



AGH UNIVERSITY OF KRAKOW
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING, AUTOMATICS, COMPUTER SCIENCE AND BIOMEDICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF APPLIED COMPUTER SCIENCE

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
wpłynęło dnia 11. 03. 2026
nr zał:

Kraków 25 lutego 2026

Prof. dr. hab. inż. Jarosław Wąs,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej

Recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Onyeka Josephine Nwobodo zatytułowanej „*Tracking Head Movements in a Flight Simulator Environment using SLAM Mechanism of Augmented Reality Glasses*”, opracowano na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Śląskiej.

1a) Tematyka rozprawy i tytuł pracy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Onyeka Josephine Nwobodo pt. „*Tracking Head Movements in a Flight Simulator Environment using SLAM Mechanism of Augmented Reality Glasses*” dotyczy problematyki śledzenia ruchów głowy w środowisku symulatora lotu z wykorzystaniem mechanizmu SLAM czyli jednoczesnego lokalizowania i mapowania.

Rozprawa dotyczy opracowania i walidacji innowacyjnego systemu śledzenia głowy dla symulatorów lotu AR, opartego na technologii SLAM oraz adaptacyjnej fuzji filtrów Kalmana i cząsteczkowych, w celu zwiększenia dokładności, stabilności i responsywności śledzenia w środowisku kokpitu. Praca obejmuje analizę i porównanie istniejących metod śledzenia (markerowych i inercyjnych) z podejściem SLAM, rozszerzonym o warstwę identyfikacji użytkownika i predykcji retencji pamięci z wykorzystaniem modeli LSTM, co umożliwia personalizację i adaptacyjne sterowanie procesem szkolenia. W mojej ocenie temat pracy został opisany prawidłowo.

1b) Charakterystyka rozprawy i ocena układu rozprawy

AGH University of Kraków ,
Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Biomedical Engineering
Institute of Applied Computer Science
A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

Praca doktorska mgr inż. Onyeka Josephine Nwobodo
pt. „*Tracking Head Movements in a Flight Simulator Environment using SLAM Mechanism of Augmented Reality Glasses*” składa się łącznie z dziesięciu rozdziałów, obejmujących: wstęp, zasadniczą część pracy, podsumowanie oraz bibliografię. Całość pracy zajmuje ponad 220 stron wraz z bibliografią i dodatkami.

Rozdział pierwszy wprowadza w problematykę pracy, przedstawiając tło rozwoju technologii symulacji lotu oraz rosnącą rolę rzeczywistości rozszerzonej w szkoleniu pilotów. Zdefiniowano lukę badawczą dotyczącą niedokładności i niestabilności systemów śledzenia głowy, sformułowano pytania badawcze i cele rozprawy oraz szczegółowo opisano przyjętą metodykę, obejmującą przegląd literatury, implementację algorytmów SLAM, analizy porównawcze, rozwój adaptacyjnej fuzji filtrów, modele uczenia głębokiego oraz procedury walidacyjne i analizę statystyczną. Wskazano także znaczenie naukowe i aplikacyjne badań oraz scharakteryzowano architekturę sprzętową gogli AR wykorzystanych w eksperymentach.

Rozdział drugi stanowi systematyczny przegląd metod śledzenia ruchu głowy w systemach AR, obejmujący rozwiązania oparte na czujnikach optycznych, magnetycznych, akustycznych i inercyjnych, a także podejścia wykorzystujące uczenie maszynowe. Przeanalizowano stopnie swobody ruchu głowy (DoF), ograniczenia technologiczne oraz aktualne kierunki rozwoju, identyfikując kluczowe wyzwania, takie jak dryf, zasłanianie i podatność na zakłócenia środowiskowe.

Rozdział trzeci koncentruje się na metodach SLAM w kontekście symulatorów lotu AR. Przedstawiono i porównano wybrane algorytmy, w tym RGB-D SLAM, ORB-SLAM, LSD-SLAM, VINS oraz podejścia oparte na głębokim uczeniu, opisując ich implementację, konfigurację eksperymentalną i analizę wyników pod kątem dokładności mapowania, stabilności trajektorii i przydatności w środowisku kokpitu.

Rozdział czwarty zawiera szczegółową analizę porównawczą śledzenia markerowego i opartego na SLAM w symulacji lotu AR. Opisano procedury kalibracji kamer, przepływy przetwarzania danych, metryki oceny oraz wyniki ilościowe, uwzględniające wpływ rozdzielczości sensorów i rozmiaru markerów na zasięg detekcji. Wykazano przewagę podejścia SLAM w zakresie adaptacyjności, odporności na zakłócenia i immersyjności.

Rozdział piąty przedstawia adaptację prawa Fittsa do trójwymiarowych środowisk AR. Opracowano zmodyfikowany model uwzględniający orientację głowy, zakotwiczenie przestrzenne obiektów oraz czynniki środowiskowe, a następnie przeprowadzono eksperymenty z analizą statystyczną wpływu lokalizacji celu, oświetlenia i złożoności sceny na trudność zadania. Wyniki posłużyły do optymalizacji rozmieszczenia elementów interfejsu w kokpicie AR.

Rozdział szósty opisuje opracowanie adaptacyjnej fuzji filtrów Kalmana i cząsteczkowych (AKPF) dla wysokiej precyzji śledzenia głowy. Przedstawiono

rozszerzone wersje EKF, UKF, EnKF oraz filtrów cząsteczkowych (SIR, APF), w tym implementacje akcelеровane GPU, a następnie porównano ich wydajność pod względem RMSE, stabilności trajektorii, opóźnień i obciążenia obliczeniowego. Analiza wykazała wyższość adaptacyjnej fuzji w warunkach nieliniowej dynamiki ruchu.

Rozdział siódmy dotyczy identyfikacji użytkownika w AR na podstawie multimodalnych danych behawioralnych. Zaprojektowano architekturę LSTM modelującą czasowe wzorce ruchów głowy, spojrzenia i gestów rąk, a skuteczność systemu oceniono za pomocą miar takich jak *accuracy*, *precision*, *recall*, *balanced accuracy* oraz macierzy pomyłek i wizualizacji t-SNE. Przeprowadzono również analizę generalizacji do nowych użytkowników i porównanie z metodami referencyjnymi.

Rozdział ósmy wprowadza model głębokiego uczenia do predykcji retencji pamięci w środowisku AR. Na podstawie nieinwazyjnych wskaźników behawioralnych opracowano sieć DNN przewidującą stan zapamiętywania, co umożliwia adaptacyjne tempo nauki i personalizację wsparcia poznawczego. Wyniki eksperymentów potwierdzają trafność predykcji oraz istotność statystyczną uzyskanych efektów.

Rozdział dziewiąty prezentuje studium przypadku wykorzystania opracowanej architektury AR w edukacji STEM na przykładzie wizualizacji interferometru Mach–Zehndera. Opisano projekt środowiska immersyjnego, procedury eksperymentalne oraz analizę porównawczą efektywności uczenia w stosunku do metod tradycyjnych, wykazując poprawę zrozumienia abstrakcyjnych koncepcji mechaniki kwantowej.

Rozdział dziesiąty podsumowuje wyniki badań, syntetyzuje wkład teoretyczny i aplikacyjny rozprawy oraz wskazuje kierunki dalszych prac, w tym rozwój systemów AR o wysokiej precyzji śledzenia w lotnictwie, systemach UAV i innych dziedzinach wymagających zaawansowanego mapowania przestrzennego i adaptacyjnej interakcji człowiek–system.

Autor posługuje się poprawną terminologią w zakresie tematyki pracy. Tytuły i kolejność rozdziałów jest również prawidłowa, treść rozdziałów odpowiada, w mojej ocenie, wymaganiom stawianym dla prac doktorskich.

1c) Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Bibliografia składa się z 320 pozycji związanych z tematyką pracy. Pozycje literaturowe zostały dobrane prawidłowo biorąc pod uwagę ich istotność i aktualność. Zostały one poprawnie wkomponowane w treść rozprawy.

1d) wskazanie oraz ocena celu pracy

Celem pracy jest opracowanie i walidacja innowacyjnego systemu śledzenia głowy dla symulatorów lotu AR, opartego na technologii SLAM oraz adaptacyjnej fuzji filtrów Kalmana i cząsteczkowych, w celu zwiększenia dokładności, stabilności i responsywności śledzenia reakcji pilota w środowisku kokpitu. Kolejnym celem jest przezwyciężenie ograniczeń istniejących metod markerowych i inercyjnych poprzez analizę, optymalizację i porównawczą ewaluację różnych algorytmów SLAM w realistycznych scenariuszach lotu. Następnym celem jest opracowanie warstwy inteligentnej personalizacji obejmującej identyfikację użytkownika na podstawie multimodalnych danych behawioralnych oraz predykcję retencji pamięci z wykorzystaniem modeli głębokiego uczenia. Praca ma również na celu redukcję opóźnień, błędów śledzenia i zjawiska choroby symulacyjnej, a tym samym zwiększenie immersyjności i efektywności szkolenia pilotów. Dodatkowym celem jest stworzenie ogólnych ram metodologicznych i projektowych, które mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w lotnictwie, lecz także w innych dziedzinach wymagających precyzyjnego mapowania przestrzennego i adaptacyjnej interakcji człowiek–system.

W mojej ocenie cele pracy zostały zrealizowane w prawidłowy sposób.

1e) wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

W pracy zastosowano zintegrowane podejście badawcze łączące analizę literatury, projektowanie systemowe, eksperymenty laboratoryjne oraz zaawansowaną analizę statystyczną i modelowanie algorytmiczne. W pierwszym etapie przeprowadzono systematyczny przegląd istniejących metod śledzenia głowy w AR, obejmujący techniki markerowe, inercyjne oraz podejścia bezmarkerowe, co pozwoliło zidentyfikować ograniczenia technologiczne i sformułować założenia projektowe dla systemu opartego na SLAM. Następnie zaimplementowano i przetestowano wybrane algorytmy SLAM (m.in. ORB-SLAM, RGB-D SLAM, VINS), analizując ich dokładność mapowania, stabilność trajektorii oraz odporność na zakłócenia w środowisku kokpitu symulatora lotu.

Kluczową metodą badawczą była eksperymentalna ewaluacja porównawcza systemów śledzenia markerowego i SLAM, obejmująca kalibrację kamer, analizę przepływu danych oraz pomiar metryk ilościowych, takich jak błąd średniokwadratowy (RMSE), opóźnienie systemowe, stabilność pozycji i orientacji oraz odporność na zasłanianie. W zakresie estymacji stanu zastosowano i porównano różne techniki filtracji, w tym rozszerzony filtr Kalmana (EKF), filtr bezzapachowy (UKF), filtr zespołowy (EnKF) oraz filtry cząsteczkowe (SIR, APF), a następnie opracowano adaptacyjną metodę fuzji filtrów Kalmana i cząsteczkowych (AKPF), weryfikowaną w warunkach dynamicznych i nieliniowych.

W obszarze interakcji człowiek–system wykorzystano eksperymenty użytkowników oraz modelowanie matematyczne oparte na zmodyfikowanym

prawie Fittsa dla środowisk trójwymiarowych AR, uwzględniające orientację głowy i zakotwiczenie przestrzenne obiektów. Do analizy danych zastosowano metody statystyczne, w tym testy istotności, analizę wariancji oraz wielowymiarową ocenę wydajności interakcji.

W części dotyczącej sztucznej inteligencji wykorzystano metody uczenia głębokiego, w szczególności wielomodalne sieci LSTM do identyfikacji użytkownika na podstawie sekwencji czasowych ruchów głowy, spojrzeń i gestów rąk, oceniane przy użyciu miar takich jak *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score* i *balanced accuracy*. Dodatkowo opracowano model predykcji retencji pamięci oparty na sieciach DNN, trenowany na nieinwazyjnych danych behawioralnych, którego skuteczność zweryfikowano eksperymentalnie i statystycznie. Całość badań miała charakter empiryczno-algorytmiczny, łączący implementację systemu w środowisku AR z walidacją ilościową i analizą porównawczą.

Uważam, że metody badawcze zostały zastosowane w prawidłowy sposób.

1f) ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Wyniki badań potwierdziły istotną statystycznie poprawę dokładności i stabilności śledzenia głowy dzięki zastosowaniu podejścia opartego na SLAM oraz adaptacyjnej fuzji filtrów Kalmana i cząsteczkowych, co przełożyło się na redukcję błędu RMSE i opóźnień systemowych. Analiza porównawcza wykazała przewagę metod SLAM nad technikami markerowymi w zakresie odporności na zasłanianie, dryf oraz zmienne warunki środowiskowe kokpitu. Modele uczenia głębokiego osiągnęły wysoką skuteczność w identyfikacji użytkownika i predykcji retencji pamięci, potwierdzając możliwość adaptacyjnej personalizacji procesu szkoleniowego. Całościowa ocena wskazuje, że zaproponowana architektura znacząco zwiększa immersyjność, komfort użytkowania i efektywność szkolenia pilotów, przy zachowaniu wykonalności obliczeniowej w czasie rzeczywistym.

W mojej ocenie prace merytoryczne zostały przeprowadzone i opisane prawidłowo. Autor szczegółowo opisał metody, w wielu przypadkach zostały one zilustrowane za pomocą obrazów i tabel.

1g) informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Opracowany system oparty na SLAM i adaptacyjnej fuzji filtrów może zostać zintegrowany z komercyjnymi i wojskowymi platformami szkoleniowymi, zwiększając realizm odwzorowania kokpitu, redukując chorobę symulacyjną oraz poprawiając efektywność długotrwałych sesji treningowych. Warstwa identyfikacji użytkownika i predykcji retencji pamięci umożliwia wdrożenie spersonalizowanych, adaptacyjnych scenariuszy szkoleniowych, automatyczne dostosowanie poziomu trudności oraz ciągłe uwierzytelnianie bez przerywania procesu nauki, co ma istotne znaczenie w środowiskach o podwyższonych wymaganiach bezpieczeństwa.

Potencjał aplikacyjny wykracza poza lotnictwo załogowe i obejmuje szkolenia operatorów bezzałogowych statków powietrznych (UAV), zarządzanie ruchem lotniczym, symulacje wojskowe oraz systemy wsparcia decyzji w środowiskach o wysokiej złożoności operacyjnej. Rozwiązanie może być również implementowane w medycynie (symulatory zabiegowe), przemyśle (szkolenia serwisowe i montażowe) oraz edukacji STEM, gdzie wymagane jest precyzyjne mapowanie przestrzenne i interakcja z obiektami 3D. Adaptacja prawa Fittsa do środowisk AR dostarcza praktycznych wytycznych projektowych dla ergonomii interfejsów przestrzennych, co może być wykorzystane przez producentów systemów AR i twórców oprogramowania. Skalowalność architektury, zgodność z urządzeniami klasy HMD oraz możliwość pracy w czasie rzeczywistym wskazują na dosyć wysoki poziom gotowości technologicznej rozwiązania i jego realny potencjał wdrożeniowy

1h) informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Nie zidentyfikowano poważniejszych nieprawidłowości w rozprawie.

1i) ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Praca stanowi rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego polegającego na zapewnieniu wysokiej precyzji, stabilności i adaptacyjności śledzenia głowy w środowiskach symulacji lotu opartych na rzeczywistości rozszerzonej. Oryginalność rozprawy przejawia się w integracji technologii SLAM z autorską, adaptacyjną metodą fuzji filtrów Kalmana i cząsteczkowych, co pozwoliło skutecznie rozwiązać problem nieliniowej dynamiki i zakłóceń pomiarowych w czasie rzeczywistym. Nowatorskim wkładem jest również połączenie wysokiej wierności mapowania przestrzennego z warstwą inteligentnej identyfikacji użytkownika oraz predykcji retencji pamięci w jednym, spójnym systemie AR. Zaproponowane podejście rozszerza dotychczasowe rozwiązania markerowe i inercyjne, oferując ugruntowane eksperymentalnie usprawnienia w zakresie dokładności, immersyjności i ergonomii interakcji. Biorąc pod uwagę wszystkie składowe uważam, że oceniana rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

1j) ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

W mojej ocenie praca wpisuje się w dyscyplinę informatyka techniczna i telekomunikacja i napisana jest poprawnie z punktu widzenia metodyki. Autor wykazał się zarówno wiedzą teoretyczną i praktycznymi umiejętnościami w zakresie analizy danych i tworzenia algorytmiki.

Uwagi:

Poniżej przedstawiono uwagi i pytania dotyczące strony merytorycznej pracy:

1. Autor jest proszony o odniesienie się do kwestii skalowalności obliczeniowej i problemu zachowania reżimu czasu rzeczywistego. Jak można zrealizować w praktyce dalsze ograniczenie złożoności obliczeniowej algorytmów SLAM?
2. Jak można poprawić dalej odporność na warunki skrajne i tzw. degradację sensoryczną? W szczególności stabilności systemu w sytuacjach silnych wibracji, zmiennego oświetlenia, częściowego zasłonięcia pola widzenia czy chwilowej utraty danych z czujników.
3. Proszę o odniesienie się do kwestii potencjalnego rozwoju procedur walidacji warstwy identyfikacji użytkownika i predykcji retencji pamięci na większych, bardziej zróżnicowanych populacjach, aby potwierdzić odporność modeli na nadmierne dopasowanie (overfitting) i zapewnić ich transferowalność między scenariuszami.
4. Autor jest proszony o odniesienie się do problemu standaryzacji metryk oceny immersji i potencjalnej choroby symulacyjnej. Jakie wskaźniki korelujące parametry techniczne z subiektywnymi odczuciami użytkowników, umożliwiłyby jednoznaczną kwantyfikację efektów ergonomicznych?
5. Jak zdaniem Autora powinny przebiegać kolejne fazy prac tzn. interoperacyjność z komercyjnymi i wojskowymi platformami symulacyjnymi, w tym standaryzację interfejsów API, zgodność z protokołami komunikacyjnymi oraz analizę bezpieczeństwa cybernetycznego systemu?
6. W rozdziale podsumowującym zabrakło mi podsumowania dotyczącego wkładu w dyscyplinę Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. To znaczy, z mojego punktu widzenia, brakuje konkretnie wylistowania wprost najważniejszych, szczegółowych osiągnięć pracy z punktu widzenia informatyki technicznej.

Wniosek końcowy

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej Kandydata w dyscyplinie naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Przedstawiona praca doktorska spełnia w pełni warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.). W szczególności zgodnie z wymaganiami ww. ustawy oceniana rozprawa pozytywnie prezentuje wiedzę teoretyczną Kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W opinii recenzenta praca może więc być dopuszczona do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Jarosław Wąs
jaroslaw.was@agh.edu.pl