

ZDITTPi. 24. 11. 2022
M. Skórný

Częstochowa, dn. 3 października 2022 r.

Prof. dr hab. inż. Robert Nowicki
Instytut Inteligentnych Systemów Informatycznych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Paszka pt. „Wykorzystanie sieci neuronowej oraz systemu rozmytego do predykcji pozycji i wyboru ścieżki poruszającego się obiektu w lokalnym systemie pozycjonowania opartym na technologii UWB”

Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na pismo prof. dra hab. Andrzeja Polańskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej, z dnia 3 sierpnia 2022 r. zgodnie z uchwałą nr 26/2022 Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej z dnia 31 maja 2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej

Przekazana do recenzji rozprawa dotyczy zagadnienia pozycjonowania obiektów ruchomych – pojazdów samobieżnych ze szczególnym uwzględnieniem wózków magazynowych oraz pojazdów samochodowych. Zaproponowano w niej i zbadano kompletny kooperacyjny system wyznaczania i predykcji położenia takich pojazdów. Ważnym elementem przedstawionych w rozprawie prac jest przygotowanie modelu komercyjnego systemu pozycjonowania bez znajomości jego rzeczywistych parametrów.

Wliczając Wstęp i Podsumowanie rozprawa składa się z pięciu rozdziałów. Zawiera ona także Spis treści, Wykaz najważniejszych akronimów i skrótów oraz Spis tabel, Spis Rysunków i Bibliografię, przy czym trzy ostatnie elementy są numerowane na równi z rozdziałami. Treść, nie licząc strony tytułowej, strony z informacją o projekcie i spisu treści, została zawarta na 131 numerowanych stronach. Bibliografia zawiera 110 pozycji, spośród których autor rozprawy jest współautorem dziewięciu. Rozprawa nie została opatrzona streszczeniem w języku angielskim, o czym mowa w art. 13. p. 6. Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Podział przygotowanego materiału na rozdziały nie budzi zastrzeżeń. **Wstęp** wprowadza czytelnika w zagadnienie ustalania pozycji pojazdów w kontekście trwającego obecnie rozwoju zmierzającego do ich autonomiczności. Przedstawiono w nim podstawowe zagadnienia związane tematyką rozprawy oraz czynniki mające wpływ na dokładność lokalizacji, szczególnie obiektów znajdujących się w ruchu. Czynniki te są elementem genezy podjętych badań. Również we wstępie zdefiniowano **cel pracy** – opracowanie działającego w czasie rzeczywistym systemu decyzyjnego pozycjonowania obiektów w ruchu, pozyskującego dane z ultraszerokopasmowego (UWB) systemu pozycjonowania, nawigacji inercyjnej i zliczeniowej. Celem pobocznym, a właściwie pośrednim, jest zbudowanie symulatora systemu UWB na podstawie obserwacji działania urządzenia rzeczywistego. Symulator jest narzędziem w dalszych działaniach. **Rozdział 2.** zawiera już konkretną wiedzę na temat systemów i

metod pozycjonowania obiektów, a także ich klasyfikację. Szczególnie dokładnie przedstawione zostało zagadnienie trilateracji, istotne w kontekście postawionego celu. W **Rozdziale 3.** opisany został proces realizacji celu pobocznego (jak go zdefiniował autor) – powstawania symulatora systemu UWB, w którym kluczową rolę pełni model węzła systemu budowany z zastosowaniem sieci neuronowej na podstawie pomiarów działania konkretnego egzemplarza fizycznego urządzenia. Warto zauważyć, że zadanie to, niezależnie od dalszych prac, jest ciekawym zagadnieniem badawczym i projektowym. Główny wątek prac – opracowanie kooperacyjnego systemu wyznaczania i wyboru ścieżki obiektów – jest treścią **Rozdziału 4.** Ważnymi wyzwaniem podjętymi w projekcie i opisanymi w tej części pracy są korekta wskazań systemu UWB oraz analiza wpływu pomiaru czasu w procesie trilateracji i czasu przetwarzania na dokładność wyznaczonej pozycji. Rozważono również przypadek czasowego braku komunikacji w systemie. Zagadnienia te zostały uwzględnione w projekcie nadrzędnego modułu decyzyjnego. Pracę wieńczy **Podsumowanie**, a uzupełniają wymienione już wyżej spisy.

Od rozprawy doktorskiej w **naukach technicznych** oczekuje się, że będzie ona potwierdzała ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora we wskazanej dyscyplinie naukowej, świadczyła o jego umiejętności prowadzenia pracy naukowej oraz przedstawiała oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dokonane przez autora. Rozprawa mgr inż. Krzysztofa Paszka warunki te spełnia. Co więcej, podjęta tematyka wpisuje się w aktualne nurty badawcze i rozwojowe w zakresie automatyzacji pojazdów.

Poza przytoczonymi już wyżej celami, autor zdefiniował następujące **tezy**:

- Wykorzystanie lokalnego podsystemu pozycjonowania UWB oraz zastosowanie filtracji komplementarnej zwiększa dokładność przy dopuszczalnym czasie wyznaczania pozycji poruszającego się obiektu,
- Fuzja danych pochodzących z podsystemów pozycjonowania wraz z wykorzystaniem systemu rozmytego i sieci neuronowej umożliwia wybór aktualnej i predykcję ścieżki poruszania się obiektu w akceptowalnym czasie.

Tezy te są jednak jedynie parafrazą celów. Jest to niestety powszechna praktyka stosowana przez autorów rozpraw doktorskich w dziedzinie nauk technicznych. Teza mówiąca, że używając wskazane narzędzia można zbudować konkretne rozwiązanie jest zwykle w oczywisty sposób prawdziwa. Jakość oczekiwanego rozwiązania będzie wyższa lub niższa, ale jego konstrukcja jest możliwa. Nie znaczy to jednak, że praca i jej wyniki przedstawiane w tego typu rozprawach doktorskich nie mają charakteru badawczego. Oczekujemy od nich jednak nie potwierdzenia tezy, a ukończonego rozwiązania postawionego problemu. Być może dlatego ani Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, ani zastępująca ją ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce stawiania tez w rozprawach doktorskich nie wymaga.

Badania naukowe, w znakomitej większości przypadków, są kontynuacją działań poprzedników. Powinnością osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora jest znajomość uzyskanych wcześniej osiągnięć oraz odniesienie się do nich w prowadzonych badaniach oraz w przygotowanej rozprawie. W przypadku tak gorącego tematu, jakim jest rozwój pojazdów autonomicznych, z jednej strony nowe publikacje pojawiają się w zasadzie codziennie, z drugiej strony ważne osiągnięcia pozostają tajemnicą firm oferujących swe rozwiązania na zasadach komercyjnych. Autor rozprawy omawia

aktualny stan rozwoju pojazdów autonomicznych powołując się na 110 publikacji wymienionych w **Bibliografii**. Wśród nich znajdują się prace naukowe podejmujące zagadnienie lokalizacji obiektów, technologii UWB, sterowania, systemów decyzyjnych i sztucznych sieci neuronowych, patenty w tej tematyce, jak i publikacje popularno-naukowe i popularyzatorskie informujące o funkcjonalności komercyjnych produktów pojawiających się lub mających się pojawić na rynku. 110 publikacji nie wyczerpuje, co oczywiste, tematu. Wybór dokonany przez autora należy jednak uznać za rzetelny i właściwy do zakresu prac przedstawionych w rozprawie. Większość cytowanych publikacji pochodzi z ostatnich lat. Warto jednak zwrócić uwagę na najstarszą cytowaną pozycję – datowany na rok 1958 artykuł opisujący autonomiczny pojazd firmy Barrett Electronics z 1954 roku.

Wyniki prac przeprowadzonych przez mgra inż. Krzysztofa Paszka nie spowodują, że Politechnika Śląska wyprzedzi takie firmy jak Waymo (Alphabet), Cruise (GM), AutoX czy Argo AI (VW) w wyścigu do stworzenia samochodu w pełni autonomicznego. Jednakże zaproponowane i zbadane rozwiązanie jest kolejnym elementem, który być może zostanie wykorzystany w czymś finalnym rozwiązaniu.

Autor rozprawy wskazuje, że oryginalnymi osiągnięciami przedstawionymi w rozprawie są:

- opracowanie symulatora systemu UWB wraz z procedurą pozyskania danych umożliwiającą odwzorowanie rzeczywistego systemu bez znajomości dokładnych parametrów transmisji,
- stworzenie funkcji korekty odległości pozyskanych z systemu UWB z wykorzystaniem funkcji wielomianowej, która redukuje niedokładności wyznaczonej pozycji w procesie trilateracji,
- adaptację metody sympleksowej do wyznaczania pozycji obiektu w procesie trilateracji wraz z wyborem punktu początkowego,
- opracowanie procedury predykcji pozycji obiektu będącego w ruchu z wykorzystaniem sieci neuronowej typu LSTM, która redukuje opóźnienie wprowadzane przez system pozycjonowania UWB,
- wprowadzenie decyzyjnego systemu eksperckiego opartego na logice rozmytej, który umożliwia rekomendację ścieżki poruszania się obiektu,
- zaproponowanie obszarów bezpieczeństwa z uwzględnieniem czasu całego procesu przetwarzania danych zarówno dla pojazdów AGV, jak i pojazdów samochodowych.

Każde z nich zostało prawidłowo przedstawione w rozprawie, tworząc dokumentację kompletnego rozwiązania. Pierwszym opisanym osiągnięciem było opracowanie symulatora systemu UWB. Zadanie to zostało zrealizowane poprzez dokonanie pomiarów działania rzeczywistego systemu pomiarowego w środowisku laboratoryjnym, a następnie jego zamodelowanie. Sam system pomiarowy został potraktowany jako tzw. 'czarna skrzynka' o nieznanym budowie i parametrach. Ponieważ eksperyment został przeprowadzony w warunkach laboratoryjnych możliwa była również ocena dokładności uzyskanych pomiarów oraz przygotowanie funkcji korekcji wskazań. Opracowany w ten sposób symulator stał się narzędziem wykorzystanym w dalszych działaniach. Proces trilateracji został przedstawiony w sposób klasyczny – poprzez rozwiązanie układu równań oraz z zastosowaniem iteracyjnej metody sympleksowego spadku. To ostatnie rozwiązanie prowadzi do rozwiązania także w warunkach rzeczywistych, gdy wyniki pomiarów odległości obarczone są błędem, a dokładne rozwiązanie układu równań nie istnieje. Kolejne wyzwanie przed którym stanął autor rozprawy wynikało z ruchu lokalizowanych obiektów. Położenie wyznaczone przez trilaterację jest prawidłowe dla momentu rozpoczęcia pomiarów odległości. Po ich przeprowadzeniu i wykonaniu obliczeń położenie poruszającego się pojazdu jest inne. Problem ten należy rozwiązać przez predykcję

położenia. W systemie zaproponowanym w rozprawie zastosowano do tego celu dwa alternatywne rozwiązania – filtr Kalmana i sieć LSTM. Dysponując położeniem obiektu w ruchu wyznaczonym różnymi metodami pozostaje wybrać położenie najbliższe położeniu właściwemu. W rozprawie zaproponowano by podjęcie decyzji w tym zakresie powierzyć systemowi rozmytemu. Jest to wybór więcej niż właściwy. System rozmyty bazuje na regułach, które przy spełnieniu pewnych warunków są czytelne dla projektanta lub operatora systemu, a przejście pomiędzy pozycjami wyznaczonymi poszczególnymi metodami nie odbywa się skokowo lecz stopniowo wraz ze stopniowym przechodzeniem pomiędzy punktami przestrzeni wejściowej opisanymi poszczególnymi regułami. Badania symulacyjne kompletnego systemu obejmowały także oszacowanie błędu wyznaczania pozycji pojazdu. Pozwoliło to na wskazanie obszarów, w których błąd ten nie przekracza arbitralnie przyjętych wartości dopuszczalnych – 110 cm dla pojazdu samochodowego i 50 dla wózka magazynowego AVG. Obszary te nazwano obszarami bezpiecznymi.

Wymienione osiągnięcia można bezpośrednio odnieść do etapów projektowania odpowiednio zaawansowanego produktu, realizowanych przez działy badawczo-rozwojowe przedsiębiorstw. Na podkreślenie zasługuje fakt, że proces projektowy jest w tym przypadku nierozłączny z procesem badawczym, którego ważnym elementem jest eksperyment – w postaci symulacji, weryfikowanej eksperymentami na modelach fizycznych i prototypach.

Praca jest napisana poprawnie pod względem językowym. Czytelnik nie pozostaje bez odpowiedzi co zostało zrobione i dlaczego. Wyniki eksperymentów są przekonywujące i jasno skomentowane.

Jak już zostało to wspomniane powyżej, rozprawa ma charakter projektowy, na co wskazują zdefiniowane cele, a tezy stwierdzają, że założone cele są możliwe do osiągnięcia. Nie umniejsza to wartości rozprawy ponieważ poszczególne etapy prowadzące do osiągnięcia postawionego celu były nierozłącznie związane z procesem badawczym. Cel został osiągnięty, a proces projektowo-badawczy prawidłowo udokumentowany i opisany. W rozprawie znalazły się jednak drobne błędy i niekonsekwencje, które jednak nie wpływają na bardzo wysoką ocenę na jaką rozprawa niewątpliwie zasługuje. Poniżej wymienię te najważniejsze.

- We wstępie do rozprawy postawiono zupełnie sztuczne tezy, które, moim zdaniem, są w rozprawach doktorskich w dziedzinie nauk technicznych zbędne.
- Model systemu UWB został przygotowany na podstawie danych uzyskanych z jednego egzemplarza urządzenia rzeczywistego. Analizując błędy pomiaru odległości popełniane przez ten egzemplarz autor słusznie zauważa, że rozkład błędów nie odpowiada rozkładowi normalnemu – system zawyża pomiary. Zaproponowany model, jak i funkcja korygująca wskazania dotyczą więc konkretnego urządzenia. Przeprowadzone badania tracą więc na ogólności. Być może autor milcząco zakłada, że zaproponowane działania powinny się powtórzyć dla każdego instalowanego egzemplarza przeprowadzając w ten sposób jego kalibrację dostosowaną do środowiska docelowego.
- Wątpliwości budzi sposób zdefiniowania ścieżki referencyjnej w rozdziale 3.3. Pomiędzy niemożliwą dla obiektu o niezerowej masie zmianę przyspieszenia z 0 do a i odwrotnie w punktach t_1 i t_2 (wartość zrywu byłby wówczas nieskończenie wysoka). Na potrzeby rozważań teoretycznych i symulacji jest to założenie dopuszczalne. Występuje jednak niezgodność pomiędzy ścieżką przedstawioną na rys. 32 i wykresami zamieszczonymi na rys. 33 (s. 62). Jeśli opisy osi OX i OY są tożsame z opisami „Oś X” i „Oś Y”, a „Oś Z” jest

prostopadła do osi OX i OY to a) prędkość liniowa w osi X powinna osiągnąć wartość 0 w połowie czasu (i drogi) pomiędzy punktami t_1 i t_2 i zmienić zwrot na przeciwny. Prędkość liniowa w osi Y od chwili t_1 powinna być niezerowa osiągając wartość maksymalną połowie czasu (i drogi) pomiędzy punktami t_1 i t_2 . Ruch po okręgu (łuku) pomiędzy chwilami t_1 i t_2 nawet ze stałą prędkością kątową związany jest z siłą dośrodkową, a więc i przyspieszeniem, który rozkłada się na kierunki OX i OY, czego nie uwzględniono na wykresach. Umieszczenie chwili $t_2 = 3,3 s$ na wykresach dokładnie w połowie odległości pomiędzy chwilami 3 s i 3,5 s wskazuje, że wykresy te zostały narysowane ręcznie, a nie są wygenerowane z danych powstałych w trakcie symulacji. Dzięki temu powyższa niezgodność nie podważa poprawności implementacji narzędzi służących do realizacji eksperymentu.

- W opisie poprzedzającym odwołanie do rys. 1 (s. 19), ani na samym rysunku (s. 20) nie wyjaśniono roli połączenia linią przerywaną satelity GPS z jedną z kotwic UWB umieszczonych na placu manewrowym.
- W opisie poprzedzającym odwołanie do rys. 4 (s. 23) podany jest podział systemów pozycjonowania na bezpośrednie i pośrednie, podczas gdy na rys. 4 użyto określeń „względne” i „bezwzględne”.
- Rysunki 4 (s. 26) i 6 (s. 27) nie wnoszą nic do prezentowanej treści.
- Nieco zaskakujący jest sposób umieszczania w rozprawie wzorów. Nie są one elementem zdań, a traktowane są jak ilustracje, do których odwołania występują w tekście. Wyjątkiem jest rozdział 4., w którym część wzorów poprzedzają dwukropki.
- Na s. 48. autor, komentując otrzymane wyniki, stwierdza, że „pierwiastek średniej kwadratowej błędów odległości zmienia się wraz z dystansem bez wyraźnej monotoniczności” zapewne na wzór wcześniej użytego stwierdzenia o „wyraźnej korelacji”, lecz uważam, że to określenie jest niezrozumiałe.

W pracy znalazły się również nieliczne „potknięcia” językowe. Oto kilka przykładów.

- Za liczebnikami porządkowymi zapisanymi z użyciem liczb brak jest kropek, np. „W rozdziale 2 przedstawiono...”.
- Na stronie 15. znajduje się niefortunne stwierdzenie mówiące, że „W rozdziale 3 opracowano symulator systemu UWB,...” podczas gdy symulator ten opracowano zapewne w laboratorium, a w rozdziale 3. symulator ten został opisany.
- Na stronie 18. autor stwierdza, że w przypadku pokrycia globalnego „system dostępny jest na całym świecie” podczas gdy w tym kontekście za systemy globalne uznajemy te działające w ramach naszej planety.
- Na s. 46. czytamy, że „średnia wartość zmiennej losowej jest zbliżona do rozkładu normalnego, gdy populacja jest wystarczająco duża”, podczas gdy twierdzenie graniczne (Lindeberga-Lévy’ego) mówi o rozkładzie średniej wartości zmiennej losowej.
- Na stronie 47. znajduje się niejasno wyrażone spostrzeżenie, że „wraz ze wzrostem odległości przeszacowanie systemu nie jest stałe”. Na podstawie przedstawionych danych można się domyśleć, że chodzi o to, że przeszacowanie nie jest stałe dla różnych odległości.
- Na s. 75. użyto określenia „jednostajnym ruchu przyspieszonym” zamiast „ruch jednostajnie przyspieszony”.
- Język naturalny dopóki jest używany ulega ciągłej ewolucji w tym wpływowi zewnętrznym. Nie wszystkie zmiany uznaje się za pożądane. W rozprawie wielokrotnie użyte zostało słowo

„autentykacja” zamiast polskiego odpowiednika „uwierzytelnianie” oraz „inicjalizacja” które niestety coraz częściej zastępuje słowo „inicjacja” w odniesieniu do zagadnień technicznych. Trzeba jednak przyznać, że ten ostatni przypadek znajduje już akceptację językoznawców, co widać np. w wypowiedziach zamieszczonych w Poradni Językowej PWN.

- W trakcie czytania można też natrafić na pojedyncze literówki.

Podsumowując, stwierdzam, że autor

- wykazał się wiedzą i znajomością literatury w zakresie, którego dotyczy rozprawa,
- przedstawił problem badawczy w postaci ograniczonej dokładności pozycjonowania obiektów w ruchu,
- rozwiązał wskazany problem proponując konkretny kooperacyjny system pozycjonowania, którego kluczowymi elementami są sztuczne sieci neuronowej i rozmyty system decyzyjny,
- zaplanował i przeprowadził badania zaproponowanego rozwiązania, wykazując jego skuteczność oraz zakres bezpiecznego stosowania.

Ponadto, uważam, że należy docenić kompleksowe podejście do postawionego zadania. Wymagało one rozwiązania nie jednego, a kilku zależnych od siebie problemów badawczych. W każdym z nich właściwie dobrano metody i algorytmy wykorzystane do osiągnięcia założonych celów. Poprawnie zdefiniowano scenariusze badań. Powstanie rozprawy poprzedziło przygotowanie innych publikacji naukowych opublikowanych w czasopiśmie recenzowanych. Ich powstanie na pewno przyczyniło się do rozwoju warsztatu badawczego Doktoranta, ale także świadczy o odpowiednio wysokiej ocenie tego warsztatu. Powyższe stanowi moim zdaniem wystarczające przesłanki do złożenia wniosku o wyróżnienie ocenianej rozprawy.

Rozprawa doktorska „Wykorzystanie sieci neuronowej oraz systemu rozmytego do predykcji pozycji i wyboru ścieżki poruszającego się obiektu w lokalnym systemie pozycjonowania opartym na technologii UWB” autorstwa mgr inż. Krzysztofa Paszka zawiera, moim zdaniem, elementy nowości i spełnia wymagania warunki określone w art. 13 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony oraz o jej wyróżnienie.

Robert Nowicki