

Opole, 31.08.2023 r.

Recenzja pracy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Kolanowskiego pt.:
„WieloczuJNIKOWY NEURONOWY SYSTEM NAWIGACYJNY Z SAMOTESTOWANIEM”
przygotowanej pod kierunkiem promotora: dr hab. inż. Aleksandry ŚwIetlickiej oraz
promotora pomocniczego: dra inż. Rafała Kapeli w dyscyplinie: Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Recenzja została sporządzona w związku z powołaniem przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej w osobie przewodniczącego rady - prof. dra hab. inż. Wojciecha Szelaąg, zgodnie z uchwałą z dnia 21.06.2023 roku do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych panu mgr. inż. Krzysztofowi Kolanowskiemu.

Recenzja ta ma za zadanie zgodnie z art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (t.j. Dz.U. 2017 poz. 1789, dalej jako: u.s.n.), mającego zastosowanie w sprawie w związku z art. 175 ust. 1 Przepisów wprowadzających ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 3.7.2018 r. (Dz.U. 2018 r. poz. 1669) ocenić czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz dowodzi ogólnej wiedzy teoretycznej doktoranta w dyscyplinie, a także umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Kryteria określone w przepisach prawnych (art. 12 ust. 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym), które uzasadniają przyznanie stopnia doktora, można podzielić na dwie kategorie: formalne i merytoryczne.

Kryteria formalne wymagają posiadanie min. tytułu magistra lub równoważnego, zdanie egzaminów doktorskich, lecz wykraczają poza obszar oceny, którą dokonuje recenzent w procesie doktorskim. Jego uwaga koncentruje się na ocenie samej rozprawy doktorskiej, co jest kryterium merytorycznym, w którym należy ocenić czy praca przedstawia unikalne rozwiązanie problemu naukowego, ponadto, rozprawa powinna potwierdzać ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta w dyscyplinie oraz zdolność prowadzenia samodzielnej pracy badawczej.

W ramach niniejszej recenzji zostaną ocenione następujące punkty:

1. Trafność wyboru tematyki pracy doktorskiej.

Ad. 1. Temat niniejszej pracy brzmi: „Wieloczujnikowy neuronowy system nawigacyjny z samotestowaniem”. Przedstawiono w niej system nawigacyjny oparty na sieciach neuronowych, który ma za zadanie umożliwić przeprowadzenia samotestowania. Praca ta zawiera również analizę obecnej wiedzy na temat nawigacji i systemów nawigacyjnych, a także metod stosowanych w procesie samotestowania. Zastosowanie różnorodnych danych wejściowych i dążenie do bardziej autonomicznego rozwiązania problemu skłoniło autora pracy do wykorzystania sztucznych sieci neuronowych (SSN). Celem badań było również porównanie różnych struktur SSN pod kątem skuteczności w określaniu położenia kąтового w trójwymiarowej przestrzeni nawigacyjnej. Opracowany system umożliwia także testowanie poprzez wykrywanie niewłaściwego działania sensorów. W badaniach użyto zestawu czujników inercyjnych IMU 9-DoF, który zawiera akcelerometr, żyroskop i magnetometr. Autor zrealizował proces testowania poprzez k-krotną krosvalidację, gdzie różne struktury SSN były osobnymi jednostkami, a ostatnia warstwa sieci miała wykrywać potencjalne źródła awarii. W pracy doktorant porównał trzy rodzaje sieci neuronowych: jednokierunkowe, rekurencyjne i konwolucyjne. Dla każdego typu tych sieci przedstawił wyniki oceny przy różnych ustawieniach normalizacji, aby określić optymalne parametry minimalizujące błędy RMSE i NRMSE. Ponadto - dla osiągnięcia celów badawczych stworzono urządzenia do gromadzenia danych pomiarowych i wykorzystano system wizyjny OptiTrack.

W mojej ocenie – wybrany temat jest aktualny i istotny dla dyscypliny naukowej: **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.**

2. Realizacja celów oraz tez prac, a także wkład w dyscyplinę naukową.

Ad. 2. W pracy zostały postawione następujące tezy:

- Możliwe jest określenie położenia obiektu w przestrzeni na podstawie odczytów z wybranych czujników inercyjnych (akcelerometr, żyroskop) i magnetometru przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych.
- Możliwe jest wykrycie nieprawidłowego działania sensorów z wykorzystaniem systemu bazującego na sztucznych sieciach neuronowych.

Celem pracy było stworzenie i konfiguracja neuronowego systemu nawigacyjnego do określania położenia kąтового w trójwymiarowej przestrzeni. Istotnym aspektem było zaprojektowanie samotestującej funkcji do wykrywania awarii w zestawie czujników inercyjnych IMU, zawierającym akcelerometr, żyroskop i magnetometr w trzech osiach. Samotestowanie nie tylko pozwala na identyfikację nieprawidłowości, lecz także umożliwia sprecyzowanie źródła problemu sensorowego. Tematyka badawcza niniejszej rozprawy doktorskiej koncentrowała się na nawigacji, co miało za zadanie ułatwienie procesu zbierania danych i umożliwienie porównania z innymi systemami, takimi jak wizyjny system Opti-Track.

Na podstawie analizy materiału przedstawionego w pracy - wyniki przeprowadzonych przez autora eksperymentów jednoznacznie potwierdzają słuszność postawionych tez. Wybrane modele SSN skutecznie określały pozycję kątową w przestrzeni trójwymiarowej. Testowanie identyfikowało również źródła awarii, wykazując, które z dziewięciu sygnałów wejściowych jest odpowiedzialne za niewłaściwe działanie systemu nawigacyjnego.

Tematyka pracy ma charakter interdyscyplinarny, gdyż łączy w sobie dwie dyscypliny naukowe: Automatykę, Elektronikę, Elektrotechnikę i Technologie Kosmiczne z Informatyką Techniczną i Telekomunikacją.

W mojej opinii takie wyniki pozwalają wysnuć wniosek, że niniejsza rozprawa doktorska **spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim**. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki badań oraz wybrane metodologie i narzędzia badawcze, niniejsza praca w sposób istotny wpływa także na rozwój dyscypliny naukowej **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne**.

3. Struktura pracy

Ad. 3. W pracy przedstawiono system nawigacyjny oparty na sieciach neuronowych, który ma za zadanie umożliwić przeprowadzenie procesu samotestowania, a także zawarto analizę obecnej wiedzy na temat nawigacji i systemów nawigacyjnych. Praca składa się z **79** stron, wliczając stronę tytułową, spis treści, streszczenie (w języku polskim oraz angielskim), wykaz akronimów, literaturę, spis rysunków oraz spis tablic; podzielona została na **7** rozdziałów (wliczając literaturę). Praca zawiera **34** rysunki, **6** tablic oraz **105** pozycji literaturowych.

W rozdziale **pierwszym** zawarto wstęp, cele pracy oraz dwie tezy badawcze, a także opisano strukturę dokumentu. Rozdział **drugi** omawia systemy nawigacyjne. Rozdział **trzeci** omawia wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych (SSN). Wprowadza w krótką historię i podział metod uczenia maszynowego: nadzorowanego, nienadzorowanego oraz ze wzmocnieniem. Opisuje dostępne pre-trenowane struktury oraz charakteryzuje cztery rodzaje SSN używane w badaniach. Przedstawia wybrane struktury SSN wykorzystane w badaniach, a także metodykę k-krotnej walidacji i znaczenie macierzy kowariancji w wykrywaniu uszkodzeń. Rozdział **czwarty** prezentuje warstwę sprzętową badawczego systemu. Opisuje układy sensoryczne, ich właściwości oraz skład komponentów. Przedstawia dwa urządzenia do akwizycji danych, w tym wbudowany system akwizycji z opisem podzespołów i parametrów pomiarów. Pokazuje również drugie urządzenie jako implementację czujnika i systemu wbudowanego w układzie scalonym oraz jego integrację z systemem wizyjnym OptiTrack. Porównuje dane z systemu wizyjnego i fuzję sygnałów za pomocą oprogramowania SH-2. Opisuje algorytm fuzji danych pomiarowych AHRS oraz kroki obliczeniowe. W rozdziale **piątym** przedstawiono ewaluację wybranych sztucznych sieci neuronowych (SSN) przy użyciu systemu k-krotnej ewaluacji, służącego do zadania samotestowania i wykrywania nieprawidłowości w danych wejściowych. Opisano proces generowania danych, wykorzystując fuzję danych pomiarowych AHRS z algorytmem Mahoneya. Przedstawiono implementację fuzji danych za pomocą SSN typu

Elmana oraz porównano różne konfiguracje używane w badaniach. Dokonano oceny sieci jednokierunkowych, rekurencyjnych i konwolucyjnych do estymacji kątów Eulera. Ewaluacja systemu samotestowania obejmowała wyniki błędów RMSE oraz NRMSE dla różnych parametrów sieci konwolucyjnych. Przedstawiono tabelaryczne porównanie ewaluacji dla różnych rodzajów SSN oraz graficzne oceny samotestowania i wykrywania nieprawidłowości w danych sensorów. Rozdział **szósty** stanowi podsumowanie oraz spis osiągnięć publikacyjnych autora. Rozdział **siódmy** (nienumerowany) to literatura.

4. Uwagi redakcyjne, krytyczne oraz pytania do pracy.

Ad. 4.

- Błędy interpunkcyjne w całej pracy, brak przecinków przed „gdy” czy „aby”. stylistyczne w całej pracy.
- W całej pracy brakuje konsekwencji używania jednego języka na rysunkach czy konsekwencji w nazewnictwie (tablice/tabele).
- **Rozdział drugi:**
 - str. 5: powinno być „Wojny Światowej”, a nie „wojny światowej”.
 - str. 6, 7: brak cytowań (odniesień do literatury) w podrozdziale 2.2 dla podziału systemów nawigacyjnych.
 - str. 8: podrozdział 2.3, który jest swego rodzaju przeglądem literatury nie zawiera zbyt wielu odnośników do literatury, pomimo zawartości treści odtwórczych. Zacytowano zaledwie 8 pozycji literaturowych.
- **Rozdział trzeci:**
 - str. 27: Rysunek 3.2 - nieczytelny.
- **Rozdział czwarty:**
 - Tytuł “Warstwa sprzętowa” nie pasuje do tego typu rozdziału, lepiej byłoby go zatytułować np. “Konfiguracja sprzętu”.
 - str. 32-36: brak odniesień do literatury.
 - str. 34: rysunek 4.2 powinien zostać przetłumaczony na język polski.
 - str. 35: rysunek 4.3. j.w.
 - str. 36: rysunek 4.4. - jaka jest celowość tego typu zdjęcia?
 - str. 40: rysunki 4.9 oraz 4.10 powinny zostać przetłumaczone na język polski, ponadto rysunek 4.9 jest słabo czytelny.
 - str. 43: rysunek 4.11 powinien zostać przetłumaczony na język polski.
- **Rozdział piąty:**
 - str. 47: rysunek 5.3 powinien zostać przetłumaczony na język polski. Tablica czy tabela?
 - str. 49: Tablica(?) 5.2. - znaczące wartości powinny być zostać w jakiś sposób zaznaczone w celu poprawy czytelności.
 - str. 50: rysunek 5.6 jest nieczytelny, a także w języku angielskim (powinien zostać przetłumaczony).
 - str. 51-53: Tablice(?) 5.3-5.5 - co oznaczają poszczególne kolory?
 - str. 54: brak opisu wyników, jedynie odniesienie do literatury ([85]), która to jest publikacją autora. W pracy doktorskiej należałoby jednak opisać wyniki, a nie

kierować do artykułu. Proszę o rozwinięcie tego opisu. Rysunek 5.7 jest słabo czytelny.

- str. 55: rysunki 5.8 oraz 5.9 powinny zostać przetłumaczone na język polski.
- str. 56: rysunki 5.10 oraz 5.11 słabo czytelne.
- str. 57: rysunek 5.12 nieczytelny (zbyt mała czcionka) oraz nieprzetłumaczony na język polski.
- str. 58: rysunki 5.13 oraz 5.14 również są nieczytelne ze względu na zbyt mały rozmiar czcionki. Powinny one także zostać przełożone na język pracy.
- **Rozdział szósty:**
 - Podsumowanie, które powinno stanowić główną część pracy zaraz na 3 stronach, z czego jedną stanowi rysunek.
 - Autor w bardzo oszczędny sposób prezentuje wyniki - odsyłając recenzenta do poszczególnych publikacji, aby ten sam sobie poszukał wyników.
- Brakuje osobnego rozdziału z szerokim przeglądem literaturowym, który to pozwoliłby na łatwiejszą ocenę osiągnięć autora.
- Brakuje osobnego rozdziału z wynikami pracy.
- Brakuje rozdziału zawierającego wnioski.
- Autor rozprawy bardzo często odnosi się do swoich publikacji, ale bez wskazania konkretnych wartości, dając pole do popisu mnie jako recenzentce, abym mogła sobie takich informacji poszukać.
- Brakuje informacji na temat innych (oprócz publikacyjnych) osiągnięć autora, takich jak otrzymane nagrody, stypendia, udział w projektach badawczych czy stażach naukowych.

5. Pozytywne aspekty pracy.

Ad. 5. Jak już zostało to wcześniej wspomniane - praca składa się z **7** rozdziałów, a sam układ pracy nie budzi zastrzeżeń. Praca napisana jest w języku polskim, przyjemnym, prostym dla odbiorcy językiem.. Sama treść pracy zawarta jest na zaledwie **53** stronach. Dobór literatury nie budzi większych zastrzeżeń, gdyż aż **42** pozycje spośród **105** są nowe (2017-2023).

Autor w całej pracy odnosi się do swoich publikacji, a w rozdziale szóstym zawarł również informacje na temat swojego dorobku naukowego.

6. Podsumowanie.

Ad. 6. W moim odczuciu doktorant wykazał się dużym zrozumieniem dla opisanej w pracy tematyki badawczej, a także umiejętnie sformułował i rozwiązał zdefiniowane tezy.

Pomimo faktu, iż lista pozytywnych cech pracy jest krótsza od tej z uwagami krytycznymi, to moja ocena pracy **mgra inż. Krzysztofa Kolanowskiego** jest **pozytywna**. Moim zdaniem niniejsza praca prezentuje cenne wyniki badań i jest znaczącym osiągnięciem

naukowym w dyscyplinie naukowej **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne**. Spełnia ona również w mojej ocenie wszystkie wymogi zawarte w aktualnie obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich i może być przedmiotem publicznej obrony.

Na uwagę zasługuje również dość dobry (na tym etapie kariery naukowej) dorobek doktoranta, na który składa się (wg Google Scholar) **17** prac, gdzie w **3** z nich doktorant jest autorem wiodącym (pierwszym). Liczba cytowań autora to: **130** (Google Scholar), **106** - **96** bez autocytowań (Scopus), **85** - **75** bez autocytowań (Web of Science); natomiast indeks Hirsha wg wszystkich ww. Baz (Google Scholar, Scopus oraz Web of Science) to: **4**.

Wniosuję do Rady Naukowej Dyscypliny **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne** o dopuszczenie pana mgr inż. Krzysztofa Kolanowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego



Dr hab. Inż. Aleksandra Kawala-Sterniuk, prof. uczelni
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
ul. Prószkowska 76
45-758 Opole
a.kawala-sterniuk@po.edu.pl