

## Streszczenie

**AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Robotyki i Mechatroniki

### Rozprawa doktorska

Tytuł: Modelowanie i sterowanie mobilnego robota gąsienicowego  
do inspekcji rurociągów

Autor: mgr inż. Michał Ciszewski

Promotor: dr hab. inż. prof. nadzw. AGH Mariusz Giergiel

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Buratowski

W poniższej rozprawie doktorskiej przedstawiony został wszechstronny, mobilny robot gąsienicowy do inspekcji rurociągów. Poruszone zostały aspekty projektowania konstrukcji, modelowania matematycznego, opracowania układu sterowania oraz wykonania i weryfikacji eksperymentalnej prototypu. Konstrukcja robota oparta jest o autorski, opatentowany mechanizm układu jezdnego, napędzany sześcioma serwomechanizmami, ustawiającymi pozycję i orientację dwóch modułów gąsienicowych. Tak korzystna konstrukcja, pozwala 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. W pracy przedstawione zostały modele kinematyki i dynamiki ruchu robota, dedykowane do inspekcji równych powierzchni. Aktywny, adaptacyjny układ jezdny robota, składający się z dwóch pedipulatorów o zamkniętym łańcuchu kinematycznym, wymaga stosowania złożonych metod modelowania i sterowania. Opracowany został autorski algorytm planowania trajektorii pedipulatorów, oparty o model 3D robota oraz o analityczne i numeryczne modele kinematyki prostej i odwrotnej. Modele matematyczne zweryfikowane zostały w oprogramowaniu MATLAB za pomocą symulacji ruchu i adaptacji układu jezdnego. Aby przewidzieć działanie prototypu, pomyślnie przeprowadzono symulacje równoległe systemu przy użyciu oprogramowania MATLAB/Simulink oraz V-REP, obejmujące implementację modeli matematycznych, układu sterowania oraz interakcję sprzętową z modelem 3D robota. Układ sterowania robota zaprojektowany został przy użyciu

multidyscyplinarnych metod, obejmujących zagadnienia związane ze sterowaniem robotów mobilnych i manipulatorów. Opisano dedykowany układ elektroniczny sterownika napędów, komunikacji i systemów sensorycznych robota. Zaprezentowano niskopoziomową aplikację dla układu sterownika robota, jak i oprogramowanie operatorskie do obsługi ruchu i adaptacji układu jezdnego oraz wizualizacji danych inspekcyjnych. Wykonanie prototypu opisane zostało z uwzględnieniem integracji podzespołów mechanicznych, elektrycznych, elektronicznych, sensorycznych i sterowania. Testy laboratoryjne prototypu pozwoliły na weryfikację działania robota i adaptacji układu jezdnego do zmiennego środowiska pracy, co potwierdza spełnienie tezy rozprawy doktorskiej. Opracowana została ulepszona wersja prototypu, w której zmodyfikowano układy mechaniczne, komunikacyjne, zasilania i sterowania, a prototyp gotowy jest do wdrożenia w przemyśle w obszarze inspekcji wizyjnej.

W rozdziale 1 „Wprowadzenie” przedstawione zostały: wstęp do rozprawy doktorskiej, cel i zakres pracy, teza oraz plan rozprawy. Robotyka mobilna jest dynamicznie rozwijającą się gałęzią dyscypliny „Automatyka i Robotyka”, a roboty mobilne coraz częściej używane są do wykonywania czynności wspomagających lub zastępujących działania człowieka, konsekwentnie wypełniając lukę pomiędzy funkcjonalnością manipulacyjną robotów stacjonarnych, a potrzebą mobilności. Obecnie, powszechnym staje się zastosowanie mobilnych robotów inspekcyjnych w przemyśle do monitoringu miejsc niedostępnych lub niebezpiecznych dla człowieka. W związku z mnogością zastosowań robotów, tworzona jest duża ilość rozwiązań, dostosowanych do pracy w danych typach przestrzeni roboczych. Motywacją do podjęcia prac jest stworzenie mobilnego robota gaśnicowego, pozwalającego na zmniejszenie ilości urządzeń, koniecznych do prowadzenia monitoringu rurociągów poziomych i pionowych oraz powierzchni płaskich, poprzez zastosowanie aktywnego systemu adaptacji mechanizmu jezdnego. Problemy badawcze poruszane w rozprawie obejmują zaprojektowanie, stworzenie modeli, opracowanie symulacji oraz układu sterowania robota wraz z walidacją eksperymentalną prototypu.

W omawianym rozdziale, sformułowana została teza rozprawy doktorskiej: „Możliwym jest stworzenie modelu matematycznego oraz jego implementacja w systemie sterowania mobilnego robota, wyposażonego w dwa napędy gaśnicowe, do adaptacji mechanizmu jezdnego i ruchu w rurociągach poziomych o różnych kształtach

i wymiarach, w rurociągach pionowych i na równych powierzchniach.” Plan rozprawy doktorskiej zawiera streszczenie ośmiu rozdziałów, obejmujących kolejne etapy prac badawczych, związanych z realizacją działań, koniecznych do udowodnienia wyżej przedstawionej tezy.

W rozdziale 2 „Zrobotyzowana inspekcja rurociągów” przedstawiono przegląd literaturowy mobilnych robotów, przeznaczonych do wielu typów zadań związanych z monitoringiem i inspekcją. Następnie opisane zostały uszkodzenia mogące wystąpić w rurociągach oraz metody inspekcji tych przestrzeni. Dokonano przeglądu mobilnych robotów inspekcyjnych, zaprojektowanych do poruszania się w rurociągach o różnych rozmiarach, typach i orientacji. Rozwiązania obejmują zarówno konstrukcje opracowane w instytutach badawczych, jak i produkty oferowane komercyjnie przez firmy z całego świata. Na podstawie wyżej wymienionych przeglądów literaturowych, stwierdzono zapotrzebowanie na opracowanie wszechstronnego robota do inspekcji rurociągów.

Mobilne roboty inspekcyjne, w zależności od zastosowania mogą pracować w różnych warunkach. Klasyfikacja robotów może być przeprowadzona ze względu na rodzaj wykonywanego ruchu: roboty poruszające się po ziemi, wspinające się, latające, pływające czy podwodne. Innym kryterium podziału jest wyszczególnienie typu lokomocji stosowanej przez robota. Roboty poruszające się po ziemi mogą posiadać koła, gąsienice, odnóża bądź elementy pozwalające na pełzanie czy skakanie. W robotyce inspekcyjnej można wyróżnić główne obszary zastosowaniami robotów: wewnątrz pomieszczeń (monitoring budynków), na zewnątrz (zastosowania militarne, monitoring stref niebezpiecznych lub niedostępnych), pod wodą (inspekcja rurociągów wypełnionych cieczami, konstrukcji podwodnych) oraz w powietrzu (inspekcja instalacji przemysłowych, upraw, misje zwiadowcze). Osobną grupą robotów inspekcyjnych są urządzenia nadzorujące procesy przemysłowe. W tej części rozdziału 2 przedstawiony został przegląd rodzajów robotów mobilnych, zaprojektowanych do pracy w różnego typu środowiskach naziemnych, z uwzględnieniem robotów kołowych, gąsienicowych i kroczących.

Inspekcja rurociągów jest szerokim zagadnieniem, w którego zakresie może znajdować się badanie stanu technicznego nowo zbudowanych rurociągów przed odbiorem technicznym, jak i monitoring okresowy eksploatowanych rurociągów w poszukiwaniu ewentualnych defektów, czy inwentaryzacja sieci rurociągowej w celu

opracowania dokumentacji technicznej. Uszkodzenia, które mogą wystąpić w eksploatowanych rurociągach obejmują m. in. odspojenie powłok ochronnych, korozję, deformację, rozszczelnienia. W niektórych przypadkach może dojść do zmian powodujących znaczące ograniczenie lub zatrzymanie przepływu cieczy, takich jak tworzenie się i cementowanie osadów lub penetracja rur przez obiekty obce, prowadząca do rozszczelnień. Inspekcja rurociągów opiera się w większości o nieinwazyjne metody oceny stanu technicznego. Najczęściej stosowaną techniką jest inspekcja wizyjna rurociągów, z zastosowaniem kamer inspekcyjnych, odpornych na warunki środowiskowe, wyposażonych w oświetlenie oraz napędy pozwalające na dostosowanie układu wizyjnego do badanego obiektu i dokładną ocenę defektów. Stosowane są także badania ultradźwiękowe, radiografia, metody magnetyczne, pozwalające dodatkowo na detekcję niewidocznych uszkodzeń. Wybór danej metody wiąże się z doбором czujników i przetworników do danego typu rurociągu. Do dokumentacji rurociągów stosuje się metody oparte na pomiarach laserowych oraz optycznych.

Do inspekcji rurociągów używane są roboty poruszające się wewnątrz, jak i po powierzchniach zewnętrznych rur. Do pracy wewnątrz rurociągów najczęściej używa się oszczędnych energetycznie konstrukcji opartych na kołach, jednak zastosowanie napędu gąsienicowego pozwala na poprawę trakcji i zwiększenie możliwości pokonywania przeszkód. W większości robotów gąsienicowych, stosowane są układy ruchu, pozwalające na nieznaczące dostosowanie do środowiska pracy. W przeglądzie, pokazane zostały roboty, dedykowane do inspekcji rurociągów pionowych lub poziomych. Po analizie dostępnych rozwiązań, stwierdzono, że nie istnieje konstrukcja robota, pozwalająca na jednoczesne dostosowanie się do ruchu na powierzchniach płaskich, w rurociągach poziomych oraz rurociągach pionowych, co stanowi motywację do podjęcia badań w zakresie modelowania i sterowania układu jeźdnego robota z aktywnym systemem adaptacji do przestrzeni roboczej.

W rozdziale 3 „Projekt mobilnego robota do inspekcji rurociągów z aktywnym mechanizmem adaptacji układu jeźdnego” zaprezentowana została konstrukcja mechaniczna robota, oparta na opatentowanym rozwiązaniu, uwzględniającym sformułowane wcześniej założenia. Układ ruchu robota składa się z dwóch pedipulatorów o zamkniętym łańcuchu kinematycznym, sześciu przegubach obrotowych i trzech serwomechanizmach, pozwalających na zmianę pozycji i orientacji zintegrowanych gąsienicowych modułów napędowych. Łącznie robot posiada osiem napędów, z czego

cztery umieszczone są wewnątrz korpusu i napędzają współosiowe pierścienie obrotowe poprzez przekładnie zębate, dwa umieszczone są w ramionach zewnętrznych pedipulatorów, a dwa silniki napędzają moduły gąsienicowe. Konstrukcja robota wykonana jest w większości z elementów aluminiowych oraz ze stali nierdzewnej, zapewniających ochronę przed korozją, a wszystkie złącza są uszczelnione, aby umożliwić działanie w środowisku wodnym. W projekcie robota przewidziana została kamera analogowa CCTV o szerokim kącie widzenia, ze zintegrowanym oraz dodatkowym oświetleniem. Na etapie projektu modelu CAD 3D robota, przedstawione zostały możliwe ustawienia pozycji i orientacji mechanizmu jezdnego, wraz z wizualizacją rurociągów różnego typu, do których robot może się dostosować. Minimalna średnica rurociągu poziomego, w którym może się poruszać wynosi  $\varnothing 210$  mm, natomiast ruch w rurociągach pionowych możliwy jest w zakresie teoretycznym średnic od  $\varnothing 224$  mm do  $\varnothing 270$  mm. Zastosowanie metod modelowania 3D pozwoliło na dokładne zaprojektowanie wszystkich podzespołów i stworzenie dokumentacji wykonawczej elementów prototypu na podstawie kompletnego modelu CAD.

Rozdział 4 „Modelowanie matematyczne robota” przedstawia opis matematyczny układu jezdnego robota. Na początku poruszony został aspekt analiz kinematycznych i dynamicznych, pozwalających na obliczenie pozycji i orientacji robota oraz momentów napędowych silników podczas ruchu robota na równych powierzchniach. Ze względu na to, że mechanizm układu jezdnego oparty jest na dwóch aktywnie sterowanych pedipulatorach, niezbędnym było stworzenie autorskich modeli matematycznych i algorytmów obliczeniowych do opisu ruchu tych zamkniętych łańcuchów kinematycznych, w celu opracowania układu sterowania.

Modelowanie kinematyki ruchu robota zostało przeprowadzone analogicznie do tworzenia modeli pojazdów gąsienicowych, z uwzględnieniem poślizgu, przy założeniu, że układ jezdny ma ustaloną pozycję z równoległe zorientowanymi modułami gąsienicowymi. Wyprowadzono równania zmiany orientacji ramy robota oraz składowych prędkości liniowych względem poszczególnych osi układu odniesienia. Poślizg gąsienic zależy od rodzaju podłoża, po którym porusza się robot, a jednoznaczne określenie pozycji i orientacji może być trudne dla powierzchni o zmiennych parametrach.

Model dynamiczny ruchu robota opracowany został przy zastosowaniu metod energetycznych, opartych o równania Lagrange’a z użyciem formalizmu Maggi’ego,

pozwalających na pominięcie operacji odsprzęgania mnożników Lagrange'a. Do modelowania dynamiki wykorzystano model kinematyki ruchu robota i uwzględniono oddziaływanie środowiska podczas ruchu pod wodą. Parametry modelu otrzymane zostały z projektu CAD robota, a przy użyciu modeli kinematyki i zasad dynamiki otrzymano energię kinetyczną robota. Równania Magii'ego umożliwiły wyprowadzenie zależności opisujących ruch robota pod wodą po powierzchniach płaskich i nachylonych. Uwzględniono w nich siły: wyporu, oporu hydrodynamicznego, oporu poprzecznego, tarcia oraz uciągu kabla zasilającego. Zastosowano w nich równania więzów nieholonomicznych, opisujących ruch pojazdu gąsienicowego. Równania pozwalają na rozwiązanie zadania prostego i odwrotnego dynamiki ruchu robota, natomiast ze względu na zmienność parametrów dynamicznych przy poruszaniu się po różnego typu powierzchniach, za ich pomocą można otrzymać jedynie aproksymację odwzorowania rzeczywistego działania robota.

Rurociągi znacząco ograniczają możliwości ruchu robota, przeważnie do jazdy w przód i w tył. W związku z tym, stosowanie poprzednio przedstawionych modeli nie jest niezbędne. Jednakże, do prawidłowego dostosowania mechanizmu jezdnego robota do środowiska pracy, konieczne było opracowanie autorskich modeli kinematyki ruchu pedipulatorów i algorytmów planowania trajektorii, koniecznych do implementacji układu sterowania robota. Pedipulator składa się z sześciu przegubów obrotowych klasy piątej, umożliwiających jedynie obrót względem jednej osi. Mimo przestrzennej struktury, mechanizm może być traktowany jako płaski, w związku z tym, że wszystkie osie obrotu przegubów są równoległe. Ruchliwość zastępczego mechanizmu płaskiego wynosi trzy, stąd możliwe jest zastosowanie trzech napędów do sterowania pozycją i orientacją modułów napędowych. Analiza mechanizmu jako zamkniętego łańcucha kinematycznego jest skomplikowana, ze względu na rozmieszczenie napędów i przegubów. Stąd w modelowaniu wykorzystano metodykę stosowaną powszechnie w robotyce dla otwartych łańcuchów kinematycznych, a dodatkowe warunki pozwoliły na domknięcie łańcucha kinematycznego. Mechanizm pedipulatora został rozdzielony na dwa otwarte łańcuchy manipulatorów płaskich o odpowiednio dwóch i trzech stopniach swobody. Warunek domknięcia pętli kinematycznej zostaje spełniony, gdy końcówki efektorów obydwu manipulatorów płaskich znajdują się w tym samym punkcie w przestrzeni. Równania kinematyki prostej pedipulatorów zostały wyprowadzone przy użyciu notacji Denavita-Hartenberga.

Stworzenie i opracowanie metody rozwiązania równań kinematyki odwrotnej dla mechanizmu pedipulatora jest najistotniejszym elementem modelowania matematycznego robota. Obliczenia bazują na numerycznych rozwiązaniach modeli kinematyki odwrotnej, z użyciem Jakobianu manipulatora, warunków zaczerpniętych z rozwiązań analitycznych, warunków domknięcia pętli kinematycznej oraz dodatkowych reguł, dedykowanych do autorskiej konstrukcji mechanizmu. Początkowo opisane zostało rozwiązanie analityczne dla modelu kinematyki odwrotnej manipulatora płaskiego o trzech stopniach swobody, potrzebne do sformułowania warunków dla obliczeń numerycznych. Następnie opisano Jakobiany geometryczne manipulatorów, potrzebne do obliczeń numerycznych kinematyki. W kolejnym kroku przedstawiono metodykę przyjętą do obliczeń numerycznych kinematyki odwrotnej z wykorzystaniem pseudoinwersji oraz transpozycji Jakobianów. Metoda oparta jest na iteracyjnym obliczeniu współrzędnych złączowych przy pomocy minimalizacji różnicy pomiędzy poząadaną i estymatą aktualnej pozy, wyrażonej za pomocą sił uogólnionych i przemieszczeń wirtualnych końcówki efektora. Dobór współczynników proporcjonalności oraz wykonanie transpozycji Jakobianu dla każdej iteracji pozwala na odwzorowanie wymaganych zmian pozy efektora na prędkości złączy mechanizmu. Obliczenia kończone są, gdy prędkości złączowe osiągną odpowiednio niskie wartości.

Modele kinematyki prostej i odwrotnej stworzone zostały wyłącznie dla obliczenia otwartych łańcuchów kinematycznych manipulatorów płaskich, wydzielonych z zamkniętego łańcucha pedipulatora. Aby umożliwić sterowanie transformacją pedipulatorów, w celu osiągnięcia zadanych konfiguracji robota, opracowany został autorski algorytm planowania trajektorii, łączący opisywane wcześniej metody oraz stosowane w kolejnych krokach algorytmu warunki, pozwalające na otrzymanie poprawnych rozwiązań. Algorytm, zaimplementowany w środowisku MATLAB, podzielony został na dwa etapy. W początkowym etapie, wykonywanym jednokrotnie, tworzona jest na podstawie modelu CAD, baza danych zawierająca współrzędne złączowe, odpowiadające danym konfiguracjom robota oraz wykonany zostaje podział mechanizmu na dwa otwarte łańcuchy kinematyczne manipulatorów płaskich. W kolejnym etapie, wykonywanym dla każdej transformacji układu jezdnego robota, podawane są pozy początkowe i końcowe pedipulatorów, następnie generowana jest trajektoria dla manipulatora o dwóch stopniach swobody przy pomocy interpolacji wielomianowej współrzędnych złączowych. Przy użyciu równań kinematyki prostej

i odwrotnej oraz warunków, dedykowanych do struktury pedipulatora, obliczana jest trajektoria manipulatora o trzech stopniach swobody, który przy zachowaniu minimalnej zmiany orientacji i pozycji modułu gąsienicowego, podąża za manipulatorem o dwóch stopniach swobody, spełniając warunek domknięcia łańcucha kinematycznego. Przy odpowiednim doborze pozycji początkowej i końcowej, możliwe jest otrzymanie trajektorii transformacji pedipulatorów. W rozdziale 4 zaprezentowano walidację numeryczną oraz wizualną obliczeń na przykładzie najbardziej użytecznych operacji transformacji układu jezdnego do pracy w rurociągach o różnych rozmiarach, nachyleniu oraz na powierzchniach płaskich.

W celu dokładniejszej analizy możliwości ruchowych robota podczas rekonfiguracji mechanizmu jezdnego w rurociągach, stworzone zostały modele matematyczne obejmujące całą strukturę kinematyczną robota w przestrzeni 2D. Dzięki opisowi punktów kontaktu gąsienic z rurociągiem, możliwe było rozwiązanie równań definiujących teoretyczną zmianę średnicy rurociągu podczas transformacji robota. Zastosowane rozwiązanie teoretyczne pozwoliło na wizualizację transformacji układu jezdnego robota w przestrzeni na wykresach trójwymiarowych, sporządzonych w środowisku MATLAB. Stworzone zostały również pełne modele dwuwymiarowe mechanizmu, a trajektorie poszczególnych punktów charakterystycznych złączy zwizualizowane zostały na wykresach trójwymiarowych. Stworzone i zweryfikowane modele matematyczne transformacji pedipulatorów, umożliwiają implementację operacji adaptacji mechanizmu jezdnego w układzie sterowania robota.

W rozdziale 5 „Symulacje adaptacji i ruchu robota w różnych przestrzeniach roboczych” przedstawiono przebieg badań symulacyjnych transformacji układu jezdnego oraz ruchu robota, opartych na modelach 3D CAD oraz na implementacji algorytmu planowania trajektorii, opisanego w rozdziale 4. Możliwie wierne odwzorowanie działania prototypu robota w fazie projektowej jest istotnym elementem rozwoju nowych układów w robotyce. Obecnie istnieje wiele platform symulacyjnych, pozwalających na badania własności ruchowych oraz testowanie układów sterowania. Aby wiernie odwzorować model CAD i przyszłe działanie prototypu robota, wybrane zostało środowisko symulacyjne V-REP, dające możliwość uruchomienia symulacji równoległych z oprogramowaniem MATLAB, gdzie stworzone zostały algorytmy obliczeniowe. W pierwszym etapie, na podstawie modelu 3D CAD, sporządzono model robota w oprogramowaniu V-REP, pozwalający na odwzorowanie działania prototypu.



W celu zwiększenia efektywności obliczeniowej symulacji, przy jednoczesnej zgodności wizualnej modelu robota, posłużono się elementami aktywnymi dynamicznie w symulacji multibody oraz ich odpowiednikami wizualnymi. W modelu dynamicznym elementy składają się z uproszczonej siatki trójkątów. Model zawiera również przeguby obrotowe swobodne i napędzane, zgodne ze strukturą mechanizmu. W przegubach napędzanych użyto sterowniki pozycji, z ograniczeniem maksymalnego momentu, odpowiadające działaniu serwomechanizmów, stosowanych w robocie. Hierarchiczna struktura sceny symulacyjnej pozwala na odwzorowanie budowy modelu oraz zamknięcie pętli kinematycznych. Symulacja napędów z gumowymi gąsienicami wymaga zazwyczaj dedykowanego oprogramowania i dużych mocy obliczeniowych, z uwagi na konieczność uwzględnienia odkształceń ostróg gąsienic, natomiast modelowanie poszczególnych segmentów jako brył sztywnych negatywnie wpływa na stabilność symulacji ze względu na dużą ilość punktów styku z podłożem. W celu eliminacji tych niepożądanych zjawisk, napędy gąsienicowe zamodelowane zostały poprzez pięć wałków o kształcie baryłkowym, dających maksymalnie dziesięć punktów styku z powierzchnią. Do symulacji w V-REP, z spośród czterech dostępnych silników obliczeniowych, wykorzystana została biblioteka Bullet, pozwalająca na uzyskanie najbardziej stabilnych wyników. Z uwagi na fakt, że algorytm planowania trajektorii zaprojektowany został w środowisku MATLAB, wykorzystano interfejs programistyczny aplikacji V-REP remote API link, umożliwiający równoległe działanie programu MATLAB, czy symulacji MATLAB/Simulink razem z oprogramowaniem V-REP. Przeprowadzenie równoległych symulacji pozwoliło na weryfikację trajektorii transformacji układu jezdnego modelu multibody robota, bezpośrednio przy pomocy modeli kinematyki odwrotnej, zaimplementowanych w algorytmie planowania trajektorii. Sterowanie ruchem gąsienic robota poprzez bezpośrednie oddziaływanie operatora, umożliwiono poprzez implementację interfejsu sprzętowego z bezprzewodowym urządzeniem typu joystick w modelu symulacyjnym Simulink, połączonym z symulatorem V-REP. Przeprowadzono badania ruchu robota w rurociągach poziomych o zmiennej średnicy, połączonych kolanami oraz łącznikami redukcyjnymi. Weryfikacja symulacyjna potwierdziła możliwość transformacji robota wewnątrz rurociągów o różnych średnicach, połączonych łącznikami redukcyjnymi oraz zdolność robota do pokonywania kolan o kątach do  $90^\circ$ . Przeprowadzono również symulacje ruchu robota po równych i nierównych powierzchniach. Weryfikacja

symulacyjna algorytmu planowania trajektorii pedipulatorów wykazała zgodność modeli matematycznych z modelem multibody robota. Najbardziej złożonym pod względem implementacji układu sterowania jest ruch w rurociągach pionowych. Wymaga on zapewnienia docisku modułów gaśnicowych do ścian rurociągu, wywieranego przez serwomechanizmy pedipulatorów. Do badań symulacyjnych ruchu robota w rurociągach pionowych stworzona została rozszerzona wersja modelu Simulink. Pozwala ona na zdalne sterowanie dociskiem gaśnic za pomocą urządzenia typu joystick. Nacisk wywierany jest dzięki realizacji kolejnych kroków trajektorii pomiędzy pozami pedipulatorów, przeznaczonymi do ruchu w najmniejszej i największej średnicy rurociągach pionowych. Testy symulacyjne wykazały możliwość działania robota w rurociągach pionowych o stałej średnicy, a dodatkowo przeprowadzono próby dostosowania układu jezdnego robota do rurociągu o zmieniającej się średnicy. Taki przypadek może wystąpić, gdy obecne są osady lub zanieczyszczenia powierzchni wewnętrznej rurociągu.

Badania symulacyjne przy użyciu specjalnie opracowanych modeli robota, w oprogramowaniu V-REP, MATLAB oraz Simulink dowiodły, że możliwa jest implementacja autorskiego algorytmu planowania trajektorii pedipulatorów do sterowania ruchem prototypu robota w różnego typu rurociągach oraz innych przestrzeniach roboczych.

W rozdziale 6 „Projekt i implementacja systemu sterowania” przedstawiono system sterowania robotem, opracowany przy użyciu technik stosowanych w robotach mobilnych, jak również w manipulatorach czy robotach przemysłowych. Opisana została architektura systemu sterowania w aspekcie układów elektronicznych, komunikacji, zasilania, a także implementacji oprogramowania sterownika robota oraz aplikacji operatorskiej.

W pierwszej części rozdziału 6, porównano metody używane do sterowania robotami mobilnymi, jak i robotami przemysłowymi. Roboty mobilne mogą być sterowane zdalnie poprzez operatora, który w pełni lub częściowo kontroluje wykonywane przez nie czynności, albo mogą poruszać się w pełni autonomicznie. Ze względu na bardzo zróżnicowane zastosowania robotów mobilnych, układy sterowania dedykowane są do danego rozwiązania konstrukcyjnego. Istotnym aspektem sterowania robotów mobilnych jest nawigacja i lokalizacja w przestrzeni, która może być realizowana przy użyciu czujników i modeli matematycznych ruchu robota. Algorytmy

bazują na wcześniej dostarczonych mapach albo wykorzystują techniki symultanicznej lokalizacji i tworzenia mapy SLAM. Nawigacja robotów w rurociągach realizowana jest zazwyczaj za pomocą pomiarów odometrycznych, dostarczanych przez układ napędowy lub w przypadku, gdy konieczne jest stworzenie dokładnej mapy, stosowane są systemy wizyjne i czujniki laserowe, wraz z pomiarami odometrycznymi. Autonomiczny ruch mobilnych robotów inspekcyjnych w rurociągach możliwy jest również bez konieczności tworzenia mapy, z zastosowaniem reaktywnego układu sterowania. W sterowaniu robotów stacjonarnych, manipulatorów przemysłowych, wykorzystywane są w większości dynamiczne modele ruchu, z wykorzystaniem równań Lagrange'a. Zadaniem układu sterowania pozycyjnego jest wykonywanie ruchu ramienia robota pomiędzy zdefiniowanymi pozami końcówki efektora: początkową i końcową. Bardziej zaawansowanym typem sterowania jest podążanie po wcześniej zdefiniowanej trajektorii. Sterowanie robota może być realizowane w przestrzeni złączy lub w przestrzeni zadań. W pierwszym przypadku, gdy nie jest znana dokładna przestrzeń robocza można zadać pozycję i orientację końcówki efektora oraz przy użyciu modeli kinematyki odwrotnej otrzymać trajektorię w przestrzeni złączy. Trajektorie generowane w ten sposób mogą zostać zapisane i później odtworzone przez robota. W drugim przypadku, niezbędna jest implementacja modelu kinematyki odwrotnej w sterowniku robota do obliczania trajektorii podczas wykonywania zadań w przestrzeni roboczej, co wymaga dużych mocy obliczeniowych. Dobór metody sterowania zależy od przeznaczenia robota i typu wykonywanych przez niego zadań.

W następnej części rozdziału 6, opisana została struktura sprzętowa i wymagania dotyczące układu sterowania mobilnego robota gąsienicowego. Ze względu na to, że adaptacyjny układ jezdny robota wymaga zastosowania metod sterowania używanych w robotyce mobilnej i przemysłowej, konieczne jest stworzenie systemu pozwalającego na integrację różnych podzespołów ruchowych. W rurociągach występują problemy z komunikacją bezprzewodową, szczególnie przy przesyłaniu dużej ilości danych, takich jak sygnał wideo z kamery CCTV, co sprawia, że robot sterowany jest przewodowo. Zastosowanie napędów gąsienicowych do ruchu po powierzchniach o zmiennych parametrach nie pozwala na otrzymanie precyzyjnych danych odometrycznych, zwłaszcza podczas pokonywania kolan, gdzie występują znaczne poślizgi, stąd zdecydowano się na zdalne sterowanie prędkością gąsienic przez operatora. Najbardziej skomplikowanym zadaniem układu sterowania jest dostosowanie układu jezdnego robota

do różnych typów rurociągów. Dlatego zaimplementowany został algorytm obliczeniowy planowania trajektorii pedipulatorów, przedstawiony w rozdziale 4 i zweryfikowany symulacyjnie w rozdziale 5. Sterowanie napędami zrealizowane jest w przestrzeni złączy. Układ komunikacyjny bazuje na interfejsie Ethernet, a robot zasilany jest prądem stałym. Sterowanie przez operatora, analogicznie do testów symulacyjnych, opisanych w rozdziale 5, umożliwia urządzenie bezprzewodowe typu joystick. Sygnał analogowy z kamery, wyświetlany jest po konwersji przy pomocy oprogramowania operatorskiego.

W skład systemu sterowania wchodzi dedykowany układ elektroniczny, umieszczony w korpusie robota, przeznaczony do obsługi komunikacji, sterowania pozycjami serwomechanizmów, prędkościami napędów gąsienicowych oraz odczytem danych z czujnika inercyjnego IMU. Układ wyposażono w mikrokontroler o architekturze AVR, osiem kanałów PWM, skonfigurowanych do współpracy z napędami, zasilanie oświetlenia oraz obsługę kamery.

Implementacja oprogramowania składa się z dwóch zasadniczych warstw: niskopoziomowego programu sterownika pokładowego robota, napisanego w języku C oraz oprogramowania operatorskiego z graficznym interfejsem użytkownika, opracowanego w języku C++. Oprogramowanie, zaimplementowane na komputerze PC, pozwala na wysyłanie komend do sterownika umieszczonego w korpusie robota oraz wyświetlanie aktualnej pozycji napędów pedipulatorów oraz prędkości zadanej gąsienic. Realizację transformacji układu jezdnego robota umożliwia odtwarzanie trajektorii generowanych przez model matematyczny robota, opracowany w środowisku MATLAB. Dane z czujnika inercyjnego IMU, zapisywane i wyświetlane przez oprogramowanie pozwalają na określenie orientacji korpusu robota w przestrzeni. Przedstawiona implementacja oprogramowania oraz układu zasilania, komunikacji i sterowania robotem umożliwia przeprowadzanie inspekcji wizyjnej w rurociągach o różnych kształtach, wymiarach i orientacji.

W rozdziale 7 „Prototyp robota do inspekcji rurociągów” przedstawiono proces wykonania oraz integracji podsystemów prototypu mobilnego robota gąsienicowego. Większość elementów mechanicznych, ze względu na autorski projekt, opracowano w sposób dedykowany dla konstrukcji robota. Elementy aluminiowe oraz ze stali nierdzewnej, stanowiące znaczącą część konstrukcji, wykonane zostały za pomocą technik obróbki numerycznej. W celu ochrony przed czynnikami zewnętrznymi, elementy aluminiowe zostały anodowane. W procesie budowy prototypu

przeprowadzono kalibrację mechanizmów pedipulatorów z serwomechanizmami oraz wykonano uszczelnienia, pozwalające na zastosowanie prototypu w trudnych warunkach środowiskowych. Prototyp robota został wstępnie zweryfikowany i porównany z modelem CAD 3D. Ręczne ustawienie mechanizmów pozwoliło stwierdzić, że konstrukcja jest zgodna z projektem i możliwe będzie podłączenie i integracja prototypu z układami zasilania, komunikacji i sterowania. Układy elektroniczne prototypu wykonane zostały zgodnie z założeniami, a dedykowany sterownik robota przetestowany został pod kątem niezawodności podczas sterowania napędami i komunikacji z oprogramowaniem operatorskim.

Pierwsze testy prototypu robota obejmowały ocenę poprawności działania układu jezdnego podczas transformacji do pracy w różnego typu przestrzeniach roboczych. Poza neutralna pedipulatorów robota odpowiada pozycjom serwomechanizmów w połowie ich zakresu ruchu i ustawiana jest po włączeniu zasilania prototypu. Przed umieszczeniem robota w rurociągu lub na powierzchni konieczne jest przeprowadzenie transformacji układu jezdnego. Prototyp robota, umieszczony na specjalnym stanowisku, pozwalającym na bezkolizyjny ruch pedipulatorów został przetestowany podczas realizacji trajektorii, otrzymanych przy użyciu modelu matematycznego. Wszystkie transformacje przeprowadzono w poprawny sposób, łącznie z ustawieniami pedipulatorów do ruchu po powierzchniach płaskich oraz w rurociągach pionowych, choć stwierdzono konieczność odpowiedniego doboru pozycji początkowej, ze względu na to, że przy zamkniętym łańcuchu kinematycznym nie jest możliwe wykonanie ruchu pomiędzy dowolnymi konfiguracjami. Zjawisko to zaobserwowane zostało wcześniej podczas badań symulacyjnych. W następnym etapie, prototyp robota został sprawdzony podczas ruchu w rurociągach poziomych o stałej średnicy oraz na powierzchniach płaskich. Jednym z najtrudniejszych zadań dla prototypu robota o dwóch napędach gąsienicowych jest ruch w rurociągach pionowych. Podczas testów sprawdzono działanie robota w rurociągu pionowym, dostosowując docisk gąsienic do ścian rury. W tym przypadku należy zauważyć, że autorska konstrukcja prototypu robota jako jedyne rozwiązanie pozwala na ruch jednocześnie po powierzchniach płaskich i rurociągach pionowych, a dostępne na rynku rozwiązania, stosowane mogą być wyłącznie w jednym z wymienionych środowisk. W celu dokładniejszej weryfikacji możliwości ruchowych robota, skonstruowane zostało dedykowane stanowisko testowe, pozwalające na tworzenie różnorodnych konfiguracji odcinków rurociągów. Podczas badań na

stanowisku sprawdzono możliwości ruchu robota w kolanach oraz w łącznikach rur o różnych średnicach. Podczas przejazdu w łączniku redukcyjnym ze średnicy  $\text{Ø}300$  mm do średnicy  $\text{Ø}242$  mm, konieczne jest przeprowadzenie operacji transformacji mechanizmu jezdnego, która została pomyślnie zweryfikowana na prototypie robota. W ramach badań sprawdzono również zdolność robota do przejazdu stanowiska, analogicznego do sceny symulacyjnej, stworzonej w środowisku V-REP, zawierającego kolana oraz łącznik redukcyjny. Aby sprawdzić możliwość opracowania zasilania akumulatorowego robota, przeprowadzono testy pozwalające na oszacowanie zużycia energii przez serwomechanizmy, układy elektroniczne oraz napędy gąsienicowe. Testy umożliwiły określenie teoretycznego czasu pracy robota na zasilaniu akumulatorowym oraz dostarczyły danych do projektu zmodyfikowanej wersji prototypu.

W ostatniej części rozdziału 7, przedstawiono modyfikację prototypu systemu inspekcyjnego, pozwalającą lepiej dostosować robota do wdrożenia w przemyśle. Na bazie eksperymentów przeprowadzonych na pierwszej wersji, zdecydowano o zmianie sposobu komunikacji na interfejs szeregowy, wykorzystujący protokół RS-485. Pozwoli to na wydłużenie zasięgu robota. Zdecydowano również o podwyższeniu napięcia zasilania prototypu i dostosowaniu układów zasilających do pracy w terenie, bez dostępu do napięcia sieciowego. Opracowana oraz wykonana została również nowa wersja układu elektronicznego sterownika pokładowego, zapewniająca oprócz wcześniej omawianej funkcjonalności, pomiar natężenia prądu pobieranego przez każdy z napędów, obsługę precyzyjnego inklinometru do badania nachylenia rurociągu, regulację zdalną oświetlenia oraz dodatkowe zabezpieczenia. W robocie zamontowano również przetwornicę napięcia DC-DC, umożliwiającą zastosowanie przewodu sterowniczego z wyższym napięciem, o długości przekraczającej 100 m. Prototyp robota został dostosowany w celu usprawnienia wdrożenia do pracy w warunkach przemysłowych poprzez integrację podsystemów i wprowadzenie wszystkich poprzednio wymienionych modyfikacji.

W rozdziale 8 „Dyskusja, wnioski i dalsze prace”, zamieszczono podsumowanie zagadnień poruszonych w rozprawie doktorskiej oraz opisano dalsze prace, które pozwoliłyby na rozszerzenie funkcjonalności mobilnego robota przeznaczonego do inspekcji rurociągów. W ramach wniosków, zebrano najważniejsze osiągnięcia opisane w kolejnych rozdziałach rozprawy oraz podsumowano metodykę badawczą prowadzącą do opracowania projektu, modeli matematycznych, implementacji systemu sterowania oraz wykonania i walidacji eksperymentalnej autorskiego mobilnego robota

gąsienicowego z adaptacyjnym układem mechanizmu jezdnego, przeznaczonego do inspekcji wizyjnej rurociągów. Stwierdzono również, że teza pracy została udowodniona.

W ramach dalszych prac zaproponowano opracowanie elementów konstrukcyjnych, dających perspektywę zwiększenia zakresu ruchu robota w rurociągach o większych średnicach. Możliwym jest również zamontowanie w robocie kamery z głowicą obrotową i funkcją zbliżenia optycznego lub innych czujników, przeznaczonych do badań nieniszczących struktury rurociągów. Stworzenie automatycznego systemu regulacji siły docisku gąsienic do ścian rurociągów, opartego na pomiarach natężenia prądu pobieranego przez serwomechanizmy, pozwoliłoby na wykonywanie inspekcji w rurociągach pionowych o zmiennej średnicy. Kolejnym aspektem dalszych prac może być opracowanie systemu nawigacji oraz inwentaryzacji rurociągów, a także zaprojektowanie i wykonanie wodoszczelnego panelu operatorskiego. Produkcja seryjna mobilnych robotów inspekcyjnych, opartych na projekcie, przedstawionym w rozprawie doktorskiej, wymagałaby dostosowania metod wytwarzania elementów w celu optymalizacji kosztów i czasu wykonania prototypu robota, a także dostosowania całości systemu do potrzeb inwestorów.

Prace przedstawione w rozprawie doktorskiej pozwoliły na rozwiązanie problemu badawczego w aspekcie projektowania, modelowania, sterowania, wykonania i implementacji mechatronicznego systemu mobilnego robota do inspekcji rurociągów.