

WPLYNĘŁO DNIA	
10.01.2023	
nr pisma	podpis

Dr hab. inż. Ryszard Jasiński, prof. PG Gdańsk, 02.01.2023
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
e-mail: ryszard.jasinski@pg.edu.pl
tel. 603072499

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Kubackiego
pt.: Pozycjonowanie 6-osioowego robota przemysłowego za pomocą
hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu
(EEG)**

1. Uwagi wstępne

Recenzję rozprawy wykonano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej, pismo nr DIM.075.457.2022 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP z dnia 03.11.2022 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

Recenzowana praca, będąca przedmiotem rozprawy, obejmuje 113 stron i składa się ze streszczenia w języku angielskim i polskim, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, 6 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 103 pozycje. Praca została napisana w języku polskim.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki.

2. Ocena doboru tematu rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Kubackiego koncentruje się na badaniach nad zastosowaniem sygnałów EEG do sterowania przemysłowym robotem sześćoosiowym przy użyciu hybrydowego interfejsu mózg-komputer.

Po publikacjach Hansa Bergera z 1924 roku zaczęto się zastanawiać nad możliwościami wykorzystania fal mózgowych do sterowania urządzeniami. Od tego czasu prowadzone są prace nad zastosowaniem sygnałów biologicznych, pochodzących bezpośrednio z ludzkiego ciała, w tym np. z układu nerwowego lub mózgu. Sygnały biologiczne zmieniają swoje parametry w wyniku zmiany stanu fizjologicznego albo stanu umysłu człowieka. Po przetworzeniu mogą one być wykorzystane do generowania sygnałów wejściowych systemów sterujących różnych urządzeń mechatronicznych. Obecnie interfejsy mózg-komputer są niezbędnymi rozwiązaniami, pozwalającymi na komunikację z komputerem np. pacjentów obłożnie chorych oraz z zaburzeniami ruchowymi. Do monitorowania aktywności mózgu najczęściej stosowane są następujące rozwiązania: elektroencefalografia (EEG),

funkcjonalne obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego (fMRI), magnetoencefalografia (MEG).

Szczególnie intensywnie rozwijają się badania nad wykorzystaniem sygnałów EEG, między innymi dzięki coraz niższym cenom przenośnych zestawów do pomiaru i wykrywania cech w falach mózgowych. W ostatnich latach opracowano i zastosowano odpowiednie metody do rozpoznawania cech charakterystycznych, występujących w sygnałach EEG. Obecnie ta forma sterowania, z wykorzystaniem sygnałów EEG, jest wciąż w fazie badań.

Prezentowana praca wychodzi na przeciw tym oczekiwaniom, a Doktorant zaprezentował komplementarne i systemowe podejście do rozwiązania problemu zastosowania sygnałów EEG do sterowania przemysłowym robotem sześcioposiowym przy użyciu hybrydowego interfejsu mózg-komputer. Należy podkreślić, że Autor pracy zastosował jako pierwszy siłowe sprzężenie zwrotne w tego typu systemach. Wykonał badania z wykorzystaniem elementu do generowania sygnału sprzężenia siłowego do operatora w zależności od punktu roboczego robota przemysłowego. Uważam, że mgr inż. Arkadiusz Kubacki, podejmując w swojej rozprawie możliwość pozycjonowania sześcioposiowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG), znakomicie wpisuje się w potrzeby rozwijającego się rynku nowych technologii. Podjęty przez Doktoranta problem badawczy w rozprawie jest uzasadniony.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Zasadnicza treść rozprawy zawarta jest w 6 rozdziałach. Treść rozdziałów jest powiązana z tytułem rozprawy i stanowi jego rozwinięcie oraz odpowiada sformułowanemu celom rozprawy.

W rozdziale 1 Autor przedstawia bazowe informacje nt. podjętego w pracy problemu badawczego, odwołując się do licznych prac naukowych z tego zakresu, jednocześnie przedstawia uzasadnienie dla podjęcia przedmiotowego tematu.

W rozdziale 2 Autor przedstawia przegląd interfejsów mózg-komputer. W pierwszej kolejności opisuje elektroencefalografię (EEG) - metodę służącą do rejestrowania aktywności elektrycznej mózgu. Następnie przedstawia typy fal mózgowych EEG, podstawy przetwarzania sygnałów mózgowych, a także opisuje artefakty, które zanieczyszczają przebiegi rejestrowanych sygnałów z elektrod. Porównuje budowę i zasadę działania urządzeń do EEG. Dalej przedstawia metody rozpoznawania aktywności mózgu w interfejsach EEG oraz ich zastosowania. Na podstawie przeglądu literatury Autor udowodnił, że brakuje w niej opisów badań i konkretnych rozwiązań interfejsów mózg-komputer pozwalających na bezpośrednie sterowanie robotem przemysłowym w trybie XYZ JOG, czyli w trzech osiach wzajemnie prostopadłych i w trybie JOG. Większość opisanych w literaturze systemów pozwalała tylko na wybór jednego z wcześniej zaprogramowanych ruchów robota. Z tych powodów Doktorant w swojej pracy zajął się sterowaniem robota

przemysłowego za pomocą sygnałów mózgowych, z zastosowaniem rozbudowanego, hybrydowego interfejsu mózg-komputer. W jej ramach zaplanowano zastosowanie: bioelektrycznego, wizyjnego oraz haptycznego sprzężenia zwrotnego.

Rozdział 3 zawiera między innymi cele i zakres pracy. Autor sformułował tezę pracy: „zastosowanie stymulacji wizyjnej człowieka i zestawu EEG, tworzącego interfejs mózg-komputer oraz siłowego sprzężenia zwrotnego, pozwala na sterowanie 6-cio osiowym robotem w zadaniach przemieszczania i uzyskanie dokładności pozycjonowania centralnego punktu narzędzia robota (TCP) w zakresie ± 15 mm”.

Rozdział 4 zawiera wyniki badań symulacyjnych pięciu różnych systemów sterowania z wykorzystaniem sygnałów mózgowych (interfejsów). Badane interfejsy: 1 - wzrokowe potencjały wywołane w stanie ustalonym (SSVEP), 2 - elektrookulografia (EOG), 3 - elektrookulografia (EOG) oraz system wizyjny, 4 - elektrookulografia (EOG), system wizyjny oraz wzrokowe potencjały wywołane w stanie ustalonym (SSVEP), 5 - elektrookulografia (EOG), system wizyjny, wzrokowe potencjały wywołane w stanie ustalonym (SSVEP) oraz system sprzężenia zwrotnego.

Należy podkreślić, że Autor przeprowadził badania, na podstawie których ustalił, że z trzech klasyfikatorów (liniowa analiza dyskryminacyjna (LDA), maszyna wektorów nośnych (SVM) oraz sztuczna sieć neuronowa (ANN)) największą liczbę poprawnie rozpoznanych poleceń w interfejsie mózg-komputer pozwoli uzyskać sztuczna sieć neuronowa. Wykonał badania hybrydowego interfejsu do sterowania sześćoosiowym modelem symulacyjnym robota przemysłowego Mitsubishi RV-12sl. Model matematyczny oraz graficzny zaimplementowano w środowisku programowym Unity 3D, z wykorzystaniem funkcji napisanych w języku C#.

Rozdział 5 zawiera wyniki badań doświadczalnych Doktoranta w zakresie kilku interfejsów mózg – komputer. Przebadany doświadczalnie najbardziej zaawansowany hybrydowy system z robotem przemysłowym umożliwia sortowanie obiektów za pomocą sygnałów z ludzkiego ciała z dokładnością 90%. Powyższe badania z wykorzystaniem przemysłowego robota potwierdzają uzyskanie celów i tezy. Osiągnięto dokładność pozycjonowania przy zastosowaniu hybrydowego interfejsu mózg-komputer bazującego na SSVEP, EOG, system wizyjny oraz dodatkowe sprzężenie zwrotne poniżej zakładanego poziomu ± 15 mm.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie wyników badań.

Praca została napisana w sposób staranny pod względem językowym i edytorskim. Zawarte w pracy rysunki i schematy w większości przypadków są dobrej jakości i posiadają wyczerpujący opis.

4. Ocena rozprawy

Dokonując oceny rozprawy należy podkreślić, że jej ogólna forma i zakres podyktowane zostały realizacją celów i udowodnieniem tezy rozprawy.

Za główne osiągnięcia mgr. inż. Arkadiusza Kubackiego uważam:

1. Usystematyzowanie wiedzy w zakresie urządzeń do monitorowania aktywności mózgu, szczególnie z wykorzystaniem sygnałów EEG, rodzajów fal mózgowych EEG, sposobów przetwarzania sygnałów mózgowych, rozwoju rozwiązań mózg-komputer.
2. Wykonanie badań trzech algorytmów klasyfikacyjnych (liniowa analiza dyskryminacyjna (LDA), maszyna wektorów nośnych (SVM) oraz sztuczna sieć neuronowa (ANN)).
3. Budowa systemu pozwalającego na sterowanie robotem za pomocą sygnałów pochodzących z mózgu, w którym zastosowano metody SSVEP, EOG.
4. Opracowanie algorytmu wykrywającego polecenia z sygnału EEG oraz wzrokowego sprzężenia zwrotnego do sterowania robotem przemysłowym.
5. Budowa kompletnego hybrydowego interfejsu mózg-komputer bazującego na SSVEP, EOG, system wizyjny oraz dodatkowe sprzężenie zwrotne.
6. Opracowanie sterowania robotem w środowisku symulacyjnym Unity 3D uwzględniającego parametry mechaniczne robota.
7. Wykonanie badań sterowania sześciokościowym wirtualnym oraz rzeczywistym przemysłowym robotem przy użyciu hybrydowego interfejsu (SSVEP, EOG, system wizyjny oraz dodatkowe sprzężenie zwrotne). Wyniki z badań symulacyjnych są zbieżne z wynikami z wykorzystaniem rzeczywistego przemysłowego robota.

Podsumowując, uważam że omówiona konstrukcja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Kubackiego oraz sposób opracowania materiału badawczego, a także forma przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań są właściwe dla tego rodzaju prac. Doktorant wykazał się dużą wiedzą ogólną, dobrą znajomością przedmiotu badań oraz opanowaniem metod analitycznych i numerycznych stosowanych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (obecnie: inżynieria mechaniczna).

5. Pytania szczegółowe

1. W podrozdziałach 4.5 i 5.3 Doktorant prezentuje wyniki badań interfejsu wykorzystującego elektrookulografię (EOG), system wizyjny, wzrokowe potencjały wywołane w stanie ustalonym (SSVEP) oraz system sprzężenia zwrotnego. Wskazane byłoby przedstawienie wartości sygnałów EEG w funkcji czasu. Także należałoby określić wpływ systemu sprzężenia zwrotnego na wartości sygnałów EEG. Czy podczas sterowania wirtualnym i przemysłowym robotem wartości sygnałów EEG różniły się?
2. System sprzężenia zwrotnego (przedstawiony w podrozdziale 5.3) został użyty podczas badań doświadczalnych sterowania robotem. W celu lepszego

zrozumienia funkcjonowania tego systemu należałoby dodać schemat, opisać zastosowane elementy (między innymi czujnik zamocowany na końcówce robota).

3. Czy w tabelach 21 i 22 są przedstawione statystyczne wyniki sortowania piłek przy użyciu wirtualnego robota? Wskazane byłoby porównanie wyników sortowania piłek przy użyciu wirtualnego i rzeczywistego przemysłowego robota (np. w jednej tabeli), co pozwoliłoby na dokładniejszą ich analizę. Czy osoby, które wcześniej sortowały piłki wirtualnym robotem, nabrały większego doświadczenia do pracy z rzeczywistym przemysłowym robotem?
4. Czy dokładność pozycjonowania centralnego punktu narzędzia robota w zakresie ± 15 mm przy zastosowaniu hybrydowego interfejsu mózg-komputer bazującego na SSVEP, EOG, systemie wizyjnym oraz dodatkowym sprzężeniu zwrotnym jest wystarczająca do pobrania elementu za pomocą chwytaka i przeniesienia go w inne miejsce?

6. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Doktorant dokonał trafnego wyboru tematyki swojej pracy oraz poprawnie określił jej zakres,
- cele pracy zostały osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora, gdyż uzasadnione twierdzenia Autora zostały ujęte w tezie pracy, a prezentowane wyniki badań są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych symulacjach, eksperymentach i mogą służyć do dalszych prac badawczych,
- Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- rozprawa zredagowana jest poprawnie,
- praca dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy, a w wielu elementach wnosi do nich nowe treści.

Powyższe argumenty świadczą o umiejętnościach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (obecnie: inżynieria mechaniczna).

Stwierdzam, że praca mgr. inż. Arkadiusza Kubackiego pt.: „Pozycjonowanie 6-osiowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG)” (promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki) spełnia wymagania stawiane rozprawom

doktorskim, w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

Ryszard Jasicki