Measurement Automation Monitoring", Vol. 65, No.1, 2019, 15–18.
3. Farneback, Gunnar. 2003. "Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion." In *Proceedings of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis*, 363–70. SCIA'03. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
4. Gageik, Nils, Paul Benz, and Sergio Montenegro. 2015. "Obstacle Detection and Collision Avoidance for a UAV with Complementary Low-Cost Sensors." *IEEE Access* 3: 599–609, DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2432455.
5. Honegger D., Lorenz M., Tanskanen P., Pollefeys M., *An Open Source and Open Hardware Embedded Metric Optical Flow CMOS Camera for Indoor and Outdoor Applications*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2013, 1736–1741, DOI: 10.1109/ICRA.2013.6630805.
6. *U-Blox.com*. [www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module].
7. Lyons R.G. *Understanding Digital Signal Processing*. Pearson Education International, 2013.
8. Meier L., *Dynamic Robot Architecture for Robust Realtime Computer Vision*. PhD thesis, 2017, ETH Zurich.
9. Meier L., Honegger D., Pollefeys M., *Px4: A Node-Based Multithreaded Open Source Robotics Framework for Deeply Embedded Platforms*. [In:] IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2015, 6235–6240, DOI: 10.1109/ICRA.2015.7140074.
10. Perry D.L., Dereniak E.L., *Linear Theory of Nonuniformity Correction in Infrared Staring Sensors*. "Optical Engineering", Vol. 32, No. 8, 1993, 1854–1859, DOI: 10.1117/12.145601.
11. Sosnowski T., Bieszczad G., Kastek M., Madura H., *Digital image processing in high resolution infrared camera with use of programmable logic device*. [In:] Optics and Photonics for Counterterrorism and Crime Fighting VI and Optical Materials in Defence Systems Technology VII, 2010, 266–276. International Society for Optics; Photonics; SPIE. DOI: 10.1117/12.865026.

## Thermal Imaging Camera Supporting the Navigation of UAVs

**Abstract:** The topic of this paper is an evaluation of developed sensor intended for navigation aid of unmanned aerial vehicles (UAVs). Its operation is based on processing images acquired with a thermal camera operating in the long-wave infrared band (LWIR) placed underneath a vehicle's chassis. The vehicle's spatial displacement is determined by analyzing movement of characteristic thermal radiation points (ground, forest, buildings, etc.) in pictures acquired by the thermal camera. Magnitude and direction of displacement is obtained by processing the stream of consecutive pictures with optical-flow based algorithm in real time. Radiation distribution analysis allows to calculate camera's self-translation vector. Advantages of measuring translation based on thermal image analysis is lack of drift effect, resistance to magnetic field variations, low susceptibility to electromagnetic interference and change in weather conditions as compared to traditional inertial navigation sensors. As opposed to visible light situational awareness sensors, it offers operation in complete darkness (harsh weather, nights and indoors). The topic of this paper is an evaluation of developed sensor intended for navigation aid of unmanned aerial vehicles (UAVs). Its operation is based on processing images acquired from a thermal camera operating in the long-wave infrared band (LWIR) placed underneath a vehicle's chassis. The vehicle's spatial displacement is determined by analyzing movement of characteristic thermal radiation points (ground, forest, buildings, etc.) in pictures acquired by the thermal camera. Magnitude and direction of displacement is obtained by processing the stream of consecutive pictures with optical-flow based algorithm in real time. Radiation distribution analysis allows to calculate camera's self-translation vector. Advantages of measuring translation based on thermal image analysis is lack of drift effect, resistance to magnetic field variations, low susceptibility to electromagnetic interference and change in weather conditions as compared to traditional inertial navigation sensors. As opposed to visible light situational awareness sensors, it offers operation in complete darkness (harsh weather, nights and indoors).

**Keywords:** thermal imaging, navigation, image analysis, image processing, UAV, optical flow

### dr inż. Grzegorz Bieszczad

grzegorz.bieszczad@wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0001-8048-2609

Ukończył w 2008 r. Wojskową Akademię Techniczną na Wydziale Elektroniki. Stopień doktora otrzymał w 2012 r. Obecnie zajmuje się zagadnieniami związanymi z projektowaniem systemów cyfrowych, programowaniem mikroprocesorów i układów FPGA związanych z cyfrowym przetwarzaniem obrazu, w tym obrazów termicznych.



### dr inż. Krzysztof Sawicki

krzysztof.sawicki@wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-1368-3854

Ukończył Wydział Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2009 r.; rozprawa doktorska z tematyki steganografii w sieciach bezprzewodowych obroniona w WAT w 2019 r.; jego zainteresowania skupiają się na sieciach bezprzewodowych, bezpieczeństwie teleinformatycznym, steganografii i systemach wbudowanych.



### dr inż. Sławomir Gogler

slawomir.gogler@wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-3002-6362

Ukończył Politechnikę Warszawską w 2011 r. na Wydziale Mechatroniki. W 2020 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w Wojskowej Akademii Technicznej. Zajmuje się zagadnieniami konstrukcji układów optycznych oraz modelowaniem matematyczno-fizycznym.



### mgr inż. Andrzej Ligienza

andrzej.ligienza@wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-5789-8531

Tytuł inżyniera otrzymał w 2014 r. po ukończeniu kierunku mechatronika ze specjalizacją inżynierii systemów mechatronicznych. Tytuł magistra otrzymał w 2016 r. po ukończeniu kierunku optoelektronika ze specjalizacją inżynierii systemów optoelektronicznych. W 2018 r. objął stanowisko starszego inżyniera w Zakładzie Techniki Podczerwieni i Termowizji Instytutu Optoelektroniki WAT.



### Mariusz Mścichowski

mariusz.mscichowski@student.wat.edu.pl  
ORCID: 0000-0002-0079-1960

Student Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Jego zawodowe zainteresowania skupiają się na cyfrowych pomiarowych układach elektronicznych oraz szybkim prototypowaniu FDM.

