



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 mgr inż. Tymoteusza Lindnera

pt.: *Zastosowanie metod uczenia ze wzmocnieniem do sterowania robotem przemysłowym współpracującym z człowiekiem,*

wykonanej w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych, Instytutu Technologii Mechanicznej, Wydziału Inżynierii Mechanicznej w Politechnice Poznańskiej, przygotowanej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Andrzeja Mileckiego.

*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. Tymoteuszowi Lindner.*

*(pismo nr DIM.075.458.2022 z dn. 03.11.2022 r.)*

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem niniejszej recenzji jest praca doktorska Pana mgr inż. Tymoteusza Lindnera pt. *Zastosowanie metod uczenia ze wzmocnieniem do sterowania robotem przemysłowym współpracującym z człowiekiem*, w której przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych związanych z zastosowaniem współpracującego robota przemysłowego w warunkach bezpośredniej bliskości z człowiekiem. Istotnym zagadnieniem podjętym w rozprawie było zastosowanie metod sztucznej inteligencji do zadań sterowania robotem w taki sposób, aby omijał on przeszkody pojawiające się na jego zadanej trajektorii ruchu. Dzięki opracowanemu rozwiązaniu bezpiecznego systemu sterowania, który umożliwił na interakcje z człowiekiem, możliwe było zastosowanie robota przemysłowego bez dodatkowych zabezpieczeń. Recenzowana rozprawa posiada 10 wyodrębnionych rozdziałów wraz ze wstępem i przeglądem literatury. Zasadnicza część rozprawy zawiera teoretyczny opis algorytmów uczenia robota ze wzmocnieniem, przedstawienie badawczego stanowiska

laboratoryjnego oraz 4 rozdziały opisujące wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych opracowanych algorytmów sterowania. Badania i analizy dotyczyły algorytmów pozycjonowania robota, omijania przeszkód na zadanej trajektorii ruchu oraz bezpiecznej współpracy robota z człowiekiem. Ponadto, Pan mgr inż. Tymoteusz Lindner zamieścił na początku *Streszczenie* w języku polskim i angielskim, *Spis treści* oraz *Spis symboli i skrótów* wykorzystanych w rozprawie. W części końcowej rozprawy można znaleźć *Podsumowanie*, 7 załączonych tabel z wybranymi parametrami poszczególnych algorytmów wykorzystanych w pracy oraz *Spis literatury*. Rozprawa doktorska zawiera 138 stron i została opatrzona 113 rysunkami, 21 tabelami.

## **2. Wybór tematu i zakres pracy**

Doktorant w swojej rozprawie wskazał, iż celem pracy jest opracowanie systemu, który pozwala na bezpieczną współpracę we wspólnej strefie roboczej człowieka i robota przemysłowego. Podstawą działania system kontrolnego robota są gradientowe algorytmy uczenia ze wzmocnieniem. Opracowany system kontrolny umożliwił omijanie przeszkód przez manipulator robota przemysłowego na zadanej trajektorii ruchu. Takie rozwiązanie według Autora pozwoliło na bezpieczną współpracę człowieka i robota przemysłowego we współdzielonej strefie roboczej. Istotnymi zagadnieniami przedstawionymi w rozprawie były opracowania w środowisku symulacyjnym i laboratoryjnym, dotyczące modelu kinematyki i adaptacyjnego układu sterowania robota antropomorficznego. Rozwiązanie to umożliwiło automatyczne omijanie przeszkód oraz pozwoliło na równoczesną pracę człowieka i robota we wspólnej przestrzeni roboczej.

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

## **3. Analiza rozprawy**

Swoją rozprawę Autor rozpoczął od *Wstępu*, w którym poruszył istotne kwestie dotyczące bezpośrednią współpracy robotów przemysłowych we wspólnej przestrzeni roboczej. Zaakcentował istotny problem podejmowania autonomicznych decyzji dotyczący wyboru trajektorii ruchu przez układ kontrolny robota.

W rozdziale zatytułowanym *Przegląd literatury* Doktorant obszernie analizował zagadnienia dotyczące współpracy robota przemysłowego z człowiekiem, a w szczególności zastosowania metod sztucznej inteligencji (SI) do rozwiązywania problemów optymalizacji ruchu robota w przestrzeniach dwu i trójwymiarowych.

W rozdziale 3 Autor określił podstawowe założenia dotyczące rozważań i badań rozprawy. Założenia te są zgodne z postawioną tezą pracy, w której rozważana jest możliwość wykorzystania gradientowych algorytmów uczenia ze wzmocnieniem, które z kolei pozwolą układowi sterowania robotem na jego autonomiczną pracę.

Rozdział 5 pracy został poświęcony obszernemu omówieniu zastosowanych w rozprawie algorytmów uczenia ze wzmocnieniem. Omówienie Autor rozpoczął od wyjaśnienia, czym jest metoda uczenia ze wzmocnieniem w zakresie podejmowania optymalnych decyzji i jakie



ma to zastosowanie aplikacyjne we współczesnej robotyce. W kolejnym podrozdziale 5.2 Doktorant wskazał, jakie rodzaje algorytmów uczących wykorzystał w badaniach, a następnie w podpunktach szczegółowo opisał ich działanie. W badaniach wykorzystał cztery wybrane algorytmy uczące, które według Autora są najbardziej „znane ... i najefektowniejsze”. Algorytmy stosowane dla tak zwanej ciągłej przestrzeni akcji i obserwacji tj.: *Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)*, *Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient*, *Soft Actor Critic (SAC)* oraz *Hindsight Experience Replay (HER)* posiadają tylko oryginalne angielskojęzyczne nazwy bez próby (może i słusznie) ich tłumaczenia na język polski. W kolejnych podpunktach Autor szczegółowo wyjaśnił działanie zastosowanych algorytmów w postaci opisów wzorów modelowych i schematów blokowych.

Rozdział 6 zawiera opis stanowiska symulacyjnego i laboratoryjnego. W środowisku symulacyjnym został zaimplementowany kinematyczny model robota wraz z układem sterowania, który posłużył do wstępnych testów symulacyjnych. Istotnym osiągnięciem Doktoranta w kontekście postawionych w rozprawie zadań badawczych jest opracowanie prototypu optoelektronicznej głowicy ochronnej. Zastosowanie takiego rozwiązania było kluczowe dla systemu sterowania gdyż umożliwiło wyznaczenie odległości punktu środkowego narzędzia (TCP) od losowo umieszczanych przeszkód w strefie roboczej robota. Architektura układu sterowania przedstawiona w dalszej części rozdziału podzielona jest na kilku modułów, gdzie ich implementacja wymagała użycia środowisk i języków programistycznych wysokiego poziomu.

W kolejnych rozdziałach 7, 8 i 9 przeprowadzono szereg testów symulacyjnych i laboratoryjnych według ujednoczonego schematu działania tj.: opis metodologii badań, przedstawienie wyników badań symulacyjnych i laboratoryjnych oraz podsumowanie osiągniętych efektów dla poszczególnych zadań.

W rozdziale 7 przeprowadzono badania algorytmów pozycjonowania robota w pustej przestrzeni roboczej z zastosowaniem sześciu kombinacji algorytmów uczenia ze wzmocnieniem. Następnie w rozdziale 8 dla testów zadania przemieszczania punktu środkowego narzędzia (TCP) po linii prostej, w strefie roboczej robota została umieszczona w sposób losowy przeszkoda. Autor rozprawy wytypował dwa algorytmy uczące, które umożliwiły omijanie tej przeszkody. Według Autora w wyniku zastosowania uczących algorytmów ze wzmocnieniem robot osiągnął pewien stopień autonomiczności decyzji dotyczących omijania przeszkód. Opracowane metody badawcze i algorytmy sterujące w rozdziałach 7 i 8 umożliwiły przeprowadzenie kolejnych testów w rozdziale 9 dla zadania omijania przeszkód na zadanej trajektorii ruchu robota. Autor przetestował różne przypadki związane z kształtem, położeniem oraz liczbą przeszkód, umieszczanych w przestrzeni roboczej robota.

Z kolei w rozdziale 10 Autor rozprawy przedstawił wyniki testów laboratoryjnych dotyczących współpracy robota z człowiekiem i są one finalnym osiągnięciem przedstawionej pracy. Opisane testy dotyczyły sterowania pracą robotem dla zadań przenoszenia elementów w obecności poruszającego się człowieka. Człowiek mógł się poruszać bezpiecznie we współdzielonej strefie roboczej bez narażenia na kolizję z ramieniem robota.

Wyniki licznych testów pracy układu sterownia robota zostały przedstawione przez Doktoranta w postaci wykresów oraz tabel porównawczych i stanowią potwierdzenie właściwie wykonanej pracy badawczej.

Ostatni rozdział rozprawy zawiera całościowe podsumowanie rozprawy oraz wnioski końcowe. Zamieszczono w nim syntetyczne podsumowanie wyników pracy oraz sformułowano 5 wniosków końcowych na podstawie zrealizowanych prac badawczych.

#### **4. Metodyka i obiekt badań**

Oceniana praca ma charakter interdyscyplinarny. W celu opracowania rozprawy Doktorant wykorzystał wiedzę z różnych obszarów nauki i techniki tj.: mechatroniki, informatyki i robotyki. Skuteczna synteza wiedzy i praktycznych doświadczeń z tych obszarów umożliwiła Autorowi osiągnięcie głównych celów pracy tj.: zbudowanie i zweryfikowanie działania służącej do wykrywania przeszkód optoelektronicznej głowicy, opracowanie oryginalnego układu sterowania robotem, przeprowadzenie badań porównawczych dokładności pozycjonowania TCP robota, opracowanie systemu bazującego na gradientowych algorytmach uczenia ze wzmocnieniem, który posłużył do omijania przeszkód na zadanej trajektorii ruchu oraz bezpiecznej i ciągłej i współpracy człowieka z robotem przemysłowym w tej samej przestrzeni roboczej.

Z przedstawionych w rozprawie dokonań Autora wynika, że opiniowana praca została zrealizowana bardzo dobrze pod względem merytorycznym oraz metodycznym, a prace badawcze i analityczne ułożone są w logiczną całość. Uzyskane wyniki badań stanowią oryginalny i istotny wkład Autora w poznanie badanych procesów związanych ze sterowaniem w trakcie współpracy człowieka z robotem przemysłowym.

#### **5. Oryginalność pracy**

Realizowany temat jest stosunkowo nowym zagadnieniem dotyczących inteligentnych systemów sterowania w układach mechatronicznych i robotycznych. Szczególnie, segment robotów współpracujących (*Cobot-ów*) w tym momencie rozwija się bardzo dynamicznie i jest coraz częściej używany w zakładach produkcyjnych do automatyzacji procesów. Kluczowym elementem tej pracy jest opracowany robotyczny system współpracujący, który składa się oprócz standardowego robota przemysłowego, ze specjalnie zaprojektowanego prototypu optoelektronicznej głowicy zamontowanej na jego ramieniu i monitorującej przestrzeń pracy robota oraz dedykowanego systemu obliczającego trajektorię ruchu robota w czasie rzeczywistym. Dzięki oryginalnemu rozwiązaniu zaproponowanego przez Doktoranta oraz wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji w sterowaniu, robot unikał kolizji zarówno ze statycznymi przedmiotami umieszczonymi w jego przestrzeni roboczej jak i poruszającym się człowiekiem. Czyli możemy mówić tutaj o systemie bezpieczeństwa, który pozwala na interakcje z człowiekiem w bezpośredniej bliskości bez konieczności montażu dodatkowych mechanicznych zabezpieczeń lub sekwencyjnego działania układu sterowania.

## 6. Uwagi i pytania do Autora pracy

W trakcie analizy treści rozprawy nasuwa się kilka uwag, które być może pomogą Autorowi ukierunkować dalsze badania własne:

Uwagi ogólne:

1. We wstępie autor określa, jakie warunki muszą być spełnione, jeśli robot i człowiek kooperują ze sobą na jednym stanowisku pracy. Wymagania bezpieczeństwa w tej kwestii są określone w normie ISO 10218 oraz specyfikacji technicznej ISO/TS 15066. Ważną wzmianką w normie jest to, że robot sam w sobie nie jest bezpieczny i musi stać się elementem systemu współpracującego. Czyli robot współpracujący dopiero z podłączonymi czujnikami i innymi niezbędnymi komponentami jest bezpiecznym systemem robotycznym i może być maszyną wykonującą określoną pracę. W dalszej części rozprawy (rozdział 10) przedstawiono wyniki obserwacji badań laboratoryjnych współpracy robota przemysłowego z człowiekiem. Robot w trakcie wykonywania zadań porusza się z ograniczoną prędkością, omija człowieka i zatrzymuje się przy zbyt dużym zbliżeniu. Niestety, Autor nie wyjaśnił czy warunki bezpieczeństwa są tutaj w pełni spełnione, zgodnie z obowiązującymi normami. Proszę o uszczegółowienie tego zagadnienia.
2. Autor w podsumowaniu rozdziału 7, (pkt. 7.4) wybrał do dalszych eksperymentów kombinacje 2 algorytmów uczenia DDPG i HER z spośród sześciu wcześniej symulacyjnie przebadanych. Następnie stwierdził, że „niektóre algorytmy nie były w stanie wykonać zadania i sterować robotem w taki sposób, żeby osiągnął on zadany punkt w przestrzeni trójwymiarowej”. Proszę o wnikliwsze wyjaśnienie, co było przyczyną tak dużej rozbieżności w wynikach badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

Uwagi szczegółowe:

1. Na str. 27, 96, 97, 101, 104 i 122 – opisano „zachowanie się algorytmu” oraz „zachowanie robota” - poprawnie powinno być „działanie algorytmu” oraz „działanie robota”.
2. Proszę wyjaśnić, co Autor miał na myśli pisząc, na str. 102, 113 i 125 - „nieregularne ruchy po trójkącie” oraz „nieregularne ruchy w postaci skoków”?
3. Na str. 126 – podano wartość dla stwierdzenia „... przy większych prędkościach ruchu robota, przekraczających 35 mm/s” – poprawnie powinno być „... 250 mm/s”?

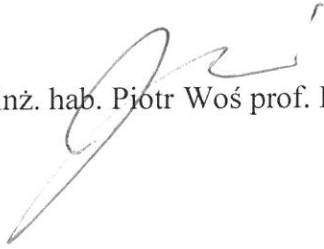
## 7. Uwagi Redakcyjne

Rozprawa została napisana z dużą starannością i przejrzystością. Należy podkreślić stylistyczną i gramatyczną poprawność języka rozprawy. Uwagę zwraca poprawność stosowanej terminologii technicznej oraz precyzja języka w opisach. Drobne błędy językowe i gramatyczne występują naprawdę wyjątkowo. Na wyróżnienie zasługuje również fakt, że część pracy dotyczącej wyników badań zawiera bardzo dużo oryginalnych ilustracji w postaci wykresów oraz zdjęć i zostały one bardzo starannie opisane. Autor pracy dołożył niezbędnych starań, aby jej strona redakcyjna nie budziła zastrzeżeń.

## 8. Wnioski końcowe

Po analizie przedłożonej rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Tymoteusza Lindnera 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.

Wniosuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Tymoteusza Lindnera, zgodnie z Regulaminem obowiązującym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej. Przedstawione w rozprawie przez Autora wartościowe dokonania świadczą, o wysokim merytorycznym poziomie jej realizacji. Praca ma charakter interdyscyplinarny, a wyniki badań przedstawione w rozprawie stanowią oryginalny i istotny wkład Autora w poznanie badanych procesów związanych z zastosowaniem sztucznej inteligencji w sterowaniu urządzeniami mechatronicznymi.

  
dr inż. hab. Piotr Woś prof. PŚk