



dr hab. inż. Michał Majka, prof. uczelni
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin
e-mail: m.majka@pollub.pl

Lublin, dn. 10 marca 2025 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 13.03.2025
Zarejestrowano pod nr 510-13-524
Podpis

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Bartyzela pt.:
„Zastosowanie głębokiego uczenia ze wzmocnieniem w robotycznym montażu przemysłowym”

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie Zawiadomienia nr 6/2025 o wyznaczeniu mojej osoby na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Grzegorzowi Bartyzelowi na podstawie rozprawy pod tytułem: „*Deep reinforcement learning for robotic industrial assembly*” („Zastosowanie głębokiego uczenia ze wzmocnieniem w robotycznym montażu przemysłowym”) z dnia 7 stycznia 2025 r. Do pełnienia funkcji recenzenta rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Bartyzela zostałem wyznaczony Uchwałą nr 112/2024 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie podjętą w dniu 12 grudnia 2024 r.

1. Przedstawienie informacji o ocenianej rozprawie doktorskiej

a) tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora

Mgr inż. Grzegorz Bartyzel jest samodzielnym autorem rozprawy doktorskiej zatytułowanej „*Deep reinforcement learning for robotic industrial assembly*”. Tytuł rozprawy w języku polskim został sformułowany następująco: „Zastosowanie głębokiego uczenia ze wzmocnieniem w robotycznym montażu przemysłowym”.



Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. dr hab. inż. Paweł Rotter prof. AGH, a promotorem pomocniczym dr inż. Marcin Węgrzynowski.

Rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Baryzela jest samodzielną pracą pisemną, wobec czego spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim, zawiera zarówno streszczenie w języku angielskim (str. 5 - 6) oraz streszczenie w języku polskim (str. 7 - 8) w związku z czym spełniony został warunek określony w art. 187 ust. 4 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

b) ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Rozprawa doktorska, napisana na 112 stronach, zawiera:

- streszczenia w języku angielskim i polskim (strony vii - viii),
- spis treści (strony ix - xi),
- spis rysunków (strona xii),
- spis tabel (strona xiii),
- wykaz symboli (strony xiv - xvi)
- wykaz skrótów (strony xvii - xix)
- 5 rozdziałów merytorycznych (w tym wstęp, podsumowanie i wnioski) – str. 1 - 73
- 2 załączniki (Hiperparametry - str. 74 - 75 oraz Dodatkowe wyniki – str. 76 - 81)
- oraz bibliografię (str. 82 - 94).

Układ pracy nie budzi zastrzeżeń i jest zgodny z klasycznym dla tego rodzaju opracowań.

W rozdziale pierwszym rozprawy doktorskiej pt. „*Introduction*” Autor uzasadnia cel podjęcia tematyki badawczej, opisuje problemy techniczne występujące podczas umieszczania elementów elektronicznych w odpowiednich miejscach i otworach płytki PCB podczas automatycznego montażu z wykorzystaniem robotów przemysłowych. W rozdziale tym Autor dokonuje przeglądu literatury związanej z inteligentnymi

systemami robotycznymi oraz algorytmami uczenia maszynowego, a następnie formułuje cele badawcze oraz stawia hipotezę badawczą (podrozdział 1.3). Głównym celem rozprawy doktorskiej jest wykorzystania algorytmów głębokiego uczenia ze wzmocnieniem w rzeczywistym zadaniu montażu robotów przemysłowych, takim jak montaż podzespołów elektronicznych. Postawiona hipoteza badawcza brzmi: „[...] *deep reinforcement learning algorithms combined with multimodal representation learning can be used effectively in flexible manufacturing systems to train robotic systems that can quickly adapt to new tasks and manipulated objects. Furthermore, it is expected that the multimodal information fusion mechanism will have an impact on extracting task-relevant features, which, in turn, will improve the generalization capability of the learned policy*”. Hipoteza badawcza w języku polskim może być przetłumaczona następująco: „*Algorytmy głębokiego uczenia ze wzmocnieniem w połączeniu z multimodalnym uczeniem się reprezentacji mogą być skutecznie wykorzystywane w elastycznych systemach produkcyjnych do szkolenia systemów robotycznych, które mogą szybko dostosowywać się do nowych zadań i manipulowanych obiektów. Ponadto założono, że multimodalny mechanizm fuzji informacji będzie miał wpływ na wyodrębnianie cech istotnych dla zadania, co z kolei poprawi zdolność uogólniania wyuczonej polityki.*”

W rozdziale drugim rozprawy doktorskiej pt. „*Background*” Autor wykonał obszerny przegląd metod uczenia maszynowego. W rozdziale tym Doktorant opisał uczenie ze wzmocnieniem (ang. Reinforcement Learning, RL), proces decyzyjny Markowa (MDP), metody oparte na wartościach i polityce, głębokie uczenie ze wzmocnieniem (ang. Deep Reinforcement Learning, DRL) oraz algorytm Soft Actor-Critics (SAC). W dalszej części rozdziału drugiego Autor opisuje dwie metody sterowania robotami manipulacyjnymi: hybrydowe sterowanie pozycyjno-siłowe (ang. motion-force control) oraz sterowanie admitancyjne. Rozdział drugi kończy się krótkim opisem autoenkoderów wariacyjnych (ang. variational autoencoder VAR).

Na początku rozdziału trzeciego pt. „*Framework for Robotic Industrial Assembly Tasks*” Autor szczegółowo opisuje problem badawczy tj. zastosowanie metody uczenia ze



wzmocnieniem do sterowania robotem umieszczającym części elektroniczne w odpowiednie miejsca płytki drukowanej. Następnie w kolejnych podrozdziałach przedstawia opracowaną architekturę sterowania robotem, wykonane oprogramowanie komunikacyjne pomiędzy oprogramowaniem sterowania robotów ROS-2 i środowiskiem Gymnasium. W kolejnej części rozdziału trzeciego szczegółowo opisano stanowisko laboratoryjne do badań złożone z robota Universal Robot UR5e, dwupalczystego chwytaka, 6-osiowego czujnika siły/momentu obrotowego, systemu wizyjnego z dwoma kamerami, stacji roboczej oraz obszarem roboczym z płytkami PCB i tacami z komponentami elektronicznymi. Następnie Autor opisuje procedurę resetowania stanowiska oraz architekturę modelu wykorzystywanego w eksperymentach. Podrozdział 3.5 zawiera analizą otrzymanych wyników eksperymentalnych. Głównym celem badań eksperymentalnych było ocena wydajności agenta RL we wstawianiu części elektronicznych do płytek drukowanych. Do oceny wydajności algorytmu zastosowano wskaźnik sukcesu i średni czas wykonania zadania. Wskaźnik sukcesu zdefiniowano jako odsetek udanych prób umieszczenia elementu elektronicznego na płycie drukowanej w stosunku do całkowitej liczby prób, podczas gdy średni czas wykonania zadania oznaczał średni czas umieszczenia manipulowanego obiektu w docelowe miejsce. W ramach badań eksperymentalnych wykonano badania wpływu obserwacji wizualnej na wskaźnik sukcesu i czas wykonania zadania oraz porównano opracowaną metodę bazującą na uczeniu ze wzmocnieniem (agenta RL) z innymi znanymi strategiami wyszukiwania miejsca wstawiania obiektu tj. strategią wyszukiwania „prosto w dół” (ang. Straight down), wyszukiwaniem losowym (ang. Random search) oraz ze strategią wyszukiwania po trajektorii spiralnej (ang. Spiral search). Otrzymane wyniki eksperymentalne wykazały, że opracowana metoda bazująca na uczeniu ze wzmocnieniem (agent RL) wykazuje się znaczną przewagą w porównaniu z innymi metodami pod względem wskaźnika sukcesu i średniego czasu wykonania zadania. Agent RL osiągnął wskaźnik sukcesu 100% lub blisko 100% we wszystkich przypadkach testowych, wykazując się również odpornością na wprowadzone zakłócenia. Na końcu



rozdziału trzeciego szczegółowo omówiono otrzymane wyniki jakościowe dla opracowanej metody.

W rozdziale 4 dysertacji przedstawiono najważniejsze osiągnięcie Doktoranta, którym jest opracowanie nowego algorytmu *Multimodal Variational DeepMDP* (MVDeepMDP). Algorytm ten pozwala na szybką adaptację wstępnie wytrenowanego agenta RL do nowych produktów na liniach produkcyjnych oraz do nowego środowiska. W algorytmie tym połączono algorytm Soft Actor-Critic (SAC) z multimodalnym autoenkoderem wariacyjnym. W rozdziale czwartym opisano architekturę modelu oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów, które potwierdzają możliwość szybkiej adaptacji algorytmu MVDeepMDP do nowych produktów i nowego środowiska. Wykazano również, że metoda ta jest skuteczna i jest w stanie montować nowe elementy bez dodatkowego trenowania. W nielicznych stwierdzonych przypadkach niepowodzenia wstawiania elementu w odpowiednie miejsce płytki drukowanej douczenie agenta RL trwa jedynie kilka minut.

Ostatni piąty rozdział dysertacji zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych oraz informacje o przyszłych kierunkach badań.

Podsumowując, w mojej opinii zarówno zawartość jak i struktura recenzowanej pracy spełnia wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim. Rozprawa doktorska została napisana jasnym, precyzyjnym i poprawnym językiem. Wykresy i rysunki są dobrej jakości, właściwie dobrane i dobrze opisane. W rozprawie odnaleźć można jedynie drobne uchybienia:

- skrócony tytuł rozprawy znajdujący się w stopce „G. Bartyzel *RL for Industrial Assembly*”,
- str. 1 „*These systems are designed to perform a wide range of operations, [...]*”,
- str. 8 „*Meanwhile, ian approach suitable [...]*”,
- str. 32 „*The nodes commnicate with each other using the publish-subscribe mechanism or service calls.*”,



- str. 33 powtórzenie zdania „ [...] the RL agent would end up waiting for the next observation while the robot is still executing the previous action. observation while the robot is still executing the previous action”,
- str. 34 “3.3 Labotatory Setup”,
- str. 35 “4 - trays with electronic componenets”,
- str. 39 “The original SAC implementation was designed only for state-based observationsonly.”
- str. 50 – niepełne pierwsze zdanie “surements stabilize as the robot completes the insertion process.”.

Należy jednak wyraźnie podkreślić, że rozprawa doktorska wyróżnia się niezwykłą starannością redakcji.

c) ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Zastosowane w rozprawie piśmiennictwo jest następstwem wyboru przez Autora przedmiotu badań. Piśmiennictwo składa się z 140 pozycji w tym z większość pozycji literaturowych z ostatnich kilku lat. W piśmiennictwie Doktorant cytuje 2 swoje prace naukowe [6] i [28]. Literatura jest prawidłowo cytowana w rozprawie doktorskiej, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką rozprawy doktorskiej.

Ocena: zastosowane piśmiennictwo jest obszerne, współczesne i prawidłowe.

d) wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata

Głównym celem badań naukowych prowadzonych przez Doktoranta było uzyskanie efektywnej metody sterowania robotem montażowym bazującej na algorytmach głębokiego uczenia ze wzmocnieniem.

W mojej ocenie główny cel rozprawy został osiągnięty.

W ramach przeprowadzonych badań Doktorant opracował metodę sterowania robotem przemysłowym wykorzystując metodę uczenia ze wzmocnieniem. Są to zaawansowane metody uczenia maszynowego, które umożliwiają agentom komputerowym nauczenie się optymalnych strategii działania poprzez interakcję ze



środowiskiem i otrzymywanie informacji zwrotnej w formie nagród. Doktorant stworzył wydajną procedurę uczenia agenta na rzeczywistym robocie przemysłowym. Dodatkowo opracował nowy algorytm nazwany Multimodal Variational DeepMDP (MVDeepMDP) pozwalający na szybką adaptację wstępnie wytrenowanego agenta do nowych produktów na linii produkcyjnej i do nowego środowiska. Opracowana przez Doktoranta metoda została przetestowana na problemie montażu elementów elektronicznych do odpowiednich miejsc na płycie drukowanej, może być jednak stosowana w innych systemach zrobotyzowanego montażu.

Dla oceny rozprawy doktorskiej kluczowe znaczenie mają jej tezy, bowiem wysiłek wkładany w przygotowane rozprawy doktorskiej powinien zmierzać w kierunku udowodnienia postawionych tez lub weryfikacji trafności postawionych hipotez badawczych.

Kandydat na stronie 3 rozprawy doktorskiej stawia hipotezę badawczą sformułowaną następująco: „[...] *deep reinforcement learning algorithms combined with multimodal representation learning can be used effectively in flexible manufacturing systems to train robotic systems that can quickly adapt to new tasks and manipulated objects. Furthermore, it is expected that the multimodal information fusion mechanism will have an impact on extracting task-relevant features, which, in turn, will improve the generalization capability of the learned policy*”.

W mojej ocenie postawiona hipoteza badawcza świadczy o zidentyfikowaniu problemu do rozwiązania oraz jednoznacznie określa cel pracy Doktoranta.

W mojej ocenie realizacja celów badawczych opisanych w rozprawie doktorskiej została poprzedzona dogłębnymi studiami Doktoranta nad piśmiennictwem dotyczącym tego tematu. Doktorant szczegółowo opisał w rozprawie obiekt badań, cel prowadzonych badań został uzasadniony, a postawiona hipoteza badawcza została poprawnie zweryfikowana. Uwzględniając powyższe uważam, że cel pracy oraz hipoteza badawcza są właściwe i prezentują poziom odpowiedni dla rozpraw doktorskich.



W mojej opinii zaproponowane i zastosowane przez Doktoranta narzędzia i metody badawcze można uznać za poprawne i odpowiednio dobrane do postawionego problemu.

W mojej ocenie, rozprawa doktorska mgr. inż. Grzegorza Bartyzela stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Opracowana przez Kandydata metoda sterowania robotem bazująca na uczeniu ze wzmocnieniem została zrealizowana za pomocą poprawnych metod i właściwej analizy otrzymanych wyników. Doktorant wykazał się również umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

h) pytania do Doktoranta związane z tematem rozprawy doktorskiej

1. W rozdziale 3.1 napisano, że surowe obrazy pochodzące z kamery mają rozmiar 1024 x 512 pikseli, które po zmniejszeniu rozdzielczości H/8 x W/8, dalej W/8 x W/8 mają rozmiar 128 x 128 pikseli (str. 28), tymczasem stanowisko laboratoryjne zostało wyposażone w kamery Basler Dart z rozdzielczością 1280 x 960 pikseli (str. 34). Z czego wynikają te różnice rozdzielczości kamer?
2. Jakie są główne ograniczenia opracowanej przez Pana algorytmu MVDeepMDP i jak mogą one wpływać na jej efektywność?
3. Czy widzi Pan możliwość zastosowania opracowanych algorytmów i metody MVDeepMDP w innych zastosowaniach przemysłowych, nie tylko na zrobotyzowanych stanowiskach montujących elementy elektroniczne?
4. Napisał Pan że praca została wykonana we współpracy z firmą Fitech sp. z o.o. która realizowała projekt „*Inteligentny robot do autonomicznego prowadzenia procesów obsadzania i montażu podzespołów elektronicznych bazujący na sztucznej inteligencji i sieciach neuronowych*” POIR.01.01.01-00-0123/19 finansowany ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014- 2020. Czy brał Pan udział w realizacji projektu? Jaki zakres pracy badawczych został wykonany we współpracy z firmą Fitech sp. z o.o.? Czy firma Fitech sp. z o.o. jest zainteresowana potencjalnym wdrożeniem opracowanych przez Pana algorytmów sterowania robotami do zrobotyzowanych systemów montażu elementów elektronicznych?



j) ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

Realizacja prac badawczych i zawartość pracy, w której zostały one opisane świadczą o zaawansowanej wiedzy Autora mieszającej się w obszarze dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Wiedza ta koresponduje z obszarem prowadzonych przez niego badań. Rozprawa doktorska obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki oraz świadczy o znajomości współczesnej literatury z zakresu metod uczenia maszynowego oraz sterowania robotami przemysłowymi. Weryfikacja postawionej hipotezy badawczej oraz oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest opracowanie nowej metody sterowania robotem przemysłowym bazującej na uczeniu ze wzmocnieniem świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

2. Dorobek publikacyjny doktoranta

Mgr inż. Grzegorz Bartyzel jest współautorem 2 artykułów naukowych znajdujących się w czasopismach naukowych ujętych w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2020 r., poz. 1668 z późniejszymi zmianami) tj. „Komunikat Ministra Nauki z dnia 5 stycznia 2024 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych”. Zgodnie z wykazem publikacji zamieszczonym w bazie danych Bibliografii Publikacji Pracowników AGH w Krakowie mgr inż. Grzegorza Bartyzela opublikował 2 artykuły naukowe w których opisano wyniki prac badawczych:

1. **Grzegorz Bartyzel**, „*Multimodal variational DeepMDP: an efficient approach for industrial assembly in high-mix, low-volume production*”, IEEE Robotics & Automation Letters“, ISSN 2377-3766, 2024, vol. 9, no. 12, s. 11297–11304, [MNiSW: 200 pkt.];



2. **Grzegorz Bartyzel**; Wojciech Półchłopek; Dominik Rzepka, „*Reinforcement Learning With Stereo-View Observation for Robust Electronic Component Robotic Insertion*”, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2023, [MNiSW: 100 pkt];

oraz 2 fragmenty książek z materiałów konferencyjnych:

3. Carlos Fernando Coelho Valadares, Piero Macaluso, **Grzegorz Bartyzel**, Maciej Dziubiński, Christopher Koeppen, Gabriel Anunciação Kopte, Janusz Twardak, Francesco Vincelli, Nicola Poerio, „*MIMP: Modular and Interpretable Motion Planning framework for safe autonomous driving in complex real-world scenarios*”, IEEE IV 2024: the 35th IEEE Intelligent Vehicles Symposium : June 2-5, 2024, Jeju Island, Korea.

4. **Grzegorz Bartyzel**, „*Uczenie ze wzmocnieniem dla montażu elementów o skomplikowanej geometrii: [streszczenie] — [Reinforcement learning for assembling parts of complex geometry : abstract]*” W: Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce 2021: materiały konferencyjne - wiosna : [22 marca 2021] / red. nauk. Jędrzej Nyckowiak, Jacek Leśny. — Poznań : Młodzi Naukowcy, 2021. — ISBN: 978-83-66743-21-2; e-ISBN: 978-83-66743-22-9. — S. 112.

Prace naukowe mgr. inż. Michała Sierszyńskiego wg bazy Scopus były cytowane 4 razy, indeks Hirsha wynosi 1.

3. Podsumowanie

Po szczegółowym zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr. inż. Grzegorza Bartyzela pod tytułem „*Głębokie uczenie ze wzmocnieniem dla zrobotyzowanego montażu przemysłowego*” stwierdzam, że spełnia ona wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim zawarte w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2024 r., poz. 1571 z późniejszymi zmianami).

Stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata mgr. inż. Grzegorza Bartyzela w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego



przewodzenia przez niego pracy naukowej (art. 187 ust. 1 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r.).

Ponadto stwierdzam, że przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Bartyzela pod tytułem: „*Głębokie uczenie ze wzmocnieniem dla zrobotyzowanego montażu przemysłowego*” jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, które mieści się w obszarze dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (art. 187 ust. 2 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r.).

Stwierdzam również, że przedstawiona od oceny rozprawa doktorska jest samodzielną pracą pisemną przygotowaną w języku angielskim, która zawiera streszczenie w języku polskim (art. 187 ust. 3 i 4 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r.).

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Grzegorza Bartyzela do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie zgłaszam w recenzji wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej. Recenzowana rozprawa doktorska wyróżnia się wysokim poziomem merytorycznym oraz oryginalnością zastosowanych metod badawczych. Praca ma charakter interdyscyplinarny mieszający się w obszarze dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (metody sterowania robotami przemysłowymi) oraz dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja (zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego). Opracowana metoda sterowania robotem przemysłowym ma moim zdaniem duży potencjał wdrożeniowy w szczególności we zrobotyzowanych systemach montażowych. Wyniki przeprowadzonych prac badawczych zostały opublikowane przez Doktoranta m.in. w samodzielnym artykule opublikowanym w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Robotics and Automation Letters* ISSN:2377-3766 z Impact Factor: 4,6 i 200 pkt. wg. wykazu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego.