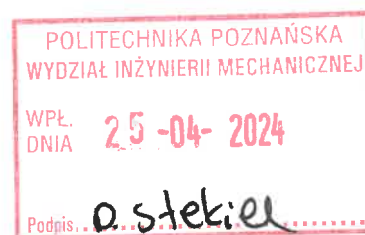


Białystok, 23.04.2024 r.

dr. hab. inż. Kanstantsin Miatluk, prof. PB
Katedra Układów Dynamicznych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Patryka Nowaka

pt. *Sterowanie robotem za pomocą odpornego na awarie osi algorytmu bazującego na sztucznej inteligencji*

promotor: Prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki
promotor pomocniczy: dr inż. Dominik Rybarczyk

wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej na podstawie uchwały nr 4/III/03/2024 z dnia 4 marca 2024 r. i oznaczonej pismem nr DIM.075.80.2024 z dnia 05 marca 2024 r.

1. Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska została przedstawiona na 103 stronach maszynopisu formatu A4 w języku polskim. Praca składa się z 6 rozdziałów, wstępu, podsumowania oraz wykazu literatury. Zamieszczono w niej 53 rysunki, 3 tabele i 81 cytowanych w pracy pozycji bibliograficznych. Na początku rozprawy został również umieszczony wykaz ważniejszych oznaczeń.

Głównym celem pracy doktorskiej autorstwa mgr inż. Patryka Nowaka było opracowanie algorytmu sterowania opartego o model symulacyjny robota, algorytm genetyczny, funkcję nagrody oraz sztuczne sieci neuronowe, który pozwala na pracę robota, mimo awarii jego jednej albo dwóch osi, z jednoczesnym omijaniem przeszkód.

W *pierwszym* rozdziale którym jest *Wstęp* przez Autora podano ogólne dane dotyczące rozwoju robotyki i stosowania robotów, opisano argumenty do rozwijania algorytmów odpornych na błędy (ang. Fault Tolerant Control – FTC), w zastosowaniu do manipulatorów, przedstawiono treść pracy i krótko opisano poszczególne rozdziały pracy.

W drugim rozdziale pt. „Rozpoznanie stanu wiedzy z zakresu odpornego na błędy sterowania robotami” Autor przedstawił podstawowe informacje, wprowadzając czytelnika w zagadnienia *odpornego na błędy sterowania*, które są w dalszej roboczej części pracy wykorzystywane. Dość dokładnie i przejrzysto zostały opisane trzy główne kategorie systemów sterowania odpornego na uszkodzenia: pasywne FTCS (PFTCS), aktywne FTCS (AFTCS) oraz hybrydowe FTCS (HFTCS). Przedstawiono przegląd rozwoju dziedziny sterowania odpornego na błędy rozpoczynając od początku lat 90-tych. Doktorant podczas przekładu zagadnień z tej dziedziny odwołuje się do pozycji literaturowych.

Autor również zwrócił uwagę i przeanalizował metody sztucznej inteligencji stosowane w sterowaniu odpornym na błędy manipulatorów. Opisano sterowniki z logiką rozmytą, adaptacyjne sterowanie rozmyte typu 2 (*ang.* adaptive fuzzy type-2 backstepping control - AFT2BC), algorytm wykrywania usterek robota z wykorzystaniem funkcji neuro-rozmytych, sztuczna sieć neuronowa w postaci perceptronu wielowarstwowego, neuronowy adaptacyjny obserwator struktury zmiennej wysokiego rzędu, i in.

W oddzielnych podrozdziałach opisano odpowiednio sterowanie w trybie ślizgowym oraz inne metody sterowania odpornego na błędy, takie jak: sterowanie oparte na kontrolerze aktywnego wnioskowania, metodę Newtona-Raphsona (NRM), hybrydowe sterowanie predykcyjne, i in.

Jako wynik przeglądu literatury pokazano, że dotychczas nikt nie opracował algorytmu, który pozwoliłby na sterowanie manipulatorem wykonującym zadanie „pick and place” w przypadku awarii osi, z jednoczesnym omijaniem przeszkód, znajdujących się w przestrzeni roboczej robota. Przegląd literatury wykonano przez Doktoranta stosując głównie wyszukiwarkę internetową Google Scholar.

W kolejnym *trzecim* rozdziale zamieszczono cele cząstkowe oraz główny cel pracy, jakie postawił sobie Pan mgr P. Nowak. Zasadniczym celem badawczym jest opracowanie algorytmu sterowania opartego o model symulacyjny robota, algorytm genetyczny, funkcję nagrody oraz sztuczne sieci neuronowe, który pozwala na pracę robota, mimo awarii jego jednej albo dwóch osi, z jednoczesnym omijaniem przeszkód. Założono, że opracowany algorytm oraz analiza uzyskanych wyników badań mają dać odpowiedź dotyczącą możliwości sterowania robotem przemysłowym, który jest odporny na awarię do dwóch osi robota oraz zapewnia omijanie przeszkód. W tym rozdziale również opisano zaproponowane rozwiązanie, zbudowane środowisko symulacyjne oraz stanowisko badawcze. Przedstawiono ogólny schemat działania systemu.

W czwartym rozdziale pt. „Algorytm odporny na uszkodzenie osi robota” Autor przedstawił opracowany algorytm odporny na wystąpienie awarii jednej albo dwóch dowolnych osi robota. Założono, że po wykryciu awarii osi, układ sterowania będzie sterować robotem w taki sposób, aby wykorzystując tylko sprawne osie, poruszał się po nowej trajektorii. Zaproponowano system sterowania, który składa się z trzech głównych bloków: modelu symulacyjnego robota, algorytmu genetycznego oraz sztucznej sieci neuronowej. Opracowany algorytm generuje trajektorię, dla w zasadzie dowolnego, realizowalnego zadania i bazuje na modelu robota, zaimplementowanym w środowisku symulacyjnym MuJoCo oraz na funkcji nagrody, zgodnie z którą wybierana jest akcja optymalna w danym kroku symulacji.

Żeby zoptymalizować ruch TCP robota, Doktorant zaproponował wykorzystanie algorytmu genetycznego (AG) do znalezienia optymalnych wartości parametrów funkcji nagrody dla zadanych danych początkowych, zwanych "sytuacją środowiskową". W celu oszacowania wartości parametrów funkcji nagrody dla „sytuacji środowiskowych” innych niż te, które były stosowane przez algorytm genetyczny, Autor zaimplementował sztuczną sieć neuronową SSN do algorytmu sterowania robotem FTC. Również zbudowano model robota i zrealizowano badanie dotyczące zminimalizowania zużycia energii przez system sterowania podczas generowania optymalnej trajektorii TCP robota.

W piątym rozdziale opisano zrealizowane badania symulacyjne oraz doświadczalne. Do przeprowadzenia badań oraz do zbierania i prezentacji wyników, zaprojektowano szereg algorytmów napisanych w języku *Python*. W celu realizacji badań algorytmu do określania strefy roboczej robota, Doktorant zaprojektował metodę pozwalającą na wyznaczenie obszaru roboczego robota dla danej konfiguracji łańcucha kinematycznego. Do wykonania badań symulacyjnych posłużono się modelem symulacyjnym robota, wykonanym w silniku fizycznym MuJoCo. Podobnie do wykonanych testów symulacyjnych, przeprowadzono również testy rzeczywiste na robocie przemysłowym Mitsubishi RV-12SDL. Opisane przeprowadzone badania symulacyjne oraz doświadczalne potwierdziły skuteczność zaproponowanej przez Autora metody i zaimplementowanego algorytmu.

Kolejną część pracy stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników, a także krótka informacja dotycząca dalszej aktywności naukowej planowanej przez Autora. Pracę doktorską kończy wykaz literatury.

2. Ocena pracy

Tematyką naukową dotyczącą sterowania robotów za pomocą odpornych na błędy algorytmów (FTC) zajmuje się wiele ośrodków badawczych nie tylko w Polsce, lecz także na świecie. Jednak do chwili obecnej nie znaleziono rozwiązania, które w przypadku wykrycia awarii osi robota, umożliwi kontynuowanie ruchu z omijaniem przeszkód i zakończenie tego ruchu, tzn. pozycjonowania punktu centralnego narzędzia (TCP) robota. Dlatego obecnie, powinny być ciągle ulepszane metody badawcze pozwalające na optymalne sterowanie robotów za pomocą odpornych na błędy algorytmów (FTC) bazujących na sztucznej inteligencji. Taką kolejną cegiełką odnośnie do znanych już metod badawczych wnosi omawiana praca.

Uważam, że poruszony w rozprawie doktorskiej temat badawczy jest interesujący i ważny z naukowego i inżynierskiego punktu widzenia.

Główne zalety przedstawionej do recenzji pracy to:

- 1) Opracowanie modelu symulacyjnego robota uwzględniającego parametry kinematyczne, umożliwiającego sprawdzanie algorytmu w środowisku wirtualnym, pozwalającego na obliczenie i zminimalizowanie zużycia energii.
- 2) Opracowanie funkcji nagrody, zgodnie z którą oceniane są poszczególne kroki robota oraz algorytmu optymalizującego trajektorię ruchu TCP robota w postaci algorytmu genetycznego.
- 3) Zastosowanie sztucznej sieci neuronowej do predykcji parametrów funkcji nagrody na podstawie aktualnej sytuacji środowiskowej.
- 4) Opracowanie systemu odpornego na uszkodzenia osi robota oraz pozwalającego na omijanie znajdujących się w obszarze roboczym przeszkód.
- 5) Wykonanie badań symulacyjnych i doświadczalnych potwierdzających skuteczność działania proponowanego rozwiązania oraz osiągnięcie zaplanowanych celów pracy doktorskiej.

3. Uwagi i pytania

1. W podrozdziale 4.2 (str. 44) stwierdzono: „Zgodnie z funkcją funkcja nagrody pierwotnie przedstawioną w postaci (28) jako: $r(i) = dg(i) - de(i)$, gdzie: i - numer kroku, $r(i)$ - wartość nagrody w i -tym kroku, $dg(i)$ - odległość TCP do punktu docelowego, $de(i)$ - suma odległości poszczególnych ramion robota od jednej lub dwóch

przeszkód, im mniejsza była wartość nagrody r , tym korzystniejszy, z punktu widzenia algorytmu, był oceniany ruch TCP robota. W związku z tym algorytm powinien wybierać takie przemieszczenie w danym kroku, aby dążyć do jej zmniejszania”.

Co spowodowało wybór przez Autora w pracy nazwy „funkcja nagrody” zwykle stosowaną w uczeniu maszynowym jako funkcja oceny? Funkcja oceny powinna premiować rozwiązania najbardziej zbliżone do wyznaczonych parametrów zadania. Czy nie powinna funkcja nagrody dążyć do zwiększenia, a nie zmniejszenia jak stwierdzono w pracy, w porównaniu z funkcją kary używaną i dążącą do zminimalizowania w zadaniach optymalizacji? Np. w przypadku uczenia się przez wzmacnianie celem jest nauczenie się przez agenta optymalnej lub prawie optymalnej polityki, która maksymalizuje „funkcję nagrody”.

2. W podrozdziale 4.2 (str. 46) w podpisie do równania funkcji nagrody (31) „gdzie: p_m, p_t – parametry” wydają się sensownym bardziej precyzyjne opisanie, jak np. „gdzie: p_m, p_t – parametry o wartościach mieszczących się w przedziale od 0 do 1”.
3. W podrozdziale 4.3 (str. 47) Doktorant stwierdza: „Dodatkowo, algorytm powinien realizować postawione zadanie, wykonując jak najmniejszą liczbę kroków albo zużywając jak najmniej energii”. Bardzo proszę o wyjaśnienie tego stwierdzenia. Czyli co powinno zużywać jak najmniej energii?
4. W podrozdziale 4.4 „*Opis procesu sterowania*” (str. 50) stwierdzono przez Autora, że w procesie sterowania: „...wolny ruch tj. pozycjonowanie (obracanie o kąt β_s), rozpoczynał się najczęściej w odległości mniejszej niż 20 mm od punktu docelowego. Dzięki temu ruch TCP robota w jego końcowej fazie był płynniejszy, bezpieczniejszy i bardziej precyzyjny”. Czy podczas realizacji badań zmniejszenie prędkości ruchu manipulatora Mitsubishi RV-12SDL powodowało zwiększenie precyzyjności pozycjonowania TCP robota? W rzeczywistości zwykle zmiana prędkości ruchu manipulatora robotów przemysłowych i uniwersalnych nie powinna wpływać na precyzyjność pozycjonowania TCP robota.
5. W podrozdziale 4.4 (str. 51) również opisano: „Główny moduł sterujący przedstawiono jako program komputerowy”. Czy jest sens, i jeżeli tak, czy planowano przedstawienie głównego modułu sterującego jako moduł hardwarowy?
6. W podrozdziale 4.6 (str. 56) opisano przez Autora że „Za pomocą programu CAD Inventor wyznaczono środki masy każdego z segmentów (ramion). Znając masę całego robota oraz jego wymiary geometryczne, w tym programie wyznaczono zarówno środki masy poszczególnych segmentów, jak i ich masy”. W jaki sposób wyznaczono środki

masy poszczególnych ramion robota, jak i ich masy? Wydaje się bardziej dokładnym stwierdzenie *wyznaczono przybliżono* zamiast *wyznaczono*.

7. W jaki sposób udało się doktorantowi w schemacie pomiarowym zużycia energii przez robota (Podrozdział 4.7, Rys.20) podłączyć amperomierz do jednej z faz układu napędowego robota Mitsubishi RV-12SDL? Jakie problemy zostały napotkane przez Autora podczas podłączenia amperomierza i realizacji pomiarów natężenia prądu?
8. W podrozdziale *Abstract* na stronie 6 znane zadanie robotów „złap i odłóż” w języku angielskim opisano jako „catch-and-put tasks”. Natomiast w innych podrozdziałach pracy (np. podrozdział 3.1, str. 37), Autor opisuje to samo zadanie jako zadanie „pick-and-place”. W celu jednolitości wydaje się sensownym stosowanie w pracy jednego określenia zadania, tzn. „pick-and-place” powszechnie stosowanego w literaturze.
9. W wielu miejscach pracy zamiast małej litery powinna występować duża litera na początku zdania, np.: „w takich zastosowaniach... (wiersz 13, str.11), „w takich przypadkach...” (wiersz 14, str. 11) „z tego względu...” (wiersz 29, str. 11), „w badanym w pracy rozwiązaniu ...” (wiersz 11, str. 12), „w rozdziale 4...”, „w rozdziale 5...”, (str.12), „w rzeczywistych zastosowaniach...” (wiersz 7, str. 44), i in.
10. W tekście pracy w niektórych miejscach występują błędy ortograficzne, np.: „specjalny algorytmu...” (wiersz 3, str. 12) oraz „wykonujących zadnia...” (wiersz 1, str. 13).
11. Zamiast podpisu w języku angielskim pod rysunkiem 5 (ryc. 5), należało go przedstawić w języku polskim, podobnie jak podpisy pod pozostałymi rysunkami.
12. Rys. 21 przedstawiony w wersji elektronicznej – plik PDF, nie umieszczono w wersji papierowej pracy (str. 63).
13. Na str. 63 i w innych miejscach pracy spotykamy pojęcie „silnik fizyczny”. Dobrze byłoby wyjaśnić, że jest to moduł oprogramowania wykorzystywany w środowisku symulacyjnym MuJoCo do rozwiązywania zagadnień fizycznych.
14. Zrealizowane badania opisane w ostatnim podrozdziale 5.5 *Badania zastosowania sterowania robotem metodą FTC do współpracy z człowiekiem* są bardziej przekonujące w aspekcie rozpoznawania i lokalizowania obiektów w przestrzeni roboczej robota oraz pozycjonowania robota w celu realizacji operacji „pick-and-place” niż z punktu widzenia możliwości współpracy robota z człowiekiem.

Powyższe uwagi i pytania mają charakter informacyjny oraz dyskusyjny i nie powinny wywrzeć znaczącego wpływu na ogólną bardzo dobrą ocenę przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej.

4. Podsumowanie

Recenzowana praca dowodzi znacznej wiedzy Doktoranta w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*. Zarówno przedstawiona praca, jak i publikacje Doktoranta w czasopismach naukowych, udowadniają jego umiejętność samodzielnego prowadzenia dalszej pracy naukowej.

Uważam, że rozprawa doktorska pt. *Sterowanie robotem za pomocą odpornego na awarie osi algorytmu bazującego na sztucznej inteligencji* autorstwa Pana mgr inż. Patryka Nowaka **spełnia wymagania** stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2021 poz. 478 z późn. zm.) i **może stanowić podstawę o ubieganie się przez Niego o stopień naukowy doktora nauk inżynieryjno-technicznych** w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*. Wnoszę o dopuszczenie Jego do obrony publicznej.

Konstantin Miatluk