

Zielona Góra, 14.03.2025r.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Wydział Nauk Inżynieryjno-Technicznych
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Podgórna 50
65- 246 Zielona Góra
M.Witczak@issi.uz.zgora.pl

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia ...25.03.2025
Zarejestrowano pod nr 310.13.7/24
PodpisGm

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgra inż. Grzegorza Bartyzela
pod tytułem

**„Zastosowanie głębokiego uczenia ze wzmocnieniem w robotycznym montażu
przemysłowym”**

opracowana na zlecenie

Akademii Górniczo - Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

I. Problem naukowy i obszar rozprawy

Problematyka naukowa poruszana w recenzowanej rozprawie doktorskiej dotyczy wzmocnienia elastyczności współczesnych linii produkcyjnych, które charakteryzują się skomplikowanymi procesami technologicznymi. W ciągu ostatnich lat zauważalny jest wzrost wykorzystania stanowisk zautomatyzowanych oraz robotów przemysłowych, w związku z tym, że obecnie tradycyjne metody sterowania robotami są niewystarczające w przypadku elastycznych linii produkcyjnych. Kolejną przeszkodą w zwiększeniu elastyczności oraz konserwacji linii produkcyjnych są wysokie koszty związane z uzbrojeniem stanowisk montażowych w zaawansowane czujniki i/lub systemy do zmiany narzędzi. W świetle powyższych faktów, popularność zdobyły metody oparte na algorytmach bazujących na sztucznej inteligencji. Innymi słowy, pojawiła się potrzeba na stworzenie metody, która będzie bazować na uczeniu ze wzmocnieniem (ang. reinforcement learning, RL), pozwalając na efektywne rozwiązanie problemu montażu wielkowymiarowych elementów na jednej linii produkcyjnej. Dzięki analizie możliwych korzyści i ograniczeń, w

pracy została skonstruowana wydajna procedura uczenia agenta RL na rzeczywistym robocie przemysłowym oraz został opracowany algorytm, który pozwala na szybką adaptację wstępnie wytrenowanego agenta RL do nowych produktów na liniach produkcyjnych. Niniejsza metoda charakteryzuje się uczeniem wielomodalnej reprezentacji dynamiki środowiska, co pozwala agentowi RL na pozyskanie niezbędnych informacji o wykonywanym zadaniu. Ponadto, usprawnia interakcję agenta RL ze środowiskiem poprzez możliwość asynchronicznego procesu zbierania danych w stosunku do procesu uczenia. Proces ten stanowi istotne i aktualne wyzwanie, które wymaga opracowania optymalnych rozwiązań. Przegląd literatury przedstawiony w rozprawie ukazuje szereg potencjalnych rozwiązań, odnoszących się do tego problemu.

Przedstawiona do recenzji rozprawa skupia się na stworzeniu metody bazującej na uczeniu ze wzmocnieniem celem umożliwienia efektywnego rozwiązania problemu montażu różnorodnych elementów na pojedynczej linii produkcyjnej. Niniejsza metoda pozwala na szybkie dostosowanie się zrobotyzowanego stanowiska montażowego do dynamicznie zmieniających się elementów w elastycznym środowisku produkcyjnym. Wspomniane rozwiązanie może zastąpić powszechnie stosowane metody.

Celem przedstawionych badań było wykazanie możliwości zastosowania metody uczenia się ze wzmocnieniem w rzeczywistych zadaniach montażu robotów przemysłowych.

Natomiast do najważniejszych zadań badawczych należy zaliczyć:

- Opracowanie efektywnych ram do uczenia agentów RL w rzeczywistych systemach robotycznych, ze szczególnym uwzględnieniem zadań związanych z montażem robotów przemysłowych.
- Opracowanie nowatorskiej metody zwanej Multimodal Variational DeepMDP, celem usprawnienia procesu przenoszenia agentów RL do nowych obiektów na liniach produkcyjnych.

Podsumowując, należy zaznaczyć, że praktycznym rezultatem rozprawy jest zaprojektowanie metody bazującej na uczeniu ze wzmocnieniem celem umożliwienia efektywnego rozwiązania problemu montażu różnorodnych elementów na pojedynczej linii produkcyjnej.

II. Koncepcja i struktura rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera 5 rozdziałów, 2 dodatki oraz bibliografię obejmującą 140 pozycji. Podstawę pracy stanowią rozdziały od drugiego do czwartego włącznie, które prezentują oryginalne wyniki naukowe doktoranta w zakresie automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznej, a w szczególności rozwoju metod sterowania robotami, które służą do zwiększania elastyczności działania w skomplikowanych procesach przemysłowych.

Kolejne rozdziały pracy zorganizowane są w następujący sposób:

- **Rozdział 1** stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Prezentuje on podstawowe cele i zakres pracy. Rozdział przedstawia również znaczenie robotów przemysłowych w nowoczesnych systemach produkcyjnych, które służą jako integralne komponenty do automatyzacji powtarzalnych i pracochłonnych zadań. Doktorant w niniejszym rozdziale opisał znaczne postępy, które poczyniono w dziedzinie robotyki oraz podkreśla znaczenie szybkiej adaptacji do nowych zadań w dziedzinie przemysłu. Autor dokonał szczegółowej analizy dostępnej literatury oraz omówienia głównych problemów stawianych w rozprawie. W rozdziale zostały również omówione metody wielokrotnego montażu oraz procesu uczenia się z wzmocnieniem, celem przedstawienia ich potencjalnej roli w poprawie efektywności i elastyczności montażu.
- W **rozdziale 2** autor skupia się na kompleksowym zobrazowaniu dostępnej wiedzy na temat uczenia ze wzmocnieniem oraz wytłumaczeniem niezbędnych definicji i koncepcji, takich jak procesy decyzyjne Markowa. W rozdziale została dokonana szczegółowa analiza RL, ze szczególnym uwzględnieniem Soft Actor-Critic (SAC), który posłużył doktorantowi jako podstawowy algorytm do przeprowadzenia badań naukowych. Autor przybliżył popularne metody sterowania zgodnego, w tym hybrydowe sterowanie pozycją/siłą oraz, tzw. sterowanie admisyjne. Rozdział zawiera również krótkie wprowadzenie do autoenkoderów wariacyjnych (Variational Autoencoders, VAE).
- W **rozdziale 3** autor szczegółowo przedstawił i scharakteryzował proponowane ramy dla zrobotyzowanych zadań montażu przemysłowego. Autor rozpoczął rozdział precyzyjnym opisem zadania w kontekście procesu decyzyjnego Markowa. W kolejnej części rozdziału została zaprezentowana architektura sterowania stworzona dla systemu zrobotyzowanego. Autor poświęcił niniejszy rozdział na zaprezentowanie zbioru programów komunikacyjnych, które mogłyby skutecznie posłużyć do uczenia agentów RL w rzeczywistym zrobotyzowanym systemie. W rozdziale została przedstawiona kontynuacja opisu konfiguracji laboratorium, do którego niezbędne są elementy znajdujące swoje zastosowanie w systemie zrobotyzowanym, narzędzia wykorzystywane w eksperymentach oraz procesy resetowania środowiska. Autor zaprezentował również szczegółowy proces wdrożenia architektury modelu, którego wykorzystał do przeprowadzenia badań. Rozdział kończy się podsumowaniem zawierającym wnioski i wynikami analiz przeprowadzonych przez autora. Końcowa część rozdziału prezentuje porównanie wydajności między agentami RL a konwencjonalnymi metodami sterowania.
- **Rozdział 4** autor poświęcił na główne osiągnięcia rozprawy. Doktorant szczegółowo opisał metodę Multimodal Variational DeepMDP (MVDeepMDP) oraz jej wdrożenie. Powyższe rozwiązanie zostało opracowane w celu poprawy uogólnienia wyuczonej polityki wdrożonej w rzeczywistym przemysłowym systemie robotycznym. Pozostała część rozdziału koncentruje się na szczegółowym przedstawieniu otrzymanych rezultatów. Dotyczy ona ilościowej analizy wyuczonej polityki, porównując

transferowalność MVDeepMDP z innymi najnowocześniejszymi metodami poprzez zestaw scenariuszy testowych. Pozostała część rozdziału koncentruje się na analizie jakościowej proponowanego podejścia. Autor omawia wpływ zastosowanych rozwiązań na wydajność polityki i analizuje możliwe wybory.

- **Rozdział 5** poświęcony jest podsumowaniu przeprowadzonych badań. Autor opisał znaczenie swoich badań i wniosków dla przyszłego procesu pilotażowego wdrożenia w rzeczywistym środowisku produkcyjnym. W podsumowaniu pracy zostało zaprezentowane również zastosowanie architektury sekwencyjnej oraz znaczenie metody SLAC. Autor podkreślił również znaczenie wpływu różnych konfiguracji obserwacji jako potencjalny kierunek przyszłych badań.
- **Wykaz bibliograficzny** obejmuje 140 pozycji, które bardzo dobrze odzwierciedlają istniejący stan wiedzy.

III. Oryginalne osiągnięcia i znaczenie poznawcze

Przedmiotem pracy badawczej było zaprojektowanie metody bazującej na uczeniu ze wzmocnieniem celem umożliwienia efektywnego rozwiązania problemu montażu różnorodnych elementów na pojedynczej linii produkcyjnej. Autor wykazał, że proponowana strategia, zwana Multimodal Variational DeepMDP (MVDeepMDP) w większości przypadków jest w stanie umożliwiać montaż nowych elementów bez konieczności dodatkowego trenowania.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Przeprowadzenie badań, które pozwoliły na opracowanie efektywnego systemu wdrażania proponowanych rozwiązań dla zrobotyzowanych zadań montażu przemysłowego.
- Stworzenie wydajnej procedury uczenia agenta RL na rzeczywistym robocie przemysłowym.
- Opracowanie algorytmu Multimodal Variational DeepMDP (MVDeepMDP), który pozwala na szybką adaptację wstępnie wytrenowanego agenta RL do nowych produktów na liniach produkcyjnych.

Zaproponowana metoda i przeprowadzone badania umożliwiają rozwiązanie problemów związanych z wyzwaniami, które są szczególnymi barierami dla szybkiej adaptacji do zmieniających się warunków produkcyjnych i osiągnięciu elastyczności w przypadku skomplikowanych procesów montażowych. Świadczy to jednoznacznie o osiągnięciu przez autora celu postawionego we wstępnej części pracy.

Dorobek naukowy autora rozprawy obejmuje 2 artykuły w czasopismach indeksowanych w JCR:

- Journal of Intelligent & Robotic Systems (100 pkt.);
- IEEE Robotics and Automation Letters (200 pkt.);

jedną pracę w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych:

- 2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV);

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w wyżej wymienionych pozycjach, uważam że mgr inż. Grzegorz Bartyzel zrealizował cel rozprawy, udowodnił postawione tezy oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i praktycznych szeroko rozumianej współczesnej automatyki i robotyki poprzez zaprojektowanie metody bazującej na uczeniu ze wzmocnieniem celem umożliwienia efektywnego rozwiązania problemu montażu różnorodnych elementów na pojedynczej linii produkcyjnej.

IV. Uwagi i komentarze dotyczące rozprawy

- 1) Jaka była motywacja dotycząca zastosowania strategii Ape-X w punkcie 3.2? Doktorant przechodzi bezpośrednio do jej zastosowania bez wcześniejszej analizy innych możliwych rozwiązań.
- 2) Rysunek 3.4 przedstawia architekturę sterowania rozważanego systemu montażowego. Uważam, że autor powinien poświęcić więcej uwagi podczas opisywania poszczególnych komponentów Ape-X. W obecnym układzie ich rola i struktura nie jest oczywista.
- 3) Rozważane zadania montażowe można zdefiniować jako procesy powtarzalne. Powyższe podejście umożliwia zastosowanie sterowania iteracyjnego z uczeniem (ang. iterative learning control, ILC) [1] i analityczne zagwarantowania zbieżności zastosowanej strategii sterowania. Czy doktorant brał pod uwagę zastosowanie ILC i/lub jego porównanie z proponowanymi strategiami bazującymi na uczeniu ze wzmocnieniem?
- 4) Motywacje odnośnie doboru i parametrów sieci konwolucyjnych przedstawionych na rys. 3.9 powinny być przedstawione w bardziej formalny sposób.
- 5) Rozdział 4 przedstawia rozszerzenie strategii zaproponowanych we wcześniejszej części pracy, umożliwiającą lepsze właściwości uogólniające w sensie wykonywania podobnych zadań. Czy zdaniem doktoranta możliwe jest zaproponowanie miar ilościowych umożliwiających obiektywną ocenę odporności zaproponowanych rozwiązań? W tym kontekście chciałbym zwrócić uwagę doktoranta na technikę, tzw. stochastycznej odporności [2].

[1] Rogers, Eric, et al. Iterative learning control algorithms and experimental benchmarking. John Wiley & Sons, 2023.

[2] Witczak, Marcin, and Przemysław Pretki. "Design of an extended unknown input observer with stochastic robustness techniques and evolutionary algorithms." *International Journal of Control* 80.5 (2007): 749-762.

V. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają jednak na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólną pozytywną ocenę. Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego problemu naukowego o praktycznym wymiarze, a także dobrze świadczą o erudycji Doktoranta. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Grzegorza Bartyzel rozprawa pt. „Zastosowanie głębokiego uczenia ze wzmocnieniem w robotycznym montażu przemysłowym” spełnia w pełni kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571) i wnoszę o dopuszczenie mgra Grzegorza Bartyzela do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Biorąc pod uwagę jakość rezultatów rozprawy oraz związane z nią publikacje w czasopismach JCR wnioskuję również o jej wyróżnienie.

Prof. dr hab. inż. Marcin Witczak