

Kielce, dnia 22 kwietnia 2024 r.

dr inż. hab. Piotr Woś prof. PŚk  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn  
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia  
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce



## Recenzja

pracy doktorskiej Pana mgra inż. Patryka Nowaka

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

wykonanej w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych, Instytutu Technologii Mechanicznej,  
Wydziału Inżynierii Mechanicznej w Politechnice Poznańskiej,  
przygotowanej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Andrzeja Mileckiego.

*Podstawa opracowania recenzji: recenzja została sporządzona w związku z powołaniem przez  
Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej do pełnienia funkcji  
recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych Panu  
mgr inż. Patrykowi Nowakowi.*

*(pismo nr DIM.075.80.2024 z dn. 05.03.2024 r.)*

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest praca doktorska Pana mgra inż. Patryka Nowaka pt. *Sterowanie robotem za pomocą odpornego na awarie osi algorytmu bazującego na sztucznej inteligencji*, w której przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych wykorzystujące metody sztucznej inteligencji do opracowania odpornej na uszkodzenia osi robota przemysłowego.

Głównym celem pracy doktorskiej jest opracowanie układu sterowania robotem przemysłowym, który będzie w stanie skutecznie radzić sobie z awariami w poszczególnych osiach napędowych i gwarantować dokładne pozycjonowanie w określonych punktach z jednoczesnym omijaniem przeszkód w jego strefie pracy. Zaproponowany algorytm łączy w

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'P. Woś', located at the bottom right of the page.

sobie modele genetyczne, sztucznej sieci neuronowej i robota przemysłowego w celu jego pozycjonowania w przypadku awarii jednej lub dwóch osi. Recenzowana rozprawa posiada 6 wyodrębnionych rozdziałów wraz ze wstępem i przeglądem stanu wiedzy z omawianego zakresu. W ramach rozprawy szczególną uwagę poświęcono wyjaśnieniu funkcjonowania algorytmów sterowania robotem odpornym na błędy, analizie zaproponowanego podejścia, zaprezentowaniu układu badawczego oraz przedstawieniu wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych przeprowadzonych na zaimplementowanych algorytmach sterowania. Ponadto, Pan mgr inż. Patryk Nowak zamieścił na początku *Streszczenie* w języku polskim i angielskim, *Spis treści* oraz *Spis symboli i skrótów* wykorzystanych w rozprawie. W części końcowej rozprawy można znaleźć *Podsumowanie* oraz *Bibliografię*. Rozprawa doktorska zawiera 103 stron i została opatrzona 53 rysunkami i 3 tabelami.

## **2. Wybór tematu i zakres pracy**

Doktorant w swojej rozprawie wskazał, iż celem pracy było opracowanie algorytmu sterowania, który umożliwiłby robotowi przemysłowemu działanie w przypadku awarii jednej lub obu osi z jednoczesnym omijaniem przeszkód. Algorytm sterowania bazuje na modelu symulacyjnym robota, algorytmie genetycznym, funkcji nagrody i sztucznych sieciach neuronowych. Prezentowane badania miały na celu osiągnięcie pięciu celów cząstkowych, do których Autor zaliczył: opracowanie środowiska symulacyjnego, opracowanie algorytmu sterowania robotem, badania algorytmu genetycznego, uczenie sztucznej sieci neuronowej oraz przeprowadzenie testów symulacyjnych i eksperymentalnych. W szczególności celem pracy było opracowanie algorytmu umożliwiającego sterowanie manipulatorem wykonującym zadanie „podnieś i umieść” w przypadku awarii poszczególnych osi przy jednoczesnym omijaniu przeszkód. Tezą pracy jest to, że algorytm pozwala na sterowanie robotem przemysłowym, który jest odporny na awarie dwóch osi i zapewnia omijanie przeszkód.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że zarówno temat rozprawy jak i zakres prac opisanych w rozprawie zostały określone właściwie.

## **3. Analiza rozprawy**

Swoją rozprawę Autor rozpoczął od *Wstępu*, w którym poruszył kwestie zastosowania robotów i manipulatorów przemysłowych w zakładach produkcyjnych i zautomatyzowanych liniach produkcyjnych oraz ich awarii, które mogą powodować znaczne straty dla przedsiębiorstw, zwłaszcza w niebezpiecznych środowiskach lub miejscach, gdzie serwisowanie jest niemożliwe. Sterowanie tolerujące uszkodzenia (ang. *Fault Tolerant Control*, FTC) ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia niezawodności działania, dlatego w rozprawie zaproponowano rozwiązanie umożliwiające pozycjonowanie robota sześcioposiowego w przypadku awarii jednej lub dwóch osi, przy jednoczesnym omijaniu przeszkód w jego przestrzeni roboczej. Algorytmy przedstawione w rozprawie wykorzystują techniki sztucznej inteligencji, takie jak algorytm genetyczny i sztuczną sieć neuronową, i

mają charakter uniwersalny, umożliwiając ich zastosowanie do robotów o zróżnicowanych strukturach kinematycznych.

W rozdziale 2-gim Autor podjął próbę rozpoznania stanu wiedzy z zakresu odpornego na błędy sterowania robotami. Doktorant szczegółowo opisuje odporne na błędy sterowania zgodne z najnowszymi osiągnięciami techniki. Według Autora obecność odpornych na błędy systemów sterowania odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu niezawodnego funkcjonowania maszyn przemysłowych, nawet w przypadku wystąpienia błędów lub awarii poszczególnych podzespołów. Systemy te mają charakter pasywny, aktywny lub hybrydowy i są niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa urządzeń krytycznych w procesie produkcyjnym. Doktorant wskazał kilka metod sztucznej inteligencji (AI) do stosowania w tych systemach. Opisał wykorzystanie sztucznej inteligencji w odpornym na błędy sterowaniu manipulatorami robotów, które obejmowały implementację sterowania rozmytego. W podrozdziale 2.4 Autor przedstawił również alternatywne metody sterowania, które są w stanie poradzić sobie z błędami awariami osi napędowych robotów. Wskazał na sterowanie trybem ślizgowym (SMC), jako popularną metodę stosowaną do sterowania systemami nieliniowymi, w tym ramionami robotów. Z analizowanej przez Autora literatury wynika, że wiodące metody stosowane obecnie i w przeszłości opierają się na AI i SMC. Inne metody obejmują zastosowanie regulatora proporcjonalno-całkująco-różniczkującego (PID), metody Newtona-Raphsona (NRM) i aktywnego regulatora wnioskowania (AIC).

Po przeprowadzonej analizie literatury, według Doktoranta zastosowanie sztucznej inteligencji w odpornym na błędy sterowaniu robotami manipulacyjnymi jest obiecujące w zakresie poprawy ich wydajności i niezawodności.

W podrozdziale 2.5, zatytułowanym *Podsumowanie przeglądu literatury* Doktorant przeprowadził wnikliwą analizę zagadnień dotyczących metod wykorzystujących sztuczną inteligencję (AI) i sterowanie trybem ślizgowym (SMC). Na tej podstawie Autor stwierdził, że nie opracowano żadnego algorytmu sterującego manipulatorem wykonującym zadanie „podnieś i umieść” w przypadku awarii osi, omijając jednocześnie przeszkody w przestrzeni roboczej robota.

W rozdziale 3-cim przedstawił opis i ogólny schemat działania systemu sterowania robotem metodą FTC. Podstawowym celem stworzonego algorytmu było określenie najbardziej efektywnej trasy od punktu centralnego narzędzia (TCP) do miejsca docelowego przy omijaniu przeszkód, a wszystko to przy wykorzystaniu pozostałych osi robota w celu zapewnienia optymalnej funkcjonalności.

W rozdziale 4-tym Autor opisał algorytmy i układy sterowania przeznaczone dla robotów przemysłowych, które posiadają zdolność do utrzymania pracy w obliczu awarii w jednej lub dwóch osiach. Systemy te wykorzystują kombinację algorytmów genetycznych i sztucznych sieci neuronowych w celu określenia optymalnych parametrów ruchu robota i oszacowania tych parametrów dla dowolnej sytuacji środowiskowej. Prezentowane algorytmy są odporne na błędy spowodowane uszkodzeniem jednej lub dwóch osi robota i mogą minimalizować zużycie energii przy jednoczesnym omijaniu przeszkód. Do oceny skuteczności układu sterowania zastosowano szereg kryteriów, takich jak ocena najkrótszej ścieżki punktu

środkowego narzędzia (TCP), zapewnienie uniknięcia kolizji i minimalizacja zużycia energii. System okazał się skuteczny we wszystkich scenariuszach, nawet w przy uszkodzeniu dwóch osi robota. Rozwój tych algorytmów i systemów sterowania stanowi znaczący krok naprzód w dziedzinie robotyki, ponieważ pozwala na większą odporność na błędy i elastyczność w zastosowaniach przemysłowych. Autor wskazał, że systemy te nadal mają ograniczenia i potrzebne są dalsze badania, aby je wyeliminować i poprawić ich wydajność.

Z kolei w rozdziale 5-tym Autor rozprawy przedstawił docelowy odporny na awarie algorytm osi oparty na sztucznej inteligencji do sterowania robotami przemysłowymi. Algorytm został przetestowany na robocie Mitsubishi RV-12SDL i był w stanie wykryć i kompensować awarie osi w czasie rzeczywistym. Prezentowane opracowanie wykorzystuje algorytm genetyczny do optymalizacji parametrów funkcji nagrody, która określa ruchy robota na podstawie jego odległości od przeszkód i bliskości punktu docelowego. Algorytm był w stanie wyznaczyć obszary robocze pod kątem różnych uszkodzeń osi manipulatora. Zastosowano go w trybie *off-line*, aby ocenić wykonalność ruchu poprzez zbadanie szerokiego zakresu wymaganych konfiguracji położenia osi. W pracy stwierdzono, że algorytm może być przydatny w zadaniach precyzyjnej manipulacji, w których dokładność pozycjonowania ma kluczowe znaczenie.

Na szczególną uwagę zasługują podrozdziały 5.2 i 5.3, w którym Autor przeprowadził badania symulacyjne na podstawie opracowanego oprogramowania sterującego robotem przemysłowym. Program generował trajektorię ruchu omijającą przeszkody, a algorytm optymalizował parametry funkcji nagrody. Doktorant wykorzystał dane tabelaryczne do wytrenowania sztucznej sieci neuronowej (ANN) w celu wygenerowania optymalnych lub quasi-optymalnych parametrów funkcji nagrody dla wszystkich możliwych sytuacji środowiskowych. Program był w stanie sterować modelem robota przemysłowego tak, aby osiągał wyznaczone pozycje docelowe bez kolizji z przeszkodami w 97% przetestowanych nowych sytuacji środowiskowych.

Skuteczność algorytmu wykazano poprzez testy na rzeczywistym sześcioksiowym robocie przemysłowym z uszkodzoną osią  $j_0$ . Najlepsze wyniki opracowanego algorytmu w kolejnych populacjach generowały coraz krótsze trajektorie ruchu robota, co według Autora wskazywało na poprawę wyników i możliwość dalszej optymalizacji. Opracowany układ sterowania robotem mógł kontynuować pracę w przypadku awarii jednej z jego osi. System wykorzystywał kombinację algorytmów genetycznych i sztucznych sieci neuronowych, aby optymalizować ruchy robota i omijać przeszkody w jego przestrzeni roboczej. System został również przetestowany pod kątem kryterium minimalnego zużycia energii, co w niektórych sytuacjach rzeczywiście skutkowało jej oszczędnością. Dokładność identyfikacji modelu momentu obrotowego zastosowanego w systemie sprawdzono poprzez porównanie z rzeczywistymi pomiarami robota.

W pracy (Roz. 5.5) opisano badania dotyczące wykorzystania systemu we współpracy z człowiekiem, podczas których rozpoznawano i lokalizowano obiekty znajdujące się w przestrzeni roboczej robota za pomocą kamery. Zaproponowany system FTC wykorzystywał

algorytm do rozpoznawania obiektów, określania współrzędnych i pozycjonowania ich w środowisku symulacyjnym.

Ostatni 6 –ty rozdział zawiera całościowe podsumowanie rozprawy oraz wnioski końcowe. Zamieszczono w nim syntetyczne podsumowanie wyników pracy oraz sformułowano 7 wniosków końcowych na podstawie zrealizowanych prac badawczych. System został pomyślnie przetestowany na robocie o sześciu stopniach swobody i można go wykorzystać do sterowania dowolnym manipulatorem od dwóch do sześciu stopniach swobody.

#### **4. Metodyka i obiekt badań**

Doktorant opracował odporny na awarie system sterowania (FTC) dla robotów przemysłowych, który może kontynuować pracę nawet w przypadku uszkodzenia jednej lub dwóch osi. Algorytm składa się z trzech głównych bloków: modelu symulacyjnego robota, algorytmu genetycznego i sztucznej sieci neuronowej. System wykorzystywał algorytm genetyczny do określenia optymalnych parametrów ruchu robota, biorąc pod uwagę przeszkody i najkrótszą trajektorię. Następnie zastosował sztuczną sieć neuronową do oszacowania parametrów funkcji nagrody dla dowolnej sytuacji środowiskowej. Algorytm był szkolony na zestawie sytuacji środowiskowych, a uzyskane dane posłużyły do uczenia sztucznej sieci neuronowej. Wykorzystując model momentu obrotowego, algorytm obliczał moment obrotowy wytwarzany przez każdy serwomechanizm. Dodatkowo algorytm uwzględniał wydajność napędów manipulatora i wykorzystywał funkcję nagrody do generowania trajektorii robota, zapewniając minimalne zużycie energii. Program jest odporny na błędy w postaci uszkodzenia jednej lub dwóch osi robota i potrafi omijać przeszkody w jego przestrzeni roboczej. Proces sterowania polega na pozycjonowaniu punktu środkowego narzędzia (TCP) robota za pomocą kombinacji szybkich i wolnych ruchów, mając na celu zminimalizowanie liczby wykonywanych kroków i ilości zużywanej energii. Autor rozprawy stwierdził, że system FTC był skuteczny we wszystkich testach, nawet w przypadku uszkodzenia dwóch osi.

Z przedstawionych w rozprawie dokonań Autora wynika, że opiniowana praca doktorska została zrealizowana bardzo dobrze pod względem merytorycznym oraz metodycznym, a prace badawcze i analityczne ułożone są w logiczną całość. Uzyskane wyniki badań stanowią oryginalny i istotny wkład Autora w poznanie badanych procesów związanych ze sterowaniem robotem przemysłowym.

#### **5. Oryginalność pracy**

Oryginalne rozwiązania zaproponowane przez Doktoranta oraz wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w sterowaniu, pozwala na ciągłą pracę robota nawet w obliczu uszkodzeń poszczególnych osi i przeszkód występujących w jego strefie pracy, minimalizując jednocześnie zużycie energii. Jest to duże osiągnięcie, świadczące o oryginalności rozprawy doktorskiej. Odporny na błędy system sterowania opracowany w tej rozprawie może mieć zastosowanie praktyczne. Ponadto energooszczędne podejście do systemu może prowadzić do znacznych oszczędności w zakresie kosztów eksploatacji i konserwacji. Zastosowanie

sztucznej inteligencji w systemach sterowania jest najnowszym trendem w naukach inżynieryjno-technicznych, a Doktorant z sukcesem zastosował ten kierunek w swoich badaniach.

Po zapoznaniu się z rozprawą stwierdzam, że opracowany system sterowania dla robota przemysłowego stanowi znaczący postęp w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

## **6. Uwagi i pytania do Autora pracy**

W trakcie analizy treści rozprawy nasuwa się kilka uwag, które być może pomogą Autorowi ukierunkować dalsze badania własne:

Uwagi ogólne:

1. Jakie są obecne standardy i regulacje dotyczące stosowania sztucznej inteligencji (AI) w robotyce w szczególności dla systemów sterowania odpornych na błędy, a także, w jaki sposób można je ulepszyć w kontekście poprawy bezpieczeństwa systemów sterowania robotami? Czy istnieją specjalne środki bezpieczeństwa, które można zaimplementować, aby minimalizować ryzyko awarii w algorytmie AI sterującym robotem? Jakie są potencjalne konsekwencje awarii w algorytmie bazującym na sztucznej inteligencji podczas sterowania robotem? Str. 16 - „Jedną z zalet zastosowania tego typu sterowania w procesie produkcyjnym, jest nie tylko bezpieczeństwo urządzeń krytycznych ...”. Proszę o uszczegółowienie tego zagadnienia.
2. W tytule i dalszych częściach pracy Autor używa określenia „sterowania odporne” i analogicznego dla niego skrótu FTC (ang. *Fault Tolerant Control*). Odporny algorytm sterowania odnosi się do systemu, który jest projektowany tak, aby wykazywał minimalne zakłócenia lub skutki awarii. Oznacza to, że może wykrywać i radzić sobie z awariami lub zakłóceniami w trakcie działania, minimalizując ich wpływ na cały system. W przypadku sterowania robotem, odporne algorytmy AI są projektowane tak, aby mogły szybko reagować na różne rodzaje awarii, zapewniając ciągłość operacji bez większych zakłóceń. Z kolei algorytm sterowania tolerancyjnego odnosi się do zdolności systemu do kontynuowania pracy w przypadku wystąpienia awarii lub zakłóceń, jednak z pewnymi ograniczeniami lub w zmienionym trybie pracy. W przypadku sterowania robotem, algorytm tolerancyjny reaguje na awarię poprzez zmianę strategii działania lub korzysta z alternatywnych ścieżek, aby nadal realizować określone cele, choćby z mniejszą efektywnością lub wydajnością. Proszę odnieść się do zagadnienia zamiennego używania nazewnictwa.
3. W ramach przeprowadzonych badań dotyczących algorytmu z kryterium minimalnego zużycia energii (Roz. 5.4), Autor porównywał efektywność robota przy uszkodzonych osiach dla konfiguracji oznaczonych od K1 do K22. Natomiast pominął, wcześniej zadeklarowaną w opisie parametrów badania, konfigurację K - wszystkie osie sprawne (Tabela III). Takie porównanie powinno być przeprowadzone w celu podkreślenia zasadności przeprowadzonych badań w kontekście właściwej efektywności robota.

4. Autor wielokrotnie używa stwierdzenia „konfiguracja kinematyczna” i „sytuacja środowiskowa”. Proszę o szersze wyjaśnienie, co oznacza w podrozdziale 4.6 stwierdzenie, że „do badania wykorzystano 220 „sytuacji środowiskowych”, a w podrozdziale 4.3. „wygenerowano 440 różnych sytuacji środowiskowych” **Si** w trakcie działania.”. Proszę o wyjaśnienie, jaka jest przyczyna praktycznego wykorzystania mniejszej ilości sytuacji środowiskowych?

## 7. Uwagi Redakcyjne

Prezentowana rozprawa jest solidnie wykonaną pracą doktorską, która prezentuje głęboką analizę i oryginalne wnioski na temat badanej problematyki. Zawiera starannie przeprowadzone badania empiryczne i gruntowną analizę teoretyczną, popartą wiarygodnymi źródłami literaturowymi.

Uwagi szczegółowe:

1. Spis ważniejszych symboli i skrótów - w części dotyczących skrótów, opisy powinny być ujednolicone. Autor używa naprzemiennie określeń w języku angielskim i polskim dla 41 skrótów pochodzących z określeń w języku angielskim.
2. Część skrótów nazw (metod, procesów, sterowań, itp.) Autor używa bezpośrednio w tekście rozprawy bez ich wcześniejszego rozwinięcia w danym rozdziale lub akapicie. Powoduje to, że czytelnik jest zmuszony do częstego korzystania z opisów skrótów umieszczonych w spisie na początku rozprawy w celu zrozumienia kontekstu.
3. Wielokrotne użycie (16 razy) odniesienia do rozprawy Autora „w niniejszej pracy” powinno być zastąpione określeniem „w tej pracy” lub „w rozprawie”.
4. Str. 19 – wyrażenie „o 5. stopniach” powinno być zamienione na „o 5-ciu stopniach” – w pracy można znaleźć wiele tego typu błędów.
5. Str. 53 – brak odniesienia do numeru tabeli „W Tabeli ...”
6. Wielokrotne użycie wyrażeń z błędami interpunkcyjnymi takich jak „w rozdziale 2. przedstawiono”, „wyników w 293. przypadkach z 440. rozpatrywanych”, „na rys. 5.” - również i w tym przypadku w pracy można napotkać wiele tego typu błędów.
7. Brak ujednolicenia dla odwołania do rysunków – np. „rys.14c ”, „rysunku 14c”.
8. Odwołania do rysunku 15-go na stronach 64 i 69, który znajduje się kilkanaście stron wcześniej (str. 45) – utrudnia to analizę rozprawy.
9. Uwagi dotyczące opisów rysunków – opisy są niejednoznaczne (np. używanie tylko samych skrótów) lub niekompletne (opis tylko w języku angielskim), co może utrudniać zrozumienie prezentowanych danych np.: „Rysunek 3. (SFT-PID-NFTSM) z (TDE)”, „Rysunek 5. a) Self organizing map neural network (SOMNN), b) Radial basis function neural network (RBFNN)”.

Pomimo wielu błędów interpunkcyjnych, sporadycznie stylistycznych i częstego używania skrótów w tym myślowych, rozprawa ma dużą wartość naukową, co do treści jest merytorycznie silna i wnosi istotny wkład do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Jej treść jest logiczna, spójna i dobrze argumentowana. Natomiast Autor powinien zrozumieć istotę ograniczenia ilości skrótów, właściwych opisów, znaczenie interpunkcji, oraz jej wpływ na czytelność i zrozumiałość tekstu naukowego.

## 8. Wnioski końcowe

Po analizie przedłożonej rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. *Patryka Nowaka* stwierdzam, że wnosi ona cenny wkład w poszerzenie wiedzy w zakresie nowych metod sterowania stosowanych w mechatronice oraz spełnia wymagania stawiane przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 poz. 261); ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Jednocześnie wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrany przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej.

dr inż. hab. Piotr Woś prof. PŚk

