



Szczecin 08.01.2022

Prof. dr hab. inż. Mirosław Pajor

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

**Recenzja pracy doktorskiej pt. ” Zastosowanie metod uczenia ze
wzmocnieniem do sterowania robotem przemysłowym współpracującym z
człowiekiem” autorstwa mgr inż. Tymoteusza Lindnera.**

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka prof. PP z dnia 03.11.2022.

1. Przedstawienie treści pracy

Przemysł maszynowy podlega szybkim przemianom można śmiało powiedzieć, że zmiany te mają charakter rewolucyjny, a analitycy nazwali ten proces czwartą rewolucją przemysłową „Przemysł 4.0”. Jednym z paradygmatów czwartej rewolucji przemysłowej jest zmiana podejścia do charakteru współpracy człowieka z maszyną (robotem). W odróżnieniu od wcześniejszego podejścia („Przemysł 3.0), w którym zakładano separację świata ludzi i maszyn (fabryki bezzałogowe), na obecnym etapie rozwoju przemysłu zakłada się, że maszyny (roboty) mają współpracować „ramię w ramię” z człowiekiem. Tak przyjęty paradygmat sprawił, że bardzo silnie rozwijają się prace konstrukcyjne i badawcze nad dostosowaniem maszyn i ich algorytmów sterowania do bezpośredniej współpracy z człowiekiem. Aktualnie na rynku dostępne są roboty kooperacyjne zwane cobotami umożliwiające realizację tego paradygmatu w pewnej ograniczonej formie. Problem współpracy człowieka z maszyną (robotem) ma dwa aspekty: pierwszy to konieczność wyposażenia robota w dodatkowe układy sensoryczne wykrywające kontakt z człowiekiem, drugi aspekt to reakcja robota na ten kontakt, czyli algorytmy sterowania robotem w warunkach kontaktu. Intensywny rozwój i badania obserwuje się w obu tych aspektach. Po pierwsze, maszyny (roboty) wyposaża się w nowe sensory np.: wizyjne, sztuczne skóry, sensory pomiaru siły itp., których celem jest zarejestrowanie obecności człowieka i bezpośredniego kontaktu dotykowego z

człowiekiem. Po drugie, wprowadza się nowe procedury w algorytmach sterowania, spowalniające pracę robota lub całkowicie go zatrzymujące w momencie wykrycia człowieka w otoczeniu robota oraz „podatne” zachowanie się napędów pod działaniem siły kontaktu człowieka z ramieniem robota (procedura chętnie używana do programowania robotów). Jednak procedury te tylko w pewnym ograniczonym aspekcie umożliwiają współpracę robota z człowiekiem, dającym się opisać w ściśle deterministyczny sposób. Pełna, swobodna i bezpośrednia współpraca człowieka z maszyną (robotem) wymyka się jednak z reżimu opisu deterministycznego i wymaga wprowadzenia w systemie sterowania robotem autonomiczności działania, zapewniającej odpowiednią reakcję na zachowanie się człowieka, czyli tzw. sztucznej inteligencji. Z pomocą badaczom działającym w tym obszarze, przychodzą odkrycia związane z rozwojem technik „uczenia maszynowego” bazujące na sztucznych sieciach neuronowych. Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w tę bardzo interesującą tematykę, niezmiernie ważną dla rozwoju systemów inteligentnego sterowania maszynami wytwórczymi. Pan mgr inż. Tymoteusz Lindner podejmuje się realizacji badań nad problematyką zastosowania technologii sztucznej inteligencji z wykorzystaniem metod uczenia ze wzmocnieniem (*reinforcement learning*) do sterowania robotem przemysłowym współpracującym z człowiekiem. W recenzowanej pracy Autor zaproponował autorski, system sterowania robotem przemysłowym wyposażonym w układ sensoryczny wykrywania człowieka w jego przestrzeni roboczej. Opracowany inteligentny układ sterowania bazujący na metodach uczenia maszynowego ze wzmocnieniem (*reinforcement learning*), umożliwia robotowi przemysłowemu autonomiczne omijanie przeszkód (w tym człowieka) dynamicznie pojawiających się w jego przestrzeni roboczej bez przerywania realizacji zaprogramowanych czynności.

Opiniowana praca doktorska liczy 138 strony i składa się z jedenastu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu symboli i skrótów oraz czterostronicowego załącznika prezentującego w formie tabelarycznej wybrane hiperparametry algorytmów stosowanych w badaniach. Na końcu zamieszczono spis literatury zawierający zestaw 134 cytowanych pozycji literaturowych. Dobór źródeł literaturowych jest prawidłowy i nie budzi zastrzeżeń. Autor dogłębnie przeanalizował dostępne źródła i wyciągnął poprawne wnioski podsumowujące stan wiedzy. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: wstęp, przegląd literatury, sformułowanie problemu badawczego, cel i teza pracy oraz pięć rozdziałów

merytorycznych zakończonych rozdziałem z wnioskami końcowymi i omówieniem perspektyw dalszych badań.

W pierwszych rozdziałach rozprawy Autor definiuje problem i syntetycznie opisuje problematykę badań. Następnie po wnikliwej analizie stanu zagadnienia wykazuje potrzebę podjęcia dalszych badań nad problematyką zastosowania metod uczenia maszynowego ze wzmocnieniem (*reinforcement learning*) w zagadnieniach sterowania robotem współpracującym z człowiekiem.

W rozdziale czwartym Autor przedstawia cele i tezę pracy badawczej. W rozprawie przyjęto następującą tezę: *Gradientowe algorytmy uczenia ze wzmocnieniem mogą być zastosowane do opracowania bezpiecznego systemu sterowania robotem przemysłowym, współpracującym z człowiekiem*. Przyjęty cel i zakres pracy oraz jej teza nie budzą zastrzeżeń i są adekwatne do rozwiązywanych problemów naukowych.

W rozdziale piątym Autor przedstawił stosowane w zagadnieniach sterowania robotami algorytmy uczenia maszynowego ze wzmocnieniem (*reinforcement learning*). Ponadto dla wybranych algorytmów, które zamierzał zastosować w pracy, przedstawił syntetycznie ich podstawy matematyczne.

W rozdziale szóstym Autor zaprezentował stanowisko badawcze. Zastosowane w pracy stanowisko badawcze miało dwojaką naturę: wirtualną i rzeczywistą. Autor wykorzystując technologię „cyfrowych bliźniaków” zbudował w środowisku *MuJoCo* model cyfrowy robota, na którym realizował badania symulacyjne testowanych algorytmów sterowania. Rzeczywiste stanowisko badawcze składało się z robota Mitsubishi RV-12SDL-12S, wyposażonego w zaprojektowaną przez Autora głowicę do wykrywania przeszkód, zamontowaną na ostatnim członie manipulatora. Na tym stanowisko przeprowadzono wszystkie badania eksperymentalne z zastosowaniem wyników uzyskanych na cyfrowym bliźniaku.

W kolejnym, siódmym rozdziale opisane zostały wyniki badań pozycjonowania robota z zastosowaniem różnych algorytmów uczenia sieci neuronowych. Badania zostały wykonane początkowo na modelu wirtualnym, a następnie na robocie Mitsubishi. Na podstawie tych badań Autor wytypował algorytmy uczenia sieci ze wzmocnieniem, do dalszych etapów badań obejmujących zagadnienia omijania przeszkód w przestrzeni roboczej.

Rozdział ósmy zawiera opis badań nad algorytmami omijania przeszkód. Autor zastosował zmodyfikowaną kombinację dwóch algorytmów HER (*Hindsight Experience Replay*) i DDPG (*Deep Deterministic Policy Gradient*), przy czym zastosowano dwóch

„agentów” (oddzielne algorytmy) do pozycjonowania i omijania przeszkód. Badania przeprowadzono analogicznie jak w poprzednim etapie, najpierw na modelu wirtualnym, a następnie na rzeczywistym robocie.

W kolejnym rozdziale dziewiątym Autor przedstawił badania algorytmów omijania przeszkód podczas realizowania ruchu po zadanych trajektoriach: trajektorii kołowej i trajektorii prostokątnej. Do badań zastosowano wcześniej zaprogramowane algorytmy. Badania zrealizowano najpierw na modelu wirtualnym, a następnie na obiekcie rzeczywistym.

W rozdziale dziesiątym Autor zaprezentował wyniki eksperymentów badań działania opracowanych algorytmów sterujących robotem podczas współpracy z człowiekiem. Badania zrealizowano na rzeczywistym stanowisku. Podczas realizacji przez robota zaprogramowanego zadania przemieszczania elementów, w strefie pracy robota pojawiał się człowiek zgodnie z ustalonym scenariuszem. Algorytmy poprawnie reagowały omijając człowieka.

W ostatnim rozdziale jedenastym przedstawiono dyskusję otrzymanych wyników badań, w której Autor wyciągnął wnioski z przeprowadzonych eksperymentów i ocenił poziom weryfikacji postawionej w pracy tezy. Ponadto Autor przedstawił koncepcję dalszych badań mających na celu doskonalenie opracowanych algorytmów sterowania pracą robota współpracującego z człowiekiem

Podsumowując należy stwierdzić, że na podstawie zaprezentowanej analizy wyników badań numerycznych i eksperymentalnych Autor rozwiązał postawiony problem naukowy i udowodnił tezę pracy.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Dużym atutem pracy doktorskiej Pana Tymoteusza Lindnera jest innowacyjny charakter proponowanych rozwiązań. Autor posiada niezwykle dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami w zakresie komputerowego modelowania i symulacji cyfrowych, złożonych problemów technicznych. Autor posiada również rozległą wiedzę z zakresu teorii uczenia maszynowego (*machine learning*) i programowania systemów informatycznych. Recenzowana praca doktorska ma silny pierwiastek informatyczny zaadoptowany na grunt inżynierii mechanicznej. Autor ma świadomość zachodzących przemian w obszarze technik sterowania maszynami (robotami) i biegle

porusza się w tych zagadnieniach. Ponadto Autor ma duże doświadczenie w projektowaniu urządzeń mechatronicznych (głowicy śledzącej przeszkody w przestrzeni roboczej manipulatora) oraz ich programowaniu. Wyniki pracy badawczej Pana Tymoteusza Lindnera dostarczają narzędzi wspomagających procesy projektowania systemów sterowania robotami współpracującymi z człowiekiem. Należy również zaznaczyć, że Autor w celu walidacji działania proponowanych rozwiązań inteligentnych algorytmów sterowania maszyn współpracujących z człowiekiem, przeprowadził szereg badań eksperymentalnych, wykazując przy tym wysokie umiejętności planowania tych badań. Zrealizowane eksperymenty doświadczalne potwierdził poprawność działania opracowanych algorytmów autonomicznego sterowania bezkolizyjną pracą robota przemysłowego podczas współpracy z człowiekiem. Zaplanowane zadania Autor zrealizował konsekwentnie, a uzyskane rezultaty poddał stosownej analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Badania porównawcze dokładności pozycjonowania robota, sterowanego przez wybrane algorytmy SI z procedurą uczenia ze wzmocnieniem.
2. Opracowanie systemu sterowania do autonomicznego omijania przeszkód bazującego na algorytmach SI z procedurą uczenia ze wzmocnieniem.
3. Opracowanie systemu sterowania do autonomicznej, ciągłej współpracy z człowiekiem, bazującego na algorytmach SI z procedurą uczenia ze wzmocnieniem.

Bardzo wysoko oceniam oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy wymienionych osiągnięć.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Autor w pracy stwierdza, że zbudowano model symulacyjny robota odzwierciedlający jego parametry mechaniczne i dynamiczne. W pracy zaprezentowano jedynie rozwiązanie zagadnienia odwrotnego kinematyki dla zastosowanego robota. W jaki sposób i na jakim poziomie złożoności zamodelowano własności dynamiczne robota wykonującego złożone ruchy przestrzenne? Czy zamodelowano również napędy i sterujące nimi fabryczne generatory trajektorii, zastosowane w rzeczywistym robocie?
2. Porównując wyniki symulacji prezentowane na rys.44 z wynikami badań doświadczalnych prezentowanych na rys. 49 widać pewne różnice w trajektoriach ruchu

(pomimo bardzo zbliżonych funkcji gęstości prawdopodobieństwa). Czym to można wytłumaczyć? Pytanie to wiąże się bezpośrednio z uwagą nr 1 – na jakim poziomie szczegółowości zamodelowano cyfrowego bliźniaka?

3. W rozdziale 8 zaprezentowano wyniki badań procedur omijania przeszkód przez robota. Układ sterowania był dwuwarstwowy: jedna warstwa „agent1” działała w trakcie omijania przeszkody, a druga warstwa „agent2” działała z dala od przeszkody, gdy robot jechał na punkt docelowy. Autor napisał (str.79 drugi akapit), że mamy równoległe działanie obu „agentów”, co raczej nie jest uprawnione. Warstwy te nie działają bowiem jednocześnie, tylko są sekwencyjnie przełączane w zależności od kontekstu. Czy Autor rozważał rzeczywistą pracę równoległą obu warstw („agentów”). Agent 2 realizując (bardzo skutecznie) trajektorię przemieszczania się do punktu docelowego byłby wówczas korygowany przez agenta 1, tzn. „spychany” z toru tak aby ominąć przeszkodę (agent 1 nie przejmowałby całkowicie kontroli nad ruchem). Być może układ nie traciłby dobrych właściwości podążania do wskazanego punktu przez agenta 2. Wówczas można zapisać, że obie warstwy pracują równoległe.
4. Ponieważ opracowany układ sterowania nie jest bezpośrednim generatorem trajektorii, zadaje on tylko dane interpolacyjne do rzeczywistego generatora trajektorii robota, zatem działa podobnie jak interpolator obrabiarkowy (tzw. interpolacja zgrubna – czysto geometryczna bez dziedziny czasu), który jest źródłem danych do następnej warstwy tzw. generatora dokładnego (uwzględniającego przyspieszenia i hamowania oraz czasu ruchów – zwykle implementowanego w falowniku). Czy wyznaczano błąd trajektorii ruchu robota sterowanego jego własnym (fabrycznym) generatorem trajektorii ? Błędy te będą się bowiem nakładały na błędy generowane przez opracowywane algorytmy.
5. Na tym etapie pracy zaprojektowane algorytmy osiągnęły dokładność pozycjonowanie i odtwarzania zadanej trajektorii obciążoną stosunkowo dużym błędem jak na standardy przemysłowe. Robot z taką dokładnością może pracować jedynie jako układ do niezbyt dokładnego przemieszczania obiektów. Jakie czynności trzeba podjąć w dalszych badaniach aby zwiększyć dokładność układu sterowania do poziomu zbliżonego do standardowych robotów przemysłowych?

Tekst pracy został napisany bardzo starannie, część edytorska pracy jest na najwyższym poziomie i zasługuje na bardzo wysoką ocenę. W trakcie czytania pracy nie zauważyłem błędów redakcyjnych.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzeniu Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 r. (z późniejszymi zmianami). Zrealizowana przez mgr. inż. Tymoteusza Lindnera praca charakteryzuje się bardzo wysokim poziomem innowacyjności. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego oraz wskazuje na duży poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. **Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Biorąc pod uwagę merytoryczny poziom pracy mgra inż. Tymoteusza Lindnera, zgodnie z Regulaminem obowiązującym na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, wnioskuję o możliwość jej wyróżnienia. Praca zawiera wartościowe i oryginalne rozwiązania w zakresie algorytmów autonomicznego sterowania robotów w warunkach ciągłej współpracy z człowiekiem, bazujących na algorytmach SI z procedurą uczenia ze wzmocnieniem. Praca wpisuje się w najnowsze trendy badawcze w tym obszarze. Na podstawie pracy doktorskiej Doktorant napisał trzy publikacje potwierdzające Jego znaczący dorobek, w tym dwie punktowane za 100 pkt:

- *Reinforcement Learning-Based Algorithm to Avoid Obstacles by the Anthropomorphic Robotic Arm* / Tymoteusz Lindner (WIM), Andrzej Milecki (WIM) // Applied Sciences - 2022, vol. 12, iss. 13, p. 6629-1-6629-24, IF: 2.838, 100.0 pkt,
- *Positioning of the Robotic Arm Using Different Reinforcement Learning Algorithms* / Tymoteusz Lindner (WIM), Andrzej Milecki (WIM), Daniel Wyrwał (WIM) // International Journal of Control, Automation and Systems - 2021, vol. 19, no. 4, p. 1661-1676, IF: 2.964, 100.0 pkt .

