

Kielce, dnia 28 grudnia 2022 r.

dr inż. hab. Piotr Woś prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Recenzja

pracy doktorskiej Pana mgra inż. Arkadiusza Kubackiego
pt.: „*Porzycjonowanie 6-osioowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG)*”,
wykonanej w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych, Instytutu Technologii Mechanicznej,
Wydziału Inżynierii Mechanicznej w Politechnice Poznańskiej,
przygotowanej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Andrzeja Mileckiego.

1. Wprowadzenie

*Podstawa opracowania recenzji: recenzja została sporządzona w związku z powołaniem przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych Panu mgr inż. Arkadiuszowi Kubackiemu.
(pismo nr DIM.075.457.2022 z dn. 03.11.2022 r.)*

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem niniejszej recenzji jest praca doktorska Pana mgra inż. Arkadiusza Kubackiego pt. *Porzycjonowanie 6-osioowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG)*, w której przedstawione zostały wyniki badań związanych zastosowaniem biosensorów i ich interfejsów do sterowania robotem przemysłowym. Recenzowana rozprawa posiada wyodrębnianą część teoretyczną i eksperymentalną określoną przez Doktoranta, jako *Badania symulacyjne* i *Badania doświadczalne* oraz *Podsumowanie wyników badań*. Łącznie praca liczy 113 stron. Ponadto Pan mgr inż. Arkadiusz Kubacki zamieścił na początku *Streszczenie*, *Spis treści*, *Spis ilustracji* i *Wykaz oznaczeń i skrótów* wykorzystanych w rozprawie, zaś w części końcowej znaleźć można *Spis literatury*. Rozprawa doktorska została opatrzona 78 rysunkami, 22 tabelami. W pracy zasadniczy akcent położono na obszar badań symulacyjnych i laboratoryjnych oraz autorskich analiz.

3. Wybór tematu i zakres pracy

Autor w swojej rozprawie doktorskiej bardzo dokładnie wskazał, iż celem pracy jest opracowanie hybrydowego interfejsu mózg-komputer przeznaczonego do sterowania 6-osioowym robotem przemysłowym. Doktorant opracował system pozwalający na sterowanie robotem za pomocą biosygnalów pochodzących z mózgu (EEG). Biorąc pod uwagę losową naturę biosygnalów i niedoskonałość komercyjnie stosowanych interfejsów mózg-komputer BCI (ang. *Brain-Computer Interface*) jest to zadanie trudne, a zarazem bardzo ambitne. Opracowane przez Doktoranta algorytmy umożliwiają skuteczne sterowanie urządzeniem, w tym przypadku robotem przemysłowym, oraz budowę interfejsu mózg-komputer z zamontowanym na ostatniej osi robota czujnikiem zapewniającym sprzężenie zwrotne dla układu sterowania. Istotnymi zagadnieniami przedstawionymi w rozprawie były badania algorytmów służących do klasyfikacji

i rozpoznania artefaktów biosygnalów. W opracowanym hybrydowym układzie sterowania Doktorant wykorzystał haptyczne sprzężenie siłowe, które posłużyło do wspomaganie sterowania 6-osiowym robotem przemysłowym. Zakres pracy obejmował: przegląd istniejącego obecnie stanu wiedzy w zakresie zastosowania interfejsu mózg-komputer, badania metod pozyskania informacji z biosygnalów, opracowanie i implementacja systemu sterowania interfejsu mózg-komputer oraz przeprowadzenie badań laboratoryjnych wraz z analizą wyników.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że zarówno temat rozprawy jak i zakres prac opisanych w rozprawie zostały określone właściwie.

4. Analiza rozprawy

Rozprawę doktorską rozpoczyna wstęp składający się z rozdziałów: *Wprowadzenia* i *Przeglądu interfejsów mózg-komputer*, które są istotne z punktu widzenia pomysłu badawczego. W rozdziałach tych Doktorant dokonał przeglądu interfejsów mózg-komputer oraz określił podstawowe pojęcia dotyczące przetwarzania biosygnalów za pomocą wybranych interfejsów, pozwalających na bezpośrednią komunikację między mózgiem a odpowiednim wykonawczym urządzeniem zewnętrznym. Omówione interfejsy są stosowane, jako zamienniki tak zwanych joysticków lub klawiatur i są dostępne w komercyjnych zastosowaniach. W interfejsach tych możliwa jest detekcja i odczyt biosygnalów wraz z ich selekcją częstotliwościową. Urządzenia te posiadają zestawy filtrów cyfrowych oraz dodatkowo są wyposażane w 3-osiowe akcelerometry. Interfejsy te również pozwalają wykrywać i obserwować stany psychiczne, mimikę twarzy oraz ruchy gałki ocznej i głowy. Dodatkowo opisano urządzenie pozwalające na tworzenie czasowo częstotliwościowych map topograficznych, które wykorzystywane są do wykrywania przejściowych zaburzeń widmowych między próbkami w biosygnale. W rozprawie przedstawiono również urządzenie, w którym rodzaj aktywności mózgu następuje w następstwie prezentacji bodźca w postaci impulsu wzrokowego i słuchowego.

Przedstawione w sposób logiczny, kompletny i przejrzysty treści, wzbogacone licznymi rysunkami i schematami stanowią interesującą lekturę opracowaną na podstawie aktualnego stanu wiedzy. Dobrze opracowany materiał oparty został na obszernym przeglądzie oryginalnych prac badawczych i przeglądowych, które ukazały się w czasopiśmie naukowych. Zamieszczone w tych rozdziałach treści dowodzą wiedzy Doktoranta oraz umiejętności studiowania i analizowania problemów badawczych na podstawie odpowiednio dobranego piśmiennictwa. Niewątpliwie ta część rozprawy stanowi właściwe wprowadzenie do realizacji zaplanowanego celu badań i interpretacji otrzymanych wyników.

W rozdziale 4 w ramach badań symulacyjnych Autor skupił się na rozpoznaniu informacji zgromadzonych w biosygnale. W tym celu zastosował algorytmy klasyfikacji sygnału, które przypisują rejestrowane sygnały do zdefiniowanych poleceń sterujących. W trakcie przeprowadzonych badań sprawdzono trzy algorytmy klasyfikacji bazujące na: liniowej analizie dyskryminacji, wektorów nośnych oraz wykorzystujące sztuczną sieć neuronową (SSN). Do rozpoznawania mimiki twarzy, ekstrakcji cech obiektów i redukcji liczby danych wykorzystał liniową analizę dyskryminacyjną. Przedstawiono rozwiązanie tak zwanych problemów dwuklasowych i sprawdzono doświadczalnie reakcję interfejsu na pulsacje światła. Maszyna wektorów nośnych, to kolejny zestaw, opracowanych przez Autora, powiązanych metod uczenia nadzorowanego, które również znalazły zastosowanie do rozwiązania problemów klasyfikacyjnych. Trzecim algorytmem klasyfikacyjnym zastosowanym w pracy jest algorytm wykorzystujący wielowarstwową sztuczną sieć neuronową. W sposób zwięzły Doktorant opisał budowę zaprojektowanej struktury sieci (SSN), oraz zaproponował sposób jej uczenia.

W celu sprawdzenia przydatności zaproponowanych algorytmów klasyfikacyjnych, Doktorant zbudował stanowisko testowe oraz opracował interfejs sprzętowo-programowy do analizy biosygnalów. Operatorzy urządzenia byli stymulowani przez światło o zadanej częstotliwości pulsacji. Doktorant w sposób skuteczny zarejestrował i sklasyfikował przebiegi biosygnalów dla trzech wybranych częstotliwości. W kolejnych rozważaniach Doktorant zaproponował sposób wykorzystania biosygnalów powstałych w wyniku ruchu gałki ocznej i poparł je badaniami symulacyjnymi. W wyniku przeprowadzenia prób operatorzy interfejsu symulacyjnego skutecznie przesuwali wirtualny punkt na planszy w wybranym kierunku. Podstawą działania symulatora było prawidłowe rozpoznawanie przez sztuczną sieć neuronową ruchu gałek ocznych i powiek. W dalszej części pracy Doktorant zaproponował implementację systemu wizyjnego do interfejsu (BCI), który umożliwił „śledzenie” ruchu gałek ocznych przy zastosowaniu kamery oraz narzędzi do analizy grafiki komputerowej. W tym celu został wykorzystany algorytm wyznaczający gradient obrazu, gdzie wektor gradientu wskazuje kierunek zmiany koloru gałki ocznej. Według Doktoranta, zastosowanie takiego rozwiązania w połączeniu z wcześniej proponowanymi rozwiązaniami, poprawiło wydajność (szybkość) działania interfejsu (BCI).

Dalsza część pracy to przedstawienie wyników modelowania zadań kinematyki 6-cio osiowego robota przemysłowego w środowisku programistycznym 3D. Zaprezentowano 5 scenariuszy sterowań modelem symulacyjnym przez operatorów interfejsu mózg-komputer. Każdy ze scenariuszy przewidywał przemieszczanie punktu końcówki symulatora robota w układzie współrzędnych kartezjańskich poprzez sterowanie w jednym kierunku w danej chwili. Zarówno ruch w kierunku wybranej osi, zgodnie z prostokątnym układem współrzędnych w przestrzeni trójwymiarowej, jak i przełączenie sterowania kierunku ruchu następowało poprzez ruch gałki ocznej i sekwencje podwójnych mrugnięć. Według Autora wszystkie testy zakończyły się pomyślnie. Zostało to udokumentowane w rozprawie licznymi wykresami trajektorii punktu roboczego ramienia robota, wykonanych na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych.

W kolejnych podrozdziałach 4.4 i 4.5 Autor zmodyfikował poprzednio opracowane algorytmy interfejsu mózg-komputer. W podrozdziale 4.4, oprócz elektrookulografii i systemu wizyjnego, zastosował dodatkowo metodę odczytu biosygnalów wywoływanych u operatora przez pulsujące światło. Do przełączania kierunku ruchu końcówki robota wykorzystał wybrane częstotliwości progowe wyodrębnione z interfejsu (BCI). Z kolei w podrozdziale 4.5 Autor rozprawy uzupełnił wszystkie zastosowane wcześniej metody o dodatkowe sprzężenie zwrotne. Według założeń Doktoranta sygnał sprzężenia zwrotnego może być pozyskiwany z przetwornika siły lub laserowego przetwornika odległości, zamontowanego na końcówce robota. Zastosowanie tego rozwiązania umożliwiło poprawę dokładności i powtarzalności pozycjonowania końcówki robota. Poparciem tej tezy są wyniki badań symulacyjnych przedstawionych na zaprezentowanych wykresach i zestawieniach tabelarycznych.

W następnej kolejności Doktorant zaproponował wykorzystanie opracowanego interfejsu mózg-komputer w procesie technologicznym sortowania detali. Próby badań symulacyjnych obejmowały różne warianty ułożenia pojemników sortownika. Wyniki opracowań statystycznych sortownika przy użyciu wirtualnego modelu robota są zachęcające i mogą być podstawą do kolejnych zastosowań technologicznych.

Rozdział 5 zawiera wyniki badań i ich analizę dla poszczególnych interfejsów mózg-komputer przeprowadzonych na stanowiskach laboratoryjnych. Doktorant rozpoczął badania od prób ustalania pozycji transportera liniowego, przy zastosowaniu ustalonych potencjałów pochodzących z interfejsu mózg-komputer, jako sygnałów zadawanych. Podczas przeprowadzonych prób, ruch transportera odbywał się skokowo zgodnie z rozpoznawanymi

poleceniami generowanymi przez interfejs (BCI). Z analizy przeprowadzonej przez Autora wynika, że istnieje związek pomiędzy występowaniem losowych artefaktów w postaci biopotencjałów generowanych przez interfejs mózg-komputer, a prawidłowym rozpoznawaniem poleceń. W następnej kolejności Doktorant przedstawił analizę wyników pracy systemu do rozpoznawania wybranych częstotliwości w sygnale pochodzącym z interfejsu (BCI), które odpowiadały częstotliwościom pulsacji światła oraz reakcji systemu na zmianę jego koloru. W dalszej części rozdziału Autor przedstawił wyniki badań eksperymentalnych z przeprowadzonych prób dla poszczególnych interfejsów mózg-komputer, zgodnie ze scenariuszami i przyjętą metodyką badań w rozdziale 4. Doktorant wykazał zgodność wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych przeprowadzonych na rzeczywistym stanowisku laboratoryjnym.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie oraz wnioski. Doktorant syntetycznie przedstawił wyniki przeprowadzonych badań oraz sformułował uogólnione wnioski. Potwierdził słuszność sformułowanej tezy, że za pomocą interfejsu mózg-komputer możliwe jest sterowanie i pozycjonowanie robota przemysłowego. Podkreślił wady i zalety takiego rozwiązania w kontekście dokładności pozycjonowania, ergonomii i komfortu pracy.

Rozdział 7 zawiera spis literatury.

5. Metodyka i obiekt badań

Przedmiotem opisanych i przeprowadzonych w rozprawie rozważań było zastosowanie interfejsu mózg-komputer oraz siłowego sprzężenia zwrotnego do sterowania 6-cio osiowym robotem przemysłowym. Autor opracował szereg wariantów programowo-sprzętowych interfejsów, które umożliwiały sterowanie robotem poprzez detekcję ludzkich biopotencjałów. Wymagało to następujących prac tj.: programowo-sprzętowego opracowania i implementacji 5-ciu wariantów systemów interfejsów mózg-komputer, zamodelowania procesu sterowania robotem przemysłowym w środowisku symulacyjnym, wykonania badań symulacyjnych i laboratoryjnych układów sterowań dla napędu liniowego i robota przemysłowego przy zastosowaniu interfejsu mózg-komputer oraz siłowego sprzężenia zwrotnego, przeprowadzenia prób w celu wykazania możliwości wykorzystania systemu sterowania robotem w technologii sortowania.

W tym miejscu chciałbym pochwalić Doktoranta za zakres wykonanych prac w celu realizacji zadań związanych celem i tezą pracy. Wymagało to od Badacza dużej wiedzy, zaangażowania i cierpliwości. Dlatego stwierdzam na podstawie wykonanego przez Doktoranta przeglądu stanu zagadnienia, przeprowadzonych badań symulacyjnych i laboratoryjnych, że potrafi On rozwiązywać złożone problemy naukowe.

6. Oryginalność pracy

Sterowanie maszyną „siłą umysłu” to rozwiązanie, nad którym pracuje wiele ośrodków badawczych i firm, których celem jest odnalezienie „klucza” do niefizycznej i niewerbalnej komunikacji między człowiekiem i maszyną. Urządzenia przyszłości mają wiedzieć, czego od nich oczekujemy rozumiejąc nasze myśli. Przedstawiona praca doskonale wpisuje się w ten współczesny trend. Oryginalną wartością recenzowanej rozprawy doktorskiej jest opracowanie oraz zweryfikowanie doświadczalnie procesu pozycjonowania 6-cio osiowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu wykorzystującego do tego celu sygnały bioelektryczne człowieka. Oryginalnym rozwiązaniem jest również opracowany przez Autora prototyp urządzenia haptycznego z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Wnioski końcowe rozprawy są poparte danymi eksperymentalnymi i można stwierdzić, że uzyskane i opisane przez

Doktoranta wyniki badań poszerzają wiedzę na temat nowych interfejsów bazujących na sygnałach bioelektrycznych człowieka.

Należy również podkreślić, że oryginalny opracowany system interfejsów posiada potencjał aplikacyjny dla innych zastosowań w komunikacji człowiek-maszyna.

7. Uwagi i pytania do Autora pracy

Po przeanalizowaniu treści rozprawy nasuwają się pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym, które szczegółowo odnoszą się do omawianych zagadnień:

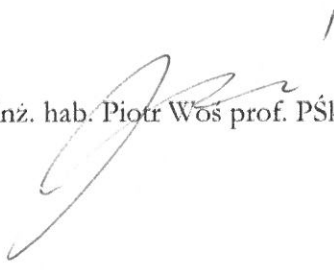
1. Autor rozprawy zastosował metody pozwalające na detekcję, filtrację i klasyfikację sygnałów generowanych przez komercyjne urządzenie (BCI). Natomiast należy tutaj zwrócić uwagę, że rejestrowane sygnały bioelektryczne mają różne źródła pochodzenia i są sumą potencjałów elektrycznych generowanych w wyspecjalizowanych tkankach lub narządach. Przedstawione rozwiązania i ich interpretacja w kontekście detekcji sygnałów nasuwają pytania, czym jest „biosygnal” i czy wszystkie sygnały generowane przez interfejs są wynikiem tylko pracy mózgu (sterowanie myślą), czy być może są biopotencjałami innego pochodzenia takiego jak napięcia mięśni szkieletowych wywołanych ruchem poszczególnych narządów?
2. W rozdziale 2 na stronie 17 Autor wymienia pięć rodzajów fal z dodatkowymi „rytmami” związanymi z aktywnością mózgu człowieka. Wskazuje, jakie częstotliwości są przypisane do poszczególnych fal. Natomiast w dalszej części pracy Doktorant, podczas analizy częstotliwościowej biosygnalów, nie odnosi się do tego zagadnienia. Czy z tego powodu, zastosowane w tytule ograniczenia, co do metody służącej do badania tylko bioelektrycznej czynności mózgu (EEG) jest uzasadnione?
3. Istotnym obszarem rozprawy jest badanie pozycjonowania robota we współpracy z haptycznym sprzężeniem zwrotnym. W podrozdziale 4.5 na stronie 77 Autor przedstawił opis przeprowadzonych badań laboratoryjnych pozycjonowania ramienia robota. W opisie tym Autor nadmienia, że „operator odczuwał wartość siły, proporcjonalnej do sygnału odległości punktu roboczego robota od przeszkody” oraz, że „sygnal ten może pochodzić zarówno z czujnika siły ... i czujnika odległości”. W dalszej części na stronie 78, (rys. 58) Autor przedstawił wykres funkcji odległości punktu roboczego robota od przeszkody, bez dodatkowego wyjaśnienia, jaki rodzaj sensora został użyty w celu określenia zależności.
4. Zarówno w badaniach symulacyjnych jak i laboratoryjnych Doktorant przeprowadził wiele doświadczeń obejmujących różne scenariusze działania interfejsu (BCI). Autor używa w nich różnych częstotliwości pulsacji i kolorów światła w celu stymulacji operatora interfejsu. W związku z tym nasuwają się następujące pytania wymagające dodatkowego wyjaśnienia i uporządkowania. Jakie były kryteria wyboru częstotliwości pulsacji światła i co było powodem zastosowania pulsacji światła białego w podrozdziale 4.4, skoro najlepszą „reakcję” układu uzyskano przy ekspozycji operatora na światło koloru czerwonego i żółtego (str. 90)?
5. W rozdziale 5 *Badania doświadczalne* na stronie 98 (rys. 76) zaprezentowano wyniki pozycjonowania robota. Proszę o wyjaśnienie jak przebiegał proces tworzenia wyników badań, oraz w jaki sposób dokonano pomiarów pozycji rzeczywistych punktów roboczych robota i jakich narzędzi programowo-sprzętowych użyto podczas pomiarów?

8. Uwagi Redakcyjne

Rozprawa doktorska jest dobrze opracowana pod względem redakcyjnym, jest napisana starannie i czytelnie. Oczywiście Doktorant nie ustrzegł się drobnych błędów edytorskich, co jest rzeczą naturalną w tak obszernej wypowiedzi. Zasadniczo treść pracy jest spójna, chociaż podział na części i rozdziały budzi moje zastrzeżenia. Wiele podtytułów pracy tak samo się nazywa lub nie posiada numeracji. W tekście Autor odnosi się do „paragrafu” a nie do podrozdziału. Ponadto Autor podzielił pracę na części obejmujące badania symulacyjne i badania eksperymentalne. Zarówno w jednej jak i w drugiej części przedstawione są wyniki i opisy elementów badań laboratoryjnych jak i symulacyjnych, co może utrudniać analizę pracy.

9. Wnioski końcowe

Po analizie przedłożonej rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Arkadiusza Kubiczaka stwierdzam, że wnosi ona cenny wkład w poszerzenie wiedzy w zakresie nowych metod sterowania stosowanych w mechatronice oraz spełnia wymagania stawiane przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 poz. 261); ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Jednocześnie wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrany przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej.


dr inż. hab. Piotr Woś prof. PŚk