



Szczecin, 26.05.2025 r.

dr hab. inż. Marcin Korzeń, prof ZUT
Katedra Sztucznej Inteligencji i Matematyki Stosowanej
Wydział Informatyki, ZUT w Szczecinie
ul. Żołnierska 49, 71-210 Szczecin

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marty Gackowskiej-Kątek pt. **„Predyktywny model dezorganizacji roju dronów przy przejściu intruza”**

Recenzja wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich.

1 Cel i zakres rozprawy

Celem rozprawy była analiza zakłóceń formacji dronów w obecności lub przy przejściu intruza. W pracy zakłada się, że rój dronów ma pewną strukturę uporządkowaną, analizowane przypadki dotyczą płaskich formacji o strukturze siatki prostokątnej. Główne zadania badawcze dotyczą analizy zachowania się roju dronów w kontekście zakłóceń spowodowanych wtargnięciem intruza, w zależności od: kąta oraz pozycji jego wejścia intruza, oraz w zależności od parametrów roju dronów, jak odległości w sieci, parametrów algorytmu unikania kolizji.

Tezy badawcze zawarte w pracy dotyczą:

1. Możliwości wykrywania faktu dezorganizacji roju dronów w obliczu zakłóceń.
2. Możliwości opracowania modeli zdolnych do przewidywania stanów dezorganizacji formacji dronów w sytuacji wtargnięcia intruza.
3. Możliwości przewidywania prawdopodobieństwa wystąpienia określonych stanów dezorganizacji pozwala na identyfikację potencjalnych zagrożeń związanych z utrzymaniem formacji.
4. Możliwości identyfikacji parametrów modeli mających bezpośredni wpływ na poziom dezorganizacji.

W ramach badań opracowano scenariusze oraz przygotowano dwa zestawy danych testowych: jeden związany z zakłóceniami w postaci drona intruza, który nie posiada algorytmu unikania kolizji (model niekooperatywny) oraz drugi ze zbiorów dotyczący zachowań kooperatywnych, gdzie intruz posiada również wdrożony algorytm unikania kolizji. Zestawy te posłużyły do wyternowania modeli predykcyjnych oraz wyciągnięcia wniosków. Praca mieści się w dyscyplinie Informatyki Technicznej i telekomunikacji oraz można ulokować ją obszarach uczenia maszynowego, modelowania i symulacji, a sama tematyka rozprawy jest bardzo aktualna.

2 Zawartość rozprawy oraz główne wyniki

Rozprawa składa się z 9 rozdziałów, spisów bibliografii, rysunków i tabel. Ponadto praca zawiera streszczenie napisane w języku polskim i angielskim. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do tematyki rozprawy oraz zawiera sformułowanie głównych tez badawczych. W rozdziały 2–4 zawierają przygotowanie pojęciowe wykorzystywane w rozprawie. W kolejności w rozdziale 2 przedstawiono przegląd literatury oraz pojęcia związane z różnymi aspektami formacji roju dronów. W rozdziale 3 podjęto próbę formalizacji problemu badawczego tj. określenia modelu roju dronów oraz przedstawiono model probabilistyczny przejść roju pomiędzy stanami w formacji. W rozdziale 4 omówiono wykorzystywane w pracy miary rozproszenia/uporządkowania formacji głównie oparte na pojęciu entropii krzyżowej. Rozdział 5 przedstawia omówienie algorytmu unikania kolizji. Cechy i parametry tego algorytmu mają wpływ na zachowanie roju i są analizowane w głównej części badań. W rozdziałach 6, 7 i 8 zawierających główną część oryginalnych prac badawczych. Rozdział 6 przedstawia zagadnienia związane ze środowiskiem symulacyjnym oraz sposobem pozyskania danych. W rozdziałach 7 i 8 przedstawiono modele przewidujące stan roju oraz przedstawiono analizę wpływu różnych parametrów symulacji na odpowiedź formacji dronów. Ostatni rozdział 9 zawiera podsumowanie i wnioski z badań. Praca liczy 134 strony (nie licząc spisów). Przegląd literatury jest stosunkowo obszerny, praca zawiera odwołania do 147 aktualnych pozycji bibliograficznych. W spisie prac znajdują się trzy pozycje – atykuły w czasopismach, których współautorką jest Autorka rozprawy.

Cześć wstępna pracy przygotowana jest niestarannie i jest to główne zastrzeżenie odnośnie recenzowanej pracy. W pracy brakuje dokładnego omówienia środowiska symulacyjnego, a przytoczone definicje nie spełniają rygorów ścisłości. Sposób pomiaru głównej miary dotyczącej oceny zaburzenia formacji dronów (tj. entropii krzyżowej) został przedstawiony w sposób nieprecyzyjny. Szczegółowe uwagi przedstawiam w sekcji poniżej.

Natomiast sam układ eksperymentów oraz badań przedstawionych w głównej części badawczej (rozdziały 6–8) został przedstawiony poprawnie, uzyskane tam wyniki traktuje jako główny wkład oryginalny Autorki. Należy docenić nakład pracy i zakres przedstawionych eksperymentów. Zebrane zbiory danych zawierają odpowiednio 3891 oraz 4564 symulacje przy różnych nastawach parametrów, a przy każdej z nastaw koniecznych było wykonanie kilkaset tysięcy symulacji. Przedstawione wyniki dotyczące analizy jakości modeli oraz oceny i analizy wpływu zmiennych są również obszerne.

W trakcie symulacji rejestrowano entropię krzyżową formacji (główną zmienną decyzyjną), prawdopodobieństwa stanu układu (przelot/regularny, kolizja, oscylacje, wibracje) oraz zmienne warunkowe tj. parametry roju (promienie bezpieczeństwa, nastawy algorytmu unikania kolizji) oraz parametry intruza. Wykonano modele prognozujące wartość entropii krzyżowej względem parametrów symulacji, a następnie dokonano analizy istotności wpływu zmiennych w modelach.

W trakcie badań wykorzystano modele liniowe: regresje odporne (Hubera, Theil-Shein), regresję grzbietową, Lasso i ich kombinację czyli model Elastic Net oraz modele nieliniowe: drzewka decyzyjne, lasy losowe, gradient boosting (XGBoost, CatBoost), SVM, k-najbliższych sąsiadów.

Otrzymane wyniki wskazują, że przy ustalonych parametrach algorytmów unikania kolizji (po stronie formacji oraz intruza) można przewidzieć zachowanie się formacji w zależności od para-

metrów wejścia intruza oraz parametrów roju dronów, co dowodzi głównej tezy pracy. Ponadto przedstawiono ciekawe analizy dotyczące związków kąta natarcia intruza z zaburzaniem formacji, przedstawiono związki entropii krzyżowej, ze stanem układu (przelot, kolizja, oscylacje wibracje), wykonano szczegółową diagnostykę zmiennych wchodzących w skład modeli. Wyniki pokazują również, że modele nieliniowe lepiej radziły sobie z rozpoznawaniem stanów w formacji niż referencyjne modele liniowe, natomiast wśród modeli nieliniowych najlepiej wypadły modele oparte na boostingu.

3 Uwagi krytyczne, problemy i pytania

1. Część formalna pracy została opracowana niestarannie i zawiera wiele usterek. Nie podano formalnych definicji wielu kluczowych pojęć występujących w pracy. Przywoływane pojęcia wprowadzane są językiem nieformalnym lub wręcz potocznym. Przykładowo: nie podano precyzyjnej definicji układu chaotycznego, a pojęcie to jest bardzo często używane. Pojęcie stabilności używane jest w różnych kontekstach np. jako stan przeciwny do stanu chaotycznego lub uporządkowany, lub (str. 14) „Stabilność – równowaga stochastyczna”. Stabilność oraz własności chaotyczne układu dynamicznego są to pojęcia odrębne przykładowo, układ liniowy (skończenie wymiarowy) może być niestabilny, ale nie ma własności chaotycznych. Pojęcia chaosu i dezorganizacji oraz organizacji i stabilności w różnych kontekstach używane są zamiennie i raczej w znaczeniu potocznym. W pracy nie wskazano jednoznacznie jak ilościowo rozróżnić oscylacje i wibracje i jak odróżnić te stany od stanu regularnego. Na stronie 22 podano taką definicję organizacji: „organizacja to występowanie ładu i uporządkowania, to także zachowanie pewnej stabilności i równowagi”. Tego typu stwierdzenia polegające na wymienieniu synonimów w języku potocznym, nie pozwalają na ilościowe określenie własności danego stanu. Na stronie 14 wskazano definicję dezorganizacji „*Dezorganizację można zdefiniować jako różnicę pomiędzy stanem idealnym organizacji, reprezentowanym przez jej cel, a stanem aktualnym.*”. Jeżeli stan układu jest wektorem to dezorganizacja również jest wektorem? Przecież układ dynamiczny zawsze jest w jakimś stanie, czy to oznacza, że układ jest zawsze w stanie dezorganizacji? Definicja ta przypomina raczej definicję uchybu regulacji. Podobnie problem logiczny występuje w definicji punktów stabilności na stronie 32, która wskazuje, że pewne punkty nie są punktami stabilności nawet, jeżeli nimi są?
2. Wprowadzone pojęcia systemu i modelu są również nieprecyzyjne (str. 31-34). W pracy tak naprawdę nie podano definicji systemu, w szczególności w sposób odwołujący się do własności dynamicznych, mimo że taki model dynamiczny był wymagany do opracowania środowiska symulacyjnego. Dokładniej omówiono jedynie pewne jego elementy np. mechanizm unikania kolizji (rozdz. 5). Przedstawiony na stronie 31 opis sugeruje, że system jest tożsamy z zestawem jego parametrów.
3. Na stronach 33,34 podano probabilistyczny model stanu roju nie wskazując precyzyjnie, jak cztery wskazane stany (R , O , K , W) są wyznaczane w trakcie symulacji. Model ten jest wtórny do modelu dynamicznego, który rządzi pełnym zachowaniem się układu. W pracy nie ma

zbyt wielu odniesień do dynamicznych aspektów symulacji oraz jej związku z wprowadzonym modelem probabilistycznym.

4. Czy w pracy analizowano fakt, że układ zachowuje się w sposób chaotyczny np.: poprzez badanie wykładników Lapunowa? W jaki sposób określono regularność, oscylacje czy wibracje układu?
5. Na str. 32 pojawia się pojęcie „wysiłek” $W(t)$ jako wielkość liczbowa wzór (2), jaka jest zależność tego wzoru z funkcją f określonej wyrażeniem (4) również określającym „wysiłek”.
6. Podstawowym pojęciem analizy zaburzenia formacji dronów jest entropia krzyżowa. Jest to podejście właściwe, gdy znamy zakładany rozkład formacji oraz rozkład zaburzony. Jednak przedstawiony opis rodzi kilka pytań. Mimo, że Autorka podała definicję entropii krzyżowej dla rozkładów ciągłych i dyskretnych, to jednak nie wskazano jak posłużyć się wzorami (5) lub (6) lub (11) mając jedynie informacje o położeniu dronów, tj. jak z położeń dronów przejść do rozkładów? W jaki sposób przyjęto rozkład odniesienia formacji przykładowo zakładając, że w badaniach symulacyjnych wykorzystano siatkę rzędu 5×5 ? Czy wykorzystywany jest wzór w postaci ciągłej czy dyskretniej? Czy rozkład dronów w przestrzeni jest rozkładem ciągłym czy dyskretnym?, jak wygląda w tym przypadku przestrzeń probabilistyczna? W szczególności wątpliwości nie wyjaśnia fragment opisu na str. 50.
7. W kontekście oceny rozbieżności rozkładów wykorzystano entropię krzyżową, czy możliwe jest zastosowanie innych miar rozproszenia, np. dyskrepancji, biorąc po uwagę że rozkład referencyjny jest rozkładem równomiernym, czy zastosowania statystyki Kołmogorowa–Smirnowa. W pracy brakuje szerszej dyskusji w kontekście wyboru miary służącej do oceny zaburzeń rozkładu. Druga bardziej dyskusyjna uwaga: dlaczego w pracy nie posłużono się dywergencją Kullbacka-Leibera, której wartość równa zero oznacza równość rozkładów. Sama wartość entropii krzyżowej niewielwe mówi nam nt. zgodności rozkładów. Dopiero w odniesieniu do pewnego ustalonego rozkładu możemy porównać jedynie względnie dwa inne rozkłady (tj. mniejsza wartości – większa zgodność, większa wartość – brak zgodności).
8. Pewnym ograniczeniem rozprawy jest rozważanie stosunkowo małej liczby dronów oraz struktur dronów w dwuwymiarowej postaci siatki prostokątnej. Zasada byłaby szersza dyskusja dotycząca przyjętych ograniczeń w tym zakresie oraz wskazanie, jak przyjęte ograniczenia wpływają na uniwersalność wniosków.
9. Wyniki prezentowane w rozdziałach 6-8 są ciekawe i wartościowe, a sposób raportowania wyników jest znacznie lepszy w stosunku do sekcji początkowych. Pewnej dyskusji wymaga omówienie wyników z tabeli 6,9,10 str. 70. Regresje odporne Hubera i Theil-Shein, są lepiej dostosowane od minimalizacji błędu bezwzględnego (MAE), natomiast pozostałe modele używają MSE jako miarę dopasowania, stąd wyniki te nie są zaskakujące i są zgodne z teorią, natomiast kluczowe pytanie czy są to wyniki na zbiorze testowym? Patrząc na rozkład zmiennej decyzyjnej (rysunki 20; 22) widać, że występują tu znaczne obserwacje odstające i użycie odpornych regresji wydają się tu jak najbardziej zasadne. Mairy RMSE i R^2 są jakościowo

tożsame z miarą MSE. Wybór modelu odniesienia na podstawie miary R^2 wydaje się w tym kontekście dyskusyjny.

10. Jeżeli chodzi o wyniki prezentowane w rozdziale 8 to pokazują one, że modele nieliniowe znacznie lepiej radzą sobie z prognozą stanu formacji, ponadto zaprezentowane wyniki są interesujące i dają pewne wskazówki odnośnie projektowania struktury formacji oraz algorytmów unikania kolizji, przykładowo patrząc na wyniki większe znaczenie ma promień bezpieczeństwa niż nastawa wzmocnienia τ .
11. Patrząc na wyniki na rysunku 21 st. 64, widać, że warość entropii krzyżowej dobrze koreluje ze stanami regularnym i oscylacji, czy to oznacza, że kolizja i wibracje nie są zauważalne przez zmiany entropii krzyżowej. Proszę wskazać, jak należy praktycznie interpretować te wyniki?
12. Patrząc na jeden ze scenariuszy wejścia intruza (rys. 13) intuicja podpowiada, że powinna być obserwowana pewna symetria odpowiedzi formacji (podobna odpowiedź układu dla kątów α oraz $90^\circ - \alpha$), natomiast patrząc na rysunki 14 i 15 (przedstawiające entropię krzyżową w zależności od kąta natarcia), takiej symetrii nie widać. Czy można poprosić wyjaśnienie?

3.1 Niektóre uwagi o charakterze redakcyjnym

W pracy zdarzają się usterki językowe jednak nie są one liczne, poniżej przedstawiam część uwag o charakterze redakcyjnym:

1. Str. 31: czym jest n na stronie 31, liczbą systemów rodziny S ? liczbą parametrów systemu? Liczbą punktów w trajektorii?
2. Str. 31,32: czym jest m we wzorach (1) i (2)? liczbą dronów?
3. Str 32: we wzorze (2) nie wyjaśniono czym jest $H(x_i, z_i)$? Czy jest to entropia wprowadzona dalej w rozdz. 4? jeżeli tak czym są x_i i z_i stanami systemu czy rozkładami prawdopodobieństw?
4. Str. 34: co oznacza $\rightarrow$ we wzorze (4)?
5. Str. 33: Dlaczego nie używa się tu jawie prawdopodobieństw warunkowych, czy stany O, W, K są pochłaniające?
6. Wzór 3, str. 33: dlaczego wyrażenie to nazywa się równaniem?, czy występuje tu jest niewiadoma? Podobnie we wzorze (5), (6) i dalsze?
7. Str. 39: jak należy rozumieć $dx(x)$ we wzorze (8)?, prawdopodobnie literówka.
8. Str. 49 we wzorze (9): nie zrozumiałe jest $i \in N$, czy i może być dowolne naturalne czy raczej jest ograniczone przez liczbę dronów?, nie wskazano co oznacza symbol $|\cdot|$, czy jest to norma? standardowo używamy raczej $\|\cdot\|$, nie wskazano czym jest q , jak należy rozumieć symbol $\leftrightarrow$?, ponadto zniknęły kropki przy i oraz j .

9. W tabelach 6,9,10 brakuje jasnego wskazania, że wyniki te dotyczą próby testowej. Wyniki te wskazują też, że model Hubera ma najniższe wartości miary MAE.
10. Str. 44: jak należy rozumieć symbol $\leftrightarrow$ we wzorze (9)?
11. Str. 60: pojawia się tu stan L , $(P(L))$, wcześniej wprowadzono stan R są to różne stany?
12. Nie jest jasne co oznaczają kolory na wykresach 29, 30 i dalszych.
13. Str 85. "na rysunku 27" powinno być „na rysunku 30”.

4 Podsumowanie

Pomimo wskazanych uwag krytycznych o dotyczących części pojęciowo notacyjnej stwierdzam, że główna część badawcza rozprawy oraz oryginalny wkład Autorki nie budzą zastrzeżeń. Praca zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego badań symulacyjnych zachowania się formacji roju dronów w obecności intruza. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych wskazują na weryfikację głównych tez badawczych. Podsumowując stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia w stopniu wystarczającym wymagania Ustawy „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce” z dnia 20.07.2018 r., w zakresie wymagań stawianych rozprawom doktorskim. Wobec powyższego wnioskuję o dopuszczenie Autorki do publicznej obrony.

