



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
I OKRĘTOWNICTWA



UCZELNIA
DARWINIŃSKA

Prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Kaliński
Zakład Mechatroniki

Gdańsk, dnia 30.12.2022 r.

OCENA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tymoteusza Lindnera

pt. „Zastosowanie metod uczenia ze wzmocnieniem do sterowania robotem przemysłowym współpracującym z człowiekiem”

Praca wykonana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej
Politechniki Poznańskiej
Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki

Podstawa oceny: uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 02.11.2022 r., oraz pismo dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP, Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej, z dnia 03.11.2022 r., wraz z otrzymanym egzemplarzem pracy doktorskiej.

1. Dobór tematu, cel i zakres pracy

Przedmiotem przedłożonej przez mgr. inż. Tymoteusza Lindnera pracy doktorskiej są badania dotyczące zastosowania metod sztucznej inteligencji do sterowania robotem przemysłowym, pracującym bezpiecznie we wspólnej strefie roboczej z człowiekiem. Powyższe dotyczy w szczególności potwierdzenia numerycznego i empirycznego, że opracowany system bazujący na metodach uczenia ze wzmocnieniem steruje robotem w taki sposób, aby bezkolizyjnie omijać różne przeszkody zlokalizowane w dowolnym miejscu w przestrzeni. Tym kierunkiem badań zajmuje się wiele ośrodków naukowych i instytucji przemysłowych, zainteresowanych zarówno koniecznością zapewnienia prawidłowych warunków pracy struktur nośnych robotów, jak też – uzyskiwaniem przez nie wymaganej wydajności procesów roboczych.

Praca doktorska mgr. inż. Tymoteusza Lindnera wychodzi naprzeciw tym wyzwaniom. Proponuje się w niej nowe podejście, które wykazuje przewagę w porównaniu ze znanymi i powszechnymi dotychczas przypadkami zastosowania metod sztucznej inteligencji. Na podstawie uzyskanych wyników wytypowano algorytm, który zastosowano do opracowania systemu składającego się z dwóch tzw. agentów pracujących

równoległe i sterujących ruchem robota. Jeden z nich był odpowiedzialny za omijanie przeszkód, a drugi za podążanie po zadanej trajektorii ruchu. Zaprojektowany system zoptymalizowano i zastosowano do sterowania robotem przemysłowym pracującym jednocześnie w tej samej strefie roboczej z człowiekiem,

Biorąc pod uwagę rosnące zainteresowanie opracowywaniem nowych i skutecznych rozwiązań w zakresie projektowania i realizacji coraz bardziej wymagających funkcji kinematycznych robotów, które w ostatnich latach służą nie tylko jako manipulatory, lecz również jako maszyny technologiczne (np. frezarki 5-osiowe), wybór tematu rozprawy należy uznać za w pełni uzasadniony. Upoważnia do tego dokonany przez doktoranta obszerny, krytyczny i wnikliwy przegląd publikacji osiągnięć naukowych. Wiele wiodących ośrodków prowadzi w przedmiotowej tematyce zaawansowane na skalę światową badania podstawowe i stosowane.

Głównym celem rozprawy było, zdaniem doktoranta, opracowanie systemu opartego o gradientowe algorytmy uczenia ze wzmocnieniem, który pozwala na bezpieczną współpracę we wspólnej strefie roboczej człowieka i robota przemysłowego. Stało się to możliwe dzięki opracowaniu takiego systemu sterowania robotem, aby wykrywał i omijał on przeszkody niespodziewanie pojawiające się na jego zadanym torze ruchu. Do opracowania systemu sterowania zastosowano algorytmy uczenia ze wzmocnieniem, a do wykrywania przeszkód w polu roboczym robota zaprojektowano i zbudowano dedykowaną głowicę z laserowymi czujnikami odległości, zamontowaną na kiści manipulatora. Cel ten został określony w sposób jasny i zrozumiały, zaś kolejne rozdziały pracy są logicznym następstwem jego realizacji.

Praca, zredagowana w języku polskim, liczy 138 stron i zawiera streszczenie w języku polskim oraz streszczenie w języku angielskim, spis treści, spis symboli i skrótów, 11 rozdziałów zasadniczych (w tym wstęp i podsumowanie), załączniki oraz wykaz 134 pozycji aktualnej literatury naukowej (w zdecydowanej większości opublikowanej po roku 2015). W załączonym wykazie literatury znajduje się wiele prac publikowanych w wysoko punktowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, np. *Mechanism and Machine Theory* (200 pkt.), *International Journal of Robotics Research* (200 pkt.), *Artificial Intelligence* (200 pkt.), *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (200 pkt.), *ACM Transactions on Graphics* (140 pkt.), *Robotics and Autonomous Systems* (140 pkt.), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (140 pkt.), *Journal of Machine Learning Research* (140 pkt.), *International Journal of Control, Automation and Systems* (100 pkt.), *Sensors* (100 pkt.). Dostrzega się również doniesienia naukowe publikowane w materiałach znanych konferencyjnych międzynarodowych oraz witryny z dostępem do oryginalnych wersji algorytmów. Z uwagi na znaczącą zawartość merytoryczną cytowanych materiałów, w świetle powyższego należy stwierdzić dobrą rozpoznawalność zamieszczonych pozycji przeglądu literatury. Staranny dobór cytowanych źródeł predestynuje przedmiotową rozprawę doktorską do rangi wartościowego opracowania naukowego.

Zakres ocenianej pracy obejmuje przegląd literatury naukowej dotyczącej istniejących rozwiązań ilustrujących: współpracę robotów przemysłowych z człowiekiem, zastosowanie w robotyce algorytmów bazujących na sztucznej inteligencji i uczeniu ze wzmocnieniem (RL – ang. *Reinforcement Learning*),



metody wykrywania przeszkód, oraz podstaw matematycznych stosowanych w badaniach algorytmów uczenia ze wzmocnieniem. Opisano środowisko pracy oraz stanowisko badawcze, badania symulacyjne i doświadczalne w laboratorium z zastosowaniem rzeczywistego robota, badania różnych algorytmów uczenia ze wzmocnieniem, w zadaniu pozycjonowania punktu środkowego narzędzia (TCP – ang. *Tool Center Point*,) robota, a także zamieszczono podsumowanie treści rozprawy. Zakres pracy został sformułowany prawidłowo, ponieważ zawiera wszystkie podstawowe elementy charakteryzujące rozprawy naukowe.

2. Merytoryczna ocena pracy

2.1. Charakter pracy

Recenzowana rozprawa jest pracą teoretyczno-eksperymentalną z zakresu sterowania ruchem robotów przemysłowych, a w szczególności – rozwoju metod uczenia ze wzmocnieniem bazujących na sztucznej inteligencji. To ostatnie ma w zamyśle umożliwić bezpieczne sterowanie robotem współpracującym z człowiekiem znajdującym się we wspólnej strefie roboczej. Na bazie obszernego, wnikliwego i krytycznego przeglądu wartościowej i rozpoznawalnej literatury przedmiotu rozprawy doktorant zaproponował oryginalną koncepcję badań własnych.

Ogromna liczba rozmaitych opracowań i materiałów źródłowych autorów zewnętrznych (w zdecydowanej większości zagranicznych) cytowanych w rozprawie świadczy o powszechnym zainteresowaniu jej tematyką nie tylko w kategoriach merytorycznych. Dostrzega się również jej wymiar w szerokim zakresie użytkowym. Osiągnięcia pracy są na tyle uniwersalne, że po ich odpowiednim rozwinięciu mogą posłużyć do opracowania metodyki oraz aplikacyjnych procedur zastosowania przedstawionej metodyki badań w praktyce.

2.2. Samodzielny i oryginalny dorobek doktoranta

Oceniana praca doktorska mgr. inż. Tymoteusza Lindnera wykazuje cechy samodzielności naukowej. Świadczy o tym metodyczne rozwiązanie postawionych problemów, umiejętne wykorzystanie wybranych nauk podstawowych i stosowanych oraz nowoczesnych metod programistycznych i narzędzi badań eksperymentalnych. Jako istotny i oryginalny dorobek doktoranta należy uznać:

- zbudowanie i zweryfikowanie działania, służącej do wykrywania przeszkód głowicy z laserowymi czujnikami odległości, montowanej na kiści robota;
- opracowanie sterowania robotem w środowisku symulacyjnym uwzględniającego parametry mechaniczne i dynamiczne robota;
- badania i porównanie dokładności pozycjonowania TCP robota, sterowanego przez wybrane algorytmy uczenia ze wzmocnieniem;
- opracowanie systemu bazującego na algorytmach uczenia ze wzmocnieniem, służącego do omijania przeszkód na zadanej trajektorii ruchu robota przemysłowego;



- opracowanie systemu bazującego na algorytmach uczenia ze wzmocnieniem do bezpiecznej, ciągłej i wspólnej współpracy robota przemysłowego i człowieka w tej samej strefie roboczej.

Ważnym osiągnięciem recenzowanej pracy jest doprowadzenie jej rezultatów do postaci o dużym znaczeniu aplikacyjnym, co w przyszłości może być wykorzystane w praktyce. Tak rozumiana idea praktycznego zastosowania wyników badań powinna znajdować odzwierciedlenie w realizowanych pracach naukowych jak najczęściej.

2.3. Tezy naukowe i wnioski z pracy

Podejmując temat rozprawy doktorant sformułował tezę pracy, która brzmi następująco:

Gradientowe algorytmy uczenia ze wzmocnieniem mogą być zastosowane do opracowania bezpiecznego systemu sterowania robotem przemysłowym, współpracującym z człowiekiem.

Powyższe sformułowanie wynika z dostrzeżenia przez doktoranta potrzeby osiągnięcia szeregu celów cząstkowych. Należą do nich:

- opracowanie środowiska symulacyjnego oraz modelu kinematyki manipulatora antropomorficznego stosowanego w badaniach doświadczalnych;
- opracowanie modelu sterowania robotem w środowisku symulacyjnym z wykorzystaniem kinematyki odwrotnej uwzględniającego parametry mechaniczne i dynamiczne robota oraz opracowanie algorytmów sterujących rzeczywistym robotem;
- opracowanie systemu wykrywania przeszkód;
- dostosowanie i implementacja wybranych algorytmów uczenia ze wzmocnieniem i ich badania w pozycjonowaniu TCP rzeczywistego robota;
- opracowanie systemu sterującego pracą robota przemysłowego, pozwalającego na omijanie przeszkód znajdujących się w polu roboczym;
- adaptacja wytrenowanych w środowisku symulacyjnym algorytmów uczenia ze wzmocnieniem do omijania przeszkód na zadanej trajektorii ruchu;
- opracowanie systemu sterującego pracą robota przemysłowego pozwalającego na jednoczesną pracę człowieka i robota we wspólnej strefie roboczej;
- badania doświadczalne weryfikujące prawdziwość tezy pracy.

Realizacja rozprawy potwierdziła aspekt studyjny i praktyczny osiągnięć doktoranta, bardzo istotny w kontekście prac wykonywanych na wyższych uczelniach technicznych, co zasługuje na szczególne podkreślenie. Doktorant wykazał w warunkach laboratoryjnych prawdziwość sformułowanej tezy, co jest niekwestionowanym, pozytywnym rezultatem opiniowanej rozprawy, tak w sensie poznawczym jak i użytkowym.

W tym miejscu należy jednak zauważyć, że:

- 2.3.1. – jedyną racjonalną (choć nie do końca wystarczającą) gwarancją deklarowanego w treści tezy bezpiecznego sterowania robotem współpracującym z człowiekiem, było trzymanie przez drugiego operatora ręki na przycisku bezpieczeństwa (115₉₋₈). Tak uwarunkowane badania z udziałem człowieka stwarzają duże ryzyko okaleczeń, a realizacja proponowanej koncepcji w warunkach przemysłowych wspomniane ryzyko jeszcze bardziej powiększa;
- 2.3.2. – stosunkowo mała, nieprzekraczająca 35 mm/s, prędkość liniowa członów robota (w teście z udziałem człowieka ograniczona nawet do 25 mm/s, 115₁₄), na obecnym etapie nie rokuje zbyt obiecujących oczekiwań w sensie zastosowań praktycznych. Wymagania stawiane robotom pracującym w nowoczesnych liniach technologicznych dotyczą prędkości kilkakrotnie większych (co zauważa również doktorant, 13₅).

Stąd, wnioski o znaczeniu utylitarnym, zwłaszcza pod kątem wykorzystania wyników rozprawy w praktyce gospodarczej przedsiębiorstw zainteresowanych instalowaniem linii zrobotyzowanych, należy formułować z większą ostrożnością.

2.4. Uwagi dotyczące pracy

2.4.1. Uwagi ogólne

2.4.1.1. Rozważania przedstawione w rozprawie dotyczyły badań symulacyjnych i eksperymentalnych, realizowanych przy różnych kombinacjach wybranych algorytmów ciągłej przestrzeni akcji i obserwacji, tj. *Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG)*, *Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3)*, *Soft Actor Critic (SAC)* i *Hindsight Experience Replay (HER)*, a także – przy różnych funkcjach nagród (*sparse, dense, dense trajectory*). Przyjmując pewną, różną w poszczególnych wariantach wytrenowania algorytmów, wartość tzw. odległości progowej d_{th} , wyznaczono w poszczególnych realizacjach błędy pozycjonowania TCP e i ich odchylenia standardowe σ_e , oraz odległości d_{tr} (również stosowne wartości σ_{dtr}) pomiędzy punktem toru rzeczywistego a wyznaczonym na podstawie pozycji startowej i zadanej. Uzyskane wyniki posłużyły jako podstawa oceny skuteczności wykorzystanych algorytmów. W przedmiotowej ocenie, poza uzasadnioną dyskusją na temat uzyskanych wartości, zabrakło jednak informacji dotyczących czasów niezbędnych do wytrenowania algorytmów (decydujących w głównej mierze o ich skuteczności), jak również przesłanek świadczących o doborze przyjętych wartości d_{th} . Zwłaszcza, że w pracy brakuje jednoznacznej definicji tego ostatniego parametru.



2.4.1.2. Zdaniem recenzenta, bardziej praktyczne sformułowanie problemu poszukiwania najlepszej kombinacji proponowanych algorytmów powinno wyglądać następująco. Przyjmując dopuszczalne wartości błędów pozycjonowania TCP (e , σ_e) oraz odległości (d_{tr} , σ_{dtr}), należy wyznaczyć wartość progową d_{th} niezbędną do wytrenowania algorytmu, przy czym minimalizowaną funkcją celu będzie czas niezbędny do skutecznego wytrenowania. Takie sformułowanie umożliwi dokonanie bezwzględnej oceny jakości proponowanych algorytmów uczenia (niezależnie od zróżnicowanych wartości d_{th}), w świetle spełnienia przyjętych założeń technicznych podyktowanych wymaganą dokładnością pozycjonowania TCP robota.

2.4.1.3. W części *Podsumowanie* (125⁸ – 126¹⁸) doktorant specyfikuje istotne z naukowego i praktycznego punktu widzenia kierunki dalszych badań w zakresie sterowania ruchem robotów, co świadczy o jego dojrzałym spojrzeniu na problematykę współczesnej robotyzacji. Nie podaje przynajmniej w sposób ogólny, jak zamierza rozwiązać wyartykułowane problemy w przyszłości. O ile zamysły opisane w p. 1 i 2 należy uznać za uzasadnione, to inne budzą pewne wątpliwości recenzenta. Przykładowo, postulowana w p. 4 eliminacja nieregularnych skoków podczas realizacji ruchów robota, jest mało prawdopodobna. Trajektorie rzeczywistych robotów przemysłowych charakteryzuje bowiem nie tylko zmienna geometria, lecz intensywne zmiany wielkości kinematycznych członów w relatywnie krótkim czasie, zwłaszcza przy osiągnięciu zdefiniowanych położeń granicznych. Powyższe ogranicza spełnienie warunku monotoniczności funkcji definiujących ruch robota. Natomiast przedstawione w p. 5 oczekiwania dotyczące współpracy człowieka z robotem (przy większych prędkościach eksploatacyjnych jego członów) pozostają w sprzeczności z powszechną tendencją sukcesywnego eliminacji bezpośredniego uczestnictwa człowieka (z uwagi na zagrożenie zdrowia i życia) w funkcjonujących w zastosowaniach przemysłowych zrobotyzowanych systemach produkcyjnych.

2.4.2. Uwagi szczegółowe

2.4.2.1. 10¹: Co oznacza sformułowanie „dyskretny krok czasowy”.

2.4.2.2. 10: W opisie skrótów: CHOMP, DDPG, HER, HRC, HRI, PPO, PRM, RRT, SAC, TD3, TRPO brakuje ich polskojęzycznych odpowiedników.

2.4.2.3. 10₁₀: Zamiast „średnia kwadratowa” powinno być „wartość skuteczna”.

2.4.2.4. 13¹⁷: Przywoływany punkt 3.4 w rozprawie nie występuje.

2.4.2.5. 17: rys. 3, 18: rys. 4 – 5, 21: rys. 7 – 8, 31: rys. 19, 49: rys. 29, zawierają opisy angielskojęzyczne.

- 2.4.2.6. 21₂: Co oznacza „...współczynnik sukcesu równy 94%”. Analogiczna uwaga dotyczy użycia terminu „współczynnik sukcesu” w innych miejscach rozprawy.
- 2.4.2.7. 42₃: Zamiast „funkcja kosztu” (dosłowne tłumaczenie z jęz. angielskiego) powinno być „funkcja celu”. Analogiczna uwaga dotyczy także innych miejsc rozprawy.
- 2.4.2.8. 43, 45, 47, 50, 78, 81: Teksty tzw. pseudokodów (nie bardzo wiadomo, co to pojęcie oznacza) są mało czytelne i stąd ich zamieszczenie w treści rozprawy nie znajduje uzasadnienia. Jeżeli jednak doktorant zdecydował się na ich zamieszczenie, powinien także dołączyć stosowny komentarz do przedstawionej treści.
- 2.4.2.9. 63²: Zamiast „Opis metodologii badań” powinno być „Metodyka badań”. Metodologia, czyli teoria sprawnego działania, odpowiada na pytanie: *co należy robić*. Natomiast metodyka, czyli praktyka wykonawcza – na pytanie: *jak należy to robić*.
- 2.4.2.10. 65¹⁰: Zamiast „odległość euklidesowa” powinno być „norma euklidesowa”. Uwaga dotyczy także innych miejsc w treści rozprawy.
- 2.4.2.11. 68₂: Termin „trajektorie” został użyty niepoprawnie. W robotyce, trajektorię definiują parametry geometryczne i kinematyczne. Natomiast rozważania zamieszczone w pracy dotyczą jedynie współrzędnych wybranych punktów robota. Przedmiotowa uwaga dotyczy także innych miejsc w treści rozprawy.
- 2.4.2.12. 99 i 100: Opis rys. 75c: „Trajektoria zadana prostokąt $z=const.$ ”, jest niezgodny z opisem zamieszczony w tekście rozprawy 100⁸⁻⁹: „...w kształcie okręgu...”.

3. Ocena pracy pod względem redakcyjnym

Układ treści jest logicznie prawidłowy. Tytuły rozdziałów i podrozdziałów są zrozumiałe i odpowiadają ich zawartości. Materiał ilustracyjny dobrano właściwie do treści poszczególnych fragmentów. Język pracy jest na ogół poprawny, czytelny i zrozumiały, aczkolwiek w treści zauważa się nieliczne przekłamania literowe, usterki gramatyczne i stylistyczne. Generalnie doktorant dołożył należytej staranności w celu poprawnego opracowania pracy pod względem językowym i edytorskim. Natomiast wadliwości redakcyjnych i terminologicznych, które wyszczególniam poniżej, należy unikać podczas pisania rozpraw naukowych.

- 3.1. 9₁₁: Powinno być „element nr *i*”.
- 3.2. 10₂: Zamiast „1.5m” powinno być „1,5 m”. Analogiczna uwaga dotyczy innych miejsc w pracy; w jęz. polskim separatorem jest „, ”, natomiast pomiędzy wartością liczbową, a jednostką miary powinna być spacja.
- 3.3. 22₁₀: Zamiast „[50]-[54]” powinno być „[50-54]”. Analogiczna uwaga dotyczy innych przywołań pozycji literatury.
- 3.4. 48: Rys. 28 zawiera mało czytelny fragment.
- 3.5. 53¹⁶: „Kinematyka odwrotna” jest terminem kolokwialnym.

- 3.6. 55-56: Zapisy funkcji „atan2” (wzory 31, 34, 36, 41, 42), „asin” (wzory 33, 37) i „acos” (wzór 38) są nieprawidłowe, ponieważ pochodzą z notacji właściwej tekstom programów komputerowych. Powinno być odpowiednio: „arc tg”, „arc sin”, „arc cos”.
- 3.7. 56-58: Rys. 35 i 36 są przywoływane w tekście w odwrotnej kolejności.

4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że oceniana praca **mgr. inż. Tymoteusza Lindnera** spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Zamieszczone uwagi mają charakter dyskusyjny i w żadnym wypadku nie pomniejszają wartości merytorycznej rozprawy, którą oceniam pozytywnie. Praca stanowi, w myśl art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595 z późn. zmianami) oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jak również – dokumentuje wiedzę teoretyczną kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej. Doktorant prezentuje sylwetkę dojrzałego i nowoczesnego naukowca, co również potwierdza opanowanie nietłatwej umiejętności kształtowania skomplikowanych rozwiązań inżynierskich o charakterze badawczym i stosowanym w zakresie sterowania ruchem członów robotów przemysłowych oraz zapobiegania kolizji z przeszkodami znajdującymi się w przestrzeni roboczej.

Wniosuję o dopuszczenie pracy jako rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

