

Specyfikacja wymagań dla systemu wizyjnej lokalizacji bezzałogowego statku powietrznego

Tomasz Pogorzelski, Sebastian Rutkowski

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Aleja Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa

Streszczenie: W artykule zaprezentowano specyfikację wymagań dla systemu lokalizacji wizyjnej wraz z jego architekturą, wydobywając kluczowe aspekty struktury, komponentów oraz kanałów komunikacyjnych. Omówiono zarówno ogólne założenia projektowe, jak i specyfikację wymagań technicznych, jakie postawiono przed poszczególnymi elementami systemu. Opisano kryteria jakościowe wymagań, jakie musi spełniać każde z nich, aby stanowiło ono wartość dla projektanta, kierownika czy samego zespołu wykonującego zadania związane z projektowaniem lub realizacją produktu. Funkcjonalność systemu zweryfikowano w warunkach laboratoryjnych za pomocą symulacji oraz podczas rzeczywistych lotów. Weryfikacja systemu potwierdziła jego zgodność z postawionymi wymaganiami. Osiągnięcie poziomu TRL 6 potwierdzono integracją wszystkich komponentów w prototypie oraz jego demonstracją w warunkach rzeczywistych, gdzie system spełnił wymagania dokładności lokalizacji (≤ 3 % AGL) i częstotliwości generowania danych ($10 \text{ Hz} \pm 0,5 \text{ Hz}$). Prezentowana technologia jest szczególnie przydatna w środowiskach, gdzie sygnały GNSS są zakłócanie lub niedostępne, zapewniając niezawodność nawigacji. Wyniki pracy stanowią istotny wkład w rozwój technologii nawigacji wizyjnej i mogą być podstawą dla dalszych badań i wdrożeń.

Słowa kluczowe: BSP, nawigacja, lokalizacja wizyjna, redundancja GNSS, specyfikacja wymagań

1. Wprowadzenie

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP) znajdują zastosowanie m.in. w misjach wojskowych, monitoringu środowiska oraz dostarczaniu ładunków. Wymagają niezawodnych systemów nawigacyjnych, jednak tradycyjne rozwiązania oparte na łączności satelitarnej zawodzą w przypadku utraty sygnału lub braku dostępu do usług GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*). Ponadto są podatne na zakłócenia oraz oszustwa dotyczące transmisji GNSS. Rodzi to potrzebę wprowadzenia redundancji informacyjnej w systemach lokalizacji BSP. Przy dzisiejszym rozwoju techniki nie można polegać tylko na jednej metodzie lokalizacji – najczęściej satelitarnej [1]. Mimo licznych regulacji prawnych i ograniczonego dostępu do urządzeń zakłócających pracę odbiorników GNSS, zdarzają się incydenty naruszające wiarygodność odbieranych danych. Nawet jeśli dzieje się to na małą skalę, to nadal jest ryzyko, że zaistnieje, gdy prawidłowa nawigacja jest konieczna. Poza tym występują miejsca, w których odbiorniki nie odbierają wystarczającej liczby sygnałów GNSS, a więc nie mogą wyznaczyć lokalizacji.

Inne formy lokalizacji, jak lokalizacja inercjalna, są obarczone błędami, które rosną z upływem czasu. Rodzi to potrzebę opracowania innych metod, które mogłyby skutecznie wesprzeć powszechną nawigację satelitarną bez konieczności stosowania dodatkowej infrastruktury. W obszarze bezzałogowych statków powietrznych, odpowiedzią mogą być systemy lokalizacji wykorzystujące analizę obrazów pozyskiwanych z kamery pokładowej BSP. W takim systemie informacje dotyczące lokalizacji są przetwarzane wewnątrz statku bezzałogowego, eliminując zależność od zewnętrznych źródeł danych. Metoda wykorzystuje analizę obrazów i wykrywanie obiektów widzianych przez kamerę pokładową, co umożliwia precyzyjną lokalizację statku bezzałogowego w czasie rzeczywistym.

Systemy lokalizacji wizyjnej w BSP znajdują zastosowanie w monitorowaniu środowiska, rolnictwie precyzyjnym, ratownictwie, inspekcji infrastruktury, w ochronie granic, obserwacji wojskowej oraz misjach na terytorium wroga. Opisany system powinien zapewniać precyzyjną lokalizację BSP niezależnie od występujących zakłóceń zewnętrznych. Konieczne jest zatem określenie potrzeb i oczekiwań wobec takich rozwiązań, z uwzględnieniem planowanych zastosowań oraz warunków eksploatacji. Wymagania te muszą zostać starannie sformułowane, aby zagwarantować ich jednoznaczność i poprawną implementację.

Przegląd metod lokalizacji wizyjnej przedstawiono m.in. w artykule [2]. Porównano tu systemy lokalizacji BSP z uwzględnieniem rodzaju stosowanych czujników, zastosowania elektromechanicznej stabilizacji obrazu (gimbal), rodzaju lokalizacji, testowanej wysokości oraz dokładności. W tab. 1 przedstawiono wybrane rozwiązania z podziałem na metody estymacji pozycji: VO (ang. *Visual Odometry*) wykorzystujące wyłącznie obraz,

Autor korespondujący:

Tomasz Pogorzelski, tomasz.pogorzelski@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 20.08.2025 r., przyjęty do druku 14.11.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

Tab. 1. Porównanie metod lokalizacji wizyjnej
Tab. 1. Comparison of visual navigation methods

Artykuł	Rok	Elementy pomiarowe	Gimbal	Metoda estymacji	Błąd XY [m]	Błąd Z [m]	Wysokość AGL [m]	Błąd 3D [m]	Błąd 3D [%]
[5]	2009	kamera mono, IMU, barometr	nie	VIO + IM	8	br. d.	60	br. d.	br. d.
[6]	2014	kamera mono, IMU	nie	VIO	br. d.	br. d.	br. d.	9,4	br. d.
[7]	2014	kamera mono	tak	VO	6,6	7,4	150	7,3	4,9 %
[8]	2015	kamera mono, IMU, barometr	nie	IM	6,8	br. d.	80	6,8	8,5 %
[9]	2018	kamera mono	nie	IM	5,1	br. d.	br. d.	br. d.	br. d.
[10]	2019	kamera mono	tak	VO + IM	br. d.	br. d.	40	17,8	44,5 %
[11]	2020	kamera mono, IMU	nie	VIO + IM	7,5	br. d.	150	7,5	5,0 %
[12]	2020	kamera stereo, IMU	tak	VO + IM	1,3	0,4	42	3	7,1 %
[13]	2021	kamera mono	tak	IM	3,6	br. d.	br. d.	3,6	br. d.
[14]	2021	kamera stereo	tak	IM	1,2	br. d.	40	1,75	4,4 %
[4]	2021	kamera mono, IMU, kompas	nie	VIO + IM	3,8	br. d.	110	3,8	3,5 %
[15]	2022	kamera mono, IMU	tak	VO + IM	15,8	br. d.	120	15,8	13,2 %
[3]	2022	kamera mono	tak	IM	2,2	br. d.	300	2,2	0,7 %
[16]	2022	kamera mono, kompas, wysokościomierz	nie	IM	3,2	br. d.	br. d.	3,2	br. d.

VIO (ang. *Visual-Inertial Odometry*) łączące dane wizyjne z pomiarami inercyjnymi oraz IM (ang. *Image Matching*) opierające się na dopasowywaniu obrazów i analizie korespondencji pomiędzy kolejnymi klatkami. Ze względu na duże różnice testowanych wysokości, dodano dane określające procentowy błąd lokalizacji względem testowanej wysokości. W podanym zestawieniu można zauważyć, że najlepszą dokładność uzyskano w pracy [3], ale w tej metodzie lokalizacji konieczne było użycie gimbała oraz wymagana była znajomość dokładnej pozycji początkowej. Na drugim miejscu znalazła się metoda zaprezentowana w publikacji [4]. Tutaj uzyskano błąd maksymalny 3,5 % przy wysokości 110 m. Co ważne, nie zastosowano stabilizatora kamery oraz nie była potrzebna znajomość dokładnej pozycji początkowej – lokalizacja obliczana była w sposób bezwzględny.

2. Cele i zakres projektu

Głównym celem opisywanego projektu było opracowanie specyfikacji wymagań systemu lokalizacji wizyjnej, zapewniającego ciągły dostęp do precyzyjnych danych lokalizacyjnych. Projektowany system stanowił demonstrator technologii na poziomie gotowości technologicznej TRL 6 (ang. *Technology Readiness Level*). Celem demonstratora było potwierdzenie, że możliwe jest dostarczanie danych lokalizacyjnych z wykorzystaniem algorytmów przetwarzania obrazów. W prezentowanej konfiguracji system miał współpracować z symulatorem, co dodatkowo przyspieszyło prace i zmniejszyło koszty. Symulator stanowił narzędzie umożliwiające szybką weryfikację kierunku rozwoju prac jako źródło symulowanych danych wejściowych, jak obraz

z kamery w różnych położeniach przestrzennych, które mogły być generowane z uwzględnieniem ograniczeń rzeczywistego BSP. Współpraca systemu z autopilotem miała zostać zweryfikowana w warunkach rzeczywistych po zamontowaniu na pokładzie wybranego BSP. Dokładność danych lokalizacyjnych, jaką można uzyskać, stanowi przedmiot oceny końcowej oraz kierunek dalszych prac.

W związku z planowanym osiągnięciem TRL 6 i dalszym rozwojem po potwierdzeniu skuteczności wybranego kierunku, w systemie pominięto wiele istotnych cech jakościowych, które docelowo świadczyłyby o zadowoleniu potencjalnych użytkowników tego systemu, jak np. niezawodność, odporność, przydatność funkcjonalna czy wydajność działania. Niektóre cechy jakościowe zostały wsparte przez odpowiednie ukształtowanie procesu [17]. Do realizacji projektu systemu lokalizacji wizyjnej zaproponowano wykorzystanie inżynierii wymagań. Są one rezultatem procesu decyzyjnego, w którym potrzeby są przekształcane w konkretne artefakty przeznaczone do implementacji. Transformacja ta przebiega w oparciu o techniki analizy i identyfikacji wymagań. Techniki te są dostosowane do celu projektu oraz specyfiki jego dziedziny. Zastosowanie inżynierii wymagań pozwala uzyskać liczne korzyści, np.: ograniczenie liczby zbędnych zadań, zapewnienie odpowiednich charakterystyk jakościowych systemu (m.in. kompletności funkcjonalnej, efektywności działania, bezpieczeństwa użytkowania, ochrony przed atakami), a także ułatwienie zarządzania modyfikacjami i zmianami konfiguracji. Warunkiem uzyskania tych korzyści jest jednak przeprowadzenie starannej analizy wymagań oraz przestrzeganie kryteriów jakościowych przy ich definiowaniu. Tylko poprawnie opracowane wymagania są pomocne przy projekto-

waniu systemu, np. brak dokładnie zdefiniowanej częstotliwości wysyłania komunikatów NMEA początkowo utrudniło integrację opisywanego systemu z autopilotem. Spełnienie kryteriów jakościowych wymaga starannego formułowania opisu wymagań, a przede wszystkim dokładnej analizy specyfiki problemu i pełnego jego zrozumienia.

Podsumowując, opracowane rozwiązanie ma umożliwiać wykonywanie lotów BSP w obszarach, w których sygnał GNSS jest zakłócany lub z innych przyczyn niedostępny. Oznacza to konieczność spełnienia określonych wymagań funkcjonalnych i niefunkcjonalnych, takich jak zapewnienie precyzyjnej i ciągłej lokalizacji wizyjnej, odporności systemu na zakłócenia środowiskowe, a także odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa i niezawodności. Specyfikacja wymagań powinna zatem obejmować m.in. kompletność funkcjonalną systemu, efektywność jego działania w różnych warunkach eksploatacyjnych oraz mechanizmy umożliwiające łatwe zarządzanie ewentualnymi modyfikacjami czy rozbudową rozwiązania.

Cel ogólny projektu: Opracowanie prototypu systemu lokalizacji wizyjnej działającego bez dostępu do sygnałów GNSS w warunkach laboratoryjnych. System ma umożliwiać estymację położenia bezzałogowego statku powietrznego w trzech wymiarach, z wykorzystaniem danych obrazowych z kamery.

Cel szczegółowy: Uzyskanie dokładności wyznaczanej lokalizacji geograficznej z błędem nie większym niż 3 % wysokości lotu AGL.

3. Specyfikacja wymagań

Inżynieria wymagań stanowi kluczowy etap procesu projektowego, pozwalający na zapewnienie kompletności funkcjonalnej, efektywności działania oraz łatwości dalszego rozwoju systemu. Jej celem jest ograniczenie ryzyka błędnych założeń projektowych oraz zwiększenie jakości końcowego rozwiązania. W projekcie przyjęto zasady metodyki SMART [18], zgodnie z którą każde wymaganie powinno być:

- S (*Specific*) – jednoznaczne i konkretne,
- M (*Measurable*) – możliwe do zmierzenia,
- A (*Achievable*) – osiągalne w ramach założonego budżetu i harmonogramu,
- R (*Relevant*) – istotne z punktu widzenia celów projektu,
- T (*Time-bound*) – określone w czasie.

Wymagania zdefiniowane w dalszej części artykułu spełniają powyższe kryteria i odnoszą się bezpośrednio do celów określonych w rozdziałach wcześniejszych. Szczegółowe aspekty jakościowe i techniczne zostały przedstawione w kontekście opracowywanego systemu lokalizacji wizyjnej BSP. Wymagania systemowe pomagają zrozumieć, jakie cechy i funkcje powinien mieć projektowany system. Zasady działania systemu lokalizacji wizyjnej były omawiane wielokrotnie [19–21]. Teraz określono

wymagania, jakie powinny spełniać jego kluczowe elementy. Zdefiniowano dwa poziomy wymagań – wymagania systemowe oraz wymagania na poziomie komponentów. W projekcie przyjęto unikalne identyfikatory zgodnie ze schematem:

- wymagania systemowe: SysReq_*x*,
- wymagania dla komponentów oprogramowania: SWRS_*x_y*,
- wymagania dla interfejsów między komponentami: IR_*x_y*.

Dla wymagań dotyczących oprogramowania komponentów oraz interfejsów zmienna *x* oznacza numer wymagania systemowego, z którym skojarzone jest wymaganie, zaś *y* to kolejny numer wymagania podlegającego temu samemu wymaganiu systemowemu. W tab. 2 przedstawiono wymagania systemowe dla opisywanego systemu, natomiast w tab. 3–8 podano zestaw wymagań zdefiniowanych dla poszczególnych komponentów systemu.

Przyjęto, że system pobiera dane z autopilota PixHawk 2 Cube (w przypadku lotów rzeczywistych) lub z symulatora FlightGear (w przypadku lotów symulowanych). System ma odbierać obraz z kamery i wyznaczać lokalizację BSP bez elektromechanicznej stabilizacji. Oznacza to, że konieczne było zaimplementowanie cyfrowej stabilizacji obrazu, kompensującej wpływ wstrząsów oraz wychyleń platformy. System lokalizacji wizyjnej wykorzystuje obrazy terenu rejestrowane na określonej wysokości. Większa wysokość położenia kamery wpływała na zmniejszenie szczegółowości widocznych cech terenu, co z kolei mogło prowadzić do zwiększenia niepewności podczas estymacji pozycji. Dlatego oczekiwana dokładność lokalizacji powinna uwzględniać wysokość BSP. Przyjęto, że błąd wyznaczonej lokalizacji BSP nie powinien być większy niż 3 % wysokości BSP nad terenem. Wartość błędu na tym poziomie pozwala na realizację misji automatycznych oraz lądowanie platformy BSP w wyznaczonym miejscu. Ostatecznie system generuje dane w standardzie NMEA z częstotliwością 10 Hz.

Komponenty systemu lokalizacji wizyjnej oznaczane są skrótem CSCI (ang. *Computer Software Configuration Item*). W systemie wyróżniono następujące elementy:

- **CSCI Parser Component (PC)** – odpowiada za odbiór i obróbkę danych z autopilota lub z oprogramowania symulacyjnego,
- **CSCI Map Component (MC)** – przetwarza ortofotomapy w otoczeniu otrzymanej lokalizacji,
- **CSCI Camera Component (CC)** – odbiera i przetwarza obraz wejściowy z kamery lub z oprogramowania symulacyjnego,
- **CSCI Global Positioning Component (GPC)** – wyznacza globalną lokalizację BSP na podstawie danych otrzymanych z czujników oraz z bazy map referencyjnych; wymaga długiego czasu przetwarzania, ale wynik pozbawiony jest błędów statystycznego,

Tab. 2. Wymagania systemowe dla systemu lokalizacji wizyjnej
Tab. 2. System requirements for the video localization system

Identyfikator	Opis	Typ
SysReq_1	System musi być interoperacyjny z autopilotem PixHawk2 Cube	Funkcjonalne
SysReq_2	System musi interpretować dane z symulatora RASTER	Funkcjonalne
SysReq_3	System musi pracować z jedną kamerą światła dziennego bez elektromechanicznej stabilizacji	Funkcjonalne
SysReq_4	System musi obliczać lokalizację bezwzględną BSP	Funkcjonalne
SysReq_5	System musi obliczać lokalizację z dokładnością do 3% wysokości lotu AGL	Funkcjonalne
SysReq_6	System musi generować ramkę NMEA z częstotliwością 10 Hz	Funkcjonalne

- **CSCI Motion Positioning Component (MPC)** – wyznacza względną pozycję BSP na podstawie kolejnych obrazów z kamery; wyniki otrzymywane są w krótkim czasie, ale wynik obciążony jest błędem statystycznym,
- **CSCI Filtering Component (FC)** – odpowiada za połączenie lokalizacji wyznaczonych przez GPC i MPC, konwertuje wynik do standardu NMEA oraz przesyła wyznaczoną pozycję do autopilota; realizuje dodanie znaczników czasu do danych wyjściowych zgodnie ze znacznikami stosowanymi przez odbiorniki GNSS przy wysyłaniu danych do innych współpracujących urządzeń.

W literaturze przedmiotu do formalnej reprezentacji wymagań oraz architektury systemów powszechnie stosuje się metody modelowania, takie jak UML czy SysML, które pozwalają na jednoznaczne odwzorowanie zależności między wymaganiami, komponentami i interfejsami [22]. Dekompozycja systemu na komponenty wynika z logiki podziału na realizowane funkcje (rys. 1).

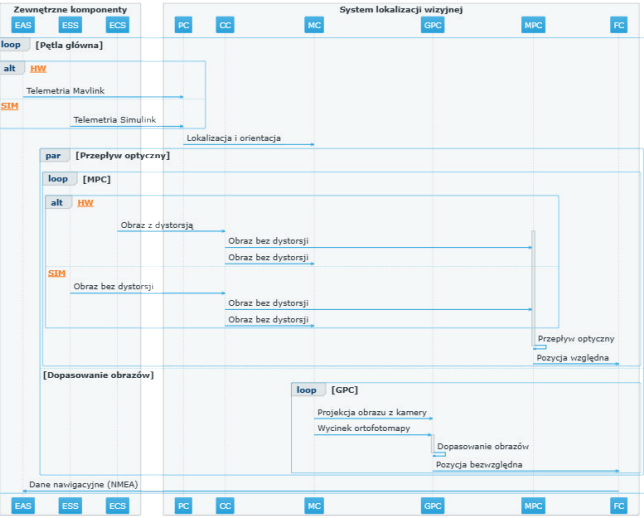
Blok External Autopilot Software (EAS) zawiera jednostkę autopilota z oprogramowaniem PX4, z której za pomocą protokołu MAVLink (w wersji 2.0) pobierane są dane telemetryczne, takie jak orientacja, ostatnia znana pozycja GPS oraz wysokość. Częstotliwość wymiany danych między EAS a blokiem Parser Component wynosi 30 Hz. Dane przekazywane przez MAVLink są dekodowane w formacie binarnym i konwertowane do struktury JSON, aby umożliwić ich łatwą integrację z pozostałymi komponentami systemu. W module MC, na podstawie ostatnio znanej lokalizacji oraz orientacji BSP, wyznaczany jest

wycinek mapy obszaru zainteresowania ROI (ang. *Region of Interest*). Wycinek ten składa się z macierzy 7 × 7 kafelków [23] o rozdzielczości 256 × 256 px. Obraz wejściowy do CC, pochodzący z kamery lub symulatora, ma rozdzielczość 1920 × 1080 px. Na podstawie informacji o lokalizacji i orientacji, obraz ten jest przekształcany z układu kamery do układu świata w MC. Porównanie obrazu z wycinkiem mapy realizowane jest z użyciem jednej z metod dopasowania cech: klasycznych algorytmów analizy obrazu (ORB [24], SURF [25], SIFT [26]) lub metod opartych na głębokich sieciach neuronowych (SuperGlue [27], Loftr [28]), opisanych szczegółowo w [19]. Wynikiem dopasowania w komponencie GPC jest geograficzna lokalizacja BSP obciążona kilkusekundowym opóźnieniem. Dla zniwelowania tego opóźnienia, komponent MPC wyznacza pozycję BSP z częstotliwością 30 Hz względem ostatniej pozycji obliczonej przez GPC. Komponent FC łączy lokalizacje otrzymane w GPC oraz MPC w celu estymacji bieżącej pozycji BSP. W FC stosowane są filtry wygładzające, które redukują szумы pomiarowe i uśredniają trajektorie. Częstotliwość aktualizacji pozycji w FC wynosi 10 Hz. W tym samym bloku generowana jest ramka danych w standardzie NMEA 0183, zawierająca komunikaty GGA, RMC i VTG, które opisują pozycję. Ramka NMEA przesyłana jest do autopilota do portu GPS2.

Wymagania dla komponentu oprogramowania o nazwie CSCI Parser Component przedstawiono w tab. 3. Komponent ten musi odbierać dane z autopilota PixHawk 2 Cube za pomocą protokołu MAVLink 2.0. Wymaganie to podyktowane jest dużą popularnością wskazanego autopilota i protokołu, co przekłada się na kompatybilność systemu. Komponent powinien zapisywać w pamięci otrzymane informacje dotyczące ostatniej znanej lokalizacji, orientacji BSP i czasu UTC. PC musi też sprawdzać status sygnału GNSS, a w przypadku jego utraty, zakłócenia bądź niewystarczającej dokładności lokalizacji przekazać informację o ostatniej poprawnej lokalizacji do Map Component.

CSCI Map Component (tab. 4) wykorzystuje ortofotomapę oraz numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) zapisane w pamięci. Na tej podstawie wyznacza wysokość BSP nad poziomem terenu (AGL). MC oblicza również macierz kamery na podstawie danych o lokalizacji i orientacji z PC oraz macierzy kalibracyjnej kamery z CC. Dodatkowo MC odbiera z CC aktualny obraz z kamery i przekształca go zgodnie z macierzą kamery w celu wyznaczenia projekcji tego obrazu na płaszczyznę terenu. W otoczeniu tego obszaru MC wyodrębnia fragment ortofotomapy ROI i przekazuje do GPC. W tab. 4 przedstawiono zdefiniowane wymagania.

CSCI Global Positioning Component (tab. 5) jest odpowiedzialny za wyznaczanie lokalizacji geograficznej BSP na podstawie dopasowania dwu obrazów pochodzących z MC: przekształconego obrazu z kamery oraz wycinka ortofotomapy ROI. Aby spełnić wymaganie SysReq_5, komponent GPC



Rys. 1. Diagram sekwencji przedstawiający proces wyznaczania lokalizacji BSP w opisywanym systemie [opr. własne]
Fig. 1. Sequence diagram showing the process of determining the UAV location in the described system [own study]

Tab. 3. Wymagania zdefiniowane dla CSCI Parser Component
Tab. 3. Requirements defined for the CSCI Parser Component

Identyfikator	Opis	Typ
SWRS_1_1	CSCI Parser Component po otrzymaniu wiadomości MAVLink 2.0 z autopilota musi wyodrębnić z niej informację o statusie sygnału GNSS, lokalizacji, orientacji i czasie	Funkcjonalne
SWRS_1_2	CSCI Parser Component po wyodrębnieniu informacji o lokalizacji, orientacji i czasie, musi zapisać te informacje w pamięci	Funkcjonalne
SWRS_1_3	CSCI Parser Component po otrzymaniu informacji z autopilota o utracie, niewystarczającej precyzji bądź zakłóceniu sygnału GNSS musi przekazać ostatnią zapamiętaną lokalizację do CSCI Map Component	Bezpieczeństwa
SWRS_2_1	CSCI Parser Component po otrzymaniu wiadomości z symulatora musi wyodrębnić z niej informację o lokalizacji, orientacji i czasie	Funkcjonalne

Tab. 4. Wymagania zdefiniowane dla CSCI Map Component
Tab. 4. Requirements defined for the CSCI Map Component

Identyfikator	Opis	Typ
SWRS_4_1	CSCI Map Component musi być zdolny do obsługi plików zawierających numeryczny model terenu	Funkcjonalne
SWRS_4_2	CSCI Map Component musi przekształcać lokalizację AMSL na lokalizację AGL	Funkcjonalne
SWRS_4_3	CSCI Map Component musi być zdolny do obsługi plików graficznych zapisanych w standardzie Slippy Map Tilenames	Funkcjonalne
SWRS_4_4	CSCI Map Component musi wyodrębniać fragment ortofotomapy na podstawie informacji o lokalizacji	Funkcjonalne

Tab. 5. Wymagania zdefiniowane dla CSCI Global Positioning Component
Tab. 5. Requirements defined for the CSCI Global Positioning Component

Identyfikator	Opis	Typ
SWRS_4_5	CSCI Global Positioning Component musi estymować lokalizację geograficzną BSP na podstawie obrazu z kamery i ortofotomapy otrzymanej z MC	Funkcjonalne
SWRS_5_1	CSCI Global Positioning Component musi estymować lokalizację BSP z dokładnością do 3% wysokości BSP nad terenem	Funkcjonalne
SWRS_6_1	CSCI Global Positioning Component musi estymować lokalizację BSP z częstotliwością większą niż 0,5 Hz	Funkcjonalne

Tab. 6. Wymagania stawiane dla CSCI Motion Positioning Component
Tab. 6. Requirements for the CSCI Motion Positioning Component

Identyfikator	Opis	Typ
SWRS_5_2	CSCI Motion Positioning Component musi estymować lokalizację względną BSP	Funkcjonalne
SWRS_6_2	CSCI Motion Positioning Component musi wyznaczać lokalizację BSP względem ostatniej estymacji lokalizacji z GPC	Funkcjonalne
SWRS_6_3	CSCI Motion Positioning Component musi estymować lokalizację BSP z częstotliwością większą niż 10 Hz	Wydajnościowe

Tab. 7. Wymagania zdefiniowane dla CSCI Camera Component
Tab. 7. Requirements defined for CSCI Camera Component

Identyfikator	Opis	Typ
SWRS_SC_3_1	CSCI Camera Component musi odczytywać z pliku konfiguracyjnego informacje o wybranym źródle obrazu	Techniczne
SWRS_SC_3_2	CSCI Camera Component musi minimalizować dystorsję obrazu z kamery za pomocą danych kalibracyjnych w przypadku wyboru kamery jako źródła obrazu	Techniczne
SWRS_SC_3_3	CSCI Camera Component musi normalizować jasność obrazu w przypadku wyboru kamery jako źródła obrazu	Funkcjonalne

musi generować odpowiedź z błędem nie większym niż 3 % wysokości lotu BSP.

Ponieważ dopasowanie obrazów realizowane przez GPC jest czasochłonne, częstotliwość jego odpowiedzi jest mniejsza niż wartość podana w wymaganiu SysReq_6. W związku z tym potrzebne było utworzenie komponentu MPC (tab. 6), który zapewni większą częstotliwość odpowiedzi systemu. Metoda zawarta w MPC analizuje pozorne przemieszczenie punktów charakterystycznych w obrazie i na tej podstawie wyznacza względne przemieszczenie BSP od chwili ostatniej pozycji wyznaczonej przez GPC. Algorytmy zawarte w MPC gwarantują działanie z częstotliwością nie mniejszą niż 10 Hz.

CSCI Camera Component (tab. 7) jest odpowiedzialny za przetworzenie obrazu pochodzącego z kamery lub z symulatora.

W przypadku obrazu z kamery, komponent koryguje dystorsję obrazu zgodnie z macierzą kalibracyjną kamery.

CSCI Filtering Component, na podstawie odebranych lokalizacji z komponentów GPC oraz MPC, oblicza ostateczną lokalizację BSP (tab. 8). Następnie komponent tworzy wiadomości w standardzie danych NMEA, które ze względu na wymaganie SysReq_6 muszą być generowane ze stałą częstotliwością 10 Hz $\pm$ 0,5 Hz.

Wszystkie kanały komunikacyjne wewnętrzne są kanałami programowymi (logicznymi), dostępnymi dla procesów/usług/aplikacji działających w tym samym systemie operacyjnym. W systemie zdefiniowano dwa typy kanałów komunikacji zewnętrznej: Simulation Services oraz Target Services. Do grupy Simulation Services zakwalifikowano kanały ESS-PC oraz ESS-CC.

Tab. 8. Wymagania zdefiniowane dla CSCI Filtering Component
Tab. 8. Requirements defined for the CSCI Filtering Component

Identyfikator	Opis	Typ
SWRS_5_3	CSCI Filtering Component musi estymować lokalizację BSP z dokładnością do 3 % wysokości BSP nad terenem	Funkcjonalne
SWRS_6_4	CSCI Filtering Component musi dodawać do wiadomości NMEA obliczoną lokalizację geograficzną, wysokość AMSL oraz kurs magnetyczny	Funkcjonalne
SWRS_6_5	CSCI Filtering Component musi dodawać do wiadomości NMEA wartość czasu UTC	Funkcjonalne
SWRS_6_6	CSCI Filtering Component musi estymować lokalizację BSP z częstotliwością 10 Hz $\pm 0,5$ Hz	Wydańnościowe

Kanały te służą jedynie do testów symulacyjnych i łączą oprogramowanie symulacyjne z systemem lokalizacji wizyjnej. Kanały komunikacji zewnętrznej typu Target Services: EAS-PC, ECS-CC oraz FC-EAS przeznaczone są do komunikacji w docelowych warunkach pracy systemu. W kanale EAS-PC jako protokół warstwy aplikacji wykorzystywany jest MAVLink (wersja 2.0). Połączenie odbywa się bezpośrednio bez użycia innych elementów uczestniczących w wymianie danych. Zakres wiadomości przekazywanych w protokole MAVLink znajduje się w wymaganiach niższego rzędu dla CSCI Parser Component. Celem tego kanału jest zapewnienie komunikacji z zewnętrznym autopilotem oraz odbiór danych niezbędnych do prawidłowego działania projektowanego systemu. Kanał ECS-CC łączy oprogramowanie fizycznej kamery z CSCI Camera Component w celu przekazania aktualnego obrazu. Kanał komunikacyjny FC-EAS jest kanałem łączącym CSCI Filtering Component z oprogramowaniem autopilota PX4. Fizycznym gniazdem docelowym w zewnętrznym autopilocie jest GPS2. Głównym celem wykorzystania kanału PC-EAS jest przesyłanie obliczonej lokalizacji geograficznej BSP do systemów zewnętrznych. Dane przesyłane są w standardzie NMEA. Przygotowane wymagania stanowiły kryteria akceptacji podczas weryfikacji systemu. Scenariusze weryfikacji uwzględniły wszystkie wymagania, potwierdzając tym samym ich spełnienie przez przygotowane rozwiązanie.

4. Eksperymenty symulacyjne

W ramach badań przeprowadzono testy jednostkowe, mające na celu ocenę poprawności działania poszczególnych komponentów systemu. Następnie wykonano testy integracyjne, które pozwoliły sprawdzić, czy poszczególne moduły współdziałają ze sobą zgodnie z założeniami. Kolejnym etapem były testy systemowe, obejmujące kompleksową ocenę funkcjonowania całego systemu w symulowanych warunkach operacyjnych. Na końcu przeprowadzono proces walidacji, mający na celu formalne potwierdzenie zgodności działania systemu z założeniami projektowymi i wymaganiami użytkownika końcowego.

Do przeprowadzania testów systemu lokalizacji wizyjnej wykorzystano symulator RASTER, składający się z programu FlightGear, który został zintegrowany z oprogramowaniem MATLAB/Simulink. Pierwszy program symulował obraz z kamery, natomiast drugi symulował dane z autopilota.

Komponent PC poprawnie odczytywał dane z systemu MATLAB/Simulink, a CC – obraz z symulatora FlightGear. W związku z powyższym, wymaganie systemowe SysReq_2 uważa się za spełnione. Na podstawie poprawnie dopasowanych obrazów z CC do ROI ortofotomapy, komponent GPC wyznaczał bezwzględną lokalizację BSP, co spełnia wymaganie SysReq_4. Na podstawie kolejnych klatek z programu FlightGear, MPC wyznaczał lokalizację względną z częstotliwością 30 Hz. Następnie FC generował odpowiedź z częstotliwością 10 Hz w standardzie NMEA, co potwierdza spełnienie SysReq_6.

Uzyskane wizualizacje (rys. 2) stanowią potwierdzenie poprawności implementacji poszczególnych komponentów sys-



Rys. 2. Wizualizacja estymowanej lokalizacji BSP przez komponent MPC – kolor żółty, GPC – kolor czerwony, FC – kolor cyan, w porównaniu do lokalizacji wyznaczonej przez moduł GNSS – kolor niebieski [opr. własne]
Fig. 2. Visualization of the estimated UAV location by the MPC component – yellow, GPC – red, FC – cyan, compared to the location determined by the GNSS module – blue [own study]

temu lokalizacji wizyjnej. Tego typu weryfikacja umożliwia również ocenę działania algorytmów dopasowania obrazów w GPC w kontekście dynamicznych, niekontrolowanych warunków środowiskowych, z jakimi system będzie się mierzył podczas rzeczywistego zastosowania.

5. Eksperymenty rzeczywiste

Do przeprowadzenia testów rzeczywistych wykorzystano platformę Great Shark 330 marki Foxtech. Jest to bezzałogowa platforma powietrzna klasy VTOL (ang. *Vertical Take-Off and Landing*), zaprojektowana do misji wymagających długiego czasu lotu i dużej niezawodności. Wyposażona jest w autopilota PixHawk2 Cube, z którego system wizyjny pobierał dane o lokalizacji, orientacji oraz czasie. Ta sama platforma służyła wcześniej do zarejestrowania ortofotomapy obszaru testowego z wykorzystaniem kamery GoPro.

W testach systemu lokalizacji wizyjnej w warunkach rzeczywistych zastosowano moduł kamery wyposażony w matrycę SONY CMOS IMX258 (1/3", 1920 × 1080 px) z obiektywem o ogniskowej 3,17 mm, co daje kąt widzenia 95,7° w poziomie i 70,7° w pionie. Ponadto moduł ten ma funkcję elektronicznej stabilizacji obrazu (EIS). Wybór tego rozwiązania podyktowany był koniecznością minimalizacji wpływu drgań mechanicznych platformy mobilnej na jakość rejestrowanego obrazu. Zastosowana kamera nie ma mechanicznej stabilizacji, co spełnia wymaganie systemowe SysReq_3. Jednostka obliczeniowa NVIDIA Jetson Xavier NX została umieszczona wewnątrz kadłuba platformy testowej i zasilona niezależnym akumulatorem.

Analiza zebranych danych wykazała, że system lokalizacji wizyjnej działał nieprzerwanie podczas całego lotu. Komponent PC poprawnie odbierał dane z autopilota, natomiast FC wysyłał

lokalizację do autopilota, co potwierdza spełnienie wymagania systemowego SysReq_1.

Do oceny korelacji zastosowano współczynnik korelacji liniowej Pearsona, który umożliwia ocenę zgodności przebiegów trajektorii w trzech osiach. Średnie podobieństwo trajektorii w przestrzeni trójwymiarowej oszacowano na poziomie 0,9995, a maksymalny błąd względny nie przekroczył 2,7 % wysokości AGL lotu BSP. Tym samym spełniono wymaganie SysReq_5.



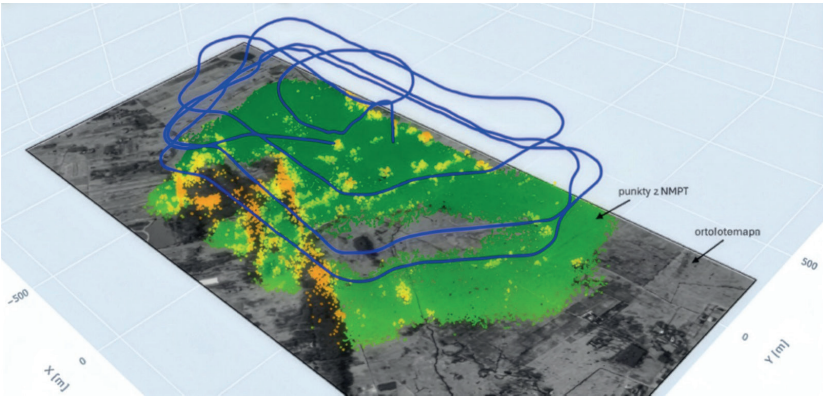
Rys. 3. Z lewej: dolna część kadłuba BSP z zaznaczonymi kamerami, z prawej: górna część kadłuba BSP z zaznaczonym modułem GNSS oraz jednostką obliczeniową [opr. własne]
Fig. 3. Left: lower part of the UAV hull with marked cameras, right: upper part of the UAV hull with marked GNSS module and computing unit [own study]

9. Podsumowanie

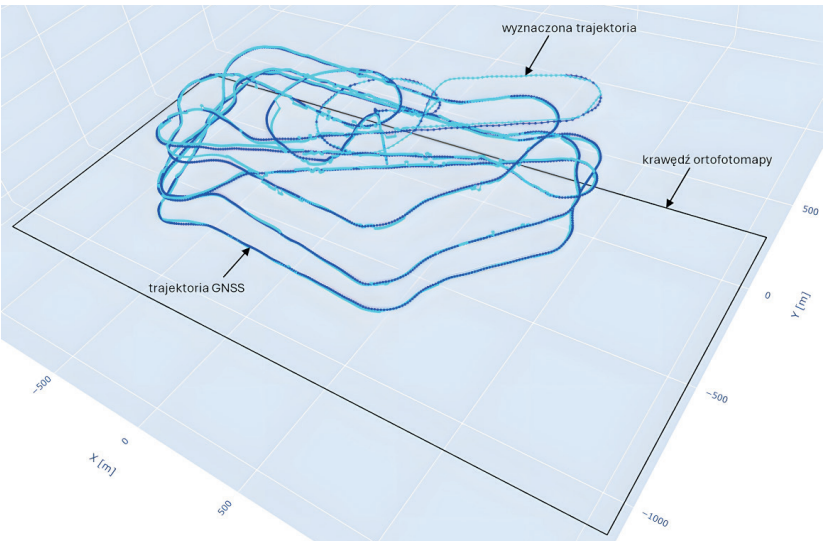
W wyniku testów w warunkach symulacyjnych oraz rzeczywistych stwierdzono, że wymagania systemowe zostały spełnione. Oznacza to, że opracowany system lokalizacji wizyjnej spełnia postawione wymagania funkcjonalne i jakościowe. Specyfikacja wymagań pozwoliła wykreować zakres produktu i uniknąć realizacji niepotrzebnych zadań, skracając czas niezbędny na opracowanie rozwiązania zaspokajającego określone potrzeby. Wymagania pozafunkcyjne pozwoliły wyznaczyć wartość pożądaną dla określonej cechy jakościowej, a tym samym postawić granicę, do której należało dążyć i kontrolować. Ta wartość stanowiła jednocześnie kryterium akceptacji i tym samym punkt, w którym wstrzymaliśmy dalsze rozwijanie programu.

Problemy, jakie rozwiązano wprowadzając specyfikację wymagań do omawianego projektu, to przede wszystkim zwiększenie kontroli i świadomości prac prowadzonych przez zespół. Wymagania zostały przetransformowane do zadań dla zespołu jak wskazano w [17], co ułatwiło monitorowanie postępu prac. Takie postępowanie ponadto, dostarczyło członkom zespołu jasnej informacji o zakresie i celu zadań oraz o kryteriach ich akceptacji. Specyfikacja wymagań, nawet krótka, pozwala w znaczący sposób utrzymać kontrolę nad zakresem prac, zwiększa świadomość podejmowanych decyzji, umożliwia monitorowanie postępów oraz znacząco usprawnia testy produktu.

Osiągnięcie szóstego poziomu gotowości technologicznej (TRL 6) zostało potwierdzone poprzez integrację wszystkich opracowanych komponentów systemu w spójnym prototypie oraz jego demonstrację w relevantnym środowisku. System działał zarówno w konfiguracji symulacyjnej, jak



Rys. 4. Wizualizacja trajektorii BSP nad ortofotomapą z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi. Skala barwna wysokości względem poziomu startowiska: od zielonego (0 m) do pomarańczowego (30 m) [opr. własne]
Fig. 4. Visualization of the UAV trajectory over an orthophotomap with marked landmarks. Color scale of elevation relative to the takeoff site: from green (0 m) to orange (30 m) [own study]



Rys. 5. Wykres trajektorii platformy BSP wyznaczony przez moduł GNSS (kolor niebieski) oraz przez system lokalizacji wizyjnej (kolor cyjan) [opr. własne]
Fig. 5. BSP platform trajectory graph determined by the GNSS module (blue) and by the vision localization system (cyan) [own study]

i w warunkach rzeczywistych, na pokładzie bezzałogowego statku powietrznego wyposażonego w autopilota PixHawk 2 Cube. Podczas lotów testowych, realizowanych na wysokości 50–120 m AGL, system spełnił kluczowe wymagania funkcjonalne: generował dane w formacie NMEA z częstotliwością 10 Hz $\pm 0,5$ Hz oraz zapewniał dokładność lokalizacji nieprzekraczającą 3 % wysokości lotu nad terenem. Uzyskane wyniki potwierdziły zdolność technologii do pracy w środowisku zbliżonym do operacyjnego, co w pełni odpowiada definicji TRL 6.

Dalsze prace skupią się na definiowaniu i realizacji wymagań dotyczących maksymalnej potrzebnej mocy obliczeniowej, złożoności sprzętowej oraz warunków środowiskowych. Odpowiednie określenie nowych wymagań skutecznie podniesie jakość końcowego systemu.

Bibliografia

1. Borodacz K., Szczepański C., *GNSS denied navigation system for the manoeuvring flying objects*, "Aircraft Engineering and Aerospace Technology", Vol. 96, No. 1, 2024, 63–72, DOI: 10.1108/AEAT-05-2023-0124.
2. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S., *Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges*, "Drones", Vol. 7, No. 2, 2023, DOI: 10.3390/drones7020089.
3. Sui H., Li J., Lei J., Liu C., Gou G., *A Fast and Robust Heterologous Image Matching Method for Visual Geo-Localization of Low-Altitude UAVs*, "Remote Sensing", Vol. 14, No. 22, 2022, DOI: 10.3390/rs14225879.
4. Mao J., Zhang L., He X., Qu H., Hu X., *A 2D Georeferenced Map Aided Visual-Inertial System for Precise UAV Localization*, IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2021, DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9982254.
5. Conte G., Doherty P., *Vision-Based Unmanned Aerial Vehicle Navigation Using Geo-Referenced Information*, "EURASIP Journal on Advances in Signal Processing", 2009, DOI: 10.1155/2009/387308.
6. Chiu H.-P., Das A., Miller P., Samarasekera S., Kumar R., *Precise vision-aided aerial navigation*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, 688–695, DOI: 10.1109/IROS.2014.6942633.
7. Yol A., Delabarre B., Dame A., Dartois J.-E., Marchand E., *Vision-based absolute localization for unmanned aerial vehicles*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, 3429–3434, DOI: 10.1109/IROS.2014.6943040.
8. Shan M., Wang F., Lin F., Gao Z., Tang Y.Z., Chen B.M., *Google Map Aided Visual Navigation for UAVs in GPS-denied Environment*, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2015, DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7418753.
9. Nassar A., Amer K., ElHakim R., ElHelw M., *A Deep CNN-Based Framework For Enhanced Aerial Imagery Registration with Applications to UAV Geolocalization*, IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2018, 1594–1610, DOI: 10.1109/CVPRW.2018.00201.
10. Mantelli M., Pittol D., Neuland R., Ribacki A., Maffei R., Jorge V., Prestes E., Kolberg M., *A novel measurement model based on abBRIEF for global localization of a UAV over satellite images*, "Robotics and Autonomous Systems", Vol. 112, 2019, 304–319, DOI: 10.1016/j.robot.2018.12.006.
11. Choi J., Myung H., *BRM Localization: UAV Localization in GNSS-Denied Environments Based on Matching of Numerical Map and UAV Images*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020, DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9341682.
12. Patel B., Barfoot T.D., Schoellig A.P., *Visual Localization with Google Earth Images for Robust Global Pose Estimation of UAVs*, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, 6491–6497, DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9196606.
13. Mughal M.H., Khokhar M.J., Shahzad M., *Assisting UAV Localization Via Deep Contextual Image Matching*, "IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing", Vol. 14, 2021, 2445–2457, DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3054832.
14. Bianchi M., Barfoot T.D., *UAV Localization Using Auto-encoded Satellite Images*, "IEEE Robotics and Automation Letters", Vol. 6, No. 2, 2021, 1761–1768, DOI: 10.1109/LRA.2021.3060397.
15. Gurgu M.-M., Queralta J.P., Westerlund T., *Vision-based GNSS-Free Localization for UAVs in the Wild*, 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR), 2022, DOI: 10.1109/ICMERR56497.2022.10097798.
16. Silveira L., et al., *Navigation Aids Based on Optical Flow and Convolutional Neural Network*, 2022 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2022 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE), São Bernardo do Campo, Brazil: IEEE, 318–323, DOI: 10.1109/LARS/SBR/WRE56824.2022.9995889.
17. Glinz M., van Loenhoud H., Staal S., Bühne S., *Handbook for the CPRE Foundation Level according to the IREB Standard*, Karlsruhe 2020.
18. Pietsch S., Riddell H., Semmler C., Ntoumanis N., Gucciardi D.F., *SMART goals are no more effective for creative performance than do-your-best goals or non-specific, exploratory 'open goals'*, "Educational Psychology", Vol. 44, No. 9–10, 2024, 946–962, DOI: 10.1080/01443410.2024.2420818.
19. Pogorzelski T., Majek K., *Onboard to Satellite Image Matching for Relocalization of the UAVs*, Uniwersytet Morski w Gdyni, 2022, 122–125.
20. Zielińska T., Pogorzelski T., *Samolokalizacja bezzałogowego statku powietrznego uwzględniająca zmienną orientację kamery*, "Pomiary Automatyka Robotyka", R. 26, Nr 4, 2022, 53–59, DOI: 10.14313/PAR_246/53.
21. Pogorzelski T., Zielińska T., *Vision Based Navigation Securing the UAV Mission Reliability*, Automation 2022: New Solutions and Technologies for Automation, Robotics and Measurement Techniques, Vol. 1427, 2022, 251–263, DOI: 10.1007/978-3-031-03502-9_26.
22. Chrabski B., Zmitrowicz K., *Inżynieria wymagań w praktyce*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2015.
23. *Slippy map*, [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Slippy_map].
24. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G., *ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF*, International Conference on Computer Vision, 2011, 2564–2571, DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
25. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L., *SURF: Speeded Up Robust Features*, Computer Vision – ECCV 2006, Vol. 3951, 2006, 404–417. DOI: 10.1007/11744023_32.
26. Gupta M., Singh P., *An Image Forensic Technique Based on SIFT Descriptors and FLANN Based Matching*, 12th

- International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2021, DOI: 10.1109/ICCCNT51525.2021.9579701.
27. Sarlin P.-E., DeTone D., Malisiewicz T., Rabinovich A., *SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks*, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, 4938–4947, DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00499.
28. Sun J., Shen Z., Wang Y., Bao H., Zhou X., *LoFTR: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers*, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021, DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00881.

Requirements Specification for Visual Localization System of Unmanned Aircraft

Abstract: The article presents a specification of requirements for a visual localization system along with its architecture, highlighting the key aspects of its structure, components, and communication channels. Both general design assumptions and the technical requirements imposed on individual system elements are discussed. The paper also describes the quality criteria that each requirement must meet in order to provide value to the designer, project manager, or the team responsible for system design and implementation. The functionality of the system was verified under laboratory conditions through simulations and during real flight tests. The verification confirmed that the system meets the defined requirements. The achievement of TRL 6 was confirmed by the integration of all components into a prototype and its demonstration under real-world conditions, where the system fulfilled localization accuracy requirements ($\leq 3\%$ AGL) and data generation frequency ($10\text{ Hz} \pm 0.5\text{ Hz}$). The presented technology is particularly useful in environments where GNSS signals are disrupted or unavailable, ensuring navigation reliability. The results represent a significant contribution to the development of visual navigation technology and can serve as a foundation for further research and implementation.

Keywords: UAV, navigation, visual localization, GNSS redundancy, requirements specification

mgr inż. Tomasz Pogorzelski

tomasz.pogorzelski@ilot.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0002-8299-0727



Absolwent Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej. W 2013 r. uzyskał stopień magistra inżyniera na kierunku mechatronika. Obecnie zatrudniony jako specjalista ds. badawczych w Dziale Teledetekcji, Centrum Technologii Lotniczych w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa. Czynny pilot bezzałogowych statków powietrznych w zakresie VLOS oraz BVLOS. W latach 2018–2019 uczestniczył w projekcie integracji systemów UTM zarządzających ruchem BSP dla Federal Aviation Administration (FAA) w stanie Nevada. Główne zainteresowania obejmują zastosowanie technik przetwarzania obrazu w robotyce. W 2020 r. rozpoczął prace nad doktoratem wdrożeniowym na Wydziale Mechaniki Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej dotyczącym nawigacji wizyjnej dla BSP z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego.

mgr inż. Sebastian Rutkowski

sebastian.rutkowski@ilot.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0003-4705-3153



Absolwent Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa oraz Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej. Od kilku lat zajmuje się inżynierią systemów, oprogramowania i jakością w odniesieniu do produktu i procesów rozwojowych. Ma wieloletnie doświadczenie w projektach międzynarodowych i krajowych z dziedziny obronności, lotnictwa i oprogramowania. Prowadzi badania w zakresie technik optymalizacji projektu technicznego i zwiększania świadomości podejmowania decyzji projektowych i związanych z zarządzaniem. Wnikliwie bada relację środowisko projektu – proces rozwojowy oraz wpływ planowania na rezultat projektu.