

dr hab. inż. Jerzy Graffstein  
04-780 Warszawa  
ul. Pomarańczowa 12A

Warszawa, 28.08.2025

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej pt.: „Zastosowanie algorytmu sterowania  
w roju dla bezzałogowych obiektów latających”**

**Autor rozprawy: mgr inż. Maciej Salwa**

**Promotor: dr hab. inż. Izabela Krzysztofik, prof. PŚk**

Recenzję rozprawy doktorskiej wykonano na podstawie: pisma nr MAA-511/74/2025 z dnia 22.05.2025 r dra hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej i umowy o dzieło nr XII/DEC-M/11RD/25.

### **1. Zgodność tytułu z treścią i postawiony cel pracy**

Tytuł dysertacja: „Zastosowanie algorytmu sterowania w roju dla bezzałogowych obiektów latających” w pełni odzwierciedla zawarte treści. Dotyczy aktualnych zagadnień automatycznego sterowania bezzałogowymi, latającymi obiektami. Praca opisuje wykonane algorytmy sterowania obiektów bezzałogowych poruszających się w roju oraz sposób ich badania oraz uzyskane wyniki przeprowadzonych testów i walidacji. W ramach tej tematyki zostało przedstawionych wiele zagadnień istotnie wpływających na zachowanie się całego roju i jego uczestników. Doktorant przedstawił ich rozwiązanie z czego większość była jego autorskimi pomysłami bazującymi częściowo na podobnych metodach dostępnych w publikacjach.

Doktorant w sposób precyzyjny i wyczerpujący określił główny cel pracy jakim było: „opracowanie algorytmu sterowania grupą bezzałogowych obiektów latających w szyku określanym mianem roju” oraz cele szczegółowe dotyczące opisywanych poszczególnych zagadnień.

## 2. Uzasadnienie wyboru tematu

Uzasadnieniem podjęcia tematu dysertacji jest obecnie obserwowany niezwykle dynamiczny rozwój obiektów bezzałogowych ze względu na ich wzrastające zastosowanie w różnych dziedzinach. Są to między innymi takie obszary działalności ludzkiej jak: rolnictwo, monitoring instalacji i infrastruktury, logistyka, bezpieczeństwo publiczne i ratownictwo oraz cele militarne. Spowodowane jest coraz powszechniejszą dostępnością technologii, które przyczyniają się do z jednej strony zwiększenia skuteczności wykonywanych zadań przez latające obiekty bezzałogowe, w tym ich formacje, a z drugiej do obniżenia kosztów takich rozwiązań. Wybór zadania polegającego na omijaniu nieruchomych przeszkód przez rój bezzałogowych obiektów jest istotny ze względu na duże znaczenie tematyki bezpieczeństwa w ruchu lotniczym.

## 3. Ocena naukowej wartości pracy i charakterystyka jej zawartości

Praca, doktorska niezwykle szeroko ujmuje zagadnienie sterowania obiektami latającymi w roju. W jej treści można wyodrębnić następujące, główne tematy: 1. Przegląd koncepcji sterowania w roju, 2. Jednostka latająca w roju i wyposażenie pokładowe w rozdziale pt.: 'Jednostka latająca', 3. Automatyczne sterowanie w roju zawarte w rozdziałach pt.: 'Środowisko graficzne' dla sterowania niższego poziomu i w rozdziale pt.: 'Matka – Operator' dla sterowania wyższego poziomu, 4) Komunikacja pomiędzy uczestnikami roju – w rozdziale: pt.: 'Komunikacja'.

### 3.1. Ocena spisu literatury i przegląd koncepcji sterowania

Autor w swojej pracy zawarł bogate piśmiennictwo bo liczące 217 pozycji z czego prawie wszystkie oprócz dwóch pozycji są w języku angielskim. W dwóch pozycjach z wymienionej literatury Doktorant jest współautorem i są one również w języku angielskim. Większość podanej literatury pochodzi z ostatnich 10 lat w tym część stanowią publikowane w Internecie opisy projektów dużych firm i korporacji dotyczących tej tematyki. Podane również zostały źródła dokumentacji w liczbie 30 wykorzystywanego przez Autora oprogramowania i sprzętu. W przeglądzie koncepcji sterowania w roju, opartym na tej literaturze, została podana jego definicja oraz przedstawiono przykładowe rozwiązania z ostatnich lat w tym dotyczące organizacji łączności. Wymienione zostały istotne aspekty w jakim kierunku następuje rozwój i zastosowania bezzałogowych pojazdów poruszających się w roju.

### 3.2. Jednostka latająca w roju i jej wyposażenie

Jako obiekt tworzący rój Autor przyjął w pracy latający obiekt z czterema wirnikami nazywany quadcopterem typu Crazyfile 2.X. Jego dane zamieszczono w dodatku wskazując, że jest on bardzo mały. Podany został jego prosty model matematyczny w formie 6 równań dynamiki opisujących ruch ciała sztywnego o 6 stopniach swobody. Omówione zostały zależności matematycznego modelu napędu oraz wpływ wiatru o trzech składowych jego prędkości wzdłuż trzech osi przyjętego układu współrzędnych. Ostanía zależność (1.12) jest poprawna, ale ma wyłącznie charakter poglądowy. Dla większej ścisłości, zmienne  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{k}_d$  w tym wzorze powinny być zapisane jako trójelementowe wektory o składowych podanych przykładowo w tekście dodatku jak dla oporów  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  - różne wartości w zależności od rozpatrywanej osi układu współrzędnych. Tę zależność można również wykorzystać do uwzględnienia oporów aerodynamicznych pochodzących od ruchu obiektu. Implementacja modelu matematycznego została wykonana w oprogramowaniu Matlab/Simulink. Doktorant w badaniach symulacyjnych wspomagał się również dedykowanym oprogramowaniem Gazebo, które, jak podaje, uwzględniało w modelu aerodynamicznym między innymi tzw. efekt Ziemi co było istotne dla lotów na małych wysokościach. Podane zostały przykłady kształtu formacji roju i ogólna ich charakterystyka oraz ich zastosowanie.

Doktorant przedstawił koncepcję wyposażenia pokładowego dronów niezbędnego do efektywnego sterowania lotem oraz do wykonania typowych misji. Zaproponował metodę pomiaru odległości pomiędzy poszczególnymi uczestnikami roju nie wymagającą dla nich dostępu do danych z GPS. Ideą takiego pomiaru jest wyznaczenie czasu pomiędzy wysłaniem fali radiowej od jednego uczestnika roju i odebraniem jej przez drugiego. Przedstawiono również metodę określania położenia w przestrzeni uczestników roju nie posiadających dostępu do pomiaru z GPS, a wykorzystujących tzw. kotwice czyli inne drony wyposażone w GPS. Zaprezentowane metody pomiarów odległości pomiędzy uczestnikami roju i ich położenia wymagają bardzo dokładnego pomiaru czasu co zapewnia zaproponowana w pracy technologia UWB.

### 3.3. Automatyczne sterowanie w roju

Zagadnienie automatycznego sterowania omówione zostało oddzielnie dla poziomu niższego (regulator mikroprocesorowym sterownikiem) i wyższego – automatyczne sterowanie całym rojem realizowanym przez 'matkę'. Mocnym atutem pracy jest niezwykle efektywne wykorzystanie współczesnych narzędzi programowych. Stosowane były przez Autora do

rozwiązywania problemów związanych z automatycznym sterowaniem, a w tym wyliczaniem niezbędnych wielkości takich jak współczynniki wzmocnień regulatora. W sterowaniu poziomym niższego zastosowano regulator typu PID, w którym współczynniki wzmocnienia zostały wyliczone dla kanału wysokości klasyczną metodą z użyciem procedury PID-Tuner z pakietu Matlab, a dla pozostałych kanałów (kąty położenia obiektu) wykorzystane były nastawy uzyskane automatycznie z oprogramowania ArduPilot w procesie auto-korekcji. Oprogramowanie sterownika Doktorant wykonał posługując się pakietem programowym ArduPilot wybranym jako najlepszy z pośród innych zaprezentowanych w pracy. Implementacja programu wykonana została na sprzęcie Raspberry Pi z nakładką Navio 2. Testy tego czterokanałowego regulatora w procesie symulacji sterowanego automatycznie obiektu dowiodły poprawności doboru nastaw co zostało przedstawione na odpowiednich wykresach. Opisane zostały sygnały sterujące dla poszczególnych kanałów polegające na odpowiedniej zróżnicowanej zmianie ciągu poszczególnych wirników, w celu zmiany kątów położenia lub identycznej zmianie ciągu wszystkich wirników, niezbędnej do zmiany wysokości. Wykonanie automatycznego sterowania wyższego poziomu jest autorskim rozwiązaniem Doktoranta i jednocześnie jest jego najistotniejszym osiągnięciem z punktu widzenia naukowego, jak również z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania całego roju. Jedną z istotniejszych cech świadczących o prawidłowym zachowaniu roju jest jego integralność, co stanowi podstawowy warunek, żeby grupa bezzałogowych obiektów mogła nazywać się rojem. Celem sterowania było między innymi przeformowanie szyku roju w sytuacji gdy np. jeden z uczestników uległ likwidacji oraz w czasie omijanie stałej przeszkody z przeformowaniem szyku. Ta część stanowi o wysokiej wartości pracy Doktoranta, ponieważ wymagała skomplikowanych wysoko-poziomowych algorytmów sterowania. Do tego celu Autor wykorzystał mechanizmy sztucznej inteligencji tzw. uczenia ze wzmocnieniem (reinforcement learning, RL) zgodnie z algorytmem QR-Learning. Proces uczenia ze wzmocnieniem był realizowany przez procedury znajdujące się w ogólnie dostępnej bibliotece TensorFlow firmy Google. Uwzględniono unikanie sytuacji przetrenowania sieci (overfitting) polegającego na zbyt dokładnym jej wyuczeniu dla wybranego obszaru zmiennych i zbyt słabego dla pozostałych zakresów zmiennych. Istotne z punktu widzenia optymalnego osiągnięcia celu misji jest wybór nagród i polityki, ponieważ stanowią odpowiednik funkcji celu w procedurach optymalizacyjnych. Polityka została jednoznacznie zdefiniowana poprzez uwzględnienie następujących aspektów:

1. Dostosowania prędkość w celu utrzymania formacji,
2. Zmiany lotu z powodu istnienia nieprzewidzianej wcześniej przeszkody,

3. Koordynacja lotu z innymi uczestnikami, w celu zachowania integralności formacji w czasie realizacji misji.

W rozpatrywanym algorytmie duże znaczenie mają nagrody, wymienione w pracy jako następujące przykłady:

1. Ukończenie misji w określonym czasie,
2. Zachowanie optymalnej odległości od innych uczestników roju,
3. Osiąganie zadanych punktów trajektorii,
4. Oszczędność energii.

Ta ostatnia lista nagród została zamieszczona w pracy jako możliwości i nie zostało do końca określone, które z tych nagród zostały uwzględnione w algorytmie. Można się domyślać, po ich treści, że mogły to być zastosowane wszystkie cztery lub ew. trzy bez pierwszej, jednak wymaga to doprecyzowania.

### 3.4. Komunikacja pomiędzy uczestnikami roju

Szczegółowo opisanym problemem była łączność pomiędzy uczestnikami roju, liderem i 'matką' (stacją naziemną). Jest to temat bardzo istotny dla prawidłowego funkcjonowania całego roju. Często, w dostępnych publikacjach dotyczących roju, albo całkowicie pomijany, albo traktowany tylko na marginesie. Dlatego decyzja Doktoranta o szczegółowym ujęciu tego zagadnienia jest w pełni uzasadniona i świadczy o jego dobrym rozeznaniu hierarchii ważności wybranego przez niego tematu. Przedstawia on topologię łączności uwzględniającą rolę poszczególnych uczestników roju. Zaprezentowane zostały najnowsze trendy rozwoju łączności bezzałogowych obiektów, w tym technologie oparte o Internet Rzeczy z komunikacją w sieci komórkowej typu IoT i gromadzeniem informacji w chmurze. Wybór dostępnej technologii ultraszerokopasmowej UWB (Ultra-Wideband) został uzasadniony wieloma korzyściami typu: duża odporność na zakłócenia, niskie zużycie energii co w przypadku małych obiektów ma decydujące znaczenie. Ten typ łączności wykorzystywany jest do precyzyjnego pomiaru odległości pomiędzy uczestnikami roju. Zapewnia możliwość przesyłania dużych ilości informacji. Cechą charakterystyczną jest mały zasięg co przy większych odległościach wymaga dodatkowych technologii np. (retransmisji). Do łączności między 'matką', a zwykłym uczestnikiem roju Autor zaproponował system MAVLink. Opisany został protokół komunikacji wewnątrz grupy oraz szczegółowo podana została zawartość formatu ramki danych. Jej struktura ma zapewnić z jednej strony jak najmniejsze obciążenie łączności (czasu wysłania i odbioru), a z drugiej strony zawierać niezbędną ilość danych i odpowiednie zabezpieczenia w celu uzyskania odporności na błędy

transmisji. Sprecyzowana została hierarchizacja przesyłanych i odbieranych informacji pomiędzy zwykłymi uczestnikami roju, liderami i matką w taki sposób, ażeby uniknąć między innymi przepełnienia pamięci.

## 5. Ocena możliwości praktycznego wykorzystania wykonanej pracy

Uzyskane efekty pracy oraz zaprezentowane jej cechy i wyniki stanowią podstawę do ich wykorzystania w praktycznych rozwiązaniach i wdrożeniach. Jedną z najistotniejszych uzyskanych cech pracy była modułowość zapewniająca wykorzystanie zaproponowanych rozwiązań automatycznego sterowania roju w różnych sektorach gospodarki i nauki. Przy wyborze sprzętu i programów wspomagających wykonanie systemu sterowania rojem Doktorant zadbał o łatwą ich dostępność. Kierował się praktycznymi przesłankami tak, żeby z jednej strony osiągnąć jak najlepszą funkcjonalność sterowania i łączności, a z drugiej strony zminimalizować koszty przedsięwzięcia. Uzyskał również efekt elastyczności wykonanych przez siebie programów komputerowych, pozwalający na zastosowanie całego programistycznego warsztatu do innych obiektów latających operujących osobno lub w roju.

## 6. Ocena zastosowanych metod badawczych

Opisane symulacje działania automatycznego sterowania w roju stanowią ważną część pracy i świadczą o wysokim poziomie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań numerycznych przez Doktoranta. Potwierdzeniem tej opinii jest między innymi zastosowanie zaawansowanej techniki w systemie SITL (Software In The Loop) zapewniającej warunki badawcze bardziej zbliżone do rzeczywistych. Do tego celu Autor wykorzystał przez siebie oprogramowany sterownik na ogólnie dostępnej platformie mikroprocesorowej. Stopniowanie złożoności testów od najprostszych - czyli przeformowanie roju do najbardziej złożonych takich jak ominięcie stałej przeszkody z jednokrotnym, a następnie z dwukrotnym przeformowaniem świadczą o dobrym poziomie umiejętności badawczych Doktoranta. Dobrą znajomość metod badawczych Doktoranta wykazał w umiejętnym przygotowaniu danych do wytrenowania algorytmu RL (uczenia ze wzmocnieniem). Przygotowanie danych realizował między innymi poprzez zadawanie współrzędnych położenia przeszkód z generatora liczb przypadkowych, w celu uniknięcia niepożądanego zjawiska typu *overfitting*. Badania przeprowadził w szerokim spektrum konfiguracji roju między innymi dla szyku liniowego jedno i dwurzędowym z różną liczbą uczestników i dla różnych stopni złożoności zadań.

## 7. Uwagi redakcyjne

Praca została sformułowana poprawnym językiem technicznym i opisuje w sposób precyzyjny zawarte zagadnienia. Wartościowe z punktu widzenia łatwiejszego zrozumienia treści pracy jest zamieszczenie na początku tekstu wykazu ważniejszych skrótów i terminów. Pomimo istnienia w tekście opisów stosowanych zmiennych, uważam, że pożyteczne jest zamieszczenie na początku pracy pełnej listy tych zmiennych wraz z odpowiednimi ich opisami.

Autor pracy nie ustrzegł się od drobnych błędów edytorskich, które nie wpływają znacząco na wartość merytoryczną całości pracy. Wśród nich są między innymi:

1. str. 44 zamiast Rys.17 powinno być Tab. 1.1,
2. str. 84 i str. 85 na wykresach Rys. 3.5 i Rys. 3.6 symbol jednostki czasu zamiast 'T' powinno być 't',
3. str. 90 z pierwszego zdania w podkreślonym tekście wynika, że to zaawansowana grafika pozwala na wierne oddanie rzeczywistości, a nie modele matematyczne. Jednak to nie grafika pozwala na uwzględnienie różnych oddziaływań środowiska tylko matematyczne modele zawarte w symulatorze,
4. str. 57 wiersz 19, str. 84 wiersz 9, str. 112 wiersz 1, str. 114 wiersz 4 od końca: bardziej prawidłowym określeniem od słowa 'wzlot' jest 'wznoszenie',
5. str. 173 Rys. 5.10 przedstawiający pozycje startowe roju, stanowiący zrzut ekranu z symulatora lotu jest słabo czytelny – prawdopodobnie wymaga dodatkowej obróbki graficznej podobnie str. 93 Rys. 4.1 oraz str. 200 Rys.6.10 i str. 201 Rys. 6.11,
6. str. 195, wiersz 16, zamiast słowa 'miana' powinno być 'zmiana',
7. str. 200, wiersz 13, zamiast 'Do przeprowadzenie' powinno być 'Do przeprowadzenia',
8. str. 204, wiersz 5, odwołanie do nieistniejącego podrozdziału 6.6.1.
9. str. 211, wiersz 4, zamiast określenia 'przysposobienie do' lepiej użyć słowa 'przygotowanie do',
10. str. 211, wiersz 10 zamiast słowa 'umyślne' lepiej użyć określenia 'zamierzone',
11. str. 211, wiersz 13 zamiast 'jest to funkcjonujące rozwiązanie ' bardziej adekwatne będzie: ' możliwe będzie funkcjonowanie tego rozwiązania'.
12. str. 213, wiersz 3 od końca zamiast 'jakoś' powinno być 'jakość', w tym samym wierszu przed słowem 'zostały' brakuje spójnika typu 'i' lub 'oraz'
13. str. 244 i str. 245 na Rys.1.2 i Rys 1.3 brakuje opisu osi – jednak podpisy pod wykresami wyjaśniają jakie zmienne są reprezentowane na osiach tych wykresów,



14. str. 246 ostatnie zdanie: 'Można zapisać je następująco zapisać następująco:' powinno brzmieć: 'Można zapisać te momenty następująco',

15. W części zamieszczonego spisu literatury brakuje daty oraz/lub nazwy wydawnictwa lub tytułu czasopisma. Dotyczy to między innymi pozycji: [11], [14], [19], [21], [24], [25], [60], [94], [120] i [144].

## 7. Wnioski końcowe

Przedłożona do recenzji praca doktorska Pana mgra inż. Macieja Salwy pt.: „Zastosowanie algorytmu sterowania w roju dla bezzałogowych obiektów latających” stanowi oryginalne rozwiązanie naukowe wnoszące istotny wkład do rozwoju wiedzy dotyczącej sterowania latającymi bezzałogowymi obiektami w roju. Doktorant potwierdził swoją znajomość wiedzy teoretycznej i praktycznej w zakresie przedmiotu dysertacji, a w szczególności tworzenia matematycznych modeli latających obiektów, systemów łączności, sterowania rojem latających obiektów bezzałogowych i procesami symulacji numerycznych. Ponadto wykazał się umiejętnościami połączenia zagadnień naukowych i praktycznych wykonując samodzielnie szereg testów i walidacji na sprzęcie PC oraz na platformie mikroprocesorowej służących do sprawdzenia funkcjonowania złożonych procesów automatycznego sterowania. Doktorant zaprezentował wysokie umiejętności samodzielnego prowadzenia eksperymentów badawczych. Mając na uwadze wymienione wyżej argumenty uważam, że praca doktorska Pana mgra inż. Macieja Salwy spełnia wymagania wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami) i może stanowić podstawę do nadania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Wnioskuje do Rady Naukowej Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie Pana mgra inż. Macieja Salwy, do publicznej obrony.

Jerzy Grawert