

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Mgr. inż. Łukasza Rykały pod tytułem

### **„Kształtowanie systemu lokalizacji przewodnika w aspekcie wyznaczania trasy przejazdu platformy bezzałogowej”**

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Rykały było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego, prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego z dnia 24.01.2022 roku.

#### **1. Ocena aktualności wybranego tematu**

Zastępowanie zadań realizowanych przez człowieka poprzez systemy autonomiczne jest zjawiskiem nieuniknionym i pożądanym z ekonomicznego punktu widzenia. Główne czynniki (oprócz ekonomicznych) determinujące rozwój pojazdów autonomicznych to, możliwość pracy w obszarach niebezpiecznych, skażonych. Dlatego naturalnym obszarem wykorzystania pojazdów typu BPL są zastosowania militarne. W Polsce dostrzeżono potrzebę rozwijania technologii tego typu oraz wprowadzania ich do służby w Siłach Zbrojnych RP. Przejawem tego może być decyzja Inspektoratu Uzbrojenia MON o zakupie do 2020 roku 50 mobilnych bezzałogowych pojazdów rozpoznawczych. Warto dodać, że kilkakrotnie NCBiR wspierało badania nad produkcją systemów bezzałogowych w ramach Programu Sektorowego INNOSBZ.

Szczególnym przypadkiem bezzałogowych platform lądowych są pojazdy podążające za przewodnikiem, gdzie dzięki możliwości utrzymania dystansu między człowiekiem, a platformą mamy szereg dotychczas niespotykanych możliwości aplikacyjnych np. w zadaniach transportowych. Podążanie za przewodnikiem człowiekiem, czy też np. wytresowanym psem pozwala na korzystanie z systemów sensorycznych człowieka czy zwierzęcia, co przy obecnym stanie techniki, zwłaszcza w obszarze analizy obrazu czy dźwięku jest nie do osiągnięcia przez systemy automatyki. Przewodnikiem może też być jednostka mechaniczna będąca liderem co przy wykorzystaniu możliwości śledzenia pozwala na budowanie formacji autonomicznych pojazdów.

Obecnie szeroko prowadzone są prace badawczo-rozwojowe nad doskonaleniem systemów lokalnej lokalizacji autonomicznych obiektów, skorelowane z ograniczeniami wynikającymi z bardzo różnych aplikacji.

Konkludując Doktorant podjął temat konfiguracji geometrycznej elementów systemu lokalizacji przewodnika w aspekcie wyznaczania trasy przejazdu platformy bezzałogowej, który w mojej ocenie jest aktualny.

## 2. Przegląd treści pracy

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Rykały zawiera 158 stron podzielonych na dziesięć rozdziałów. Zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń oraz spis literatury obejmujący 120 pozycji literaturowych, w tym liczne adresy dokumentów zawartych na stronach internetowych wykorzystywanych podczas przygotowania rozprawy. W wykazie literatury zawarto 6 prac Autora dysertacji. Praca zawiera 107 rysunków oraz 12 tabel.

Pracę rozpoczyna wprowadzenie w tematykę bezzałogowych platform lądowych ze szczególnym uwzględnieniem systemów umożliwiających prowadzenie mobilnych obiektów za przewodnikiem. Bardzo obszerny rozdział drugi dotyczy analizy stanu zagadnienia. Autor przytacza komercyjne rozwiązania dotyczące sterowania bezzałogowymi platformami lądowymi następnie opisuje dostępne w literaturze technologie obserwacji przewodnika, kładąc szczególny nacisk na funkcjonalności platform, których poruszanie zdeterminowane jest znacznikami umieszczonymi na obiekcie definiowanym jako przewodnik. Całość podsumowuje wnioskami, których głównym przesłaniem jest zdefiniowanie celu i zakresu pracy zawartym w rozdziale trzecim.

Przyjęty plan badawczy zdefiniowany w rozdziale trzecim jest konsekwentnie realizowany w kolejnych rozdziałach i podrozdziałach. Doktorant rozpoczyna prace od badań modułów UWB (badania identyfikacyjne podsystemu lokalizacji przewodnika), ukierunkowanych na procentowe określenie wartości utraconych pakietów w komunikacji. Poszukuje rozwiązań rozmieszczenia kotwic i etykiety, pozwalających przy ich wzajemnej widoczności na utratę mniej niż 95% sekwencji pomiarowych. Uzyskane wyniki determinują przyjęcie w dalszej części rozmieszczenia elementów układu UWB.

Kolejny etap badań zaprezentowany w rozdziale 5 obejmuje wstępne analizy podsystemu lokalizacji przewodnika, których celem jest określenie całkowitych błędów lokalizacji przewodnika w warunkach stacjonarnych (nieruchomy BPL - nieruchomy przewodnik) przy pomocy metod geometrycznych. Autor zakłada, że takie podejście jest niezbędne do budowy modelu symulacyjnego pracy modułów UWB, które pozwolą na zbudowanie modelu symulacyjnego pracy czujników UWB, co w dalszej perspektywie pozwoli na przyjęcie metodologii przeprowadzenia eksperymentu. Na potrzeby jakościowej oceny wyników Autor przyjął autorski wskaźnik w postaci zdefiniowanego całkowitego błędu lokalizacji. Przyjęta strategia symulacji zrealizowana w oprogramowaniu Matlab w 80 punktach pomiarowych, pozwoliła na wyciągnięcie wniosków zawartych w podrozdziale 5.3.2, w których zawarto liczbowe wartości średniego całkowitego błędu określenia położenia przewodnika w funkcji odległości (5m, 10m 20m). Poprawność uzyskanych rozwiązań potwierdzono rzeczywistym eksperymentem.

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazano, iż w celu określenia całkowitych błędów lokalizacji niezbędne jest wyznaczenie rzeczywistego, referencyjnego położenia przewodnika. W rezultacie przeprowadzonych badań stwierdzono, że minimalna liczba kotwic niezbędna do lokalizacji przewodnika za pomocą metod geometrycznych wynosi dwie. Autor jednak zamiast zastosowania dwóch modułów UWB, zaproponował użycie czterech z nich. Takie podejście pozwoliło zmniejszyć błędy całkowite lokalizacji i wyeliminować część błędnych pomiarów. W rezultacie badań wykazano, iż całkowite błędy lokalizacji zwiększają się również wraz ze wzrostem odległości pomiędzy przewodnikiem, a BPL w związku z ograniczoną dokładnością pomiarów modułów UWB, co wydaje się być wnioskiem oczywistym.

Rozdział 6 dotyczy określenia docelowej konfiguracji rozmieszczenia kotwic charakteryzującej się minimalną liczbą utraconych pakietów danych podczas pracy. W rozdziale 4 zaproponowano

wykorzystanie 4 systemów lokalizacji co zdeterminowało poszukiwanie ich suboptymalnego rozlokowania.

Do przeprowadzenia badań opracowano i zbudowano na terenie WAT stanowisko obejmujące obszar 20 m x 20 m. Na tym terenie ustawiono BPL i rozmieszczono przed nim siatkę o węzłach w odległości co 1 m. Przyjęto, że cztery kotwice związane z BPL zostały rozmieszczone w 13 konfiguracjach oraz rozmieszczono etykiety względem BPL w otwartym terenie w dwunastu punktach pomiarowych.

Wprowadzano wskaźnik pomiarowy w postaci procentowej liczby utraconych pakietów.

W celu ustalenia wpływu rozmieszczenia modułów UWB na wartości liczby utraconych pakietów danych, Autor wykorzystał metody globalnej analizy wrażliwości realizowaną w oparciu o sieci neuronowe. Zaproponowane do analizy sieci neuronowe w różnych konfiguracjach liczyły od 25 do 50 neuronów, a jako funkcje aktywacji wybrano funkcje: liniową, logistyczną, wykładniczą i tangens hiperboliczny.

Autor na podstawie prac badawczych sformułował wnioski, że zarówno wysokość kotwic jak i wysokość etykiet ma znacznie większy wpływ na jakość uzyskiwanych wyników niż zmiany położenia w płaszczyźnie xy przyjętego w pracy układu odniesienia.

Prowadzone prace pozwoliły odrzucić trzy konfiguracje dla których błąd przekraczał 5% utraconych pakietów oraz na wskazanie na podstawie przyjętego wskaźnika konfigurację K11 jako najlepszą w analizowanej klasie konfiguracji.

W rozdziale 7 dla wybranej konfiguracji K11 przeprowadzono badania symulacyjne wybranych przez Autora trzech algorytmów lokalizacji: metodę geometryczną (GEO), trilaterację (TRI) oraz metodę optymalizacji (NLP). W wyniku badań symulacyjnych algorytm NLP został wskazany jako najdokładniejszy algorytm lokalizacyjny. Ponadto stwierdzono że wprowadzone zakłócenie pomiarów odległości z kotwic ma zauważalny wpływ na dokładność lokalizacji dla wszystkich rozpatrywanych algorytmów przyczyną sygnał zakłócający ma jednak największy wpływ na dokładność lokalizacji algorytmu GEO. Badania symulacyjne nie uwzględniały występujących w warunkach rzeczywistych, zaników sygnałów. Prace nad zweryfikowaniem uzyskanych rozwiązań przeprowadzono w rozdziale 8, przy czym przeanalizowano wszystkie dotychczas analizowane badane metody. W celu wyeliminowania niekorzystnych zjawisk wynikających z zaników sygnału występujących w warunkach rzeczywistych zastosowano filtrację medianową oraz filtrację filtrem uśredniającym.

Kolejny etap realizacji pracy obejmował działania związane z określeniem trasy przewodnika na podstawie wyznaczonych lokalizacji (rozdział 9). Zagadnienie to wymagało rozwiązania problemu dopasowania funkcji ciągłej do dyskretnego zbioru danych (lokalizacji przewodnika). W pracy przeanalizowano krzywą wielomianową, dla której sformułowano wymagania: niska złożoność obliczeniowa, funkcja klasy C2, możliwość estymacji brakujących przebiegów, możliwość wpływu na sposób kształtowania funkcji wygładzającej.

Pracę kończą wnioski i zdefiniowane kierunki dalszych badań oraz wykaz materiału źródłowego stanowiącego 120 pozycji literaturowych i źródeł w postaci stron internetowych.

Przeprowadzone w ramach pracy badania pozwoliły na dobór konfiguracji i opracowanie algorytmów wyznaczania położenia przewodnika dla bezałogowej platformy lądowej, co było celem naukowym pracy.

Realizacja zdefiniowanego celu pracy poszerzyła dotychczasową wiedzę w obszarze możliwości aplikacji systemów UWB w rozwiązaniach dotyczących śledzenia przewodnika, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia rozwiązań dotyczących wspomagania liderów, dowódców w zadaniach pożarowych, militarnych i innych.

### 3. Wyniki pracy i ich ocena

Oceniana praca stoi na wysokim poziomie pod względem merytorycznym. Autor precyzyjnie określił cel, który chce osiągnąć i w pełni go zrealizował stosując konsekwentnie właściwe narzędzia i metody badawcze. Wykazał się przy tym dobrym rozeznaniem w rozpatrywanej problematyce naukowej. Na podkreślenie zasługuje sprawność w organizacji warsztatu badawczego i umiejętność wyciągania właściwych wniosków z przeprowadzanych analiz, pozostaje tu pewien niedosyt jeśli chodzi o formę ich prezentacji. Sposób przedstawiania rozważań jest zrozumiały i przekonujący. Poszczególne etapy pracy świadczą o dobrym przygotowaniu badawczym Autora oraz o jego umiejętności prowadzenia prac badawczych. Warto tu zwrócić uwagę na wielorakość stosowanych narzędzi i metod badawczych, których właściwe używanie wymaga solidnej podbudowy teoretycznej i doświadczenia.

Strona edytorska rozprawy jak i styl pracy jest na dobrym poziomie, chociaż nie jest ona wolna od drobnych błędów i pomyłek, niemniej nie wpływają one znacząco na lekturę pracy.

Obecnie obserwujemy duży rozwój różnego typu pojazdów autonomicznych. Bezzałogowe platformy lądowe stanowią złożone urządzenia techniczne stosowane do działań w trudnych lub niebezpiecznych warunkach środowiskowych. Wykorzystanie ich pełnego potencjału wymaga rozwoju wielu technologii, w szczególności nawigacji i sterowania, co bezpośrednio przekłada się na ich poziom autonomii. Najbardziej zaawansowane mogą poruszać się w pełni autonomicznie, co jest realizowane poprzez zastosowanie specjalizowanych czujników oraz algorytmów.

Praca dotyczy opracowania systemu lokalizacji przewodnika, który pozwoli na wyznaczenie trasy przejazdu dla platformy bezzałogowej. Realizacja tak postawionego celu wymagała przeprowadzenia szeregu czynności, w mojej ocenie najistotniejsze z nich stanowiące wartość dodaną to:

- wyposażenie bezzałogowej platformy lądowej w moduły pomiarowe UWB w celu lokalizacji przewodnika,
- wykonanie eksperymentalnych badań rozmieszczenia modułów UWB na bezzałogowej platformie lądowej w celu określenia docelowej konfiguracji układów pomiarowych,
- opracowanie algorytmów wyznaczania położenia przewodnika z zastosowaniem technologii UWB,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych podsystemu lokalizacji przewodnika wykorzystującego opracowane algorytmy lokalizacji,
- wykonanie eksperymentalnej weryfikacji podsystemu lokalizacji przewodnika z wykorzystaniem opracowanych algorytmów lokalizacji,
- opracowanie sposobu wyznaczania trasy przewodnika z zastosowaniem technologii UWB,

Zrealizowane w ramach pracy badania pozwoliły na wysunięcie następujących wniosków :

- występuje utrata części danych w sytuacji braku bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami kotwic i etykiety,
- błędy lokalizacji zwiększają się wraz ze wzrostem odległości pomiędzy przewodnikiem, a BPL,
- położenie przednich i tylnych kotwic względem podłoża ma największy wpływ na utratę pakietów w bezprzewodowej komunikacji UWB,
- największą dokładność lokalizacji przewodnika zapewnia algorytm NLP,
- występowanie zaników lokalizacji przewodnika zwiększa błędy całkowite wyznaczania trasy przewodnika za pomocą krzywej wielomianowej.

Przeprowadzone w ramach pracy badania pozwoliły na dobór konfiguracji i opracowanie algorytmów wyznaczania położenia przewodnika dla bezzałogowej platformy lądowej, co było celem naukowym pracy.

## Uwagi ogólne

Autor dysertacji jest niewątpliwie pasjonatem o bardzo dużym doświadczeniu. Swobodnie stosuje narzędzie do symulacji jak Matlab/Simulink. Wykorzystuje w badaniach autorskie rozwiązanie rozmieszczenia systemu UWB. Przeprowadza właściwie szereg testów i analiz. Niestety istnieją też elementy pracy, które budzą wątpliwości lub wymagają wyjaśnienia.

W mojej ocenie lektura pracy nasuwa szereg wniosków dyskusyjnych czy problematycznych:

- w pracy Autor mówi o głębi obrazu np. str.14 używając tego terminu w mojej ocenie niepoprawnie. Autor przez głębie obrazu rozumie odległość obiektu do systemu akwizycji danych np. kamery czy zespołu kamer. Powinno się mówić głębia ostrości obrazu ten parametr związany jest z odległością. Sama głębia obrazu często definiowana jest jako reprezentacja dostępnej w notacji binarnej palety barw czy odcieni szarości.
- w pracy wprowadzono szereg wskaźników np. błąd całkowity lokalizacji, który jest w mojej ocenie autorską odmianą błędu średniokwadratowego, czy błąd procent prawidłowych pomiarów, który jest proporcjonalny do błędu względnego. Takie podejście nie jest niewłaściwe, ale można było zastosować sformalizowane zdefiniowane znane dla ogółu odbiorców wskaźniki.
- Autor jako wyjście z opracowywanego systemu podaje funkcję dla której definiuje wymogi np. ciągłość na poziomie klasy C2. Kilukrotnie podnosi konieczność minimalizacji kosztu obliczeniowego, z drugiej strony wymogi systemu podążania za przewodnikiem są na poziomie dziesiątek centymetrów. Te dwie rzeczy pozostają w mocnej sprzeczności. Algorytmy, które wymagają funkcji klasy C2 jak algorytmy sterowania nadążnego: adaptacyjne, odporne, rozmyte, neuronowe pozwalają na minimalizację błędów realizacji trajektorii na poziomie części milimetra. Tu taka sytuacja nie występuje. W analizowanym przypadku właściwym byłoby wykorzystanie algorytmów śledzenia lidera czy wirtualnej struktury, które od lat dedykowane są do podążania za przewodnikiem i są matematycznie bardzo łatwe w implementacji. Ich wynikiem jest trajektoria w postaci funkcji dwukrotnie różniczkowalnej (klasy C2).
- implementacja sieci neuronowych wydaje się być „trochę na siłę”. Zastosowano gotowy pakiet, bez zdefiniowania wektora wejściowego, rysunku, zdefiniowania wektora wyjściowego, a przede wszystkim parametrów funkcji aktywacji, jest pracą w pewnym sensie po omacku. Cały ciężar tej metody leży w parametrach funkcji aktywacji. Autor wykorzystuje tu funkcję: liniową, logistyczną, wykładniczą i tangens hiperboliczny. Brak jest jakichkolwiek danych o parametrach tych funkcji. Uzyskane wyniki są w mojej ocenie mało wartościowe z naukowego punktu widzenia.

## Uwagi szczegółowe

Występujące w pracy błędy edytorskie, stylistyczne czy językowe nie wpływają znacząco na jakość przekazywanych informacji. Poniżej wymienię błędy, na które należy zwrócić szczególną uwagę w przyszłości.

- W pracy podrozdziały noszą taką samą nazwę: 5 razy występuje opracowanie metodyki badawczej i identycznie jeśli chodzi o wyniki badań. Podrozdziały powinny identyfikować obszar podejmowanej tematyki.
- str. 78<sup>1</sup> – powołanie na tabelę nr 6.8, która nie występuje w dysertacji
- str. 67- „kolejną grupą platform stanowią”, błąd stylistyczny
- str. 64 – „sterujący do układów wykonawczych”, błąd stylistyczny
- str. 7 – użyto skrótu UWB wcześniej nie zdefiniowanego,
- str. 17 – w tabeli zwrot „Układy laserowe laserowy
- str. 32<sup>24</sup> – „modeli matematycznych wybranych algorytmów” niepoprawne sformułowanie.
- str 32 - dwa ostatnie akapity są w trybie przypuszczającym
- str. 52 – tabela wisząca
- str. 76<sup>15</sup> – „W tym celu należy w pierwszej kolejności należy”, błąd stylistyczny
- str. 127<sub>17</sub> – „Aproksymacja jak zaznaczono wcześniej jest problemem...” – sens
- str. 72 – jest powołanie na nie istniejącą tabelę 6.8.

## 4 Wnioski końcowe

Recenzowana praca zawiera algorytmy, wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki badań doświadczalnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem opracowanego stanowiska do eksperymentalnego badania algorytmu wyznaczania położenia przewodnika bezzałogowej platformy lądowej wyposażonej w układy pomiarowe UWB.

Autor wykazał w przedłożonej rozprawie odpowiednią znajomość podjętego problemu naukowego, umiejętność jego rozpatrywania, opanowanie nowoczesnych metod komputerowych, sprawność w zaplanowaniu i przeprowadzeniu eksperymentu.

Pomimo przytoczonych uwag krytycznych, które w większości dotyczą kwestii edytorskich, przedstawiona praca stanowi Autorskie rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Należy podkreślić, że przyjęta metodyka prac jest zgodna z obowiązującymi zasadami realizacji prac naukowych i wskazuje na odpowiedni dobór narzędzi badawczych.

Uważam, że opiniowana praca Pana mgr. inż. Łukasza Rykały spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 roku, poz.1669), Ustawy z 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2016 roku poz. 882 ze zmianą: Dz. U. z 2016 roku poz. 1311) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2016 roku poz. 1586) i może być dopuszczona do dalszego procedowania.

