

Dr hab. inż. Michał Tomaszewski
Kierownik Katedry Sztucznej Inteligencji
Politechnika Opolska, Wydział Informatyki
Ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
wpłynęło dnia 4.02.2026
nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Onyeki Josephine Nwobodo

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

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof A. Cyran, prof. uczelni

Przedłożona do oceny rozprawa p. mgr Onyeki Josephine Nwobodo dotyczy zagadnień śledzenia ruchów głowy w środowisku symulatora lotu z wykorzystaniem mechanizmów jednoczesnej lokalizacji i mapowania (SLAM) oraz technologii rozszerzonej rzeczywistości (Augmented Reality, AR). Praca koncentruje się na analizie, projektowaniu oraz eksperymentalnej weryfikacji algorytmów estymacji położenia i orientacji użytkownika w systemach szkoleniowych o podwyższonych wymaganiach dotyczących dokładności, stabilności i opóźnień czasowych.

Problematyka precyzyjnego śledzenia ruchów użytkownika w systemach AR od wielu lat stanowi przedmiot intensywnych badań naukowych, jednak obserwowany w ostatniej dekadzie wyraźny wzrost zainteresowania tą tematyką pozostaje w ścisłym związku z dynamicznym rozwojem technologii rzeczywistości rozszerzonej, metod fuzji sensorycznej oraz zaawansowanych algorytmów estymacji stanu. Rozwój platform sprzętowych, takich jak gogle AR nowej generacji, w połączeniu z postępem w zakresie algorytmów SLAM, uczenia maszynowego oraz przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym, otwiera nowe możliwości projektowania realistycznych, adaptacyjnych i bezpiecznych systemów symulacyjnych, w tym zaawansowanych symulatorów lotu wykorzystywanych w procesach szkoleniowych.

Pani mgr Onyeka Nwobodo jest doświadczonym badaczem z zaczynającym być zauważalnym dorobkiem publikacyjnym. W jej bibliografii można znaleźć artykuły naukowe potwierdzające znajomość tematu i wysoki poziom wiedzy eksperckiej z zakresu podejmowanego zagadnienia. Do najważniejszych prac Autorki mógłbym zaliczyć:

1. Nwobodo, O. J., Wereszczyński, K., & Cyran, K. (2023). A review on tracking head movement in augmented reality systems. *Procedia Computer Science*, 225, 4344-4353.
2. Nwobodo, O. J., Kuaban, G. S., Nkemeni, V., Wereszczyński, K., & Cyran, K. A. (2025). A Hybrid Adaptive Filter for Head Tracking in Augmented Reality (AR)-based Flight Simulators. *IEEE Transactions on Computers*.
3. Nwobodo, O. J., Wereszczyński, K., Kuaban, G. S., Skurowski, P., & Cyran, K. A. (2024). An adaptation of Fitts' Law for performance evaluation and optimization of augmented reality (AR) interfaces. *IEEE Access*, 12, 169614-169627.

W dniu pisania recenzji p. mgr Onyeka Nwobodo ma 29 cytowań i indeks Hirscha $h=4$ według Scopus.

1. Przedmiot, cel i zakres rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy zagadnień precyzyjnego śledzenia ruchów głowy w środowisku symulatora lotu z wykorzystaniem technologii rozszerzonej rzeczywistości. Praca koncentruje się na problemie niskolatencyjnego, stabilnego i odpornego na zakłócenia śledzenia pozycji i orientacji głowy użytkownika, co stanowi kluczowy element realizmu i ergonomii w szkoleniowych systemach symulacyjnych dla lotnictwa.

Głównym celem rozprawy jest opracowanie oraz eksperymentalna weryfikacja zaawansowanych metod śledzenia ruchów głowy w symulatorach lotu opartych na AR, ze szczególnym uwzględnieniem technik SLAM oraz adaptacyjnej fuzji filtrów Kalmana i filtrów cząsteczkowych. Autorka stawia sobie za zadanie poprawę dokładności, stabilności oraz redukcję opóźnień systemowych w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami markerowymi i inercyjnymi.

Zakres pracy obejmuje zarówno analizę stanu wiedzy w obszarze AR, SLAM i systemów śledzenia ruchu, jak i opracowanie własnych rozwiązań algorytmicznych, ich implementację na platformie Microsoft HoloLens 2 oraz szeroko zakrojone badania eksperymentalne. Praca zawiera również rozdziały rozszerzające, prezentujące zastosowania sztucznej inteligencji w identyfikacji użytkowników, modelowaniu stanu poznawczego oraz wizualizacji procesów edukacyjnych w środowiskach AR.

2. Struktura i organizacja pracy

Rozprawa ma strukturę logiczną i przejrzystą, obejmującą dziesięć rozdziałów merytorycznych. W rozdziale pierwszym Autorka wprowadza czytelnika w tematykę pracy, formułuje problem badawczy, cele oraz pytania badawcze. Rozdziały drugi i trzeci stanowią obszerny przegląd literatury dotyczącej technik śledzenia ruchów głowy w systemach AR oraz metod SLAM stosowanych w symulacji lotniczej.

Rozdział czwarty poświęcony jest analizie porównawczej metod markerowych i SLAM-owych w kontekście zaawansowanych symulatorów AR. Rozdział piąty przedstawia adaptację prawa Fittsa do interakcji w trójwymiarowych środowiskach AR. Kluczowy dla rozprawy rozdział szósty zawiera autorskie rozwiązanie w postaci adaptacyjnej fuzji filtrów Kalmana i filtrów cząsteczkowych (Adaptive Kalman–Particle Filter, AKPF) wraz z obszerną walidacją eksperymentalną.

Rozdziały siódmy, ósmy i dziewiąty mają charakter aplikacyjno-rozszerzający i prezentują wykorzystanie metod uczenia maszynowego do identyfikacji użytkowników, predykcji stanów poznawczych oraz wizualizacji zagadnień dydaktycznych w AR. Rozprawę zamyka rozdział podsumowujący wraz z wnioskami i kierunkami dalszych badań.

3. Ocena aktualności i zasadności podjętego tematu

Tematyka rozprawy jest aktualna i istotna zarówno z punktu widzenia badań naukowych, jak i zastosowań praktycznych. Problemy precyzyjnego śledzenia ruchów głowy, redukcji opóźnień oraz stabilności wizualizacji należą do kluczowych wyzwań współczesnych systemów AR, szczególnie w zastosowaniach o wysokich wymaganiach bezpieczeństwa, takich jak szkolenia lotnicze.

Integracja technologii SLAM z adaptacyjną fuzją filtrów estymacyjnych stanowi odpowiedź na realne ograniczenia klasycznych systemów markerowych i inercyjnych. Z tego względu wybór tematu należy ocenić jako w pełni uzasadniony i dobrze wpisujący się w zakres dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom merytoryczny i obejmuje szerokie spektrum zagadnień z zakresu systemów rozszerzonej rzeczywistości, estymacji stanu, przetwarzania sygnałów oraz algorytmów śledzenia ruchu w czasie rzeczywistym. Autorka konsekwentnie realizuje postawione cele badawcze, przechodząc od analizy rozwiązań klasycznych do opracowania i walidacji własnych metod algorytmicznych.

Rozdział czwarty zawiera poprawnie zaprojektowaną analizę porównawczą systemów markerowych i SLAM-owych. Autorka stosuje standardowe i powszechnie akceptowane metryki jakościowe, takie jak: dokładność, precyzja, średni błąd bezwzględny, odchylenie standardowe błędów oraz opóźnienie systemowe.

Na uwagę zasługuje również próba ujęcia adaptowalności systemów poprzez wprowadzenie wskaźnika Scenario Versatility Index. Pewnym ograniczeniem tej części pracy jest natomiast brak formalnej, jednoznacznej definicji wskaźnika określanego jako Cognitive Skills Improvement Factor, który pojawia się w zestawieniach tabelarycznych oraz w podsumowaniach, lecz nie został dostatecznie zoperacjonalizowany metodologicznie. Utrudnia to pełną ocenę replikowalności i interpretowalności uzyskanych wyników.

Rozdział szósty stanowi zasadniczy i najważniejszy element rozprawy. Przedstawiono w nim autorską metodę adaptacyjnej fuzji filtrów Kalmana i filtrów cząsteczkowych, której celem jest uzyskanie kompromisu pomiędzy niską latencją a wysoką odpornością na nieliniowości i zakłócenia pomiarowe. Na szczególne podkreślenie zasługuje:

- analiza porównawcza wielu wariantów filtrów (EKF, UKF, EnKF, SIR, UPF, APF),
- implementacja algorytmów w rzeczywistym środowisku AR (HoloLens 2),
- szeroki zestaw metryk obejmujących dokładność pozycji i orientacji, opóźnienia oraz ich wariancję,
- zastosowanie adaptacyjnych mechanizmów doboru parametrów filtrów.

Rozdziały siódmy, ósmy i dziewiąty rozszerzają zasadniczy nurt rozprawy, prezentując możliwości wykorzystania opracowanej platformy AR w zadaniach identyfikacji użytkownika, modelowania stanu poznawczego oraz wizualizacji procesów dydaktycznych. Choć rozdziały te mają w większym stopniu charakter aplikacyjny i eksploracyjny, dobrze ilustrują potencjał opracowanych metod i pokazują, że zaproponowane rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie również poza wąsko rozumianą symulacją lotniczą. Rozdziały te zwiększają zakres aplikacyjny pracy, jednak ich walidacja – zwłaszcza w kontekście psychologicznym i dydaktycznym – ma charakter wstępny. Należy je traktować raczej jako ilustrację potencjału systemu niż jako równorzędny wkład metodologiczny w stosunku do rozdziału szóstego.

Całościowo należy stwierdzić, że rozprawa stanowi spójne, technicznie dojrzałe i metodologicznie poprawne opracowanie, a przedstawione rozwiązania są adekwatne do problemów badawczych sformułowanych we wstępie pracy.

5. Ocena metodologii badań

Metody badawcze zastosowane w rozprawie są zasadniczo poprawne i adekwatne do postawionych celów. Autorka stosuje uznane miary jakości estymacji (RMSE, MAE, latency), przeprowadza powtarzalne eksperymenty oraz analizuje kompromisy pomiędzy dokładnością a kosztami obliczeniowymi.

Pewnym ograniczeniem jest stosunkowo niewielka liczebność próby użytkowników oraz uproszczone środowisko testowe w postaci syntetycznych obiektów (np. sześciąt). Ograniczenia te są jednak typowe dla badań prototypowych w AR i zostały w pracy w znacznej mierze świadomie zaakceptowane.

6. Wkład naukowy rozprawy

Za najważniejsze osiągnięcia i wkład naukowy rozprawy należy uznać:

1. Opracowanie adaptacyjnej metody fuzji filtrów Kalmana i filtrów cząsteczkowych dla precyzyjnego śledzenia ruchów głowy w środowiskach AR.
2. Kompleksową analizę porównawczą metod markerowych i SLAM-owych w kontekście symulacji lotniczej.
3. Adaptację prawa Fittsa do interakcji przestrzennych w środowiskach AR.
4. Demonstrację możliwości rozszerzenia platformy AR o elementy personalizacji, uczenia maszynowego i wsparcia procesów poznawczych.

7. Uwagi krytyczne i pytania do doktoranta

1. Wskaźnik poprawy zdolności poznawczych (Cognitive Skills Improvement Factor)

W rozprawie wprowadzono wskaźnik określany jako Cognitive Skills Improvement Factor, który pojawia się zarówno w zestawieniach tabelarycznych, jak i w części interpretacyjnej wyników. Wskaźnik ten odgrywa istotną rolę w porównaniu efektywności systemów markerowych i SLAM oraz wnioskowaniu o wpływie technologii AR na proces uczenia się i rozwój kompetencji użytkowników. W jaki sposób wskaźnik ten został formalnie zdefiniowany, tzn. jakie konkretne zmienne wejściowe oraz procedury obliczeniowe zastosowano i w jaki sposób zapewniono ich porównywalność pomiędzy badanymi metodami?

2. Interpretacja bardzo wysokich wyników skuteczności w rozdziałach 7–9

W rozdziałach poświęconych identyfikacji użytkownika, modelowaniu stanu poznawczego oraz predykcji zapamiętywania raportowane są bardzo wysokie wartości dokładności i skuteczności modeli opartych na metodach uczenia głębokiego. Wyniki te sugerują bardzo dobrą separowalność klas oraz wysoką stabilność predykcji, co w kontekście badań behawioralnych bywa trudne do osiągnięcia. Pojawia się pytanie w jakim stopniu uzyskane wyniki mogą być uwarunkowane specyfiką danych eksperymentalnych (liczebność próby, jednorodność grupy badawczej, kontrolowane warunki testowe)? Jak autorka ocenia potencjalne ryzyko nadmiernego dopasowania

modeli oraz możliwość pogorszenia skuteczności w warunkach bardziej zróżnicowanych danych?

3. **Parametr α w algorytmie fuzji filtrów**

W Algorytmie 2 parametr α występuje jako współczynnik wagowy łączący estymaty filtru Kalmana i filtru cząsteczkowego w procesie fuzji. Jednocześnie w części eksperymentalnej parametr α pojawia się również jako parametr rozrzutu punktów sigma w Unscented Kalman Filter, co może prowadzić do niejednoznaczności interpretacyjnej. Proszę o doprecyzowanie relacji pomiędzy tymi parametrami oraz uzasadnić przyjętą notację. Czy współczynnik fuzji był ustalany empirycznie jako stały, czy też adaptowany dynamicznie na podstawie bieżących miar niepewności estymacji?

4. **Wyniki z zerową wartością błędu RMSE (RMSE = 0)**

W przedstawionych wynikach eksperymentalnych, w szczególności w odniesieniu do wybranych filtrów (np. APF oraz niektórych wariantów filtrów zespolonych), raportowane są zerowe wartości błędu RMSE zarówno dla pozycji, jak i orientacji. Takie wyniki są rzadko spotykane w praktycznych systemach śledzenia ruchu, zwłaszcza w obecności szumu pomiarowego i ograniczeń sprzętowych. Czy wyniki te należy rozumieć jako efekt specyficznego sposobu wyznaczania trajektorii referencyjnej, uproszczonego scenariusza testowego lub zastosowanego modelu symulacyjnego?

5. **Dobór i stabilność parametrów filtrów adaptacyjnych**

W pracy zastosowano mechanizmy adaptacyjnego doboru parametrów filtrów, takich jak liczba cząstek, macierze szumu procesowego oraz pomiarowego. Rozwiązanie to stanowi jeden z kluczowych elementów proponowanej metody i ma bezpośredni wpływ na stabilność estymacji. Jak autorka ocenia stabilność zaproponowanego mechanizmu adaptacji w długotrwałych sesjach symulacyjnych? Czy obserwowano sytuacje prowadzące do oscylacji parametrów, degradacji jakości estymacji lub przejściowej niestabilności algorytmu?

6. **Uproszczony charakter scenariuszy testowych**

W części eksperymentalnej do oceny jakości śledzenia ruchu głowy zastosowano uproszczone obiekty wizualne (np. sześcian), pełniły one rolę reprezentacji elementów środowiska AR. Takie podejście ułatwia analizę błędów i stabilności algorytmów, lecz upraszcza rzeczywistą złożoność kokpitu lotniczego. Czy spodziewane jest istotne pogorszenie skuteczności algorytmu w bardziej złożonych, wizualnie bogatych scenariuszach symulacji lotniczej?

7. **Zakres generalizacji zaproponowanego podejścia**

Autorka wskazuje możliwość zastosowania opracowanych metod poza lotnictwem, m.in. w medycynie, przemyśle oraz systemach edukacyjnych. Które elementy zaproponowanego algorytmu AKPF są specyficzne dla symulacji lotniczej, a które można bezpośrednio przenieść do innych domen aplikacyjnych? Jakich modyfikacji wymagałyby

algorytm w przypadku istotnie odmiennych profili ruchu i charakterystyki interakcji użytkownika?

8. Uwagi redakcyjne i edytorskie

W rozprawie można również wskazać pewne drobne problemy redakcyjne, które mają charakter formalny i stylistyczny, lecz nie wpływają na ocenę wartości naukowej pracy. Do najważniejszych należą:

- niejednolite stosowanie jednostek miar; w różnych fragmentach pracy te same wielkości (np. błędy położenia, opóźnienia czasowe czy miary dokładności estymacji) prezentowane są w odmiennych jednostkach lub skalach (np. metry i centymetry, milisekundy i sekundy), nie zawsze z wyraźnym wskazaniem przyjętej konwencji. Może to utrudniać bezpośrednie porównanie wyników pomiędzy rozdziałami i tabelami, zwłaszcza w części dotyczącej analizy ilościowej i porównań algorytmicznych,
- miejscowe niespójności w oznaczeniach matematycznych (np. wieloznaczne użycie tych samych symboli),
- sporadyczne powtórzenia treści opisowych pomiędzy rozdziałami o charakterze przeglądowym i dyskusyjnym,
- drobne niejednolitości terminologiczne (np. równoległe stosowanie pojęć „latency” i „response delay” bez jednoznacznego rozróżnienia),
- pojedyncze błędy językowe i składniowe typowe dla obszernej pracy przygotowanej w języku angielskim.

Uwagi te mają charakter redakcyjny i nie podważają ani poprawności metodologicznej, ani oryginalności zaproponowanych rozwiązań.

9. Konkluzja i wniosek końcowy

Moja ocena rozprawy doktorskiej p. mgr Onyeki Josephine Nwobodo jest **pozytywna**. Przedłożona rozprawa doktorska podejmuje aktualną i istotną problematykę z pogranicza informatyki technicznej, systemów immersyjnych oraz teleinformatycznych metod przetwarzania danych sensorycznych. Tematyka pracy wpisuje się w dyscyplinę informatyka techniczna i telekomunikacja, a zakres poruszanych zagadnień odpowiada współczesnym kierunkom rozwoju technologii rzeczywistości rozszerzonej, systemów śledzenia ruchu oraz inteligentnych metod analizy interakcji człowiek–system.

Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością literatury przedmiotu oraz aktualnego stanu badań, zarówno w zakresie klasycznych metod estymacji stanu, jak i nowoczesnych podejść opartych na fuzji sensorów oraz algorytmach uczenia maszynowego. Szczególną wartość pracy stanowi zaproponowany adaptacyjny algorytm fuzji filtrów Kalmana i filtrów cząsteczkowych, którego konstrukcja została szczegółowo uzasadniona teoretycznie i zweryfikowana eksperymentalnie w realistycznym środowisku systemu AR.

Na podkreślenie zasługuje również szeroki zakres badań eksperymentalnych, obejmujący zarówno analizę dokładności i opóźnień systemu śledzenia ruchu głowy, jak i ocenę aspektów poznawczych oraz interakcyjnych użytkowników. Zaprezentowane wyniki potwierdzają wysoką skuteczność zaproponowanych rozwiązań, a sformułowane w pracy wnioski są w większości logicznie uzasadnione i spójne z przedstawionym materiałem badawczym.

Zgłoszone w recenzji uwagi krytyczne dotyczą głównie doprecyzowania wybranych definicji, interpretacji niektórych wyników ilościowych oraz kwestii związanych z uogólnialnością i replikowalnością badań. Uwagi te nie podważają jednak zasadniczej wartości naukowej rozprawy i mają charakter dyskusyjny lub uzupełniający, typowy dla rozpraw doktorskich o znacznym stopniu złożoności technicznej.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr Onyeki Josephine Nwobodo spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668), dlatego zwracam się do Wysokiej Rady Dyscypliny Informatyki Technicznej i Telekomunikacji Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr Onyeki Josephine Nwobodo do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Opole, 27.01.2026 r.

Review of the Doctoral Dissertation: MSc Onyeka Josephine Nwobodo

Dissertation title: Tracking Head Movements in a Flight Simulator Environment using SLAM Mechanism of Augmented Reality Goggles

Supervisor: PhD DSc (Eng.) Krzysztof A. Cyran, University Professor

The doctoral dissertation submitted for review by Ms. Onyeka Josephine Nwobodo, MSc, addresses the problem of head-motion tracking in a flight simulator environment using Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) mechanisms and Augmented Reality (AR) technology. The work focuses on the analysis, design, and experimental verification of algorithms for estimating the user's position and orientation in training systems with elevated requirements regarding accuracy, stability, and time delays.

The problem of precise user-motion tracking in AR systems has been the subject of intensive scientific research for many years. However, the clearly increased interest observed over the last decade is closely linked to the dynamic development of augmented reality technologies, sensor fusion methods, and advanced state-estimation algorithms. The development of hardware platforms such as next-generation AR headsets, combined with advances in SLAM algorithms, machine learning, and real-time signal processing, opens new possibilities for designing realistic, adaptive, and safe simulation systems, including advanced flight simulators used in training.

Ms. Onyeka Nwobodo is an experienced researcher with a growing publication record. Her bibliography includes scientific papers that confirm her familiarity with the topic and a high level of expertise in the addressed area. Among her most important works, I would list:

- Nwobodo, O. J., Wereszczyński, K., & Cyran, K. (2023). A review on tracking head movement in augmented reality systems. *Procedia Computer Science*, 225, 4344–4353.
- Nwobodo, O. J., Kuaban, G. S., Nkemeni, V., Wereszczyński, K., & Cyran, K. A. (2025). A Hybrid Adaptive Filter for Head Tracking in Augmented Reality (AR)-based Flight Simulators. *IEEE Transactions on Computers*.
- Nwobodo, O. J., Wereszczyński, K., Kuaban, G. S., Skurowski, P., & Cyran, K. A. (2024). An adaptation of Fitts' Law for performance evaluation and optimization of augmented reality (AR) interfaces. *IEEE Access*, 12, 169614–169627.

On the day this review was written, Ms. Onyeka Nwobodo had 29 citations and an h-index of 4 according to Scopus.

1. Subject, objectives and scope of the dissertation

The submitted doctoral dissertation concerns precise head-motion tracking in a flight simulator environment using augmented reality technology. The work focuses on the problem of low-latency, stable, and disturbance-resistant tracking of the user's head position and orientation, which is a key factor for realism and ergonomics in aviation training simulation systems.

The main objective of the dissertation is to develop and experimentally verify advanced methods for head-motion tracking in AR-based flight simulators, with particular emphasis on SLAM techniques and on the adaptive fusion of Kalman and particle filters. The author aims to improve accuracy and stability, and to reduce system delays compared to classical marker-based and inertial solutions.

The scope of the work includes both an analysis of the state of the art in AR, SLAM, and motion-tracking systems, and the development of original algorithmic solutions, their implementation on the Microsoft HoloLens 2 platform, and extensive experimental studies. The dissertation also includes additional chapters that present applications of artificial intelligence in user identification, cognitive-state modelling, and the visualization of educational processes in AR environments.

2. Structure and organization of the dissertation

The dissertation has a logical and clear structure comprising ten substantive chapters. In Chapter 1, the author introduces the topic, formulates the research problem, objectives, and research questions. Chapters 2 and 3 provide an extensive literature review on head-motion tracking techniques in AR systems and SLAM methods applied in aviation simulation.

Chapter 4 is devoted to a comparative analysis of marker-based and SLAM-based methods for advanced AR simulators. Chapter 5 presents an adaptation of Fitts' law to interaction in three-dimensional AR environments. Chapter 6, the key chapter, contains the author's original solution in the form of an Adaptive Kalman–Particle Filter (AKPF), together with extensive experimental validation.

Chapters 7, 8, and 9 are application-oriented extensions that present the use of machine learning methods for user identification, cognitive state prediction, and the visualization of didactic topics in AR. The dissertation concludes with a summary chapter containing conclusions and directions for further research.

3. Assessment of the timeliness and relevance of the topic

The dissertation topic is timely and important both from the perspective of scientific research and practical applications. Problems of precise head-motion tracking, delay reduction, and visualization stability are among the key challenges of modern AR systems, especially in safety-critical applications such as aviation training.

The integration of SLAM technology with adaptive filter fusion addresses the real limitations of classical marker-based and inertial systems. Therefore, the choice of the topic should be assessed as fully justified and well aligned with the discipline of technical computer science and telecommunications.

4. Substantive assessment of the dissertation

The dissertation demonstrates a high level of substantive rigor and covers a wide range of topics related to augmented reality systems, state estimation, signal processing, and real-time motion-tracking algorithms. The author consistently pursues the stated research objectives, moving from an analysis of classical solutions to the development and validation of her own algorithmic methods.

Chapter 4 presents a well-designed comparative analysis of marker-based and SLAM-based systems. The author applies widely accepted quality metrics, including accuracy, precision, mean absolute error, standard deviation of error, and system latency.

Noteworthy is also the attempt to capture system adaptability through the introduction of the Scenario Versatility Index. A limitation of this part of the work is the absence of a formal, unambiguous definition of the indicator referred to as the Cognitive Skills Improvement Factor, which appears in tabular summaries and in the interpretation of results, but has not been sufficiently operationalized methodologically. This hinders a full assessment of the replicability and interpretability of the obtained results.

Chapter 6 constitutes the core and most important element of the dissertation. It presents an original adaptive fusion method combining Kalman and particle filters, aiming to achieve a compromise between low latency and high robustness to nonlinearities and measurement disturbances. The following aspects deserve particular emphasis:

- comparative analysis of multiple filter variants (EKF, UKF, EnKF, SIR, UPF, APF),
- implementation of the algorithms in a real AR environment (HoloLens 2),
- a broad set of metrics including position and orientation accuracy, delays, and delay variance,
- use of adaptive mechanisms for tuning filter parameters.

Chapters 7, 8, and 9 extend the main line of the dissertation by presenting possibilities of using the developed AR platform for user identification, cognitive-state modelling, and visualization of educational processes. Although these chapters are more application-oriented and exploratory, they illustrate well the potential of the developed methods and show that the proposed solutions may be applicable beyond narrowly understood aviation simulation. These chapters broaden the dissertation's application scope; however, their validation - especially in the psychological and didactic contexts - remains preliminary. They should be treated rather as an illustration of system potential than as a methodological contribution comparable to that of Chapter 6.

Overall, the dissertation is a coherent, technically mature, and methodologically sound study, and the presented solutions are adequate to the research problems formulated in the introduction.

5. Assessment of the research methodology

The research methods used in the dissertation are generally correct and adequate for the stated objectives. The author applies recognized estimation-quality measures (RMSE, MAE, latency), conducts repeatable experiments, and analyzes trade-offs between accuracy and computational costs.

A limitation is the relatively small number of users and the simplified test environment, which uses synthetic objects (e.g., a cube). However, such limitations are typical for prototype AR studies and are, to a considerable extent, consciously accepted in the dissertation.

6. Scientific contribution of the dissertation

The most important achievements and scientific contributions of the dissertation include:

1. Development of an adaptive fusion method combining Kalman filters and particle filters for precise head-motion tracking in AR environments.

2. A comprehensive comparative analysis of marker-based and SLAM-based methods in the context of aviation simulation.
3. Adaptation of Fitts' law to spatial interaction in AR environments.
4. Demonstration of the possibility of extending the AR platform with personalization, machine learning, and cognitive-support components.

7. Critical remarks and questions to the doctoral candidate

1. Cognitive Skills Improvement Factor

The dissertation introduces an indicator referred to as the Cognitive Skills Improvement Factor, which appears both in tabular summaries and in the interpretative part of the results. This indicator plays an important role in comparing the effectiveness of marker-based and SLAM-based systems and in reasoning about the impact of AR technology on learning and competence development. How was this indicator formally defined, i.e., what specific input variables and computational procedures were used, and how was their comparability across the evaluated methods ensured?

2. Interpretation of very high performance results in Chapters 7–9

In the chapters devoted to user identification, cognitive-state modelling, and memory prediction, very high accuracy and performance are reported for models based on deep learning methods. These results suggest very good class separability and high prediction stability, which can be difficult to achieve in behavioural studies. To what extent could the obtained results be conditioned by the specifics of the experimental data (sample size, homogeneity of the study group, controlled test conditions)? How does the author assess the potential risk of overfitting and the possibility of performance degradation under more diverse data conditions?

3. Parameter α in the filter fusion algorithm

In Algorithm 2, parameter α serves as a weighting coefficient that combines the Kalman filter and particle filter estimates during the fusion process. At the same time, in the experimental section, parameter α also appears as the sigma-point spread parameter in the Unscented Kalman Filter, which may lead to ambiguity in interpretation. Please clarify the relationship between these parameters and justify the adopted notation. Was the fusion coefficient determined empirically as a constant, or was it dynamically adapted based on current uncertainty measures?

4. Results with RMSE = 0

In the presented experimental results, in particular for selected filters (e.g., APF and some fused filter variants), zero values of RMSE are reported for both position and orientation. Such results are rarely observed in practical motion-tracking systems, especially in the presence of measurement noise and hardware limitations. Should these results be understood as an effect of a specific way of defining the reference trajectory, a simplified test scenario, or the applied simulation model?

5. Selection and stability of adaptive filter parameters

The dissertation uses mechanisms for adaptive selection of filter parameters, such as the number of particles and process/measurement noise matrices. This solution is a key element of the proposed method and directly affects estimation stability. How does the author assess the stability of the proposed adaptation mechanism during long simulation sessions? Were situations observed that led to parameter oscillations, degradation of estimation quality, or temporary algorithm instability?

6. Simplified nature of the test scenarios

In the experimental part, simplified visual objects (e.g., a cube) were used to evaluate head-motion tracking quality, serving as representations of AR environment elements. Such an approach facilitates analysis of errors and algorithm stability, but it simplifies the real complexity of an aircraft cockpit. Is a significant degradation of algorithm performance expected in more complex, visually rich aviation simulation scenarios?

7. Scope of generalization of the proposed approach

The author indicates the possibility of applying the developed methods beyond aviation, including medicine, industry, and educational systems. Which elements of the proposed AKPF algorithm are specific to aviation simulation, and which could be directly transferred to other application domains? What modifications would be required if the motion profiles and user-interaction characteristics were substantially different?

8. Editorial and stylistic remarks

The dissertation also contains some minor editorial issues of a formal and stylistic nature, which do not affect the assessment of the scientific value of the work. The most important include:

- non-uniform use of measurement units; in different parts of the dissertation the same quantities (e.g., position errors, time delays, or estimation-accuracy measures) are presented in different units or scales (e.g., metres and centimetres, milliseconds and seconds), not always with a clearly stated convention. This may hinder direct comparison of results across chapters and tables, especially in the quantitative analysis and algorithmic comparisons,
- local inconsistencies in mathematical notation (e.g., ambiguous reuse of the same symbols),
- occasional repetition of descriptive content between review-type and discussion-type chapters,
- minor terminological inconsistencies (e.g., using “latency” and “response delay” in parallel without a clear distinction),
- isolated language and syntactic errors typical of a large dissertation prepared in English.

These remarks are editorial in nature and do not undermine either the methodological correctness or the originality of the proposed solutions.

9. Final conclusion and recommendation

My assessment of the doctoral dissertation of Ms. Onyeka Josephine Nwobodo, MSc, is **positive**. The submitted dissertation addresses a timely and important problem at the intersection of technical computer science, immersive systems, and teleinformatic methods for processing sensory data. The dissertation topic falls within the discipline of technical computer science and telecommunications, and the scope of the addressed issues aligns with contemporary directions in the development of augmented reality technologies, motion-tracking systems, and intelligent methods for analysing human–system interaction.

The author has demonstrated very good knowledge of the subject literature and the current state of research, both in classical state-estimation methods and in modern approaches based on sensor fusion and machine-learning algorithms. A particular value of the dissertation is the proposed adaptive fusion algorithm combining Kalman filters and particle filters, whose design is thoroughly justified theoretically and verified experimentally in a realistic AR system environment.

The breadth of the experimental research also deserves emphasis, covering both the analysis of the head-motion tracking system's accuracy and delays, and the assessment of cognitive and interaction aspects of users. The presented results confirm the high effectiveness of the proposed solutions, and the conclusions formulated in the dissertation are, in most cases, logically justified and consistent with the presented research material.

The critical remarks raised in this review mainly concern clarifying selected definitions, interpreting certain quantitative results, and issues related to generalization and replicability of the studies. These remarks do not undermine the fundamental scientific value of the dissertation and are of a discussion-oriented or supplementary nature, typical for doctoral dissertations of considerable technical complexity.

I consider that the doctoral dissertation of Ms. Onyeka Josephine Nwobodo fulfils the conditions specified in Article 187 of the Act of 20 July 2018 — Law on Higher Education and Science (Journal of Laws 2018, item 1668). Therefore, I request the High Council of the Discipline of Information and communication technology of the Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science, Silesian University of Technology, to admit Ms. Onyeka Josephine Nwobodo to further stages of the proceedings for awarding the doctoral degree.

Opole, 27.01.2026 r.