

Lublin, 15 maja 2025 r.

dr hab. Małgorzata Charytanowicz, prof. uczelni
Kierownik Zakładu Sztucznej Inteligencji i Analizy Danych
Katedra Informatyki Wydziału Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska



Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Marty Gackowskiej-Kątek
pt.: *Predyktywny model dezorganizacji roju dronów przy przejściu intruza*
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych,
w dyscyplinie naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja

Recenzja została wykonana w oparciu o uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich nr 6/2025 z dnia 13 marca 2025 r. oraz pismo z dnia 19 marca 2025 r. podpisane przez Przewodniczącą Rady Naukowej, dr. hab. inż. Tomasza Talaśka, prof. PBS.

Rozprawa doktorska została wykonana w Zakładzie Techniki Cyfrowej Wydziału Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. Piotra Cofty.

Tematyka rozprawy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy opracowania i oceny modeli predyktywnych umożliwiających analizę i prognozowanie dezorganizacji stacjonarnej formacji roju dronów w przypadku wtargnięcia intruza. W ramach prowadzonych przez Doktorantkę badań opracowany został probabilistyczny model systemu reprezentującego rój dronów. Modele predyktywne zostały opracowane na podstawie dwóch zbiorów danych, do wygenerowania których zastosowano symulację. Istotnym aspektem proponowanego podejścia jest przeprowadzenie i analiza wyjaśnialności wykorzystanych modeli.

Zawartość i struktura rozprawy

Rozprawa liczy 154 strony i została zredagowana w języku polskim. Składa się z dziewięciu rozdziałów oraz Bibliografii, Spisu rysunków i Spisu tabel. Spis piśmiennictwa zawiera 147 pozycji, prawidłowo dobranych do tematu rozprawy. Pierwszy rozdział rozprawy poprzedzony jest Streszczeniem w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym, pod tytułem Wstęp, Autorka zawarła ogólne wprowadzenie w tematykę dotyczącą bezzałogowych statków powietrznych, zwanych popularnie dronami. Tematyka ta jest rozpatrywana w kontekście stacjonarnych formacji rojów dronów. Doktorantka zwróciła uwagę na istotne aspekty związane z zachowaniem się roju w sytuacji pojawienia się intruza oraz oddziaływaniem na rój w celu zminimalizowania ryzyka dezorganizacji roju. Następnie został przedstawiony cel i zakres rozprawy oraz cztery tezy badawcze. Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie i ocena modeli predykcyjnych pozwalających na analizę i przewidywanie stopnia dezorganizacji roju dronów w sytuacji wtargnięcia intruza.

Zagadnienie badawcze rozważane przez Doktorantkę ma niewątpliwie istotne znaczenie w kontekście dynamicznego rozwoju bezzałogowych statków powietrznych zwanych dronami oraz możliwości ich zastosowań i praktycznych wdrożeń w różnych dziedzinach życia.

W rozdziale drugim, liczącym 18 stron, Doktorantka przedstawiła problematykę związaną z rojami dronów, ich organizacją i dezorganizacją. W oparciu o bogate piśmiennictwo zwrócono uwagę na interdyscyplinarność zagadnienia i dokonano gruntownego przeglądu literatury, pozwalającego na zdefiniowanie procesów organizacji i dezorganizacji formacji roju. Tą część rozprawy uważam za ważną w aspekcie zidentyfikowania luki badawczej odnoszącej się do tych procesów i wynikającą stąd konieczność opracowania efektywnych systemów zarządzania zmianami w strukturze i zachowaniu rojów.

W rozdziale trzecim dokonano formalizacji problemu badawczego. Na podstawie przeglądu literatury Doktorantka stwierdziła, iż istniejące modele nie umożliwiają zbadania w sposób kompleksowy procesu organizacji i dezorganizacji roju. Istotnym wkładem Doktorantki jest opracowanie probabilistycznego modelu systemu reprezentującego rój z określonymi parametrami. Model ten został zrealizowany jako probabilistyczny graf przejść z wagami. Do zdefiniowania metod parametryzacji i realizacji algorytmów pozwalających na wyznaczenie parametrów modelu wykorzystano symulacje.

Miary zastosowane do oceny jakości i efektywności modeli predykcyjnych przedstawiono w rozdziale czwartym. Za miarę dezorganizacji przyjęta została entropia krzyżowa. Temu zagadnieniu poświęcona jest pierwsza część rozdziału. W drugiej części zostały opisane podstawowe miary oceny jakości modeli predykcyjnych. Opis ten byłby czytelniejszy, gdyby podane zostały wzory dla tych miar. Sformułowanie dotyczące obliczania współczynnika determinacji nie jest jasne. Rozdział ten w pewnym stopniu zamyka część teoretyczną, przedstawiającą pojęcia wykorzystane w dalszej części rozprawy.

W kolejnym rozdziale piątym przedstawiony został algorytm unikania kolizji. Na uwagę zasługuje fakt, iż jest to innowacyjny i autorski algorytm, objęty zgłoszeniem patentowym P.431104, którego pewne elementy zostały zmodyfikowane w ramach przedłożonej rozprawy doktorskiej. Autorka opisała poszczególne elementy algorytmu, natomiast brak jest podania samego algorytmu w postaci schematu lub kolejnych kroków. Trudny do oceny jest również wkład samej Doktorantki w powstanie i rozwój algorytmu.

W celu przeprowadzenia badań zachowań rojowych w oparciu o przedstawiony algorytm opracowany został symulator 2D realistycznego zachowania się formacji roju dronów. Opis symulacji i uzyskanych wyników obejmuje rozdział szósty. Uwzględnienie możliwości pojawienia się intruza wraz z możliwością zmiany parametrów dronów i algorytmu antykolizyjnego pozwoliło na implementację różnorodnych scenariuszy. W symulatorze wyróżniono dwa podstawowe scenariusze obejmujące zachowania niekooperatywne oraz zachowania kooperatywne. Jako miarę oceny dezorganizacji w badanych formacjach rojów dronów zaimplementowano entropię krzyżową.

Dwa kolejne rozdziały dotyczą modeli predykcyjnych i ich wyjaśnialności. W rozdziale siódmym omówiono modele bazowe, wykorzystywane do predykcji dezorganizacji roju dronów (entropii krzyżowej) na podstawie parametrów roju i algorytmu antykolizyjnego. Za modele bazowe przyjęto regresję liniową w kilku wariantach. Dla obu zbiorów danych najlepsze wyniki pod względem współczynnika determinacji osiągnęła regresja grzbietowa i regresja Lasso, aczkolwiek wyniki nie były zadowalające. W toku dalszych analiz wprowadzono dodatkowe zmienne uzyskując nieznaczną poprawę wyników. Dla drugiego zbioru danych najlepsze wyniki były znacznie gorsze niż dla pierwszego zbioru. W rozdziale ósmym opracowano predykcyjne modele uczenia maszynowego dla podstawowego i rozszerzonego zbioru parametrów, wykorzystując następujące modele uczenia maszynowego: Decision Tree, Random Forest, CatBoost, XGBoost, oraz dodatkowo SVR i K-Neighbors Regressor. W ramach przeprowadzonych badań wyłoniony został model CatBoost charakteryzujący się współczynnikiem determinacji przekraczającym 80%. Analizę poszerzono o zastosowanie metody SHAP w celu omówienia wpływu poszczególnych parametrów na zachowanie systemu. Dla obu zbiorów danych zdecydowana większość opracowanych modeli osiągnęła zauważalnie lepsze wyniki niż modele bazowe, co wynika z przyjętych w rozprawie założeń dotyczących doboru modeli bazowych. Podkreślić należy, iż analiza SHAP wykonana została bardzo wnikliwie, a uzyskane wyniki zostały dokładnie opisane

Rozprawę kończy rozdział dziewiąty zawierający podsumowanie i wnioski. Uwagi dotyczące poszczególnych rozdziałów zostaną sformułowane w dalszej części recenzji

Uwagi recenzenta

Lekturę rozprawy i zrozumienie wprowadzonych definicji utrudnia niewłaściwy zapis wzorów matematycznych. Te same oznaczenia zapisywane są dużą i małą literą, różnym krojem pisma, z pochyleniem i bez pochylenia (strony 31-34). Zapis matematyczny jest nieściśły (np. $i=1..n$), brak jest objaśnień symboli i wielkości występujących we wzorach (np. symbol $\times$ we wzorze (5)). Przykładowo, zdanie „Oczekiwany wysiłek dla opisywanej sytuacji można przedstawić równaniem 3” (strona 33) jest niejasne. Wprowadzony zapis wskazuje raczej na definicję modelu M jako uporządkowanej krotki.

Kolejnym mankamentem rozprawy jest brak informacji na temat walidacji opracowanych modeli. W związku z wyborem metod uczenia maszynowego w trakcie lektury rozprawy nasuwają się następujące pytania:

1. W jaki sposób zostały wyznaczone hiperparametry modeli uczenia maszynowego? Jak została przeprowadzona walidacja modeli? Czy zostało zastosowane podejście k-fold?
2. Czy wartości hiperparametrów modeli były takie same dla wszystkich scenariuszy badań?
3. W jaki sposób obliczany został współczynnik determinacji R^2 ? Jak rozumieć pojawienie się ujemnych wartości tego współczynnika w tabeli 14 i w tabeli 18?
4. Czy wyniki dotyczące oceny modeli uczenia maszynowego i analiza SHAP dotyczą zbioru testowego?

Z racji pełnionej funkcji recenzenta zamieszczam uwagi dotyczące tekstowej i edytorskiej strony rozprawy. Nie obniżają one merytorycznej wartości rozprawy, wpływają jednak na jej czytelność:

1. Doktorantka nie ustrzegła się powtórzeń, co ze względu na dużą objętość pracy wydaje się być zrozumiałe.
2. W rozprawie występuje niejednolity sposób zapisu rozwinięć skrótów odnoszących się do języka angielskiego (strony 17, 19, 41).
3. W przypadku odwołań numer wzoru podawany jest w nawiasach lub bez, przy czym akapity ze wzorami matematycznymi są niepoprawnie sformatowane.
4. Podpisy rysunków pojawiają się na innej stronie, niż sam rysunek (np. strony 51-52).
5. Układ i tytuły tabel różnią się pomimo ich jednolitej zawartości (np. tabele 12 i 14).
6. Rysunek 25 jest nieczytelny.

7. W rozprawie występują drobne błędy interpunkcyjne, literowe i słowne, .
8. Zapis pozycji bibliografii nie jest jednolity.

Oryginalny wkład Doktorantki

Oryginalny wkład badawczy Doktorantki dotyczy opracowania probabilistycznego modelu systemu reprezentującego rój dronów z określonymi parametrami oraz sformalizowania pojęcia entropii krzyżowej jako miary oceny dezorganizacji roju. W ramach przeprowadzonych badań zidentyfikowano parametry roju i algorytmu antykolizyjnego istotne ze względu na minimalizację ryzyka dezorganizacji roju. Wszystkie tezy postawione w rozprawie zostały udowodnione.

Podsumowanie

Niniejszym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Marty Gackowskiej-Kątek pt.: *Predyktywny model dezorganizacji roju dronów przy przejściu intruza* spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r., poz. 1571), w związku z czym wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Marty Gackowskiej-Kątek i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Wyrażoną opinię przedkładam Radzie Naukowej Dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, która podejmie decyzje w sprawie przebiegu dalszych etapów przewodu doktorskiego Pani mgr inż. Marty Gackowskiej-Kątek i nadania Jej stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja.



Lublin, dnia 15 maja 2025 roku

dr hab. Małgorzata Charytanowicz, prof. uczelni