

Warszawa, 30.01.2026

dr hab. inż. Janusz Furtak, prof. WAT
Wydział Cybernetyki
Wojskowa Akademia Techniczna

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Tracking Head Movements in a Flight Simulator Environment using SLAM Mechanism of Augmented Reality Goggles**

Autor rozprawy: **mgr Onyeka Josephine NWOBODO**

Promotor rozprawy: **Dr hab. inż. Krzysztof Adam CYRAN, Prof. PŚ**

Dziedzina: **nauki techniczne**

Dyscyplina: **Informatyka Techniczna i Telekomunikacja**

1. Ocena układu pracy doktorskiej

Recenzowana praca jest bardzo obszerna, ma 238 strony tekstu, które zostały podzielone na dziesięć rozdziałów zasadniczych. Zawiera także spis treści, listę rysunków, listę skrótów i wykaz cytowanej literatury.

Rozdział pierwszy zarysowuje główne problemy jakie występują w stosowaniu symulatorów lotu w procesie szkolenia pilotów. Zwrócono uwagę na możliwość stosowania technologii rozszerzonej rzeczywistości w celu polepszenia skuteczności treningów pilotów i wyzwania, z którymi trzeba się zmierzyć przy projektowaniu tego typu rozwiązań. Według autorki rozprawy krytycznym elementem jest śledzenie położenia głowy osoby ćwiczącej w środowisku symulatora. Ten proces powinien charakteryzować się minimalnym opóźnieniem i dostarczać wiarygodnych danych o położeniu w czasie rzeczywistym w dynamicznym środowisku symulatora, aby zapewnić odpowiednią świadomość sytuacyjną pilotowi, prawidłowe podejmowanie przez niego decyzji i dużą skuteczność treningu.

Rozdział drugi jest przeglądem literatury dotyczącym rozważanego problemu. Szczególną uwagę poświęcono istniejącym technologiom śledzenia ruchów głowy pilota bazującym na markerach i rozwiązaniom nawigacji wykorzystującym algorytmy SLAM do śledzenia ruchu głowy pilota w symulatorach lotu. Główny wniosek z tego przeglądu dotyczy możliwości zapewnienia płynnego, responsywnego i niezawodnego śledzenia głowy w dynamicznym i złożonym środowisku poprzez opracowanie zaawansowanego algorytmu rozwiązującego problemy opóźnień, dryftu i fluktuacji opóźnień.

Rozdział trzeci jest poświęcony badaniu własności różnych odmian algorytmów SLAM, które mogą być zastosowane do śledzenia ruchu głowy pilota w trakcie ćwiczeń w symulatorze lotu z wykorzystaniem rozszerzonej rzeczywistości. Wynikiem badań z tego zakresu są zidentyfikowane, z punktu widzenia wykorzystania rozszerzonej rzeczywistości, silne strony i ograniczenia następujących algorytmów: RGB-D SLAM, ORB SLAM, LSD SLAM, Visual-Inercial SLAM i SLAM oparty na głębokim uczeniu.

Niezależnie od zastosowanych metod śledzenia położenia głowy pilota istotnym wyzwaniem dla rozszerzonej rzeczywistości jest ocena precyzji dopasowania wirtualnych elementów do fizycznych komponentów kokpitu. O tych problemach jest mowa w rozdziale czwartym. Dodatkowo w tym rozdziale przebadano i porównano podejście wykorzystujące markery i algorytmy SLAM. Istotnym wnioskiem z tych badań jest sugestia, że projektowanie powinno się skupić na rozwiązaniu hybrydowym integrującym precyzję oferowaną przez podejście bazujące na markerach oraz elastyczność i skalowalność algorytmów SLAM.

W rozdziale piątym rozważany jest problem oceny użyteczności interfejsów AR w symulatorze kokpitu. W badaniach tego problemu wykorzystano reguły wynikające z prawa Fittsa, które mogą być wykorzystane w modelach interakcji człowiek-komputer do oceny realizacji zadań związanych ze wskazywaniem. Do przeprowadzenia badań opracowano stanowisko testowe wykorzystujące urządzenie Microsoft HoloLens 2. Wynikiem przeprowadzonych badań są wytyczne do projektowania w zakresie redukcji trudności zadań interakcji, optymalizacji położenia obiektów na scenie i interakcji z interfejsem.

Rozdział szósty opisuje szkielet hybrydowego adaptacyjnego filtra złożonego z filtra Kalmana i filtra cząsteczkowego, który dostosowuje filtrowanie dla dynamiki liniowej (filtr Kalmana) albo dynamiki nieliniowej (filtr cząsteczkowy). Przebadano oddzielnie trzy filtry Kalmana i trzy filtry cząsteczkowe oraz hybrydowe rozwiązania skomponowane z trzech par filtrów pod kątem wierności śledzenia ruchu głowy pilota w środowisku rozszerzonej rzeczywistości symulatora lotu oferującym małe opóźnienie, akceptowalne zapotrzebowanie na moc obliczeniową i gwarantującym dokładność i reaktywność.

Wykorzystywane w dotychczas opisanych eksperymentach urządzenie Microsoft HoloLens 2 daje możliwość równoczesnego pozyskiwania danych dotyczących śledzenia ruchu oczu, śledzenia ruchów głowy oraz gestów dłoni. Rozdział siódmy jest poświęcony opracowaniu metody identyfikacji pilota korzystającego z symulatora na podstawie tych danych z wykorzystaniem sieci neuronowej typu Long Short-Term Memory. Metoda została przebadana, a uzyskane wyniki są obiecujące. Tematyka tego rozdziału nie jest ściśle związana z tematem pracy doktorskiej, ale rozwiązany problem identyfikacji pilota zdecydowanie poprawi łatwość użytkowania symulatora lotu wykorzystującego rozszerzoną rzeczywistość, eliminując potrzebę logowania i dostosowanie środowiska symulatora przy zmianie osoby wykonującej trening.

W rozdziale ósmym rozważany jest problem skuteczności szkolenia pilotów w symulatorze lotów z wykorzystaniem rozszerzonej rzeczywistości. Przedstawiono tam nieinwazyjną metodę szacowania ilości informacji zapamiętanej przez uczestników szkolenia. Wykorzystanie tego typu rozwiązań pozwala na tworzenie adaptacyjnych mało obciążających i mierzalnie skutecznych środowisk szkoleniowych. Tematyka tego rozdziału jest również mniej związana z tematem pracy doktorskiej, ale stanowi podwaliny pod przygotowanie bezpiecznego, efektywnego i spersonalizowanego środowiska do szkolenia pilotów.

Opisywany w pracy szkielet tworzenia rozszerzonej rzeczywistości na potrzeby symulatorów lotu z rozwiązaniami gwarantującymi dużą wierność i skuteczność szkolenia mają cechy, które można wykorzystać w innych środowiskach. W rozdziale dziewiątym przedstawiono zastosowanie tego rozwiązania w nauczaniu zjawisk z zakresu mechaniki kwantowej. Ten materiał potwierdza, że rozwiązanie przedstawione w pracy może mieć również inne zastosowania.

Pięć istotnych rozdziałów pracy opracowano na podstawie publikacji wieloautorских, których jednym ze współautorów była Doktorantka. Ta lista jest następująca:

- rozdział 3 – pozycja [16] listy publikacji – tytuł rozdziału i tytuł artykułu jest taki sam;
- rozdział 4 – pozycja [37] – tytuł rozdziału i tytuł artykułu jest taki sam;
- rozdział 5 – pozycja [178] – tytuł rozdziału i tytuł artykułu jest taki sam;
- rozdział 6 – pozycja [197] – tytuł rozdziału jest bardzo podobny do tytułu artykułu;
- rozdział 8 – pozycja [276] – tytuł rozdziału i tytuł artykułu jest taki sam

Lista cytowanej w pracy literatury obejmuje 320 pozycji. Lista jest dosyć obszerna i efektywnie pozycjonuje przedstawiane zagadnienia na tle opracowań międzynarodowych. Pozycje literatury odnoszące się do wymienionych wyżej rozdziałów są podobne do pozycji literatury przywołanych przez te artykuły.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było opracowanie rozwiązań mających na celu podniesienie efektywności szkolenia pilotów w symulatorach lotu, zapewnienie wierności postrzegania rzeczywistości przez szkolonego pilota w trakcie różnych, skomplikowanych scenariuszy oraz niezawodności działania. Doktorantka zdecydowała się zastosować w symulatorze lotu rozszerzoną rzeczywistość, która bazuje na urządzeniu Microsoft HoloLens 2. Takie podejście skutkowało koniecznością opracowania metody precyzyjnego wyznaczania położenia głowy trenowanego pilota we wnętrzu kokpitu symulatora z minimalnym opóźnieniem i minimalnymi błędami określania położenia przy zachowaniu małego obciążenia obliczeniowego dla opracowanych rozwiązań.

Doktorantka przeanalizowała i przebadła szereg metod śledzenia położenia bazujących na markerach, IMU i różnych odmianach SLAM. Efektem pracy jest propozycja nowatorskiego rozwiązania adaptacyjnego i hybrydowego integrującego śledzenie położenia w oparciu o markery i wybrane algorytmy SLAM. Istotnym wzmocnieniem jakości rozwiązania było zastosowanie filtracji. W pracy przebadano szereg odmian filtrów Kalmana i filtrów cząsteczkowych, a do prezentowanego rozwiązania zastosowano adaptacyjny filtr integrujący zalety filtrów Kalmana i filtrów cząsteczkowych.

Badania przedstawione w pracy wybiegły poza ten podstawowy cel. Bazując na danych uzyskiwanych w rozszerzonej rzeczywistości Doktorantka zaproponowała rozwiązanie do identyfikacji trenowanego pilota na podstawie analizy jego zachowania, co bardzo dobrze wspomaga tworzenie nowoczesnego środowiska symulatora lotów.

Inną wartością dodaną jest opracowanie rozwiązania oceniającego skuteczność treningu pilota, co daje możliwość kształtowania scenariuszy treningów dla pilotów. Dodatkowo może wpływać na przyszłe planowanie konstrukcji symulatorów w sposób pozwalający zmniejszać trudność zadań interakcyjnych dla trenowanego pilota.

Ocena zastosowanych metod badawczych

W ramach pracy przebadano niezależnie kilka grup rozwiązań. Dotyczyły one metod śledzenia położenia bazujących na markerach i na różnych odmianach SLAM, metod filtracji cząsteczkowych i filtracji Kalmana oraz metod wykorzystujących sieci neuronowe. Te zagadnienia są treścią rozdziałów od trzeciego do dziewiątego. We wszystkich tych badaniach stosowano podobny sposób postępowania obejmujący następujące elementy: szczegółowy opis problemu, algorytmu lub metody, następnie przygotowanie stanowiska badawczego dostosowanego do badanego zagadnienia, wykonanie eksperymentów, zilustrowanie wyników w różnych przekrojach, a na koniec przedstawienie zwięzłych wniosków i sugestii wykorzystania badanych elementów.

Takie podejście łączy rozważania teoretyczne z badaniami eksperymentalnymi i należy stwierdzić, że jest ono skuteczne, a uzyskane wyniki charakteryzują się dużą wiarygodnością.

Ocena opisu i praktycznych zastosowań wyników badań

Zagadnienia w pracy są przedstawione klarownie. Opisy, analizy i wnioski są uzupełniane rysunkami, co podnosi jakość przedstawianego materiału. Znaczącym mankamentem dotyczącym rysunków jest umieszczenie rysunków czasem kilka stron po pierwszym odwołaniu do nich, co utrudnia analizę treści i zawartości rysunków.

Treść pracy skupia się na praktycznym zastosowaniu opracowanych metod w nowoczesnych symulatorach lotu. W wielu miejscach pracy można znaleźć propozycje zastosowania poszczególnych rozwiązań w innych środowiskach. Autorka często wspomina o zastosowaniach w medycynie.

Praktycznemu zastosowaniu opracowanego szkieletu do prezentacji zagadnień z zakresu mechaniki kwantowej został poświęcony rozdział dziewiąty.

Bez wątpienia proponowane rozwiązania znajdują zastosowania praktyczne.

Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego

Zaproponowane rozwiązanie można scharakteryzować następującymi własnościami:

- wykorzystuje rozszerzoną rzeczywistość;
- do wyznaczania położenia głowy trenującego pilota wykorzystuje adaptacyjne i hybrydowe rozwiązanie integrujące śledzenie położenia w oparciu o markery i wybrane algorytmy SLAM;
- uzyskuje poprawę jakości danych poprzez zastosowanie adaptacyjnych filtrów Kalmana i filtrów czasteczkowych;
- umożliwia identyfikację ćwiczących osób na podstawie śledzenia ruchu gałek ocznych, ruchów głowy i gestów rąk;
- ma potencjał do oceny jakości przyswajania wiedzy przez pilotów i oddziaływania na kształt scenariuszy treningowych.

Z pewnością takie podejście jest oryginalne i stanowi istotny wkład w rozwój nowoczesnych symulatorów lotu. Ponadto zaproponowane rozwiązania hybrydowe i adaptacyjne z zakresu śledzenia ruchu obiektów mogą znaleźć zastosowania w dziedzinie nawigacji i zarządzania pojedynczymi dronami i rojami dronów.

Ocena prezentacji ogólnej wiedzy teoretycznej kandydatki w dyscyplinie i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Każdy z rozdziałów od trzeciego do dziewiątego zawiera podrozdział o jednej z nazw: „Metodyka”, Materiały i metody”, „Metody”. W każdym z tych podrozdziałów widać znaczny stopień zaawansowania doktorantki w prezentowaniu wiedzy teoretycznej z zakresu dyscypliny i związanej z treścią danego rozdziału. Doktorantka swobodnie posługuje się aparatem matematycznym, o czym świadczy jego wykorzystanie w podrozdziałach opisujących rezultaty poszczególnych eksperymentów do prezentowania wyników i ilustrowania analiz i wniosków.

Analiza literatury przeprowadzona w rozprawie wskazuje na dobrą orientację i wystarczającą wiedzę Autorki w dyscyplinie naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Warto odnotować, że wśród podanej listy publikacji występuje siedem publikacji, których jednym ze współautorów jest Doktorantka. Publikacje te ukazały się w latach od 2023 do 2025 w materiałach konferencji międzynarodowych lub czasopismach międzynarodowych umieszczonych na liście punktowanych czasopism i konferencji.

3. Mankamenty pracy

Natury ogólnej

1. Przedstawiona praca w procesie recenzowania była traktowana jako „praca pisemna”, a nie jako „zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych” (pojęcia zaczerpnięte z Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Art. 187 pkt. 3). Jednak praca zawiera pięć rozdziałów, których tytuły są prawie identyczne do tytułów publikacji wieloautorskich, w których Doktorantka jest jednym ze współautorów,

a treści tych rozdziałów są bardzo podobne do treści tych publikacji. Rozdziały te zawierają rysunki, które wcześniej były użyte przez autorów tych publikacji, a przy rysunkach nie ma referencji do rysunków z publikacji. Pojawia się pytanie czy doktorantka dysponuje prawami do ponownego użycia tych rysunków w swojej pracy, które należy uzyskać od wydawnictw pierwotnych publikacji?

2. W pracy brak jakiegokolwiek informacji na temat udziału Doktorantki w opracowaniu tych publikacji i w konsekwencji wkładu doktorantki w treść poszczególnych rozdziałów. Wydaje się, że Doktorantka powinna przedstawić taką informację nie później niż w trakcie publicznej obrony.
3. W pracy można znaleźć szereg symptomów korzystania ze sztucznej inteligencji przy opracowaniu pracy, co nie jest naganne, ale Doktorantka powinna poinformować jakie elementy pracy i z wykorzystaniem jakich narzędzi były przygotowane.

Dotyczące struktury i zawartości rozdziałów pracy

4. W różnych miejscach pracy powtarzają się opisy pewnych zagadnień. Zrozumiałe jest wprowadzenie danego opisu jeden raz, a później używanie danego sformułowania. Zaprezentowane podejście utrudnia zrozumienie treści pracy, a powtarzanie podobnych opisów prowokuje czytelnika do kilkukrotnego niepotrzebnego czytania podobnych opisów w celu znalezienia różnic. Przykładem takiej treści jest pierwszy akapit na stronie 56, pierwszy akapit sekcji 6.1.1, czy ostatni akapit sekcji 6.1.2.
5. Na początku pracy przedstawiony jest słownik wykorzystywanych pojęć. Niezależnie od tego w pracy często są używane pełne opisy pojęć ze skrótami w nawiasie. Przykładem jest „augmented reality (AR)”.
6. Na rysunku „Figure 4.2” niezbyt wyraźnie są oznaczone elementy składowe formuły (4.2) i z tego względu trudno się domyślić skąd wzięła się ta formuła. W tekście nie znalazłem żadnego opisu przybliżającego ten problem.
7. Dużym niedostatkiem utrudniającym zrozumienie treści jest czasem kilku stronicowa odległość referencji do rysunku od położenia tego rysunku. Podam kilka przykładów:
 - referencja do rysunku „Figure 4.3” jest na stronie 59, a rysunek na stronie 61;
 - referencja do rysunku „Figure 4.4” jest na stronie 60, a rysunek na stronie 62;
 - referencje do rysunków „Figure 5.12” i „Figure 5.13” są na stronie 86, a rysunki na stronach odpowiednio 101 i 102;
 - referencja do tabeli „Table 5.4” jest na stronach 91,94, 95, a tabela na stronie 95.

Podobne uwagi dotyczą rysunków o numerach 5.2, 5.3, 5.7, 5.8, 5.15.

Z tego powodu rozdział piąty jest trudny do zrozumienia i sprawia wrażenie, że był pisany przez inną osobę, niż pozostałe rozdziały.

8. Używanie wyszukanych wyrazów utrudnia zrozumienie treści. Poniżej podam kilka przykładów:
 - strona 114 – “intricately” zamiast “carefully”
 - strona 131 – “exacerbate” zamiast “increase”
 - strona 181 – “insurmountable” zamiast “unbeatable”

Edycyjne

- o strona 41 – występują dwa duże akapity, które mają prawie identyczną treść.
- o strona 50 – występuje referencja do rysunku „Figure 1”, a takiego rysunku w pracy nie ma. Jest rysunek oznaczony Figure 3.1. Natomiast w artykule [16], na podstawie którego powstał rozdział trzeci jest identyczny rysunek oznaczony jako „Figure 1”
- o strona 51 – podobna uwaga dotyczy referencji do tabeli odpowiednio „Table 1”, „Table 3.1” i artykułu [16].
- o strona 63 – występuje odwołanie do formuły „3.2” a chyba chodzi o formułę 4.2.
- o strona 81 i strona 83 – formuły nie mają swoich identyfikatorów.
- o strona 84 – w tytule rozdziału występują błędne litery.
- o strona 94 – w formule (5.5) występują oznaczenia „AVG”, które nie są nigdzie opisane.
- o strona 95 – występuje referencja do rysunku „Figure 5.10”, który nie wiadomo, co ilustruje.
- o strona 109 – w wielu miejscach pracy używane są sformułowania „We”. To budzi wątpliwości czy praca została wykonana samodzielnie.
- o strona 110 – występuje odwołanie do algorytmu „Algorithm 1”, a chodzi chyba o „Algorithm 2”
- o strona 113 – w formule (6.4) występuje element P_k , który nie jest opisany.
- o strona 114 – w formule (6.7) występuje element a_{k-1} , który nie jest opisany.
- o strona 130 – występuje odwołanie do tabeli „Table I in the appendix” – nie ma w pracy tabeli „Table I” i nie ma „Appendix”.
- o strona 150 – na rysunku „Figure 7.1” jest praktycznie nieczytelny.
- o strona 153 – występuje odwołanie do rysunku „Figure 2” , a prawdopodobnie chodzi o rysunek „Figure 7.2”.
- o strona 165 – występuje odwołanie do sekcji V-A, której nie ma w pracy.
- o strona 181 – dwukrotnie użyte słowo „Broglie’s”.
- o strona 187 – kolejność rysunków „Figure 9.5” i „Figure 9.6” powinna być zamieniona.

4. Podsumowanie oceny

W podsumowaniu oceny rozprawy stwierdzam, że opiniowana praca pomimo wskazanych mankamentów odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim ze względu na dobry poziom merytoryczny i duży potencjał wdrożeniowy zaproponowanych rozwiązań.

Opiniowaną rozprawę doktorską oceniam **pozytywnie**.

Konkluzja

Uważam, że opiniowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktorantki w dyscyplinie naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, a także dowodzi umiejętności prowadzenia przez Nią samodzielnej pracy naukowej.

W oparciu o przedstawioną powyżej ocenę potwierdzam, że opiniowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. (Prawo o szkolnictwie wyższym) (Dz. U. Nr 2018, poz. 1668, z późn. zm.) i **w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgr Onyeki Nwobodo do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**