

**Recenzja rozprawy Pana mgr. inż. Krzysztofa Gromady pt.: „Zwiększenie autonomii taktycznych bezzałogowych statków powietrznych w oparciu o radar z syntetyczną aperturą i kamerę elektrooptyczną”**

Rozprawa Pana mgr. inż. Krzysztofa Gromady pt.: „Zwiększenie autonomii taktycznych bezzałogowych statków powietrznych w oparciu o radar z syntetyczną aperturą i kamerę elektrooptyczną” w ramach dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w ramach dziedziny nauk: Nauki Inżynieryjno-Techniczne dotyczy wyników badań Autora związanych z rozwojem technologii bezzałogowych systemów powietrznych. Recenzja składa się z ośmiu części. Pierwsze sześć akapitów stanowi moją odpowiedź na informacje i zalecenia dla recenzentów sformułowanych przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej. Dwa ostatnie akapity dotyczą krytycznych uwag końcowych na które oczekuje pisemnej odpowiedzi Autora oraz ocenę końcową.

**1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?**

Autor przedstawił następującą tezę (I) w rozdziale I:

„Analiza zobrażenia zbieranego przez radary z syntetyczną aperturą i kamery optyczne pozwala na podniesienie poziomu autonomii platform bezzałogowych oraz niezawodności i odporności na zakłócenia ich systemów nawigacji”.

W rozdziale 7 Autor stwierdza że wyniki badań opisywanych algorytmów pozwalają uznać tezę (II) pracy „Radary z syntetyczną aperturą i kamery optyczne pozwalają na podniesienie poziomu autonomii platform bezzałogowych oraz niezawodności i odporności na zakłócenia ich systemów nawigacji” za udowodnioną.

W mojej ocenie nastąpiła pomyłka redakcyjna, w dalszej części opinii przyjąłem tezę (I) za obowiązującą ze względu na fakt, że rozprawa dotyczy autorskich algorytmów analizy zobrażenia a nie opracowania nowych radarów czy też kamer optycznych. Proszę Autora o wyjaśnienie tej kwestii?

Autor zrealizował badania w trzech kategoriach:

- Detekcji obiektów zainteresowania/zagrożenia.
- Lokalizacji UAV na podstawie sensorów obserwacyjnych.
- Automatyzacji przygotowywania i adaptacji misji.

Autor wskazał za cel pracy wprowadzenie algorytmu lokalizacji platformy powietrznej w oparciu o radar z syntetyczną aperturą oraz kamerę wizyjną, oraz rozszerzenie znanych algorytmów z zakresu optymalizacji i przetwarzania obrazów w celu podniesienia autonomii UAV.

W mojej ocenie cel i teza rozprawy zostały jasno sformułowane przez Autora. Autor opracował mechanizm skupiania uwagi oparty o algorytm wstępnego wykrywania obszarów zainteresowania wykorzystując dane SAR. Autor opracował algorytm usprawniający zadanie estymacji położenia obiektów, uwzględniając ich pozycję kątową. Autor zaproponował nowy algorytm estymacji globalnej pozycji samolotu na podstawie skanów SAR w układzie mapy. Warto podkreślić możliwość zastosowania danych z głowicy optycznej bądź innych sensorów obserwacyjnych co czyni to rozwiązanie uniwersalnym o wysokim potencjale wdrożeniowym i mieści się ramach dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w ramach dziedziny nauk: Nauki Inżynieryjno-Techniczne.

Autor opracował algorytm wstępnego trenowania sieci neuronowych z wykorzystaniem uczenia nienadzorowanego. Zaobserwowano znaczące podniesienie jakości cech generowanych przez sieć oraz zwiększenie końcowej sprawności.

Autor przedstawił zagadnienie potencjalnego wdrożenia systemu automatyzacji przygotowania i adaptacji misji. Opracowano rozszerzenie istniejącego systemu unikania kolizji. Istotnym aspektem o wysokim potencjale wdrożeniowym jest opracowanie zbioru algorytmów usprawniających proces budowy modelu do optymalizacji harmonogramu lotu z uwzględnieniem ograniczeń bezpieczeństwa, dynamiki lotu oraz ograniczeń związanych z zastosowanymi sensorami.

Istotnym wkładem Autora jest uwzględnienie ograniczeń zasobów obliczeniowych komputerów pokładowych i ograniczeń związanych z czasem przetwarzania. Autor opracował rozwiązanie techniczne działające w czasie rzeczywistym.

## **2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?**

Bibliografia składa się ze 193 pozycji w tym 7 pozycji stanowią artykuły ze znaczącym udziałem Autora. Większość pozycji literaturowych przypada na lata 2026 – 2023, tylko jedna pozycja jest z 2024 roku. Dla pozycji [49][129][175][186] brakuje daty publikacji. Przegląd aktualnego stanu wiedzy o konstrukcjach oraz funkcjonalnościach bezałogowych statków powietrznych został przedstawiony w rozdziale drugim. Przedstawiono klasyfikację i założenia konstrukcyjne bezałogowych statków powietrznych w zastosowaniach służb mundurowych. Skoncentrowano się na zagadnieniach militarnych co w mojej ocenie stanowiło przesłankę o skromnie dozowanej wiedzy technicznej. Przegląd literatury dotyczący algorytmów autonomicznego lotu bezałogowych statków powietrznych przedstawiony jest w rozdziale trzecim. W mojej ocenie brakuje rozdziału LiDAR odometry a na rozdział Visual Odometry poświęcono zbyt mało uwagi. Przegląd literatury jest poprawny ale czasami nieaktualny np.: Autor wskazuje ORBSLAM2 [117] a nie aktualną wersję ORBSLAM3 ([ORB-SLAM3] Carlos Campos, Richard Elvira, Juan J. Gómez Rodríguez, José M. M. Montiel and Juan D. Tardós, ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial and Multi-Map SLAM, IEEE Transactions on Robotics 37(6):1874-1890, Dec. 2021.). W mojej ocenie przegląd zastosowań w przemyśle jest niewystarczający.

### **3. Czy autor rozwiązał podstawowe zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Autor rozwiązał problem podniesienia jakości detekcji obiektów zainteresowania względem klasycznych rozwiązań poprzez opracowanie szeregu algorytmów omówionych w rozdziale czwartym. Istotnym wkładem naukowy Autora jest opracowanie algorytmu detekcji na obrazowaniu SAR uwzględniając ograniczenia pracy w czasie rzeczywistym. Autor dodatkowo wprowadził mechanizm wykrywania obszarów zainteresowania, cieni i obszarów o wysokiej refleksyjności a także użycie do segmentacji obrazowania SAR. Autor wykazał zwiększenie precyzji działania sieci detekcyjnych, badanie przeprowadzono z wykorzystaniem modelu YOLOv5. Autor znacząco zmniejszył czas przetwarzania. Autor użył właściwej metodyki do oceny precyzji, czułości oraz analizy szybkości przetwarzania obrazów.

Autor opracował system lokalizacji oparty o segmentację obrazowania radarów o syntetycznej aperturze. Warto podkreślić, że opracowane rozwiązanie uwzględnia możliwość zastosowania kamer wizyjnych podnosząc przy tym uniwersalność rozwiązania. Wyniki badań zostały przedstawione w rozdziale piątym. Autor wyznaczył niepewność końcową uwzględniając dokładność segmentacji i nakładania maski a także niepewności określenia pozycji kątowej samolotu w przypadku braku sygnału GPS/GNSS. Autor wskazuje przewagę do istniejącego rozwiązania [142] (dokładność 25m, czas obliczeń 2 minuty) odnotowaną jako dwukrotnie niższą 13,07m z czasem obliczeń 50ms ponad 1000 krotnie krótszym.

Autor w rozdziale szóstym przedstawił nowatorskie rozwiązanie automatycznego projektowania harmonogramu i trajektorii przelotu UAV, z uwzględnieniem parametrów sensorów obserwacyjnych. Autor zastosował zoptymalizowaną pod kątem złożoności obliczeniowej autorską implementację algorytmu pozwalającego na przeliczanie i weryfikację planów lotu w bardzo krótkim czasie. Metodyka modelowania sytuacji zagrożenia oraz analiza wyników algorytmu unikania kolizji są prawidłowe. Przyjęte założenia są prawidłowe.

### **4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Tematyka rozprawy ma charakter niszowy. Można się domyślać, że znacząca liczba obecnie stosowanych rozwiązań ma charakter militarny, który jest informacją niejawną. Autor wskazuje pracę [142] Jakub Markiewicz, Karol Abratkiewicz, Artur Gromek, Wojciech Ostrowski, Piotr Samczyński oraz Damian Gromek „Geometrical Matching of SAR and Optical Images Utilizing ASIFT Features for SAR-based Navigation Aided Systems”: Sensors 2019, Vol. 19, 2019, jako referencyjną (Autor osiągnął dwukrotnie lepszą dokładność oraz 1000 krotnie szybszy czas obliczeń). Większość prac związanych z pośrednio i bezpośrednio z rozprawą Autor opublikował w czasopiśmie MDPI o umiarkowanej renomie. Samodzielny oryginalny wkład Autora został opublikowany w samodzielnej pracy [13] Gromada, K. Unsupervised SAR Imagery Feature Learning with Median Filter-Based Loss Value. Sensors 2022, 22, 6519. <https://doi.org/10.3390/s22176519>.

Autor wprowadził nowe elementy systemu, pozwalającego na podniesienie autonomii samolotu. Opracowano autorskie algorytmy detekcji obiektów zagrożenia i zainteresowania oparte na klasycznych metodach przetwarzania obrazu oraz SI (Sztucznej Inteligencji). Autor zaproponował nowe rozwiązanie lokalizacji globalnej samolotu na podstawie nakładania maski segmentacyjnej zbieranego obrazu SAR lub optycznego na mapy pokrycia terenu. Autor zaproponował nowe algorytmy usprawniające proces

planowania trasy – planowanie trajektorii i określenie warunków nalotu uwzględniając cele obserwacyjne.

#### **5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Autor przedstawił uzyskane wyniki poprawnie i przekonująco. Pewien niedosyt budzi fakt braku eksperymentu w większej skali uwzględniającego znacząco większy obszar roboczy oraz zmienność warunków atmosferycznych. Mimo to, nie widzę przesłanki która przeważałaby na niekorzystną ocenę rozprawy.

#### **6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych?**

Badania nad Bezzałogowymi Statkami Powietrznymi są ciągle aktualne w przestrzeni konsumenckiej (np.: delivery robotics) czy też w obronności. Autor rozprawy koncentruje się raczej na BSP dalekiego zasięgu wyposażonych w instrumenty pomiarowe stosowane w dużej części w aplikacjach militarnych. Warto wskazać na fakt, że opracowane algorytmy mogą być zastosowane dla tańszych czujników, które mogą znaleźć zastosowanie w aplikacjach konsumenckich. Oznacza to, że opracowane algorytmy mogą stanowić punkt odniesienia do dalszych prac nad przetwarzaniem danych wizyjnych czy też SAR do wspomaganie nawigacji w sytuacji zaniku sygnału GPS czy GNSS. Przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych widoczna jest w następujących obszarach:

- zagadnienie harmonogramowania przelotów z uwzględnieniem ograniczeń dynamicznych samolotów, jak i sensorów obserwacyjnych,
- rozwinięto algorytmy unikania kolizji,
- opracowano nowe algorytmy pozwalające na detekcję obiektów zainteresowania na obrazowaniu SAR (podejście klasyczne jak i SI),
- nowe algorytmy segmentacji obrazów SAR (metody klasyczne i SI),
- nowy algorytm lokalizacji samolotów skutecznie działający nawet przy zaniku sygnału GNSS,
- opracowano metodykę pracy komputerów misji, która pozwala na implementację współbieżnie działających algorytmów przetwarzania danych SAR.

#### **7. Krytyczne uwagi końcowe**

- Proszę wyjaśnić zamienne stosowanie GPS i GNSS w rozprawie.
- Proszę wyjaśnić odporność proponowanych algorytmów na warunki atmosferyczne.
- Proszę wyjaśnić w sposób ilościowy i jakościowy poziom autonomii i umiejscowić w tej skali opracowane rozwiązanie.
- Proszę Autora o wyjaśnienie kwestii tezy rozprawy.

#### **8. Ocena końcowa**

Rozprawa Pana mgr. inż. Krzysztofa Gromady pt.: „Zwiększenie autonomii taktycznych bezzałogowych statków powietrznych w oparciu o radar z syntetyczną aperturą i kamerę elektrooptyczną” **spełnia wymagania** określone w art. 187 ust. 1-2 Ustawy.