

dr hab. inż. Halina Tarasiuk
Instytut Telekomunikacji, Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Warszawa, 30 styczeń 2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej IITiS PAN

Tytuł rozprawy: *“IoT-based decision making and passenger routing for the emergency evacuation of cruise ship” („Oparty na IoT system podejmowania decyzji i kierowania pasażerami podczas ewakuacji awaryjnej statków wycieczkowych”)*

Autor rozprawy: dr Yuting Ma

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Erol Gelenbe

Kontekst rozprawy.

Praca wpisuje się w będącą obiektem licznych badań problematykę zarządzania sytuacjami awaryjnymi i postępowania w przypadku klęsk żywiołowych (pożary, huragany, powodzie), a także katastrof komunikacyjnych i ataków terrorystycznych – w celu ograniczenie strat ludzkich i ekonomicznych. Chociaż każde z tych zdarzeń jest inne, to wszystkie charakteryzują się kilkoma wspólnymi cechami: przestrzeń fizyczna jest ograniczona, a jej część zostaje zablokowana z powodu pożaru, dymu, zanieczyszczeń itp. Ludzie muszą być szybko ewakuowani, a służby ratownicze muszą szybko dostać się na miejsce zdarzenia. Wśród ewakuowanych znajdują się zarówno osoby sprawne fizycznie, jak i osoby, którym trzeba pomóc – z powodu wieku lub odniesionych obrażeń.

Rozprawa koncentruje się na awariach statków przewożących dużą liczbę pasażerów. Dla określonej jch topografii trzeba opracować metody ewakuacji, tak by zapewnić pasażerom i załodze możliwość dotarcia do bezpiecznych punktów w określonym przez normy czasie. Rozwiązanie problemu wymaga wykorzystania specjalistycznych narzędzi wspomagania decyzji, w tym infrastruktury Internetu Rzeczy (IoT), która może śledzić położenie ewakuowanych i efektywnie kierować ich do wyjść ewakuacyjnych bezpiecznymi drogami, korzystając z zaawansowanych algorytmów trasowania oraz metod obliczeniowych. Wymaga to określenia skuteczności stosowanych metod i predykcji czasu opuszczania statku przez ewakuowanych o różnych możliwościach fizycznych.

Czy tematyka rozprawy jest aktualna i jak jest związana z rozwojem dyscypliny ?

Tak, systemy wspomagające postępowanie w przypadku sytuacji awaryjnych są intensywnie rozwijane. Dotyczy to też złożonego problemu ewakuacji pasażerów statków.

Wyniki pracy dotyczą optymalizacji procedur ewakuacyjnych poprzez modele symulacyjne i analityczne, stosując techniki trasowania dostosowane do każdego ewakuowanego. Pokazują, że

podejścia oparte na IoT mogą znacząco przyspieszyć ewakuację, skrócić opóźnienia i pomóc w zapewnieniu zgodności ze standardami bezpieczeństwa.

Praca w widoczny sposób przyczynia się do doskonalenia systemów ewakuacji z zagrożonych statków.

Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autora i czy został on trafnie sformułowany ?

Głównym celem Autorki jest opracowanie metod planowania ewakuacji awaryjnej z wykorzystaniem sieci nawigacyjnej, dostosowanych do zmiennych warunków ewakuacji, uwzględniając złożoność i różnorodność wnętrza, wykorzystując zintegrowany system obejmujący bezprzewodową sieć WSN (Wireless Sensor Network złożoną z wielu małych, autonomicznych węzłów rozproszonych przestrzennie, które monitorują fizyczne lub środowiskowe warunki – np. temperaturę, dźwięk, ruch – i bezprzewodowo przesyłają dane do stacji bazowej), serwer ewakuacyjny i indywidualne smartfony.

Aby osiągnąć ten cel, przeprowadzono następujące badania:

- Opracowano cztery podejścia do ewakuacji awaryjnej statków, obejmujące (i) scentralizowany algorytm nawigacji awaryjnej dla jednej osoby ewakuowanej, (ii) dwuetapowy hybrydowy algorytm nawigacji dla jednej osoby ewakuowanej, (iii) scentralizowany algorytm planowania ewakuacji wielu osób ewakuowanych wieloma ścieżkami, (iv) rozproszoną i zdecentralizowaną metodą planowania ewakuacji wielu ewakuowanych oparta na uczeniu przez wzmocnianie (RL - reinforcement learning)
- Zaproponowano metodę budowy sieci nawigacyjnej statku opartą na diagramie Voronoï do tworzenia modelu graficznego używanego przez pierwsze trzy algorytmy.
- Oceniono wpływ niedoskonałości systemu IoT i błędów pasażerów na skuteczność ewakuacji statków wycieczkowych przy użyciu zaproponowanego w pracy dwuetapowego hybrydowego podejścia do nawigacji awaryjnej dla pojedynczej ewakuowanej osoby.
- Zaproponowano oparte planowanie unikania zatorów podczas ewakuacji w oparciu o teorię kolejek, która ocenia średnią skuteczność ewakuacji różnych tras.

Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy wykorzystał w tym celu właściwe metody ?

Wyznaczone cele zostały osiągnięte przy wykorzystaniu adekwatnych metod

Na czym polega oryginalny wkład Autora w dyscyplinę ?

Inteligentne statki wyposażone w zaawansowane technologie, takie jak Internet rzeczy (IoT), stały się obecnie normą. Istnieją różne systemy ewakuacyjne oparte na IoT, które zapewniają dynamiczne plany ewakuacyjne, które mogą reagować na zmieniające się warunki na pokładzie i dostosowywać wskazówki na podstawie danych zbieranych w czasie rzeczywistym z infrastruktury IoT. Recenzowana praca skupia się na opracowaniu opartych na IoT systemów ewakuacji awaryjnej w warunkach zmiennego przechylenia i ryzyka wywrócenia. Podnosi ich jakość

na zdecydowanie wyższy poziom, pokazując jak można wykorzystać IoT i sieci czujników w ewakuacjach na dużą skalę. Poszerza obecne zasady planowania ewakuacji, uwzględniając uczenie się przez wzmocnienie i dynamiczne dostosowywanie tras.

Jakie jest znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne wkładu Autora ?

Proponowane algorytmy ewakuacji są oryginalne, lepiej uwzględniają opis dróg ewakuacji, są oparte na zaawansowanych algorytmach i zintegrowane z siecią IoT. W efekcie powstaje system ewakuacyjnej nawigacji bardziej zaawansowany od istniejących. Biorąc pod uwagę liczbę i wielkość statków wycieczkowych, ich wzrastającą złożoność, jak również ich coraz lepsze wyposażenie w sieci IoT, praca jest bardzo aktualna i ma duże znaczenie praktyczne. Ma też znaczenie poznawcze w rozwoju samouczących się algorytmów ewakuacji.

Oryginalne wyniki są dokładnie przedstawione w kolejnych artykułach, umieszczonych w załącznikach pracy.

Artykuł I przedstawia scentralizowany schemat tworzenia trasy w nawigacji awaryjnej w statku przy pomocy sieci WSN. Zaproponowano metodę budowy trójwymiarowej sieci nawigacyjnej, która ma wspierać późniejsze przydzielanie zadań ewakuacyjnych. W szczególności podprzestrzenie wewnątrz statków są podzielone na dwa typy: podprzestrzenie proste i podprzestrzenie złożone. Pierwsze z nich odnoszą się do pomieszczeń sześciennych z hipotetycznymi pojedynczymi drzwiami lub dwójgiem drzwi na przeciwległych ścianach, natomiast drugie obejmują przestrzenie, których rzuty na podłogę tworzą wklęsłe wielokąty, przestrzenie z dwoma drzwiami na tej samej ścianie lub sąsiednich ścianach oraz przestrzenie z więcej niż dwoma drzwiami. w celu wygenerowania sieci nawigacyjnych, w przypadku prostych podprzestrzeni stosowana jest metoda oparta na dualności Poincarégo, natomiast w przypadku złożonych podprzestrzeni stosowana jest metoda oparta na algorytmie konstrukcji diagramu Voronoia. Drzwi, schody i wklęsłe narożniki w podprzestrzeni złożonej są wykorzystywane jako początkowe wierzchołki diagramu, z dodatkowymi węzłami dla dalszego podziału przestrzeni. Początkowe wierzchołki Voronoi i następnie dodane węzły w sąsiednich komórkach są łączone tworząc sieć nawigacyjną dla podprzestrzeni złożonej. Sieci nawigacyjne wszystkich prostych i złożonych podprzestrzeni są połączone w oparciu o ich relacje topologiczne, tworząc kompletną trójwymiarową sieć nawigacyjną wnętrza statku. Parametry, takie jak średni czas przejścia przez każde połączenie przy określonym nachyleniu statku wraz z przestrzenno-czasowym rozkładem zagrożeń przewidzianych na podstawie danych WSN, są wykorzystywane do scharakteryzowania sieci nawigacyjnej.

Na podstawie skonstruowanej sieci przedstawiono model graficzny, a następnie szczegółowe opracowanie problemu nawigacji awaryjnej statku. Opracowany schemat jest oparty na algorytmie aproksymacji w czasie całkowicie wielomianowym i podaje rozwiązanie sub-optymalne. Podano granice błędu rozwiązania i przeprowadzono symulacje dla rzeczywistych danych aby ocenić wyniki schematu jeśli chodzi o średni czas ucieczki, wskaźnika powodzenia nawigacji, średnią długość trasy, minimalną odległości od zagrożeń i czas działania algorytmu.

W Artykule II przedstawiono dwuetapowe adaptacyjne podejmowanie decyzji w

nawigacji awaryjnej. Zaproponowany poprzednio schemat aproksymacyjny może prowadzić do powtarzających się ruchów do przodu i do tyłu ewakuowanych osób; dla ich uniknięcia zaproponowano podejście dwuetapowe. Najpierw, tabele przeglądowe są syntetyzowane w każdym punkcie pośrednim (tj. węzłach schodów i węzłach wyjściowych) bez uwzględnienia przestrzenno-czasowego rozkładu zagrożeń. Ponieważ nawigacja wyłącznie według tych tabel może spowodować, że ewakuowani zostaną uwięzieni przez dynamiczne zagrożenia, aktualizuje się tabele na podstawie dynamiki zagrożeń, przewidywanej na podstawie danych WSN. Oceniono wydajność proponowanego dwuetapowego hybrydowego podejścia dla różnych rozmiarów sieci oceniając średnią długość ścieżek ewakuacyjnej, średni czas ucieczki, wskaźnik powodzenia nawigacji i minimalną odległość od zagrożeń.

Artykuł III jest artykułem przeglądowym.

Artykuł IV dotyczy scentralizowanego wielościeżkowego planowania ewakuacji. Dwie wspomniane metody nawigacji nie uwzględniają czasu oczekiwania spowodowanego kolejkami ewakuowanych z powodu ograniczonej przepustowości korytarzy lub klatek schodowych. Dlatego zaprojektowano metodę planowania wielościeżkowego, która równomiernie rozkłada obciążenie ewakuacyjne między korytarze i klatki schodowe. Najpierw szacuje się czas ewakuacji na podstawie typowych opóźnień na poszczególnych odcinkach. Następnie planowane są poprawki i ustalane dedykowane ścieżki dla ewakuowanych zgodnie z ustaloną kolejnością ewakuacji. Ten schemat testowano symulacyjnie, wykorzystując rzeczywiste dane statku wycieczkowego Costa Concordia, pokazując, że dzięki zastosowaniu proponowanego podejścia można było zapobiec 32 ofiarom śmiertelnym, do których doszło w rzeczywistej katastrofie.

Artykuł V rozwija rozproszoną i zdecentralizowaną metodę opartą na głębokim uczeniu się. Złożoność obliczeniowa metody planowania wielościeżkowego wzrasta wykładniczo wraz ze wzrostem liczby ewakuowanych, co ogranicza stosowalność metody w czasie rzeczywistym. Obliczenia są wykonywane w serwerze centralnym, który może ulec uszkodzeniu. Dlatego opracowano rozproszoną i zdecentralizowaną jej wersję opartą na głębokim uczeniu się, uwzględniając siatkę rozprzestrzeniania się zagrożeń, wąskie gardła przy wyjściach, rozkład czasowo-przestrzenny sprzętu ratunkowego oraz zmiany nachylenia statku. Wykorzystując tabele routingu, tworzy się macierz nagród, rozróżniając węzły w zbiorze wykonalnym od węzłów w zbiorze niewykonalnym. Zbiór wykonalny obejmuje wszystkie węzły następcze, które nie naruszają terminu ewakuacji, nawet w przypadku opóźnień w najgorszym przypadku. Utworzona macierz jest następnie przenoszona do modelu Dueling DQN. Architektura Dueling DQN dzieli sieć neuronową na dwa strumienie: funkcję wartości stanu oraz funkcję przewagi akcji. Dzięki temu model uczy się, które stany są cenne bez analizowania wpływu każdej akcji, co poprawia efektywność próbkowania, przyspiesza zbieżność i jest szczególnie skuteczne w środowiskach z wieloma podobnymi akcjami.

Artykuły VI i VII oceniają wpływ niedoskonałości systemu IoT i błędów pasażerów na opóźnienia ewakuacji statków wycieczkowych

Sieci bezprzewodowe i serwery obliczeniowe wykorzystywane do podejmowania decyzji są

narażone na przeciążenia, zwłaszcza że decyzje i komunikacja muszą być często aktualizowane w odpowiedzi na dynamiczny charakter środowisk ewakuacyjnych. To przeciążenie może prowadzić do opóźnień w przysyłaniu pakietów sieciowych, a decyzje nawigacyjne mogą być zagrożone przez opóźnione instrukcje lub informacje, wykorzystywane w algorytmach nawigacji awaryjnej. Ponadto pasażerowie mogą popełniać błędy i nie przestrzegać instrukcji podawanych przez system z powodu paniki, błędnej interpretacji wskazówek lub ograniczonej widoczności wskaźników kierunkowych. Większość wcześniejszych prac pomijała te czynniki, tutaj szczegółowo analizuje się ich wpływ na czas ewakuacji pasażerów poprzez symulacje w środowisku drugiego, trzeciego i czwartego pokładu rzeczywistego statku wycieczkowego. Oceniono symulacyjny wpływ probabilistycznych opóźnień informacji przekazywanych przez system na czas ewakuacji oraz niezgodnych z zaleceniami systemu decyzji pasażerów.

Artykuł VIII przedstawia kolejkowy model system ewakuacji pozwalający uniknąć zatłoczenia podczas ewakuacji. Model ma postać sieci kolejek o nieograniczonej pojemności, co oznacza, że korytarze i klatki schodowe są zaprojektowane tak, aby były wystarczająco duże, aby nigdy nie były całkowicie wypełnione przez ludzi. Do wyboru następnego połączenia stosowane są cztery różne metody wyznaczania trasy: (i) osoba ewakuowana opuszczająca węzeł wybiera następne połączenie z równym prawdopodobieństwem, (ii) wybierane jest połączenie o najwyższej wydajności, (iii) kolejne połączenie jest wybierane z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do stosunku jego wydajności do całkowitej wydajności wszystkich kolejnych połączeń, (iv) wybierane jest połączenie, które minimalizuje opóźnienie do wyjścia, przy jednoczesnym uwzględnieniu najgorszego przypadku opóźnienia.

Aby złagodzić zatłoczenie w korytarzach, zaproponowano zastosowanie polityki „Pull Policy”, która wykorzystuje komunikaty z punktu wyjścia, aby nakazać ewakuowanym opuszczenie strefy oczekiwania i udanie się w kierunku wyjścia. W strefie oczekiwania wizualny wskaźnik ogranicza lub zachęca do wejścia do korytarzy. Wpływ proponowanej polityki na średni całkowity czas ewakuacji dla czterech zasadach routingu został oszacowany poprzez symulacje w rzeczywistej architekturze wybranego statku.

Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora w zakresie nauk technicznych i szczegółowej wiedzy odpowiadającej zakresowi badań ?

Tak, praca jest bardzo mocno osadzona w realiach technicznych budowy statków pasażerskich, jak również operuje zaawansowanym aparatem matematycznym. Precyzyjnie zdefiniowano problem ewakuacji przy zmiennych w czasie ograniczeniach i zastosowano odpowiednie techniki optymalizacji i uczenia przez wzmacnianie, w którym interakcja ze środowiskiem i automatyczne zbieranie danych s a podstawą uczenia się algorytmu.

Jakie są słabe strony rozprawy ?

Brak wyraźnego określenia wkładu Doktorantki w rezultaty opublikowane w załączonych artykułach. Proszę Doktorantkę o omówienie tej kwestii w czasie obrony.

Być może bardziej szczegółowo należałoby omówić i modelować dynamikę przypadkowych zachowań ewakuowanych osób, lecz jest to raczej uwaga dla przyszłych prac.

Ocena układu pracy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych.

Praca liczy ok. 160 stron i składa się z ok. 30-stronicowego wstępu omawiającego rezultaty pracy i ośmiu załączników - artykułów zawierających poszczególne elementy pracy. Doktorantka jest współautorką tych artykułów. Sześć z tych artykułów zostało opublikowanych w bardzo dobrych czasopiśmie z impact factorem; są to: *IEEE Sensors Journal*, IF = 4.5, *IEEE Access*, IF = 3.6, *Ocean Engineering*, (dwukrotnie) IF = 5.5, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IF = 8.4, *Sensors*, IF = 3.5, czyli łączny IF = 31. Jest to dla przewodów doktorskich ponadprzeciętny wynik bibliometryczny. Wyczerpująca bibliografia obejmuje ok. 140 pozycji.

Podsumowanie. Uważam, że rozprawa doktorska Pani Yuting Ma spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę o stopniu i tytułach naukowych. Autorka umiejętnie stawia i rozwiązuje w oryginalny sposób aktualny problem o dużym znaczeniu praktycznym, wykazując się rozległą wiedzą i stosując odpowiednie narzędzia matematyczne i informatyczne. Wyniki opublikowano w uznanych czasopiśmie o światowym zasięgu. Uważam, że proponowana rozprawa spełnia wymagania obowiązujących przepisów w zakresie prac doktorskich. Wnioskuje o przyjęcie tej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.