



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Prof. dr hab. inż. Krzysztof J. Kaliński, prof. zw. PG
Katedra Mechaniki i Mechatroniki

Gdańsk, dnia 03.09.2017 r.

O C E N A

rozprawy doktorskiej mgr. inż. **Michała Ciszewskiego**
pt. „**Modeling and control of a tracked mobile robot for pipeline inspection**”

Praca wykonana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie
Promotor: dr hab. inż. Mariusz Giergiel, prof. nadzw. AGH
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Buratowski

Podstawa oceny: uchwała Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
oraz pismo z dnia 10.04.2017 r. prof. dr. hab. inż. Antoniego Kalukiewicza,
Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH,
wraz z otrzymanym egzemplarzem pracy doktorskiej.

1. Dobór tematu, cel i zakres pracy

Przedmiotem przedłożonej przez **mgr. inż. Michała Ciszewskiego** pracy doktorskiej są badania dotyczące projektowania, modelowania, sterowania, możliwości wykonania i implementacji mechatronicznego systemu robota mobilnego do inspekcji rurociągów. Wykorzystanie wszechstronnych, mobilnych robotów gąsienicowych do realizacji uciążliwych zadań inspekcyjnych w środowisku trudnodostępnym dla ludzi, obserwuje się coraz częściej. Tym kierunkiem badań zajmuje się wiele ośrodków naukowych i instytucji przemysłowych, zainteresowanych zarówno koniecznością sprawdzenia odbiorowego oddanych do użytku nowych rurociągów, jak też – monitorowaniem ich uszkodzeń spowodowanych m.in. korozją rury stalowej w fazie początkowej, czy odkształceniem jej ściany w wyniku nadmiernego nacisku gruntu.

Zdolność do przemieszczania się w bliżej nierozpoznanym środowisku, również w obecności bliżej niezidentyfikowanych zanieczyszczeń sprawia, iż obiekty te doskonale nadają się do różnego rodzaju

prac o charakterze eksploatacyjnym. Zastosowania robotów mobilnych w praktyce nie należą jednak do łatwych z powodu złożoności związanej z uwzględnieniem rozmaitych warunków pracy, trudnych a niekiedy – niemożliwych do odwzorowania w modelach symulacyjnych i badaniach laboratoryjnych.

Praca doktorska mgr. inż. Michała Ciszewskiego wychodzi naprzeciw tym wyzwaniom. Proponuje się w niej, w celu poprawy efektywności przewidzianych do realizacji zadań inspekcyjnych, opracowanie unikalnej konstrukcji pozwalającej na stosowanie jednego robota do inspekcji wizyjnej różnego typu obiektów przemysłowych, w tym rurociągów o różnych kształtach i wymiarach, o orientacji poziomej i pionowej oraz do jazdy po równych i nierównych powierzchniach. Jest ona konkurencyjna w porównaniu z istniejącymi dotychczas rozwiązaniami, a jej skuteczne doprowadzenie do postaci nowoczesnego systemu mechatronicznego otwiera nowe możliwości kształtowania optymalnych obiektów docelowych.

Biorąc pod uwagę rosnące zainteresowanie opracowywaniem nowych rozwiązań w zakresie robotyki mobilnej, a zwłaszcza – pojazdów gąsienicowych, wybór tematu należy uznać za trafny. Upoważnia do tego dokonany przez doktoranta obszerny, krytyczny i wnikliwy przegląd publikacji osiągnięć naukowych. Wiele wiodących ośrodków prowadzi w przedmiotowej tematyce zaawansowane na skalę światową badania podstawowe i stosowane.

Celem rozprawy było, zdaniem doktoranta, opracowanie systemu inspekcji bazującego na minimalizacji niezbędnej liczby robotów do różnych typów rurociągów poziomych i pionowych, jak też płaskich i chropowatych powierzchni. Cel ten został określony w sposób jasny i zrozumiały, zaś kolejne rozdziały pracy są logicznym następstwem jego realizacji.

Praca, zredagowana prawie w całości w języku angielskim, liczy 168 stron i zawiera streszczenie w języku angielskim, rozszerzone streszczenie w języku polskim, spis treści, listę rysunków wraz z podpisami, wykaz skrótów, 8 rozdziałów zasadniczych (w tym podsumowanie) oraz wykaz 118 pozycji aktualnej literatury, w zdecydowanej większości opublikowanej po roku 2000. Ponadto, w wykazie załączonych prac przygotowanych przy współudziale doktoranta dostrzega się aż 15. Powyższe mogłoby świadczyć o jego autentycznym zaangażowaniu w realizację zadań naukowo-badawczych, których uwieńczeniem jest oceniana rozprawa. Należy jednak zauważyć, że poza 1 pozycją (praca magisterska) są to opracowania zespołowe, liczące nawet do 8 współautorów. Innym mankamentem załączonego wykazu literatury jest znikoma liczba pozycji z listy JCR, posiadających Impact Factor. Dominują natomiast materiały konferencyjne i w przeważającej ilości – witryny internetowe. Nie kwestionując zawartości merytorycznej cytowanych materiałów, w świetle powyższego należy stwierdzić słabą rozpoznawalność zamieszczonych pozycji przeglądu literatury. Praca doktorska jest opracowaniem naukowym i w związku z powyższym doktorant powinien okazać w doborze cytowanych źródeł większą staranność.

Zakres pracy obejmuje wprowadzenie, obszerny przegląd literatury z zakresu robotyki inspekcyjnej rurociągów, opis konstrukcji mobilnego robota inspekcyjnego rurociągów z aktywnym mechanizmem adaptacji układu jezdnego, opis matematyczny robota z uwzględnieniem modelu kinematyki i dynamiki ruchu robota oraz modelu kinematyki pedipulatorów, symulację adaptacji i ruchu robota w różnych

środowiskach, projekt układu sterowania i jego implementację, prototyp robota inspekcyjnego rurociągów wraz z jego badaniami laboratoryjnymi oraz podsumowanie treści rozprawy i perspektywy dalszych prac badawczych. Zakres pracy został sformułowany prawidłowo, ponieważ obejmuje wszystkie podstawowe elementy charakteryzujące rozprawy naukowe.

2. Merytoryczna ocena pracy

2.1. Charakter pracy

Recenzowana rozprawa jest pracą teoretyczno-eksperymentalną z zakresu modelowania strukturalnego i symulacji numerycznych złożonych zjawisk dynamicznych w gąsienicowych robotach mobilnych. Na bazie obszernego, wnikliwego i krytycznego przeglądu literatury przedmiotu rozprawy doktorant zaproponował rozwiązanie bazujące na wykorzystaniu własnego, opatentowanego układu jezdnego składającego się z dwóch pedipulatorów o zamkniętym łańcuchu kinematycznym, sześciu przegubów obrotowych i trzech serwomechanizmów. Przedstawił opis matematyczny na bazie modelu kinematyki i dynamiki, dokonał symulacji ruchu robota w różnych przestrzeniach roboczych, zaprojektował system sterowania oraz przeprowadził badania laboratoryjne zbudowanego prototypu.

Ogromna liczba rozmaitych opracowań i materiałów źródłowych instytucji zewnętrznych (krajowych i zagranicznych) cytowanych w rozprawie świadczy o powszechnym zainteresowaniu jej tematyką nie tylko w kategoriach merytorycznych. Dostrzega się również jej wymiar w szerokim zakresie użytkowym. Osiągnięcia pracy są na tyle uniwersalne, że po ich odpowiednim rozwinięciu mogą posłużyć do opracowania metodyki oraz aplikacyjnych procedur zastosowania gąsienicowych robotów inspekcyjnych w praktyce eksploatacyjnej.

2.2. Samodzielny i oryginalny dorobek doktoranta

Oceniana praca doktorska mgr. inż. Michała Ciszewskiego prezentuje metodyczne rozwiązanie postawionych problemów, umiejętne wykorzystanie wybranych nauk podstawowych i stosowanych (m.in. modelowania strukturalnego, symulacji komputerowych) oraz nowoczesnych metod i narzędzi mechatroniki. Istotny i oryginalny dorobek doktoranta to:

- opracowanie konstrukcji robota bazującej na autorskim, opatentowanym mechanizmie układu jezdnego, napędzanym sześcioma serwomechanizmami ustawiającymi pozycję i orientację dwóch modułów gąsienicowych. Umożliwia ona stosowanie jednego robota do inspekcji wizyjnej różnego typu obiektów przemysłowych, w tym rurociągów o różnych kształtach i wymiarach, o orientacji poziomej i pionowej oraz do jazdy po równych i nierównych powierzchniach;

- opracowanie autorskiego algorytmu planowania trajektorii pedipulatorów, bazującego na modelu 3D robota oraz na analitycznych i numerycznych modelach kinematyki prostej i odwrotnej. Umożliwia on sterowanie położeniem i orientacją pedipulatora podczas ruchu zadanego w przestrzeni roboczej;
- weryfikacja poprawności modelu obliczeniowego prototypu robota za pomocą symulacji ruchu i adaptacji układu jezdnego z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB/Simulink oraz V-REP;
- możliwość rekonfiguracji pedipulatorów, w celu realizacji ruchu prototypu robota w rurociągach pionowych. Propozycję tak uniwersalnego rozwiązania w zakresie robotyki inspekcyjnej różnych środowisk spotyka się w badaniach naukowych i zastosowaniach przemysłowych po raz pierwszy.

Ważnym osiągnięciem recenzowanej pracy jest doprowadzenie jej rezultatów do postaci o dużym znaczeniu aplikacyjnym, rokującym realną możliwość ich wykorzystania w praktyce. Tak rozumiana idea praktycznego zastosowania wyników badań powinna znajdować odzwierciedlenie w realizowanych pracach naukowych jak najczęściej.

2.3. Tezy naukowe i wnioski z pracy

Podejmując temat pracy doktorant przedstawił następującą tezę:

Możliwym jest sformułowanie modelu matematycznego oraz jego implementacja w systemie sterowania robota mobilnego, wyposażonego w dwa napędy gąsienicowe, do aktywnej adaptacji i realizacji ruchu w rurociągach poziomych o różnych kształtach i wymiarach, w rurociągach pionowych i na równych powierzchniach

Realizacja rozprawy potwierdziła aspekt studyjny i praktyczny osiągnięć doktoranta, bardzo istotny w kontekście prac wykonywanych na wyższych uczelniach technicznych, co zasługuje na szczególne podkreślenie. Doktorant wykazał prawdziwość sformułowanej tezy, co jest niekwestionowanym, pozytywnym rezultatem opiniowanej rozprawy, tak w sensie poznawczym jak i – użytkowym. W tym miejscu należy jednak zauważyć, że oceny skuteczności działania prototypu robota dokonano w warunkach laboratoryjnych, gdzie badano jego zachowanie podczas poruszania się w modelowych odcinkach rur odbiegających w swoim charakterze od rzeczywistych warunków pracy robotów inspekcyjnych. Stąd, oczekiwania o znaczeniu praktycznym, dotyczące wykorzystania prototypowanego robota w zaawansowanych zastosowaniach użytkowych, powinny być formułowane z większą ostrożnością. Zwłaszcza, że istotę tych zastosowań w eksploracji rurociągów silnie zanieczyszczonych osadami, uszkodzonych w wyniku korozji czy deformacji wzdłużnych i promieniowych, zauważa sam doktorant (46¹⁻⁴), a przedmiotowa rozprawa była realizowana w ramach projektu N N501 054440 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. To ostatnie implikuje zapytanie o brak w rozprawie potwierdzenia jej rezultatów bardziej przekonującymi przykładami.

2.4. Uwagi dotyczące pracy

2.4.1. Uwagi ogólne

2.4.1.1. Deklarowana w pracy koncepcja projektowania mechatronicznego (56¹⁵) nie odpowiada zaprezentowanej metodyce poszukiwania optymalnego rozwiązania robotów inspekcyjnych rurociągów. Wprawdzie doktorant skoncentrował swój wysiłek intelektualny na osiągnięciu pożądaných właściwości robotów mobilnych traktowanych jako skomplikowane systemy mechatroniczne, pominął jednak istotny element rozważań stanowiący tzw. „drogę dojścia” do uzyskania rozwiązania optymalnego. Ta ostatnia bazuje bowiem na zastosowaniu technik wirtualnego prototypowania, symulacji mieszanych z wykorzystaniem systemów czasu rzeczywistego i prototypowaniu rozwiązania w systemie docelowym. Każda z tych technik służy sukcesyjnej poprawie jakości przewidzianego do uzyskania rozwiązania docelowego.

2.4.1.2. Wyniki obliczeń symulacyjnych wielkości geometrycznych i kinematycznych podczas transformacji pedipulatora do różnych konfiguracji i wymiarów rurociągów (rys. 4.8 – 4.10) nie ilustrują relacji pomiędzy czasem symulacji, a czasem rzeczywistego procesu. Jest to o tyle istotne, ponieważ mogłoby świadczyć o skuteczności zaproponowanego przez doktoranta rozwiązania mechatronicznego kształtowania optymalnej konstrukcji podzespołów robota inspekcyjnego.

2.4.1.3. Uzyskana zgodność rezultatów symulacji w środowisku MATLAB I V-REP wydaje się łatwa do przewidzenia. Ale czy determinuje to ukształtowanie optymalnej konstrukcji robota inspekcyjnego? Lektura rozdz. 5 pokazuje bowiem, że celem przeprowadzonych symulacji było jedynie uzyskanie powyższej zgodności wyników.

2.4.1.4. Jako podstawę potwierdzenia poprawności ukształtowanej konstrukcji robota inspekcyjnego w warunkach laboratoryjnych, doktorant przyjął monitorowanie zapotrzebowania na moc chwilową w trakcie ruchu w różnych rurociągach. Natomiast nie zajął się analizą cech funkcjonalnych robota, niemniej istotnych z punktu widzenia jego rutynowego użytkowania. Powyższe dotyczy zarówno pierwotnej, jak też poprawionej w wyniku badań testowych wersji prototypu.

2.4.1.5. Tytuł p. 8.1 nie odpowiada jego treści, która zawiera syntetyczne streszczenie poszczególnych fragmentów rozprawy.

2.4.2. Uwagi szczegółowe

2.4.2.1. 41¹⁻²: Podana definicja robota 3-kołowego jest niepoprawna.

2.4.2.2. 41₁₃₋₁₂: W rozważaniach dotyczących optymalizacji zużycia energii w ruchu robotów brakuje cytowania prowadzonych na Politechnice Gdańskiej prac z zakresu sterowania optymalnego przy energetycznym wskaźniku jakości [MSSP 2011-2016, Mechatronics 2014-2016].

- 2.4.2.3. 56¹⁰: zamiast „doctoral dissertation” (odpowiednik habilitacji) powinno być „PhD thesis” (doktorat).
- 2.4.2.4. 60: na rys. 3.3 nie zachowano właściwej proporcji wymiarów geometrycznych.
- 2.4.2.5. 64: w jakich jednostkach jest mierzony poślizg (*slip*) we wzorach (4.2).
- 2.4.2.6. 69-71: jakie argumenty przekonały doktoranta o celowości stosowania formalizmu Maggiego, skoro znane z literatury naukowej równania Appella-Gibbsa są znacznie prostsze i wygodniejsze w formułowaniu równań dynamiki robotów mobilnych, zwłaszcza o zauważalnej asymetrii geometrycznej i parametrycznej (patrz: prace M. Mazura z Politechniki Gdańskiej, doktorat 2010, MSSP 2015).
- 2.4.2.7. Doktorant wykazuje nadmierną skłonność do zamieszczania w pracy oczywistych, akademickich wyjaśnień, np. opis par kinematycznych 5 klasy (72^{2-6}), istnienie 2-ch rozwiązań odwrotnego zadania kinematyki (77^{6-7}), czy sekwencja równań 4.94 – 4.97.
- 2.4.2.8. 78: skuteczność rozwiązania nieliniowego problemu przedstawionego w postaci wzoru (4.53) wymaga jego poprawnego uwarunkowania, z uwagi na uwikłanie wielu funkcji w poszukiwaniu rozwiązania przybliżonego.
- 2.4.2.9. 79^{12,17}: w wyrażeniach skalarnych jest stosowana symbolika iloczynu wektorowego „x”.
- 2.4.2.10. 89: oznaczenia na rys. 4.7 są niezgodne z obowiązującą nomenklaturą. Ponadto, w 2-ch miejscach obserwuje się „rozdwojenie” algorytmu, bez zamieszczenia na schemacie stosownego bloku decyzyjnego.
- 2.4.2.11. 106: przedstawione w tab. 5.1 czasy próbkowania są zdaniem recenzenta zbyt długie. Pożądaną skuteczność symulacji szybkozmiennych procesów dynamicznych można uzyskać przy czasach próbkowania rzędu 0,1 μ m.
- 2.4.2.12. 106₂–107¹: w jakim zakresie zamieszczone stwierdzenie uzasadnia celowość współpracy środowisk V-REP i MATLAB.
- 2.4.2.13. Czy na rys. 5.7, 5.9, 5.13 i 5.14 przedstawiono czasy symulacji, czy czasy rzeczywistego procesu.
- 2.4.2.14. 125₈₋₇: w rozważaniach dotyczących definiowania trajektorii robota w warunkach dynamicznych należało zacytować m.in. prace realizowane na Politechnice Gdańskiej (*Mechatronics* 2016).
- 2.4.2.15. 126: schemat na rys. 6.3 jest niekompletny, ponieważ nie wynika z niego sposób kreowania trajektorii dynamicznej x_d .
- 2.4.2.16. 145: we wzorach 7.1 – 7.3 zauważa się niezgodność jednostek wielkości fizycznych.

3. Ocena pracy pod względem redakcyjnym

Układ treści jest logicznie prawidłowy. Tytuły rozdziałów i podrozdziałów są zrozumiałe i w większości odpowiadają ich zawartości. Materiał ilustracyjny dobrano właściwie do treści poszczególnych

fragmentów. Język pracy jest na ogół poprawny, czytelny i zrozumiały, aczkolwiek w treści zauważa się przekłamania literowe i usterki gramatyczne. Natomiast wadliwości redakcyjnych i terminologicznych, które wyszczególniam poniżej, należy unikać podczas pisania rozpraw naukowych.

- 3.1. Obszerny fragment „List of figures” (5 stron) można z powodzeniem pominąć, bez jakiegokolwiek szkody dla całości rozprawy.
- 3.2. Część „List of acronyms” zawiera skróty powszechnie znane w literaturze naukowej, np. 2D (Two-dimensional), 3D (Three-dimensional), CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing), DC (Direct Current), PC (Personal Computer), PD (Proportional-Derivative), PID (Proportional-Integral-Derivative). Stąd, ich dodatkowe wyjaśnianie mija się z celem. Inne skróty, np. NDE (Non-Destructive Evaluation), NDT (Non-Destructive Testing), są natomiast powtórnie wyjaśniane w treści rozprawy.
- 3.3. 32⁶: powinno być „ C_{ij} – component of coefficient matrix”.
- 3.4. 33₂ (i w innym fragmencie pracy): siłę skupioną należy oznaczać symbolem F (a nie P).
- 3.5. Podczas pisania rozprawy doktorant stosował zamiennie słownictwo *British English* i *American English* (np. *modeling*: 36_{13,9}, 37₄, *minimization*: 36₁₆).
- 3.6. 41₂, 63₆ i w innych miejscach: w przypadku cytowania wielu pozycji literatury należy stosować jedną parę nawiasów [].
- 3.7. Na końcu podpisów pod rysunkami nie należy stawiać znaku „.”.
- 3.8. 66: na rys. 4.3. brakuje oznaczeń siły F_D i momentu M_P .
- 3.9. Pojawiający się w treści rozprawy termin „modelowanie matematyczne” nie został precyzyjnie zdefiniowany. W świetle powyższego, bardziej właściwym określeniem byłby „opis matematyczny”.
- 3.10. Przenoszenie do tekstu rozprawy funkcji matematycznych bezpośrednio z notacji właściwej programom komputerowym (np. 76: wzory 4.42- 4.46, 77: 4.51-4.52) nie powinno mieć miejsca.

4. Wniosek końcowy

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że oceniana praca mgr. inż. Michała Ciszewskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Zamieszczone uwagi mają charakter dyskusyjny i w żadnym wypadku nie pomniejszają pozytywnej oceny wartości merytorycznej rozprawy. Praca stanowi, w myśl art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. Nr 65, poz. 595 z późn. zmianami) oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jak również – dokumentuje wiedzę teoretyczną kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego pracy naukowej.

Doktorant prezentuje sylwetkę dojrzałego i nowoczesnego naukowca, co również potwierdza opanowanie nietłatwej umiejętności pracy zespołowej w zakresie kształtowania skomplikowanych

rozwiązań inżynierskich o charakterze badawczym i stosowanym w zakresie nowoczesnej robotyki mobilnej.

Wnioskuje o dopuszczenie pracy jako rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

