

Wrocław, dnia 31 lipca 2025 roku

Dr hab. inż. Radosław Rudek, prof. AWL
Akademia Wojsk Lądowych
imienia generała Tadeusza Kościuszki
ul. Czajkowskiego 109
51-147 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Rafała Więckowskiego

pt. „Ocena przejezdności trasy w systemach autonomicznej jazdy lądowych platform mobilnych pracujących w terenach przygodnych”

Promotor: dr hab. inż. Barbara Siemiątkowska, prof. uczelni

1. Wprowadzenie

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Barbary Siemiątkowskiej, prof. uczelni i złożona w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Dysertacja opracowana została w formie monografii wydanej przez Politechnikę Warszawską.

2. Problem badawczy i jego znaczenie

W rozprawie doktorskiej Autor postawił ambitną do wykazania praktycznego tezę badawczą, iż „uwzględnienie informacji semantycznej o elementach otoczenia w modelu przejezdności terenu, pozyskanych za pomocą kamery hiperspektralnej, oraz ich integracja z danymi geometrycznymi umożliwiając poprawę jakości planowania trasy i zwiększenie zdolności operacyjnych autonomicznych i zdalnie sterowanych bezzałogowych platform lądowych (BPL) w środowiskach nieustrukturyzowanych”.

Wykazanie niniejszej tezy wymagało rozwiązania problemu badawczego polegającego na opracowaniu metody analizy przejezdności terenu dla bezzałogowych platform lądowych (BPL) w terenie nieustrukturyzowanym oraz zweryfikowanie w praktyce jej efektywności. W tym celu konieczne było skonstruowanie reprezentacji otoczenia umożliwiającej wyznaczenie bezpiecznej i realizowalnej w praktyce trasy przejazdu w złożonych warunkach terenowych. Ze względu na poziom skomplikowania zagadnienia wymagane było przeprowadzenie kompleksowych prac, do których należy zaliczyć zbudowanie modelu otoczenia, polegające na synchronizowanej integracji i agregacji danych pozyskiwanych z różnych sensorów (m.in. lidar, kamery RGB, termowizyjne, hiperspektralne). Niezbędne

również było dokonanie analizy przejezdności potencjalnych tras oraz odniesienie rozwiązań do analizy panujących warunków rzeczywistych. W tym kontekście kapitalne znaczenie ma nie tylko trafne rozpoznanie i omijanie przeszkód (przejezdna wysoka trawa, lecz nieprzejezdne niższe przeszkody takie jak rowy, gruzowiska, złom, etc.), ale także właściwości materiałowe nawierzchni (asfalt, droga gruntowa, błoto, śnieg, etc.). W związku z tym, istnieje praktyczna potrzeba określenia jej typu, gdyż może on implikować nieprzejezdność terenu (np. błotniste wzniesienia). W tym celu zaproponowano rozszerzenie modelu o dane pochodzące z kamery hiperspektralnej, które powinny przełożyć się na poprawę jakości planowania tras i zwiększenie zdolności operacyjnych BPL. Niezwykle istotne jest to, że wszystkie uzyskane wyniki teoretyczne, ze względu na charakter zagadnienia, powinny być (a w rezultacie zostały) zweryfikowane przez Doktoranta w warunkach rzeczywistych, w tym poprzez przeprowadzenie testów terenowych przy użyciu bezzałogowych platform lądowych (PIAP ATENA, PIAP HUNTeR oraz PIAP PATROL/DEZROB).

Warto zwrócić uwagę na bardzo trafny dobór tematyki badawczej. Stanowi ona bowiem istotny i intensywnie rozwijany kierunek prac dotyczący wykorzystania bezzałogowych platform lądowych wynikający z rosnącego zapotrzebowania, przede wszystkim wojskowego, na opracowanie technologii pozwalających zastąpić człowieka lub ograniczyć jego obecność do sterowania zdalnego podczas wykonywania niebezpiecznych zadań (w tym bojowych) przy narażeniu na bezpośredni kontakt z realnym zagrożeniem (np. przeciwnikiem). W obliczu aktualnych wyzwań i sytuacji na współczesnym teatrze działań wojennych przedstawione badania znajdują szerokie zastosowanie praktyczne w nie tylko w systemach cywilnych, ale przede wszystkim w obszarach wojskowości. Temat rozprawy jest zatem bardzo aktualny i ważny, zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska złożona została w formie monografii (wydawnictwo książkowe sygnowane przez Politechnikę Warszawską, Warszawa 2025) zawierającej 201 stron, na którą składa się streszczenie, siedem rozdziałów, spis tabel i rysunków oraz bibliografia obejmująca 119 pozycji, w tym 5 publikacji współautorskich Doktoranta.

Rozdział 1 stanowi klarowne wprowadzenie do tematyki platform bezzałogowych, ich rozwoju oraz zastosowania, a także charakteryzuje kontekstu badawczy pracy.

Rozdział 2 zawiera sformułowanie celu rozprawy doktorskiej, definicję podejmowanego problemu naukowego wraz z hipotezą oraz opisuje zastosowaną metodykę badawczą ze szczególnym uwzględnieniem aspektu zastosowania kamer hiperspektralnych.

Rozdział 3 przedstawia rozbudowany przegląd stanu wiedzy i techniki w obszarze autonomii robotów mobilnych, jak również omawia technologie stosowane do budowania modelu otoczenia uwzględniając m.in. lidary i kamery (w tym hiperspektralne); przybliża również badania dotyczące określenia lokalizacji, mapowania, oceny przejezdności i sterowania lądowymi platformami mobilnymi.

Rozdział 4 stanowi kluczową częścią rozprawy i przedstawia opisy prac własnych Doktoranta, które obejmują Jego badania zrealizowane w ramach projektów

w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP Sieci Badawczej Łukasiewicz (ATENA, HUNTeR, DEZROB), ogólny schemat proponowanego systemu oraz metodę oceny przejezdności terenu, a także analizę materiałów podłoża przy zastosowaniu kamer hiperspektralnych wraz z integracją pozyskanych danych z modelami geometrycznymi.

Rozdział 5 opisuje badania eksperymentalne, ze szczególnym uwzględnieniem testów terenowych platform autonomicznych z wykorzystaniem kamer hiperspektralnych, gdzie zaprezentowano szczegółowe wyniki eksperymentów wraz z oceną skuteczności zaproponowanego systemu.

Rozdział 6 prezentuje rezultaty wdrożenia zaproponowanych rozwiązań oraz omówienie implementacji metod oceny przejezdności w ramach konkretnych projektów.

Rozdział 7 stanowi zwięzłe podsumowanie powyższych wyników i zawarto w nim najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań, ich perspektywy rozwoju, a całość pracy zamyka bibliografia oraz spis tabel i rysunków.

Doktorant wykazał się umiejętnością opisywania poruszanych zagadnień oraz uzyskanych wyników w sposób zrozumiały i klarowny. Strona redakcyjna pracy została przygotowana ze starannością, chociaż Autor nie uniknął sporadycznych błędów, które zostały wymienione w dalszej części. Na podkreślenie zasługuje szczegółowa analiza materiałów źródłowych, gdzie Doktorant udowodnił, iż posiada doskonałą orientację w aktualnym stanie badań przedstawionych w literaturze światowej, jak też i znajomość stosowanych rozwiązań praktycznych. Wyniki prac badawczych zostały opracowane zgodnie z przyjętą metodyką, której założenia zostały precyzyjnie przedstawione w recenzowanej rozprawie doktorskiej. W moim przekonaniu w ramach przedstawionej dysertacji Doktorant w pełni zrealizował założony cel naukowy potwierdzając ambitną tezę badawczą. W szczególności wprowadził szereg nowatorskich rozwiązań, które choć mają z reguły naturę heurystyczną, to oparte zostały na solidnych podstawach teoretycznych, angażując również sprawdzone metody znane z literatury i praktyki, a skuteczność zaproponowanego całościowego systemu zweryfikował nie tylko w sferze symulacji, lecz przede wszystkim w rzeczywistych warunkach terenowych przy wykorzystaniu konkretnych bezzałogowych platform lądowych (ATENA, HUNTeR, DEZROB).

Do **najważniejszych rezultatów** uzyskanych przez Doktoranta zaliczam:

- Wprowadzenie nowej metody integracji danych geometrycznych z danymi materiałowymi poszerzającymi możliwości oceny przejezdności terenu (na bazie mapy 2,5D opracowanej na podstawie danych pochodzących z lidarów oraz mapy materiałowej pozyskanej przy użyciu analizy hiperspektralnej). Skorelowanie parametrów geometrycznych (m.in. nachylenie, chropowatość, różnice wysokości) oraz własności materiałowych (m.in. wilgotność gleby, obecność trawy lub piasku) pozwala na efektywniejsze planowanie tras przejazdu oraz skuteczniejszą ocenę potencjalnych możliwości przejazdu w trudnym terenie.
- Znaczące rozszerzenie możliwości modelowania przejezdności w porównaniu z klasycznymi podejściami (bazującymi wyłącznie na danych geometrycznych)

poprzez opracowanie praktycznego wykorzystania sygnatur spektralnych umożliwiających segmentację semantyczną oraz klasyfikację materiałów terenu.

- Opracowanie praktycznej metody planowania tras rozszerzającej standardowe podejścia o dynamiczną ocenę parametrów przejezdności takich jak maksymalna prędkość, czy też określanie trasy w oparciu o dynamikę pojazdu w zależności od rodzaju podłoża, a tym samym pozwalające na zbliżone do rzeczywistości odwzorowanie zachowań operatora BPL dostosowującego styl jazdy do aktualnych warunków terenowych.

Należy podkreślić, że wyniki przedstawione przez Doktoranta mają kapitalne znaczenie zarówno z perspektywy rozwoju dyscypliny, jak też i praktycznego zastosowania w bezzałogowych platformach lądowych. Skorelowana integracja danych geometrycznych i materiałowych otwiera nowe, praktyczne możliwości modelowania terenu przekładając się na zwiększenie bezpieczeństwa i efektywnego poruszania się pojazdów bezzałogowych w terenach przygodnych.

Recenzowana rozprawa świadczy o wszechstronnej wiedzy teoretycznej oraz praktycznej Doktoranta w dyscyplinie, a także potwierdza Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz wdrażania teorii w praktyce. Jednakże Autor nie ustrzegł się przed błędami redaktorskimi, a ponadto w trakcie lektury rozprawy doktorskiej nasunęły mi się również **pytania, wątpliwości i uwagi**, które zamieszczam poniżej:

- Występują sporadyczne błędy redakcyjne, interpunkcyjne, literówki, np.:
 - „Praca kończy się bibliografią, spisem symboli, tabel oraz rysunków”, str. 16, linia -4, jednakże w pracy nie występuje spis symboli;
 - brak spacji „ATENA[11] BEZROB[12]”, str. 15, linia 8;
 - brak konsekwencji w stosowaniu skrótów odnoszących się do „bezzałogowa platforma lądowa”, gdyż zamiast BPL występuje w tym kontekście również znaczeniowo bliskoznaczny skrót UGV, lecz pochodzące z języka angielskiego (*Unmanned Ground Vehicle*), np. UGV (str. 47), zaś BPL (str. 53); ponadto UGV występuje także jako skrót rozwinięcia „zrobotyzowanej platformy mobilnej (UGV)”, str. 65, linia -1;
 - błędy formatowania i zapisu równania (1), str. 58;
 - nieprawidłowa interpunkcja: „. [108]”, str. 70, linia 5, „. [109]”, str. 70, linia 9;
 - ten sam symbol opisuje różne parametry np. „*n*” ma inne znaczenie w wyrażeniu (2), str. 59, zaś inne w wyrażeniu (6), str. 82;
 - brak właściwego formatowania równania (7), str. 83;
 - „*optymalniejsze*”, str. 100, linia 8, jest to błędne określenie (albo jest optymalne, albo nie jest), zatem w tym przypadku powinno być „*zoptymalizowane*”;
 - „*podejścia opartego o tabeli*”, str. 103, linia 3, powinno być „*podejścia opartego o tabelę*”;
 - w poz. [68] nie podano autora;
 - stosowane są mieszane style zapisu bibliografii;

- brak konsekwencji w stylach cytowania, np. w niektórych przypadkach odnoszenie się do prac naukowych powiązane jest z podaniem imienia, nazwiska oraz stopnia naukowego jednego ze współautorów, w innych tylko imienia i nazwiska (choć stopnie naukowe posiadają), występują też takie, gdzie podany jest inicjał imienia i nazwisko albo samo nazwisko;
- wielokrotne powtarzanie rozwinięcia skrótu już wyjaśnionego np. SLAM;
- symbole reprezentujące wartości skalarne w wyrażeniach matematycznych powinny być zapisane kursywą;
- liczne samotne spójniki na końcu linii.
- W pracy podano finalne wartości parametrów modeli i metod, jednakże z perspektywy czytelnika i możliwości porównawczych zasadne byłoby, aby wskazać na jakiej podstawie zostały one wybrane, jakie uzyskano wyniki dla innych wartości tychże parametrów np.:
 - W Tabeli 3, str. 85, zawarto finalne wartości parametrów np. „*Liczność krytyczna komórek = 8*”, „*Wielkość komórki = 50cm*”, jednakże brakuje konkretnego uzasadnienia ich doboru, zaś z badawczego punktu widzenia ciekawe byłoby pokazanie jakie wyniki (jakość rozwiązania, czas obliczeń) uzyskanoby przy innych wartościach.
 - „*(...) sprawdzane jest najbliższe sąsiedztwo, na przykład w postaci okna 3x3*”, str. 94, linia -8, nasuwa się pytanie na jakiej podstawie wybrano taką konfigurację, czy były sprawdzane inne (np. 5x5), jakie dały wyniki, etc.
 - „*Jeśli np. test chi-kwadrat przypisał pikselowi klasę «asfat», ale większość jego sąsiadów należy do klasy «trawa», oznacza, że prawdopodobnie został on błędnie sklasyfikowany (...)*”, str. 95, linia 1, ciekawe byłoby pokazanie jaką skuteczność trafnej identyfikacji ma metoda, jaka jest wartość miary takich błędnych klasyfikacji.
- W mojej ocenie część kluczowych opisów merytorycznych mogłaby być rozszerzona, aby dokładniej zobrazować opracowane techniki i metody, np. dodanie pseudokodu zastosowanego algorytmu adresowania komórek mapy heksagonalnej, który jest przedstawiony we współautorskiej pracy Doktoranta [16].
- Z perspektywy zmniejszania złożoności obliczeniowej wyznaczania tras wydaje się, że perspektywicznym podejściem jest wektoryzacja modelu na potrzeby efektywnego czasowo wyznaczenia trasy przy zastosowaniu metody „*convex hull*”. Natomiast w pracy brakuje mi odniesienia się do tej metody, chociażby w części dotyczącej przeglądu stanu wiedzy.

Powyższe uwagi dotyczą w znacznej mierze kwestii redakcyjnych, zaś pozostałe zostały sformułowane z perspektywy ich rozważenia w przyszłych pracach i nie wpływają na jednoznacznie wysoką ocenę merytoryczną pracy.

4. Konkluzja

Podsumowując przedstawioną opinię stwierdzam, iż rozprawa Pana mgr inż. Rafała Więckowskiego spełnia z wyraźną nawiązką warunki stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym **wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.**

Mając na uwadze aktualność i trudność podjętej problematyki, oryginalność oraz wysoki poziom naukowy rezultatów uzyskanych przez Doktoranta, a także ich wymiar praktyczny, jak również pełnienie roli kierownika w znaczących projektach badawczo-rozwojowymi powiązanych z tematyką dysertacji **rekomenduję jej wyróżnienie.**

