

prof. dr hab. inż. Gabriel Kost  
Katedra Automatykacji Procesów Technologicznych  
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Politechnika Śląska  
44-100 Gliwice  
ul. Konarskiego 18A  
e-mail: gabariel.kost@polsl.pl  
tel.: 32/237-16-09

---

---

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Macieja KOŁODZIEJA**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Macieja KOŁODZIEJA, pt. „Synteza ruchu mobilnego robota z kołami mecanum”. Recenzję opracowano na podstawie:

- uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dn. 29 maja 2024 dot. powołania mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kołodzieja,
- pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta z dn. 3.06.2024, znak: RM-530-01-01/2024.

**1. Zakres tematyczny rozprawy**

Gwałtownie rozwijająca się automatyzacja dotyka obecnie wszystkich aspektów życia człowieka, zarówno sfery życia codziennego (aspekty domowe), jak i przemysłowego. Szczególnie mocno i dynamicznie procesy automatyzacji rozwijają się w zakresie szeroko rozumianych procesach budowy maszyn, poczynając od konstrukcji, przez przygotowanie produkcji, jej realizację (procesy technologiczne), aż po logistykę i magazynowanie oraz organizację procesów rynkowych. Jedną z gałęzi tego rozwoju są procesy robotyzacji, zarówno w zakresie robotyki stacjonarnej, ale również robotyki mobilnej, gdzie rozwój metod konstruowania, sterowania, programowania i organizacji

pracy robotów mobilnych w ramach szeroko pojętych procesów logistyki jest szczególnie dynamiczny (inralogistyka). Rozwój robotyki mobilnej związany jest głównie z rozwojem autonomicznych urządzeń samojeżdżących sterowanych zdalnie (wózki) i tzw. robotów kroczących, które obecnie wykorzystuje się głównie jako rozwiązania specjalne. Istotnym problemem robotyki mobilnej jest poszukiwanie rozwiązań z zakresu konstrukcji i sterowania szczególnie, że urządzenia te często wykorzystywane są w ograniczonych geometrycznie przestrzeniach, np. magazynach (ruch pomiędzy regałami), które cechuje ograniczona przestrzeń dróg jezdnych. Wymaga to od układów jeżdżących znacznej zwrotności ruchu. To zaś wymusza poszukiwanie odpowiedniej struktury mechanicznej układu jezdnego. Propozycje takich rozwiązań dotyczą np. poszukiwania możliwości zastosowania modułowej struktury układu jezdnego dobieranego stosownie do typu podłoża, wymaganych warunków realizacji ruchu (zwrotność ruchu, zasięg) oraz zastosowania układów jezdnych bazujących np. na kołach omnikierunkowych, jakimi są koła typu *MECANUM*. Czynniki te sprawiają, że w robotyce mobilnej rozwiązania układu jeżdżącego robota są dość zróżnicowane: układy 2-, 4-, 6-cio kołowe, czy gąsienicowe. Nieodłącznym problemem w każdym ze stosowanych przypadków jest sprawne, skuteczne funkcjonalnie sterowanie układem jednym robota mobilnego. Rozwiązania takie są zazwyczaj rozwiązaniami prototypowymi, stosowanymi indywidualnie dla konkretnych rozwiązań układów jezdnych.

Jedną z takich propozycji są coraz powszechniejsze próby wykorzystania tzw. kół szwedzkich, zwanych również kołami *MECANUM*. Dzięki odpowiedniej budowie i sterowaniu pozwalają one na uzyskanie tzw. ruchu „omnikierunkowego”, co znakomicie zwiększa zwrotność platformy mobilnej napędzanej tego typu układem. O ile rozwiązanie konstrukcyjne kół typu *mecanum* jest ustalone, to głównym kierunkiem rozwoju układów jezdnych bazujących na tym rozwiązaniu są prace związane na opracowaniem skutecznego funkcjonalnie układu sterowania takim napędem.

Tego rodzaju podejście zaproponował Doktorant w swojej pracy i podjął się zadania opracowania skutecznego sposobu sterowania platformą jezdną opartego na przeprowadzonej syntezie ruchu robota mobilnego z kołami *mecanum* (mobilny robot przemysłowy Husarion Panther). Jak podkreśla Autor (pkt. 1.2/7) motywacją do podjęcia pracy było dostrzeżenie „*ograniczeń w dziedzinie mobilnej robotyki, szczególnie w kontekście ruchu omnikierunkowego i jego implementacji w robotach z kołami Mecanum*”, szczególnie w kontekście dużej złożoności obliczeniowej proponowanych dotychczas rozwiązań w tym zakresie. Autor stawia tezę (pkt. 1.3/8), że:

**„Zastosowanie obliczeniowo wydajnych metod sterowania odpornego i neuronowego mobilnym robotem z kołami mecanum napędzanego nadmiarowo, umożliwiło realizację ruchu nadążnego z dużą dokładnością, pomimo występowania zmiennych warunków pracy robota.”**

Uważam, że zaproponowany temat i sposób jego rozwiązania jest ważny, aktualny, ciekawy i wykazuje znaczny potencjał badawczy, szczególnie w kontekście szerszego upowszechniania i bardziej powszechnego zastosowania robotów jeżdżących z układem jezdnym bazującym na kołach mecanum i wpisuje się w aktualne trendy rozwoju robotyki mobilnej, w szczególności w zakresie sterowania autonomicznych robotów mobilnych.

## **2. Treść rozprawy i jej kompozycja**

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 8-mu rozdziałów (łącznie 147 stron).

W początkowej części pracy (pkt. I. *Wstęp* i pkt. II. *Podstawy teoretyczne*), Doktorant w bardzo syntetycznej i skróconej formie przedstawia uzasadnienie wyboru tematu pracy, definiuje tezę pracy oraz podstawowe informacje dotyczące stosowanych rozwiązań z zakresu stosowanych algorytmów sterowania ruchem dynamicznych układów nieliniowych, jakimi są układy jezdne omnikierunkowe i nadmiarowe. Autor wskazał stosowane w tym zakresie algorytmy sterowania robotem kołowym z kołami *mecanum*.

W pkt. III/21 Autor przedstawia przedmiot badań jakim jest robot jeżdżący Husarion Panther, 4-kołowy z kołami *mecanum* oraz podstawowe zagadnienia związane z syntezą jego ruchu. Omawiana jest jego kinematyka prosta i odwrotna w zakresie ruchu robota po prostej i po okręgu, jako najbardziej typowych i wystarczających przypadków ruchu robota. Rozwiązano również problem dynamicznych równań ruchu robota w oparciu o równania Maggiego.

W celu „pełnego” rozpoznania obiektu badań Autor przeprowadza proces jego identyfikacji. Wykorzystuje do tego celu metodę adaptacyjną pozwalającą na identyfikację parametryczną obiektu w czasie rzeczywistym i metodę wsadową. Procesy te pozwoliły Doktorantowi na estymację parametrów modelu matematycznego robota (pkt. III) uwzględniającą właściwości jego modelu fizycznego (rzeczywistego). Uzyskane w wyniku identyfikacji parametry poddano procesowi walidacji wykorzystując program Matlab/Simulink. Proces ten umożliwił oszacowanie wskaźników jakości w oparciu o pierwiastek błędu średniokwadratowego i pozwolił na ocenę dokładności odwzorowania modelu matematycznego robota Husarion Panther.

W pkt V/51 Doktorant omówił problem sterowania nadążnego robotem przeprowadzając serię symulacji ruchu robota w oparciu o program Matlab/Simulink. Autor wykorzystał dwie metody. W pierwszej, metodzie syntezy ruchu analizowanego robota Autor zaadaptował algorytm sterowania odpornego oparty na koncepcji sterowania równoważnego i ślizgowego (pkt. VI.1). Opracował układ sterowania nadążnego i przeprowadził testy symulacyjne ruchu robota, wykorzystując zaadaptowany algorytm sterowania odpornego. W drugiej (pkt. V.2/80) wykorzystano algorytm sterowania neuronowego opartego na sieci RVFL. Dla obu metod sterowania zaprojektowano i zbudowano układ sterowania nadrzędnego. Przeprowadzone testy dotyczyły symulowania ruchu robota w ruchu po prostej i po łuku. Podczas symulacji zadawano w postaci parametrycznej zakłócenia na ruch poszczególnych kół *mecanum*. Badania te wykazały poprawność opracowanego modelu matematycznego.

W rozdziale VI zostały przeprowadzone badania doświadczalne opracowanego systemu sterowania nadążnego z wykorzystaniem robota Husarion Panther. Badania przeprowadzono na dedykowanym stanowisku szybkiego prototypowania sterowania robota, wyposażonym w kartę pomiarową dSpace 1103 pozwalającą na dokonywanie pomiarów w czasie rzeczywistym. Jak zauważa Autor, słabym punktem opracowanego sposobu sterowania rzeczywistym robotem jest wyznaczenie sygnału sterowania dla drugiego koła (równanie III.63), gdyż w rozważaniach modelowych założono, że oba koła cechują się identyczną mocą i oporami ruchu. Problem wynika zaś z zastosowanego rozwiązania pracującego w czasie rzeczywistym. Dobrano podłoże po którym porusza się robot. Jest nim mata z pianki poliuretanowej T25. Podobnie jak w poprzednich testach symulację przeprowadzono dla ruchu po prostej i po łuku oraz zastosowano zakłócenia w postaci parametrycznej. Blok sterowania zamodelowano w programie Matlab/Simulink. Rozdział kończą wnioski w których Doktorant podkreśla, że „*uzyskane przebiegi weryfikacyjne są wysoce zbliżone do parametrów przebiegów symulacyjnych, niewielkie różnice wynikają z niedokładności w oszacowaniu parametrów modelu matematycznego MRKM*” (kół *mecanum*).[...] [...]Otrzymane wyniki świadczą że oba zaproponowane algorytmy sterowania nadążnego, są wysoce wydajne w sterowaniu robotami z kołami *mecanum*”.

Rozdział VII zawiera podsumowania i kierunki dalszych badań. Autor analizuje tu i uogólnia przyczyny nieścisłości występujące pomiędzy modelem matematycznym i opartej na min symulacji jazdy robota, a wynikami uzyskanymi w procesie przeprowadzonego eksperymentu fizycznego. Analizuje przyjęte wskaźniki jakości, które pozwoliły Mu na

porównanie uzyskanych wyników, w tym sprawności obliczeniowej opracowanych algorytmów sterowania. Uważam, że przedstawione wnioski są dość jednostronne. Autor koncentruje się jedynie na porównaniu jakościowym opracowany przez siebie algorytmów sterowania nadążnego bazujących na przeprowadzonej syntezie ruchu 4-ro kołowego robota jeżdżącego na kołach *mecanum*. Autor nie analizuje jednak sprawności obliczeniowej stosowanych algorytmów sterowania w kontekście innych, istniejących już rozwiązań, na co wskazuje w tezie swojej pracy (pkt. I.1). Wydaje się, że Autor ocenił sprawność obliczeniową wykorzystanych algorytmów sterowania w oparciu o ich efektywne działanie w zakresie sterowania w czasie rzeczywistym, gdyż nie podał kryteriów tej oceny.

Z kolei rozdział VIII/143 dotyczy bibliografii i obejmuje 81 pozycji, w tym 3 pozycje współautorskie Doktoranta, na które zwraca On uwagę w pkt. I.5/9 dysertacji pt. *Publikacje*. Uwagę zwraca fakt, że wśród przedstawionych w wykazie literatury (pkt. VIII/143) pozycji źródłowych jest 30 pozycji starszych niż 10 lat, a 21 jest sprzed 2000 roku. Wynika to z pewnością z faktu, że algorytmy sterowania zastosowane w rozwiązaniu proponowanym przez Doktoranta (poza sterowaniem neuronowym) nie są obecnie przedmiotem szczególnych analiz literaturowych. Dotyczy to głównie sterownia odpornego.

Pracę kończą streszczenia w języku polskim i angielskim.

Uważam, że praca jest napisana poprawnie. Jej kompozycja jest właściwa. Eksperymenty prowadzone dla tych samych warunków, dla obu zastosowanych metod sterowania, odpornego i neuronowego pozwalają na łatwe porównanie otrzymanych wyników i ich ocenę.

### **3. Oryginalne osiągnięcia**

Wziąwszy pod uwagę złożoność problemu badawczego, a przede wszystkim jego innowacyjność i oryginalność dla robotyki mobilnej jeszcze raz podkreślam, że przedstawiona do oceny rozprawa podejmuje ważny i ciekawy merytorycznie problem, oraz ma duże walory poznawcze i potencjał badawczy. Za oryginalne elementy pracy uważam (na co również zwraca uwagę Doktorant w podsumowaniu, pkt. VII/137):

- opracowanie i rozwiązanie równań kinematyki prostej i odwrotnej robota wykorzystującego koła *mecanum* oraz zdefiniowanie modelu numerycznego dynamicznych równań ruchu robota,

- opracowanie algorytmu sterowania odpornego opartego na teorii układów o zmiennej strukturze oraz sterowania neuronowego opartego na sieciach RVFL,
- zastosowanie teorii Lapunowa do oceny stabilności zamkniętego układu sterowania odpornego,
- przeprowadzenie złożonych procesów badań symulacyjnych.

W ogólnym ujęciu przedstawiona do oceny praca przedstawia ciekawy problem, mogący mieć duże znaczenie praktyczne. Mimo pewnych braków formalnych, na co zwracam uwagę w kolejnym punkcie recenzji uważam, że jest ona wartościowym i inspirującym materiałem, i określa przestrzeń do dalszych badań w tym zakresie.

#### 4. Uwagi szczegółowe

Analizując przedstawiony do oceny materiał, można wskazać kilka niedociągnięć, mianowicie:

- Autor dokonując bardzo skrótowego przeglądu literatury (pkt. I.1/3) zwraca uwagę, że dla platform jeżdżących posiadających układ jezdny bazujący na kołach *mecanum* stosowane są różnego rodzaju algorytmy sterowania ruchem. M.in. wskazuje na sterowanie oparte na adaptacyjnym regulatorze ślizgowym, sterowaniu hybrydowym, impedancyjnym i predykcyjnym. W swojej pracy zastosował sterowanie nadążne oparte na algorytmie sterowania odpornego i neuronowego. Brakuje jednak uzasadnienia tego wyboru tym bardziej, że Doktorant definiuje tezę pracy wskazując na potrzebę opracowania sprawnych obliczeniowo, a zatem szybkich algorytmów sterowania („obliczeniowo wydajne”), co może sugerować, że wcześniejsze rozwiązania w tym zakresie nie spełniają w pełni tego kryterium tym bardziej, że analizowany układ jezdny wykazuje nadmiarowość i dużą zmienność warunków pracy robota.
- moim zdaniem brakuje analizy sterowania ruchem poszczególnych kół, co jest ważne szczególnie przy ruchu po łuku. Chodzi o „efekt działania przekładni różnicowej”, co w przypadku sterowania elektrycznego (komputerowego) układem jezdny bazującym na 4-ch niezależnie napędzanych kołach musi być rozwiązane programowo i ma znaczący wpływ na odwzorowanie zadawanej trajektorii ruchu robota,
- zakłócenia pracy kół w procesie symulacji były zadawane do układu sterowania w formie parametrycznej i stałej. Uważam, że biorąc pod uwagę stabilność pracy układu sterowania, takie podejście znacznie upraszcza ten proces powodując, że układ stabilizował się i utrzymywał stabilne warunki pracy w długim okresie czasu. Uważam,

że lepszy efekt, podkreślający jakość opracowanych algorytmów sterowania (w tym stabilności układu opartej na kryterium Lapunowa), który uzyskano dopiero w procesie symulacji fizycznej, dałaby dynamiczna zmiana wartości zakłóceń, na przykład w oparciu o wykorzystanie generatora liczb losowych i znacznego skrócenia czasu aktywności zakłócenia o danych chwilowo parametrach. Dałoby to szansę na sprawdzenie szybkości dostosowania się układu sterowania do quasi rzeczywistych warunków pracy kół i być może Autorowi na wprowadzenie skutecznych sposobów weryfikacji skutków takich zakłóceń na odwzorowanie zadawanej trajektorii.

- we wnioskach brakuje odniesienia się Doktoranta do zdefiniowanej w pkt. I.3/8 tezy pracy.

Dodatkowo zwracam również uwagę na dość często występujące w tekście pracy niedociągnięcia edytorskie:

- nieczytelność rysunków na których znajdują się wyniki przeprowadzonych symulacji, która dość istotnie utrudnia analizę ich treści:
  - na wykresach (wg opisu zamieszczonego w tekście pracy do przedstawionych rysunków, np. rys. V.2/57) wykorzystano linię niebieską i pomarańczową, jednak wszystkie rysunki są czarno-białe,
  - nieczytelne opisy na wykresach (zbyt małe litery i cyfry),
- formatowanie tekstu (często występujące „białe plamy”, szczególnie w rozdz. V i VI, np. na stronach, np. str. 61, 62),
- często występujące błędy stylistyczne i literowe.

Niedociągnięcia te nie obniżają wartości merytorycznej ocenianej pracy.

Uważam, że praca mimo przedstawionych uwag jest zrealizowana poprawnie, wyniki przeprowadzone badania i ich wyniki są opisane systematycznie, a podjęty przez Doktoranta temat ma duży potencjał naukowy. Moim zdaniem wartość merytoryczną pracy podniosłoby jeszcze zdefiniowanie ogólnych założeń do przeprowadzonego procesu badawczego. W prawdziwe Autor przedstawiając poszczególne etapy realizacji pracy wskazuje na pojedyncze, cząstkowe założenia w oparciu o które rozwiązuje omawiane zadanie badawcze, jednak zebranie ich i uogólnienie w pewien system ograniczeń, który jest podstawą prowadzonych badań moim zdaniem podniosłoby jeszcze bardziej wartość merytoryczną ocenianej rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kołodzieja.

## 5. Wniosek końcowy

Mimo wskazania w recenzji pewnych braków, moja ogólna ocena pracy jest bardzo dobra. Należy wyraźnie zaznaczyć że zadanie, którego podjął się Doktorant, jest złożone, trudne i niejednorodne problemowo. Autor omówił w niej systematycznie wszystkie etapy przeprowadzonych prac badawczych i mimo pewnego braku precyzji wypowiedzi istotną wartością naukową pracy jest podjęcie próby i rozwiązanie problemu syntezy ruchu i sterowania nadążnego robota jeżdżącego wykorzystującego omnikierunkowe koła mecanum. Pozwala mi to jednoznacznie stwierdzić, że Autor dobrze radzi sobie z postawionymi przed Nim zadaniami badawczymi.

Tym samym stwierdzam, że Pan mgr inż. Maciej KOŁODZIEJ wykazał się niezbędnym zasobem wiedzy z zakresu analizy, modelowania i sterowania robotami mobilnymi, a opiniowana praca mieści się w obszarze dziedziny naukowej „Inżynieria mechaniczna” i spełnia warunki stawiane przez ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. Ust. z dn. 20.04.2023, poz. 742). Tym samym **stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta, p. mgr. inż. Macieja KOŁODZIEJA do publicznej obrony.**

