

Gliwice, 7.06.2017 r.

dr hab. inż. Sławomir Kciuk
Instytut Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej
Politechnika Śląska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Michała Ciszewskiego

pod tytułem:

„Modeling and control of a tracked mobile robot for pipeline inspection”

Podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki prof. dr. hab. inż. Antoniego Kalukiewicza z dnia 10.04.2017r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.

1. Ocena aktualności wybranego tematu

Postęp technologiczny, który obserwujemy, wiąże się ściśle z gwałtownym wzrostem innowacyjności w zakresie nowych technologii wytwarzania oraz metod i narzędzi projektowania.

Zapotrzebowanie na wysoką wydajność, konkurencyjność cenową wyrobów, personalizację ze względu na specyfikę realizowanych procesów technologicznych prowadzi do powstawania coraz bardziej złożonych układów mechatronicznych, stanowiących obecnie nieodzowny element każdego nowoczesnego urządzenia.

Zintegrowane metody projektowania, z zastosowaniem najnowszych osiągnięć inżynierii materiałowej, wsparte badaniami fizycznymi i symulacyjnymi z wykorzystaniem modeli wirtualnych, stają się standardową praktyką w procesie koncipowania, projektowania i wytwarzania produktu. Dalszy rozwój tych metod, szczególnie w odniesieniu do projektowania układów w obszarze robotów inspekcyjnych, wymaga sprostania wielu wyzwaniom, związanym m.in. z multidyscyplinarnym charakterem tego typu układów i jednoczesnym ich sprzężeniem z systemami sterowania.

Ważnym aspektem jest zatem wykorzystanie efektu synergii metod badawczych w celu uzyskania optymalnych cech dynamicznych i zapewnienia zadanych parametrów eksploatacyjnych.

Przegląd dostępnych aplikacji do modelowania i symulacji złożonych zjawisk jakie zachodzą w robotach przemysłowych, w kontekście badania i oceny ich cech funkcjonalnych oraz niezawodności działania dla różnych warunków eksploatacyjnych, wskazuje że celowe jest poszukiwanie nowych i udoskonalanie istniejących algorytmów obliczeniowych w tym obszarze, popartych skutecznymi narzędziami do obliczeń i symulacji numerycznych. Szczególną grupę pojazdów mechanicznych stanowią roboty inspekcyjne. Badania symulacyjne dynamiki ruchu pojazdów, w tym ze sterowanym zawieszeniem układu jezdnego wymaga opracowania modeli – zarówno samego pojazdu, jak i modelu sterowania. Choć modele te są wprawdzie opisywane w literaturze, lecz obszarem naukowym wciąż nie w pełni rozpoznany jest aplikacyjny charakter tych badań umożliwiającą zastosowanie

prostego a zarazem skutecznego narzędzia do projektowania, złożonych układów mechatronicznych jakimi są gąsienicowe roboty inspekcyjne. Wiarygodne modele obliczeniowe stają się cennym narzędziem przy projektowaniu pojazdów, czy ich mechanizmów. Obecnie często rozważana jest przydatność różnorodnych metod sterowania w aspekcie skuteczności działania systemów/podsystemów decydujących o funkcjonalności wyrobu – gąsienicowego robota inspekcyjnego.

Biorąc powyższe pod uwagę, wybrany temat pracy doktorskiej uważam za aktualny zarówno pod względem naukowym, jak również pod względem zastosowania wyników badań w praktyce. Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Automatyka i Robotyka”.

2. Przegląd treści pracy

Sformułowany przez Autora cel i zakres pracy jest jasny a postawiona teza zasadna i prawidłowa w swej konstrukcji.

W recenzowanej pracy przedstawiono interesujące poznawczo i ważne ze względu na zastosowania praktyczne problemy dotyczące projektowania, modelowania i weryfikacji doświadczalnej wybranej klasy pojazdów gąsienicowych.

Przedstawiona w pracy problematyka badawcza daje nowe możliwości w zakresie wspomagania procesu projektowo – konstrukcyjnego oraz modyfikacji i modernizacji obiektów już istniejących.

Rozprawę doktorską podzielono na osiem rozdziałów, uzupełnionych spisem literatury, wykazem rysunków, spisami: tabel, skrótów symboli i oznaczeń. Treści zapisano na 167 stronach.

W pracy przedstawiona została konstrukcja robota gąsienicowego, która umożliwia jego stosowanie do inspekcji wizyjnych różnego typu obiektów przemysłowych, a szczególnie rurociągów o różnych wymiarach i kształtach, zorientowanych poziomo i pionowo. Robot może również poruszać się po powierzchniach płaskich. Opisywana i analizowana konstrukcja robota do inspekcji rurociągów jest prototypowym rozwiązaniem, które zostało opatentowane w zakresie adaptacyjnego mechanizmu układu jezdnego, napędzanego sześcioma serwomechanizmami.

Autor opracował i zapisał matematyczne modele opisujące kinematykę i dynamikę ruchu robota po równych powierzchniach.

Adaptacyjny układ jezdny robota, składający się z dwóch pedipulatorów o zamkniętym łańcuchu kinematycznym, wymaga stosowania złożonych metod modelowania i sterowania. W tym celu opracowany został autorski algorytm planowania trajektorii pedipulatorów, oparty o model 3D robota oraz o matematyczne i numeryczne modele kinematyki prostej i odwrotnej.

Modele matematyczne zostały zapisane w środowisku MATLAB/Simulink. Opracowane modele numeryczne umożliwiły przeprowadzenie symulacji ruchu pojazdu i układu jezdnego. Przeprowadzono symulacje współbieżne przy użyciu oprogramowania MATLAB/Simulink oraz V-REP, obejmujące implementację modeli matematycznych, układu sterowania oraz interakcję sprzętową z modelem 3D robota.

Autor opracował i opisał układ sterowania robota. Opisano dedykowany układ elektroniczny sterownika napędów, komunikacji i systemów sensorycznych robota.

W szczególności, w rozdziale 1. sformułowana została teza rozprawy doktorskiej: „Możliwym jest stworzenie modelu matematycznego oraz jego implementacja w systemie sterowania mobilnego robota, wyposażonego w dwa napędy gąsienicowe, do adaptacji mechanizmu jezdnego i ruchu w rurociągach poziomych o różnych kształtach i wymiarach, w rurociągach pionowych i na równych powierzchniach.”

W następnym 2. rozdziale autor zawarł przegląd literatury w zakresie robotów mobilnych, których zadaniem jest monitoring i szeroko pojęta inspekcja. Przeanalizowano typy uszkodzeń mogących wystąpić w rurociągach oraz metody ich inspekcji. Treści tego rozdziału dotyczą również przeglądu robotów mobilnych z przeznaczeniem do inspekcji instalacji rurociągów o zróżnicowanych typach oraz wymiarach. Zawarty przegląd rozwiązań konstrukcyjnych robotów mobilnych obejmuje zarówno wyroby komercyjne jak również prototypy.

W kolejnym rozdziale zatytułowanym „Projekt mobilnego robota do inspekcji rurociągów z aktywnym mechanizmem adaptacji układu jezdnego” szczegółowo opisano konstrukcję robota gąsienicowego. Opis dotyczy konstrukcji mechanicznej, struktury kinematycznej, układu napędowego, oraz wyposażenia robota. Zaprezentowany model CAD robota, wykorzystano do wizualizacji pozycji i orientacji układu jezdnego z uwzględnieniem geometrii rurociągów różnego typu. Zdefiniowane zostały warunki brzegowe środowiska pracy robota w postaci minimalnej średnicy rurociągu poziomego - $\varnothing 210$ mm, rurociągu pionowego - od $\varnothing 224$ mm do $\varnothing 270$ mm.

Rozdział 4. zawiera opis matematyczny układu jezdnego robota w zakresie kinematyki i zjawisk dynamicznych. Opracowane modele matematyczne opisują ruch sterowanych układów pedipulatorów i uwzględniają podstawowe zjawiska charakterystyczne dla pojazdów gąsienicowych, takie jak poślizg gąsienic. Opracowane modele uwzględniają zmienną orientację ramy robota.

Model opisujący zjawiska dynamiczne w czasie ruchu robota opisano równaniami Lagrange'a i Maggi'ego, uwzględniając zjawiska dynamiczne w czasie ruchu robota pod wodą po powierzchniach płaskich i nachylonych jak również siły tarcia oraz uciążu kabla zasilającego.

W kolejnym rozdziale opisano symulacje transformacji układu jezdnego oraz ruchu robota w środowisku V-REP w połączeniu z algorytmem planowania trajektorii opracowanym w środowisku MATLAB/Simulink. Wykonane symulacje uwzględniały sterowanie ruchem i siłą docisku gąsienic robota poprzez interfejs sprzętowy z bezprzewodowym urządzeniem typu joystick.

W rozdziale 6. opisano architekturę systemu sterowania, komunikacji i zasilania oraz porównano metody sterowania robotami mobilnymi i robotami przemysłowymi.

W przedostatnim rozdziale opisano proces wytworzenia oraz integracji podsystemów prototypu gąsienicowego robota mobilnego. Opisane testy prototypu potwierdziły jego założoną funkcjonalność.

W ostatnim 8. rozdziale zawarto podsumowanie pracy oraz opisano proponowane kierunki dalszych prac.

3. Ocena merytoryczna, wyniki pracy i ich ocena

Recenzowana rozprawa doktorska, w mojej opinii, reprezentuje wysoki poziom naukowy. Podjęte przez autora wyzwanie integracji układów elektronicznych, elektromechanicznych i innych wraz z układem sterowania, wymaga nowoczesnego podejście do projektowania poprzez zastosowanie nowych metod symulacyjnych, które wykraczają poza tradycyjne narzędzia CAD czy MES. Nieoptymalne bowiem połączenie różnych podsystemów: mechanicznego, elektronicznego, informatycznego oraz sterowania, generuje problemy w procesie integracji oraz powoduje niewykorzystanie efektu synergii, wydłużenie czasu trwania procesu projektowo- konstrukcyjnego, zwiększenie nakładów finansowych, a nawet jego przerwanie ze względu na nieosiągnięcie celu.

Rozważania teoretyczne oraz zaproponowana metodyka projektowania i modelowania oraz badań weryfikacyjnych wybranej klasy obiektów mechatronicznych jakimi są gaśnicowe roboty mobilne zwłaszcza do inspekcji rurociągów jest znaczącym osiągnięciem naukowym autora. Tematyka recenzowanej monografii mieści się w nurcie prac o znaczeniu zarówno teoretycznym, jak i praktycznym, dotyczy bowiem istotnych zagadnień z punktu widzenia metodologii projektowania złożonych układów z obszaru automatyki i robotyki. Rozpatrzenie zjawisk dynamicznych, opracowanie prototypowych rozwiązań konstrukcyjnych oraz badania weryfikacyjne – wszystko to ma duże znaczenie w badaniach konstrukcji mobilnych robotów gaśnicowych, ich optymalizacji, czy dostosowania do skrajnie zmiennych warunków pracy.

Przedstawiona kompozycja pracy jest właściwa, treść rozdziałów spójna a ich kolejność logiczna. Doktorant stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, od podstawowych, prostych zagadnień do złożonych. Taki układ treści powoduje, że zagadnienia prezentowane w pracy przedstawione są w sposób przejrzysty i konsekwentny.

Rozprawa napisana jest jasnym, poprawnym językiem.

Na wyróżnienie zasługują cytowana i omawiana bibliografia. Jej dobór przekonuje mnie, iż autor znakomicie porusza się w prezentowanym w rozprawie zagadnieniu. Dobór rysunków i wykresów uważam za właściwy.

Główną wartością pracy jest to, że autor podjął się trudnego zadania połączenia oraz dostrojenia różnych systemów i optymalnego sterowania prototypowego mobilnego robota gaśnicowego do inspekcji rurociągów.

Analizując istniejący stan wiedzy, dotyczący zagadnień projektowania oraz modelowania robotów mobilnych, doktorant zaproponował metodę badawczą, umożliwiającą symulowanie numeryczne ruchu pojazdu, z uwzględnieniem wielorakich przeszkód pochodzących od przejazdu gaśnic przez nierówności, zmienne kształty toru, zmienne warunki środowiskowe oraz opracował system adaptacyjnego sterowania tym ruchem. Doktorant przeprowadził badania z wykorzystaniem odpowiednich modeli, opracowanych przez Niego w środowisku programu Matlab/Simulink oraz V-REP.

Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne. Wszystkie wymienione powyżej zagadnienia i związane z nimi elementy pracy stanowią o jej dużej wartości merytorycznej.

Lektura dysertacji nasuwa jednak pewne komentarze i uwagi krytyczne, częściowo dyskusyjne:

- w pracy, w części dotyczącej budowy modeli matematycznych, zabrakło jednostek miary opisywanych wielkości fizycznych. Biorąc pod uwagę przedstawiane, np. na

stronie 90., wyniki symulacji, gdzie prędkość kątowa podawana jest w jednostkach $^{\circ}/s$, pojawia się wątpliwość co do poprawności prezentowanych wyników,

- w pracy zabrakło szerszej analizy zjawisk związanych z opisem siły trakcyjnej, bardzo istotnej w projektowaniu pojazdów gąsienicowych. Autor tylko pobieżnie odnosi się do tego zagadnienia w komentarzu na str. 71.
- niejasno opisano model kontaktu gąsienicy z podłożem,
- bardzo cenne dla pracy było by przeprowadzenie badań doświadczalnych w celu weryfikacji parametrów kinematycznych wybranych elementów układu jezdnego,
- ze względu na specyfikę środowiska pracy oraz rozwiązanie konstrukcyjne gąsienicowego robota do inspekcji rurociągów bardzo cennym byłoby zawarcie w rozprawie analizy jego awaryjnych stanów pracy.

W pracy zauważono kilka błędów redakcyjnych, które zostały przekazane do wiadomości autora.

Przedstawione uwagi i komentarze zostaną zapewne wyjaśnione, bądź skomentowane w trakcie publicznej obrony.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, realizację postawionego zadania należy ocenić wysoko ze względu na:

- prawidłowe zdefiniowanie przedmiotu badań,
- rzeczowy sposób prezentacji wyników,
- sumiennosc wykonania poszczególnych etapów pracy zwłaszcza pod kątem formalnym i matematycznym,
- wykazane przez autora dobre rozeznanie w wielu dziedzinach wiedzy, w tym umiejętności praktyczne,
- wymierne osiągnięcia teoretyczno-aplikacyjne, pozwalające na szereg spostrzeżeń i wyciągnięcie interesujących wniosków.

4. Ocena końcowa

Oceniając przedstawioną rozprawę doktorską należy podkreślić aktualność jej tematyki z punktu widzenia potrzeb konstrukcji i eksploatacji układów mechatronicznych a w szczególności mobilnych robotów gąsienicowych do inspekcji rurociągów. Recenzowana rozprawa zawiera elementy, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny „Automatyka i Robotyka”.

Uważam, że opiniowaną pracę Pana mgr inż. Michała Ciszewskiego cechuje interdyscyplinarne podejście do zagadnień projektowania, modelowania układów o złożonej naturze fizycznej, co stanowi stosowny wkład w zakresie analizy i kształtowania cech dynamicznych konstrukcji wybranej klasy układów mechatronicznych. Opracowane algorytmy i modele do badań symulacyjnych oraz sposób realizacji tych badań świadczą o odpowiednim przygotowaniu doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo-badawczej.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest wartościowym pod względem merytorycznym opracowaniem naukowym wykazującym znaczący wkład Autora

w rozwiązanie rozważanych w niej zagadnień. Wymienione w niniejszej recenzji uwagi oraz zauważone usterki nie zmieniają mojej bardzo pozytywnej opinii o pracy.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie przewodu doktorskiego, określone w **Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku, z późniejszymi zmianami, o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.**

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Z uwagi na wysoki poziom naukowy rozprawy i istotne znaczenie oryginalnych wyników badań zawartych w przedstawionym, w sposób kompleksowy, rozwiązaniu zagadnienia inspekcji wizyjnej wybranej klasy rurociągów za pomocą prototypowego robota gąsienicowego oraz dorobek publikacyjny Doktoranta, zgłaszam wniosek o wyróżnienie przez Radę Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Ciszewskiego.

