



INSTYTUT INFORMATYKI STOSOWANEJ
POLITECHNIKA ŁÓDZKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Metodyka AADL projektowania
rozproszonych systemów czasu
rzeczywistego w autonomicznej
platformie mobilnej**

STRESZCZENIE

Autor:
mgr inż.
Maciej ŁASKI

Promotor:
prof. dr hab. inż.
Dominik SANKOWSKI

Promotor pomocniczy:
dr inż.
Krzysztof STRZECHA

29 lipca 2014

Spis treści

1	Cel, zakres i teza rozprawy	3
1.1	Cel rozprawy	3
1.2	Zakres rozprawy	4
CZEŚĆ I: STAN WIEDZY		6
2	Rozproszone systemy czasu rzeczywistego	6
3	Przegląd metodyk projektowania rozproszonych systemów czasu rzeczywistego	7
4	Metodyka AADL	8
CZEŚĆ II: ZREALIZOWANY SYSTEM ROBOTA MOBILNEGO		9
5	System Zarządzania Platformą Mobilną	9
6	Dekompozycja Systemu Zarządzania Platformą Mobilną	11
CZEŚĆ III: OPRACOWANE I ZAIMPLEMENTOWANE ALGORYTMY ZARZĄDZANIA PLATFORMĄ MOBILNĄ		13
7	Rozproszony system sterowania silnikami napędowymi platformy mobilnej	13
8	Algorytmy ramienia obserwacyjnego robota	15
9	Modyfikacja i implementacja algorytmu ICP (Iterative Closest Point)	18
CZEŚĆ IV: PODSUMOWANIE		19

Wstęp

Obecnie trudno wyobrazić sobie życie bez automatów, które wyręczają człowieka w wielu dziedzinach życia. Wspomagają one pracę w fabrykach, kopalniach, pod wodą często w miejscach bardzo niebezpiecznych dla życia ludzkiego takich jak rejonyskażeń chemicznych czy pola minowe. Coraz częściej maszyny te są w stanie wykonywać swoje zadania autonomicznie.

Ilość pól minowych znajdujących się na Ziemi, zwłaszcza w krajach trzeciego świata, wciąż wzrasta. Koszt wyprodukowania jednej miny niewiele przekracza kwotę jednego dolara, a jej umieszczenia na polu minowym kosztuje niewiele więcej. Niestety powstawanie pól minowych jest związane z taktycznymi decyzjami podejmowanymi w trakcie działań wojennych i często są one nie udokumentowane i nieoznakowane. Z tego powodu bardzo trudno jest unieszkodliwić takie ładunki. Ponadto powstają coraz bardziej zaawansowane miny. Zawierają układy mikroprocesorowe i same decydują o tym, czy powinny wybuchnąć w danym momencie. Często decyduje o tym waga lub ilość nacisnięć wyzwalacza, czy nawet pojawienie się pola magnetycznego, które jest generowane przez wykorzystywane przez wojsko wykrywacze. Miny takie mogą dla przykładu nie zostać zneutralizowane przez trał, ponieważ wystąpił zbyt duży nacisk lub wybuchnąć, gdy tylko wykrywacz metali znajdzie się w ich pobliżu. Życie ludzkie w takiej sytuacji jest bardzo zagrożone. Aktualnie szacuje się, że usunięcie miny z rejonu zagrożenia kosztuje kilka tysięcy dolarów nie uwzględniając, iż życie sapera podejmującego się zadania rozbrojenia ładunku jest **bezценne**. Nie da się go porównać z kosztami produkcji robota, który mógłby autonomicznie przemierzać pole minowe i sukcesywnie oznaczać wykryte w ziemi ładunki.

Wyżej wymieniony problem był inspiracją do podjęcia działań w kierunku konstruowania platformy mobilnej potrafiącej wykonywać autonomiczne zadania. Zaprojektowanie i zrealizowanie platformy mobilnej, która mogłaby posłużyć do celów wojskowych jest zadaniem złożonym i interdyscyplinarnym. Każdy element, zarówno mechaniczny, elektryczny jak i informatyczny konstruowanego robota powinien współgrać z całością systemu. W ramach niniejszej rozprawy przedstawiony został kompletny modułowy i skalowalny system zarządzania platformą mobilną, w którego skład wchodzi układy: zasilania, napędowe, komunikacji, interakcji z użytkownikiem, przetwarzania obrazów, obsługi czujników oraz **realizacji zadań autonomicznych**. Motywacją do podjęcia badań nad realizacją robota przeznaczonego do zadań wojskowych był grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Autonomiczny robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min” nr 0010/1/R/T00/2008/05. Grant ten zrealizowany został w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej (dawniej Katedry Informatyki Stosowanej) we współpracy w Łódzkim przedsiębiorstwie PREXER sp. z o.o.

Autor niniejszej rozprawy jest członkiem zespołu badawczego pracującego w In-

stytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej w skład którego wchodzi: prof. dr hab. inż. Dominik Sankowski (kierownik i koordynator projektu), prof. dr hab. inż. Piotr Ostalczyk, prof. dr hab. inż. Krzysztof Ślot, dr inż. Marcin Bąkała, mgr inż. Sylwester Błaszczuk, mgr inż. Wojciech Dadan, mgr inż. Piotr Duch, mgr inż. Rafał Jachowicz, mgr inż. Roman Krzeszewski, **mgr inż. Maciej Łaski**, mgr inż. Adam Wulkiewicz oraz osoby, które odeszły od projektu w trakcie jego trwania, ale mają znaczący wkład w jego realizację: dr inż. Sławomir Jeżewski, mgr inż. Adam Śmigielski. Zespół ten zaprojektował, zaimplementował, oprogramował i przetestował algorytmy wchodzące w skład Systemu zarządzania Platformą mobilną. Wszystkie elementy tego systemu, wraz z zaznaczonymi poszczególnymi autorami algorytmów przedstawione zostały na ogólnym schemacie systemu w rozdziale 5 (Rys. ??). **Autorskie algorytmy zostały opracowane, a następnie zaimplementowane w językach C, C++ i C#. Liczba linii kodu całego przedsięwzięcia dotyczącego realizacji tego zagadnienia wyniosła około 200 tysięcy z czego autor niniejszej pracy opracował około 60 tysięcy.**

Realizacja poszczególnych zadań wykonanych w projekcie wymagała szczegółowego planu pracy i działań, zwłaszcza na etapach integracji modułów realizowanych przez różne osoby. Konieczne było wykonywanie częstych testów kompletnego systemu, tak aby można było przeanalizować wpływ działania wszystkich współpracujących ze sobą modułów. Dla przykładu nie można przetestować funkcjonowania modułu odpowiedzialnego za poruszanie się do zadanej pozycji GPS bez integracji modułów: napędowego i lokalizacji. Wielokrotne testy były wykonywane na Politechnice Łódzkiej oraz na poligonach wojskowych i strażackich. Autor zawarł wyniki związane z tematyką rozprawy w 15 publikacjach naukowych w tym: jedna z listy Filadelfijskiej (Ostalczyk, Łaski *i inni*, 2013), pięciu rozdziałach w monografii wydanej przez wydawnictwo World Scientific (Stany Zjednoczone) (Błaszczuk, Łaski *i inni*, 2014; Duch, Łaski *i inni*, 2014; Jachowicz, Łaski *i inni*, 2014; Łaski *i inni* 2014; Wulkiewicz, Łaski *i inni*, 2014) i jednym rozdziale w monografii wydanej przez wydawnictwo Springer (Duch, Łaski *i inni*, 2013).

Autor rozprawy ma świadomość interdyscyplinarnego charakteru pracy, gdzie Automatyka i Teoria Sterowania przeplatają się z Informatyką. Przedstawione problemy dotyczą głównie informatycznych aspektów zagadnienia projektowania rozproszonego systemu czasu rzeczywistego do zarządzania platformą mobilną z tego

powodu elementy automatyki i teorii sterowania nie zostały uwzględnione.

Rozdział 1

Cel, zakres i teza rozprawy

1.1 Cel rozprawy

Celem tej pracy było **zaprojektowanie rozproszonego systemu zarządzania platformą mobilną**. System ten został zaimplementowany i wdrożony w rzeczywistym obiekcie badawczym, robocie mobilnym przystosowanym do zadań zwiadu i wykrywania min. Informatyczne podejście autora dysertacji do realizacji tego zadania pozwoliło na zaprojektowanie **modułowego i skalowalnego** systemu umożliwiającego zdalne i **intuicyjne** sterowanie robotem. Celem głównym projektowanej platformy było ułatwienie obsługi robota operatorowi bez specjalistycznego przeszkolenia.

Realizacja wyżej wymienionego systemu zarządzania platformą mobilną wymagała zapoznania się z możliwościami i wymogami rozproszonych systemów czasu rzeczywistego, algorytmów komunikacji, sposobów akwizycji danych pomiarowych, analizy dostępnych układów mikroprocesorowych. Oprócz technicznych aspektów przeprowadzona została analiza funkcjonalności wysokiego poziomu, które wpływają na jakość obsługi robota. Wyszpecyfikowany został szereg rozkazów, które operator może wydawać nie wnikając szczególnie w jaki sposób rozkazy zostaną zrealizowane.

Mając to na uwadze, autor rozprawy zaprojektował rozproszony System Zarządzania Platformą Mobilną pracujący w czasie rzeczywistym. Wydzielone zostały poszczególne funkcjonalności każdego z elementów. Zaprojektowany został dedykowany układ mikroprocesorowy dla każdego elementu wykonawczego i czujnikowego znajdującego się na platformie. Dobrane zostały mikrokontrolery, tak aby zapewnić odpowiednią moc obliczeniową do realizacji wymaganych zadań, mając na uwadze również cenę jednostkową urządzenia. Dobrane zostały systemy komunikacji pomiędzy elementami systemu, tak aby zapewnić możliwie szybką wymianę specyficznych danych. Zaprojektowano protokoły komunikacji uwzględniając możliwości rozbudowy i modyfikacji systemu.

1.2 Zakres rozprawy

Niniejsza rozprawa została podzielona na cztery części:

CZEŚĆ I: STAN WIEDZY

Rozdział nr **2** zawiera krótką charakterystykę i przedstawienie systemów czasu rzeczywistego. Rozdział nr **3** przedstawia wybrane metodyki projektowania rozproszonych systemów czasu rzeczywistego. Rozdział nr **4** przedstawia szczegółowy opis wybranej w ramach realizacji niniejszej pracy metodyki AADL (Język Projektowania i Analizy Architektury, ang. The Architecture Analysis & Design Language), która posłużyła do zaprojektowania przedstawianego Systemu Zarządzania Platformą Mobilną.

CZEŚĆ II: ZREALIZOWANY SYSTEM ROBOTA MOBLNEGO

W rozdziale nr **5** opisany został **zaprojektowany przez autora rozprawy** System Zarządzania Platformą Mobilną. Przybliżone zostały jego cechy charakterystyczne oraz główne elementy. W Rozdziale nr **6** opisane zostały poszczególne moduły wchodzące w skład wymienionego systemu.

CZEŚĆ III: OPRACOWANE I ZAIMPLEMENTOWANE ALGORYTMY ZARZĄDZANIA PLATFORMĄ MOBILNĄ

W rozdziale nr **7** przedstawiony został zaprojektowany i zaimplementowany przez autora rozprawy system zarządzania podstawą jezdnią sześciokołowej platformy mobilnej. W rozdziale nr **8** przedstawiony został zaprojektowany i zaimplementowany moduł zarządzania ramieniem obserwacyjnym mocowanym na platformie mobilnej. W rozdziale nr **9** przedstawione zostały zmodyfikowane i zaimplementowane przez autora rozprawy algorytmy lokalizacji i budowania mapy nieznanego otoczenia za pomocą skanera laserowego.

CZEŚĆ IV: PODSUMOWANIE

Ta część rozprawy przedstawia podsumowanie i wnioski dotyczące rozprawy oraz dalsze kierunki rozwoju i badań związanych z tematyką rozprawy.

Teza rozprawy

Teza rozprawy sformułowana została następująco:

Możliwa jest skuteczna, wykorzystująca metodykę AADL, integracja algorytmów sterowania i zarządzania w czasie rzeczywistym napędem oraz ramieniem obserwacyjnym autonomicznej platformy mobilnej z akwizycją i przetwarzaniem informacji sensorycznej w celu realizacji jej funkcjonalności.

Metodyka AADL (ang. Architecture Analysis and Design Language) jest językiem modelowania wspierającym wstępne analizy architektury systemów czasu rzeczywistego z uwzględnieniem właściwości krytycznych dla wydajności poprzez: rozszerzoną notację, zestaw gotowych narzędzi oraz precyzyjnie zdefiniowaną semantykę.

Integracja systemu obejmowała opracowanie, zmodyfikowanie, zaimplementowanie i zweryfikowanie autorskich algorytmów, układów sterowania i zarządzania autonomiczną platformą mobilną. Funkcjonalność zweryfikowano poprzez przeprowadzenie szeregu badań i testów zarówno na poligonach wojskowych jak i straży pożarnej.

Udowodnienie powyższej tezy wymagało:

- zapoznania się z podstawami teorii sterowania oraz analizy i przetwarzania sygnałów;
- przeprowadzenia analizy wymagań funkcjonalnych stawianych platformie mobilnej służącej do zadań zwiadu i wykrywania min, na podstawie których można przeprowadzić dekompozycję systemu i wyodrębnić moduły funkcjonalne zajmujące się realizacją ściśle określonych zadań;
- opracowania własnych i modyfikacji istniejących algorytmów realizujących autonomiczne poruszanie się platformy mobilnej, w tym:
 - algorytmu sterowania napędem podstawy platformy mobilnej,
 - algorytmu kontroli trakcji w celu oszczędności energii i równomiernego obciążania napędów platformy,
 - algorytmu kinematyki odwrotnej, przystosowanego dla intuicyjnego zarządzania manipulatorem,
 - algorytmu budowania mapy otoczenia i jednoczesnej lokalizacji platformy w nieznanym otoczeniu,
 - systemu komunikacji pomiędzy modułami wewnętrznymi, który umożliwia szybką rozbudowę Systemu Zarządzania Platformą Mobilną bez ingerencji w istniejące moduły.
- implementacji w/w algorytmów w rzeczywistej platformie mobilnej;
- przeprowadzenia wielu eksperymentów weryfikujących opracowane algorytmy oraz określających kierunek rozwoju i kolejnych modyfikacji. Wymagało to pracochłonnych prób realizowanych na kompletnym urządzeniu, w skład którego wchodzi wiele modułów realizowanych wspólnie przez wieloosobowy zespół.

Rozdział 2

Rozproszone systemy czasu rzeczywistego

W niniejszym rozdziale przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z **rozproszonymi systemami czasu rzeczywistego** wymagane do dobrego zrozumienia dalszej części rozprawy. Przedstawione zostały pojęcia podstawowe, fundamentalne funkcjonalności oraz metody projektowania i realizacji systemów czasu rzeczywistego (RT, ang. real-time). Kolejne rozdziały rozprawy będą dotyczyły opisu **rzeczywistego urządzenia**, które jest zarządzane przez zaprojektowany przez autora **rozproszony system czasu rzeczywistego**.

System czasu rzeczywistego

Komputerowy system czasu rzeczywistego (ang. real-time computer system) jest to system, w którym czas reakcji na wymuszenie zewnętrzne jest ściśle określony. Jakość i poprawność działania takiego systemu jest więc warunkowana nie tylko poprawnością obliczeń logicznych, ale również czasem, w którym obliczenia te są dostarczane. Z tego powodu systemy te są wykorzystywane do sterowania i nadzorowania pracy obiektów dynamicznych.

Komputerowy system czasu rzeczywistego jest częścią większego systemu – **systemu czasu rzeczywistego** (ang. real-time system). System ten zmienia swoje parametry w funkcji czasu, dla przykładu: reakcja chemiczna wciąż trwa nawet w przypadku odłączenia systemu komputerowego, który nią zarządza. **System czasu rzeczywistego** można podzielić na klastry (ang. cluster), czyli wydzielone elementy systemu zapewniające konkretną funkcjonalność. Połączenie pomiędzy klastrami operatora a komputerowym systemem czasu rzeczywistego nazywane jest **interfejsem człowiek-maszyna**. **Interfejs sterujący**, znajdujący się pomiędzy klastrami obliczeniowym i kontrolowanego obiektu, wyposażony jest w szereg czujników i elementów wykonawczych (np. silniki, ciągniki, siłowniki) transformujących fizyczne sygnały (prąd, napięcie) do postaci cyfrowej i odwrotnie.

Rozproszony system czasu rzeczywistego

Systemy czasu rzeczywistego bardzo często implementowane są w środowisku rozproszonym. Systemy takie składają się z wielu węzłów połączonych ze sobą za

pomocą interfejsów komunikacyjnych. Przeważnie do tego celu wykorzystywane są mikrokontrolery. Stosunek ceny do wydajności obecnie produkowanych mikrokontrolerów czyni je ekonomicznie atrakcyjnymi do zastosowań w systemach wbudowanych. Układy te posiadają wbudowane fizyczne interfejsy komunikacji, rozbudowane systemy przerwań oraz systemy akwizycji i sterowania: przetwornik analogowo cyfrowe (ADC – Analog to Digital Converter, DAC – Digital to Analog Converter), komparator, sterowanie wypełnieniem impulsu (PWM – Pulse Width Modulation).

Rozdział 3

Przegląd metodyk projektowania rozproszonych systemów czasu rzeczywistego

Niniejszy rozdział przedstawia wybrane znane i stosowane **metody projektowania rozproszonych systemów czasu rzeczywistego**. Autor rozprawy **wykorzystał jedną z opisywanych metodologii** do zamodelowania zrealizowanego **Systemu Zarządzania Platformą Mobilną**. Z tego powodu, wybrana metodologia **AADL (Architecture Analysis & Design Language)**, została opisana bardziej szczegółowo. Na końcu rozdziału zawarte zostało również porównanie opisanych metodologii i wyjaśnienie wyboru właśnie tego narzędzia.

Metody **projektowania oprogramowania** rozwinęły się znacznie w ciągu ostatnich trzech dekad od ustrukturyzowanych metod wspierających systemy scentralizowane do zaawansowanych metod projektowania aplikacji rozproszonych i kompletnych linii produktów. Wczesne metody projektowania polepszyły jakość i wpłynęły na czas powstawania kolejnych systemów. Metody wspierające analizę **programowania współbieżnego, systemów czasu rzeczywistego oraz systemów rozproszonych** pojawiły się już w latach 70 XX wieku. Dzięki rozwojowi **projektowania zorientowanego obiektowo** (Object Oriented Design) powstały metody obsługujące zarówno koncepcje enkapsulacji, dziedziczenia oraz współbieżności procesów rozproszonych.

Analiza i projektowanie rozproszonych systemów czasu rzeczywistego jest skomplikowanym procesem. Spowodowane jest to szczególnym zachowaniem tych systemów. Czas reakcji, dostęp do systemów komunikacji i ich niezawodność są krytycznymi punktami, które ciężko określić i reprezentować. Projektowanie systemów czasu rzeczywistego obejmuje:

- inżynierię oprogramowania,
- inżynierię warstwy sprzętowej,

- inżynierię warstwy komunikacji,
- nadzór i kontrolę.

Nawet niewielkie zmiany w specyfikacji systemu mogą nieść za sobą poważne konsekwencje. Systemy wbudowane, w których oprogramowanie działa bezpośrednio w sprzętowych kontrolerach może wymagać kompletnego przepisania programu. Warstwa sprzętowa wymaga wykorzystania specyficznych procesorów i systemów operacyjnych.

Wszystkie opisane metodologie zostały zaprojektowane specjalnie do modelowania twardych systemów czasu rzeczywistego, takich jak elementy samolotów, satelitów czy systemów kontroli i podtrzymywania życia. Zdecydowana większość z nich ma swoją długą historię MASCOT, ROOM, HOOD i nie umożliwia modelowania wszystkich funkcjonalności nowoczesnych systemów. Ponadto występuje problem z dostępem do narzędzi CASE (ang. Computer-aided software engineering – projektowanie wspomagane komputerowo) zwłaszcza dla metodologii MASCOT, ROOM i HOOD. UML-RT natomiast nie posiada darmowych narzędzi i jest tylko jeden program obsługujący to rozszerzenie dla UML. AADL jest językiem opisu architektury, który powstał stosunkowo niedawno. Pierwsza jego wersja została przedstawiona w 1999 roku i wciąż trwają prace nad jego rozbudową i projektowaniem rozszerzeń. Ponadto dla języka AADL istnieje kilka programów zarówno na licencji darmowej jak i komercyjnej. Metodologia ta jest bardzo elastyczna ponieważ jej elementy składowe mogą reprezentować podsystemy różnego rodzaju. Dla przykładu element reprezentujący szybę wymiany danych może zostać wykorzystany do modelowania dystrybucji energii czy nawet układu hydraulicznego za pomocą odpowiednich tagów i parametrów. Narzędzia obsługujące metodologię AADL działają w oparciu o te tagi. Z tego powodu metodologia AADL wykorzystywana jest podczas projektowania systemów samolotów, gdyż każdy podsystem (komputerowy, hydrauliczny, zasilania itd.) może zostać zamodelowany i analizowany za pomocą tych samych narzędzi, przez co opis, analizy i dokumentacja systemu jest spójna.

Z tego właśnie powodu AADL został wybrany przez autora rozprawy jako narzędzie do zaprojektowania Systemu Zarządzania Platformą Mobilną opisanego w dalszych rozdziałach.

Rozdział 4

Metodyka AADL

Metodyka AADL jest obecnie bardzo intensywnie rozwijana i wykorzystywana do projektowania dużych systemów o znaczeniu krytycznym dla zdrowia i życia ludzkiego. Z sukcesem stosuje się ją do projektowania samolotów i satelitów. Z tego powodu powstała duża ilość oprogramowania pozwalająca na modelowanie układów w języku AADL oraz wykonywanie różnego rodzaju analiz i symulacji.

Komponent w języku AADL charakteryzowany jest poprzez jego tożsamość (charakterystyczna nazwa i znaczenie w czasie pracy), możliwe połączenia z innymi komponentami, wyróżniające właściwości (krytyczne cechy komponentu w swoim architektonicznym kontekście) oraz elementy podrzędne i interakcje z nimi.

Oprócz interfejsów i wewnętrznych elementów konstrukcyjnych, język AADL pozwala na definiowanie innych tworów abstrakcyjnych, które mogą być zdefiniowane dla architektury komponentów i systemów. Na przykład, abstrakcyjny przepływ informacji lub danych kontrolnych może zostać zidentyfikowany, powiązany z określonymi elementami i wewnętrznym systemem połączeń oraz poddany dalszej analizie.

Rozdział 5

System Zarządzania Platformą Mobilną

Pierwszym krokiem podjętym w celu skonstruowania robota specjalistycznego, który mógłby zostać wykorzystany przez różne jednostki, w tym wojsko, było precyzyjne zdefiniowanie wymagań funkcjonalnych. Następnie w oparciu o założone kryteria powstał projekt wstępny oparty o metodologię AADL, wynikiem którego była szczegółowa specyfikacja:

- podziału na moduły funkcjonalne,
- wykorzystania jednostek obliczeniowych,
- doboru źródeł i typów zasilania,
- doboru rodzaju sensorów i elementów wykonawczych.

Zaprojektowany i zrealizowany robot mieści się w kategorii wagowej $75kg$ (Łaski *et al.* 2012) (Łaski *et al.* 2014). Służy on do celów zwiadu i wykrywania min. Poniżej przedstawione zostały wymagania stawiane platformie mobilnej, które były podstawą dla podejmowanych decyzji:

- zasięg $4km$ – maksymalna odległość na jaką robot może oddalić się od konsoli operatora (w linii prostej) i wciąż wrócić do pozycji wyjściowej,
- prędkość maksymalna $1,5 \frac{m}{s}$ – prędkość truchtu żołnierza z pełnym wyposażeniem,
- pokonywanie przeszkód terenowych o wysokości $0,4m$ – umożliwia poruszanie się w trudnym terenie,

- czas pracy $3h$ – czas pracy robota przy poruszaniu się z maksymalną prędkością,
- czas hibernacji $120h$ – czas, w którym większość systemów robota jest nieaktywna, ale istnieje możliwość skomunikowania się drogą radiową i „wybudzenia” robota w celu przywrócenia mu pełnej funkcjonalności.

Ponadto, wyspecyfikowane zostały wymagania funkcjonalne platformy mobilnej:

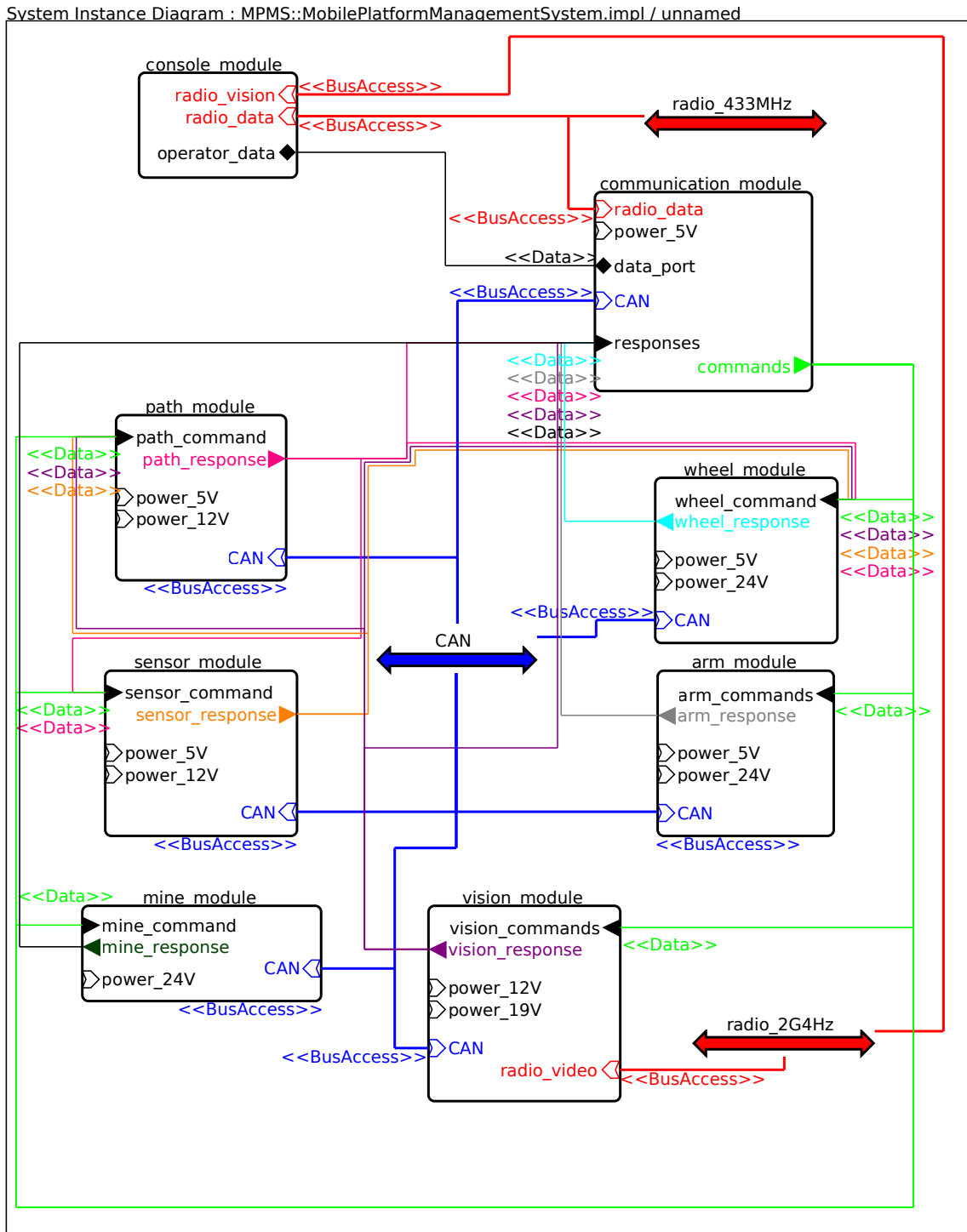
- możliwość obserwacji obiektów w otoczeniu platformy przy różnych warunkach oświetleniowych (Wulkiewicz *et al.* 2014) (Jachowicz *et al.* 2012),
- transmisja obrazu zintegrowanego z wielu kamer za pomocą modemów radiowych na odległość $4km$,
- możliwość bezprzewodowego sterowania platformą na odległość $4km$,
- możliwość wykrywania ładunków niebezpiecznych zawierających metal: miny przeciw piechotne i przeciwpancerne,

Kolejnym aspektem projektu było wyposażenie platformy w możliwości jazdy autonomicznej. Przez autonomię uznaje się w tym przypadku wszelkie zadania, które robot może wykonywać bez nadzoru operatora. W tym przypadku skupiono się na wyodrębnieniu takiego zestawu poleceń, które byłyby wystarczające do realizacji podstawowych zadań platformy. Bardziej skomplikowane zadania muszą być traktowane w sposób wyjątkowy, ponieważ nie da się na etapie projektowym przewidzieć wszystkich wymagań użytkownika końcowego.

Ze względu na złożoność i wiele funkcjonalności zrealizowanej platformy zaprojektowany i zrealizowany został rozproszony system czasu rzeczywistego (Łaski *et al.* 2012) (Łaski *et al.* 2014) obsługujący wszystkie urządzenia znajdujące się na platformie mobilnej.

System składa się z modułów, które są odpowiedzialne za wykonywanie ściśle określonych zadań. Wszystkie moduły komunikują się pomiędzy sobą za pomocą systemu komunikacji międzymodułowej. Na Rys. 5.1 przedstawiony został diagram zamodelowany w oparciu o metodologię AADL, na którym wyszczególniono wszystkie moduły wchodzące w skład całego systemu oraz logiczne połączenia pomiędzy elementami. Moduł został zobrazowany jako blok „system” metodologii AADL. Każdy z tych bloków ma zamodelowane porty połączeń wraz z ich kierunkiem dystrybucji wiadomości, połączenie z główną szyną wymiany danych oraz zapotrzebowanie na zasilanie. Ze względu na czytelność diagramu, połączenia szyn zasilania zostały pominięte w ramach tego rysunku.

System modelowany za pomocą AADL ma strukturę hierarchiczną. Przedstawiony diagram ilustruje najwyższy poziom abstrakcji systemu (Rys. 5.1). Wszystkie elementy, posiadają swoje rozwinięcie i również zostały zamodelowane przy wykorzystaniu języka AADL.



Rysunek 5.1: System Zarządzania Platformą Mobilną zamodelowany w języku AADL.

Rozdział 6

Dekompozycja Systemu Zarządzania Platformą Mobilną

W tym rozdziale przedstawiony został opis wszystkich modułów wchodzących w skład Systemu Zarządzania Platformą Mobilną. Na Rys. 5.1 z Rozdz. 5 przedstawiony został ogólny diagram AADL, na którym wymienione są wszystkie moduły wraz z zaznaczonym sposobem i kierunkiem wymiany informacji. Poniższy opis uszczegóławia informacje na ich temat przykładając uwagę głównie do **informatycznego** aspektu ich realizacji (Jeżewski i Łaski 2009).

1. Moduł napędowy – Moduł napędowy odpowiedzialny jest za zarządzanie sześcioma silnikami znajdującymi się w podstawie platformy mobilnej i realizację zadań związanych z poruszaniem się platformy mobilnej w terenie (Łaski *et al.* 2014).
2. Moduł ramienia – Na skonstruowanej platformie mobilnej zamocowany jest przedstawiony na moduł ramienia obserwacyjnego wraz z głowicą obserwacyjną wyposażoną w nowoczesne systemy wizyjne. Ramię to jest manipulatorem o czterech stopniach swobody pozwalających na obserwację różnych obiektów znajdujących się w otoczeniu robota (Duch *et al.* 2013a) (Ostalczyk *et al.* 2013).
3. Moduł pozycji i orientacji – Moduł pozycji i orientacji służy do estymacji aktualnego położenia robota w otoczeniu (Wulkiewicz *et al.* 2012).
4. Moduł wyznaczania bezkolizyjnej ścieżki ruchu – Moduł umożliwia wykrywanie obiektów w nieznanym otoczeniu oraz wyznaczania i podążania po bezkolizyjnej ścieżce ruchu platformy.
5. Moduł przetwarzania obrazu – Skonstruowany robot wyposażony jest w głowicę obserwacyjną wyposażoną w zaawansowany system wizyjny, pozwalający dokonywać obserwacji otoczenia w różnych warunkach oświetleniowych (Duch *et al.* 2014) (Błaszczuk *et al.* 2014) (Wulkiewicz *et al.* 2014) (Jachowicz *et al.* 2012) (Duch *et al.* 2013b) (Jachowicz *et al.* 2014).
6. Moduł komunikacyjny – System komunikacji pomiędzy modułami, odpowiedzialny jest za zapewnienie stabilnej, niezawodnej i szybkiej wymiany danych z konsolą operatora i pomiędzy modułami.

7. Moduł konsoli operatora – Zapewnia bezprzewodową komunikację z robotem na dystansie 4 *km* umożliwiając zdalne zarządzania i odbieranie informacji o stanie platformy (Błaszczyk *et al.* 2012).
8. Moduł wykrywacza ładunków niebezpiecznych – Wykrywa on elementy metalowe znajdujące się w ziemi w oparciu o analizę szybkości zanikania pola magnetycznego generowanego przez cewki.
9. Moduł zasilania – Moduł dostarczający i nadzorujący odpowiednie napięcia dla wszystkich elementów elektronicznych platformy mobilnej.

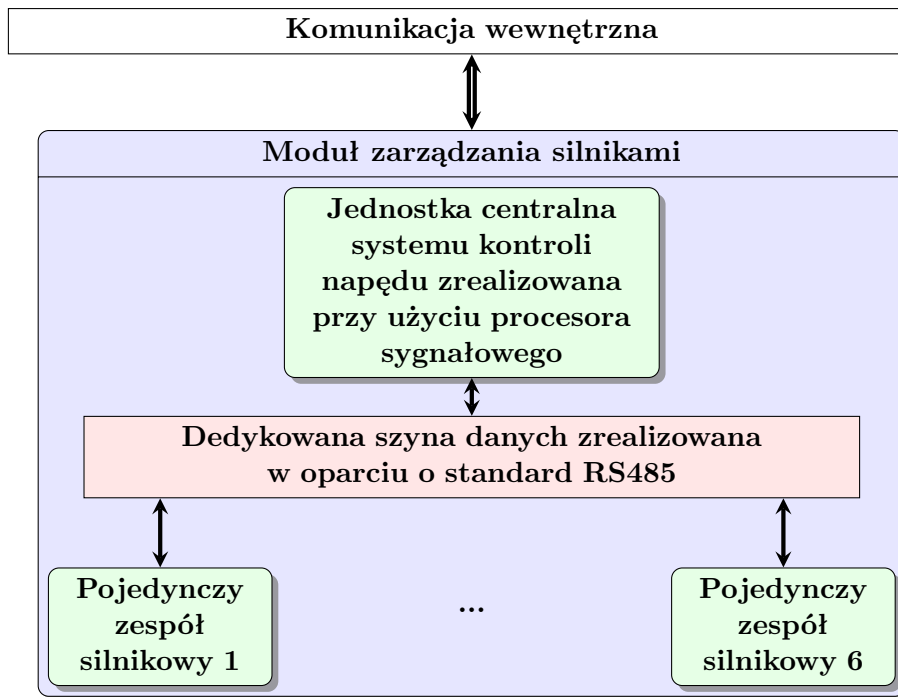
Rozdział 7

Rozproszony system sterowania silnikami napędowymi platformy mobilnej

W niniejszym rozdziale przedstawiony został **system zarządzania napędem sześciokołowej platformy mobilnej** (Wulkiewicz *et al.* 2012) (Łaski *et al.* 2012). Opisane zostały sposoby sterowania i zabezpieczania elementów wykonawczych, a także metody implementacji pozwalające na odseparowanie fizycznych cech poszczególnych elementów zespołu napędowego od pozostałych elementów systemu zarządzania platformą mobilną. System ten został w całości **zaprojektowany i zaimplementowany przez autora rozprawy**. Przedstawione i opisane zostały również diagramy AADL dla poszczególnych komponentów systemu.

Scentralizowany moduł zarządzania silnikami

Skonstruowany robot został wyposażony w sześć zespołów napędowych, w których skład wchodzi: silnik prądu stałego, enkoder kwadraturowy, mostek H oraz system mikroprocesorowy. Schemat modułu napędowego został przedstawiony na rysunku 7.1. Zespoły te umieszczone są po trzy na obu bokach platformy mobilnej i podłączone bezpośrednio do koła, które napędzają. Wszystkimi zespołami napędowymi zarządza jednostka centralna, która nadzoruje, przesyła rozkazy oraz zapewnia niezawodną komunikację z pozostałą częścią systemu. Jednostka centralna jest ostatnim elementem modułu napędowego w zaprojektowanym Systemie Zarządzania Platformą Mobilną (opisanym w rozdziale 5), który posiada informację na temat parametrów fizycznych platformy. Zaliczyć do nich można: średnicę kół, ich wzajemne położenie, maksymalną prędkość i zdolności do hamowania.



Rysunek 7.1: Elementy modułu napędowego zarządzającego silnikami elektrycznymi.

Zaimplementowany System Zarządzania Platformą Mobilną został zaprojektowany z myślą o jego **otwartej architekturze i elastyczności**. Z tego powodu przeprowadzono testy na rzeczywistej platformie, w wyniku których wyspecyfikowany został zestaw rozkazów, które platforma musi realizować. Komendy te są wystarczające, aby platforma mogła wykonywać rozkazy innych modułów, na przykład modułu wyznaczającego bezkolizyjną ścieżkę ruchu.

Dedykowany zespół napędowy do zarządzania pojedynczym silnikiem

Z całego modułu zarządzania silnikami platformy mobilnej można wydzielić pojedynczy dedykowany zespół napędowy służący do sterowania silnikiem prądu stałego. Jak wspomniano wyżej, takich modułów jest sześć w zrealizowanej platformie. Są one połączone szyną komunikacyjną zrealizowaną za pomocą interfejsu RS485. Dzięki temu każdy z zespołów napędowych może komunikować się z pozostałymi zespołami i informować je o swoim stanie. Z tej samej szyny komunikacyjnej korzysta również jednostka centralna w celu wydawania rozkazów i wykonywania diagnostyki wszystkich podległych jej zespołów napędowych.

Kontrola trakcji

Sześciokołowa platforma mobilna z każdym silnikiem obsługiwanym niezależnie wymaga dość specyficznego podejścia do realizacji sterowania. Pierwszym napotkanym problemem, który został zdefiniowany w trakcie badań przeprowadzonych na zrealizowanej platformie, było wzajemne oddziaływanie kół na siebie, które spowo-

dowane jest drobnymi różnicami w promieniu (R) kół napędowych co powoduje uzyskanie różnej prędkości liniowej przy identycznej, wyregulowanej prędkości kątowej (ω). Różnica ta jest wynikiem różnic w ciśnieniu opon, ustawienia środka ciężkości platformy położonego niecentralnie, niedokładnym ustawieniu układu zawieszenia oraz różnic w podłożu, po którym platforma się porusza. Eliminacja i kalibracja wszystkich wyżej wymienionych układów tak, aby wzajemne oddziaływanie kół nie występowało nie jest możliwa, zwłaszcza, że występują czynniki zewnętrzne. Nie istnieje również możliwość dokonywania dokładnego pomiaru prędkości liniowej (v) kół napędowych.

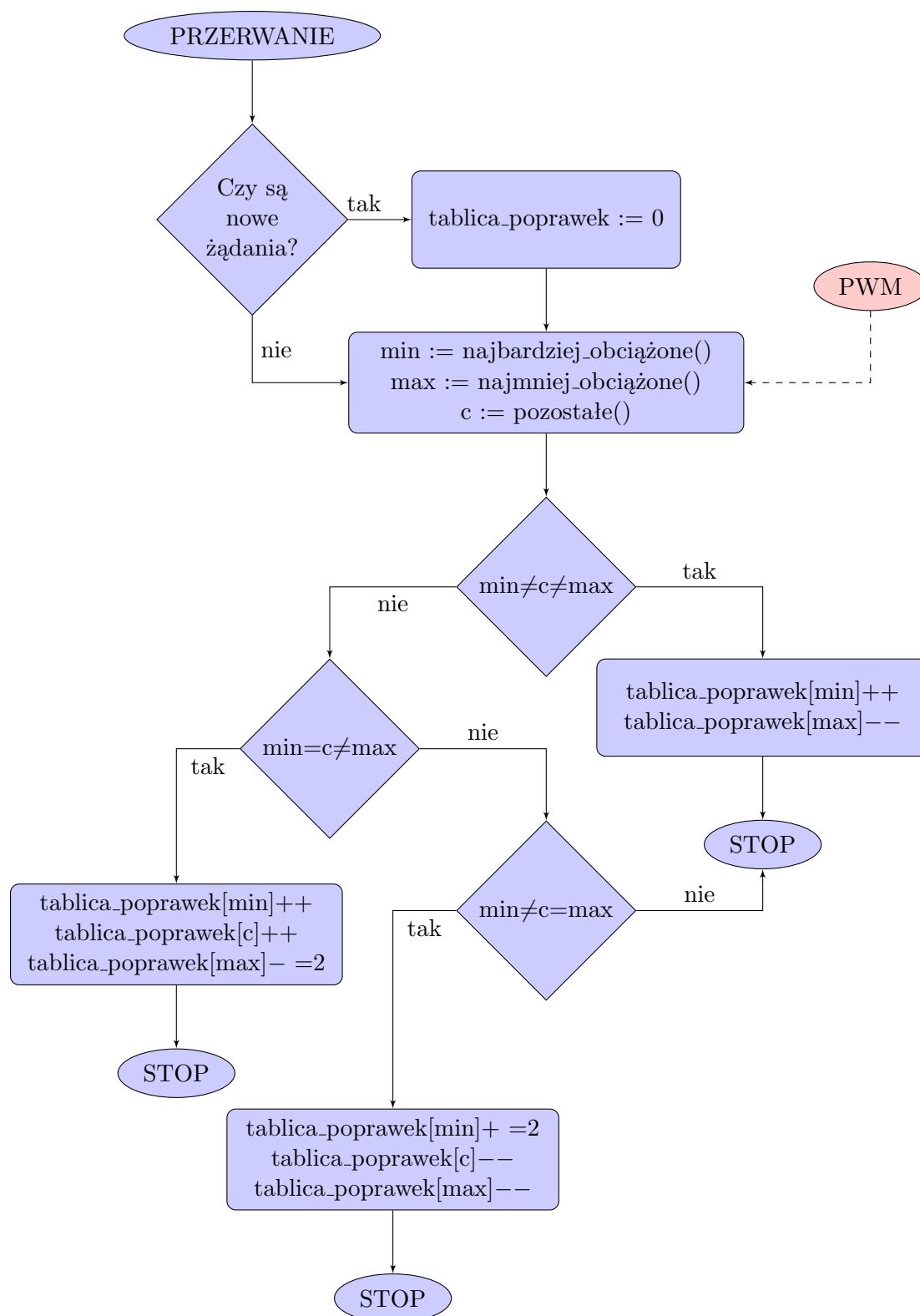
W celu wyeliminowania wyżej wymienionego problemu **autor rozprawy zaprojektował i zaimplementował algorytm kontroli trakcji**, który dodatkowo koryguje zadawaną prędkość kątową tak, aby obciążenie silników było równomierne. Algorytm kontroli trakcji oblicza poprawki do prędkości, które są dodawane do prędkości zadawanych kołom z jednej strony platformy. W pamięci są trzy tablice przechowujące współczynnik poprawki dla każdego z kół. Współczynnik ten jest mnożnikiem dla jednostki prędkości, która będzie dodana do zadawanej prędkości każdego z kół. Im większa zostanie przyjęta ta jednostka tym bardziej dynamicznie algorytm będzie wyrównywał obciążenie kół. Algorytm obliczania wartości tej tablicy został przedstawiony na Rys. 7.2.

Zastosowanie modułowego rozproszonego systemu sterowania umożliwiło szybkie wprowadzenie zmian w układzie napędowym bez konieczności przebudowywania architektury całego układu. Jednostka centralna sprawująca nadzór nad poszczególnymi zespołami napędowymi posiada wszystkie informacje niezbędne do realizacji dodatkowych funkcjonalności. W przypadku pojawienia się dodatkowych modułów, które wystarczy tylko wpiąć w dedykowaną szynę danych, nie pojawia się problem z ich obsługą. Wszystkie elementy systemu są elastyczne i modyfikowalne, a ich zadanie sprowadza się do realizacji ściśle wyspecyfikowanych funkcjonalności. Z tego właśnie powodu w bardzo prosty i szybki sposób można wprowadzać modyfikacje i aktualizacje do istniejącego systemu zarządzania platformą mobilną.

Rozdział 8

Algorytmy ramienia obserwacyjnego robota

W niniejszym rozdziale przedstawiony został **zrealizowany i zweryfikowany przez autora rozprawy system sterowania i zarządzania ramieniem obserwacyjnym platformy mobilnej** (Łaski *et al.* 2012) (Duch *et al.* 2013a) (Duch *et al.* 2013b) (Ostalczyk *et al.* 2013). System ten został opracowany do celów realizacji rzeczywistego urządzenia, które wyposażona jest zrealizowana platforma mobilna. W



Rysunek 7.2: Algorytm wypełniania tablicy poprawek wykorzystywanej przez kontrolę trakcji

celu realizacji opisywanego systemu wykorzystana została architektura rozproszona opierająca się o założenia opracowane dla systemu sterowania silnikami napędowymi platformy mobilnej (rozdział 5).

Ramię obserwacyjne

W ramach projektu “Robot mobilny pola walki do zadań zwiadu i wykrywania min” skonstruowane zostało ramię przeznaczone do wykonywania zadań obserwacyjnych. Elementy mechaniczne zrealizowane zostały przez Łódzkie firmy PREXER sp. z o.o. i Sohor sp. z o.o. sp komandytowa. Warstwa elektroniki i oprogramowania w całości została **zaprojektowana i zrealizowana przez autora rozprawy**.

Zaprojektowany i zrealizowany został manipulator o czterech stopniach swobody umożliwia obserwację otoczenia platformy mobilnej w zakresie 270° w płaszczyźnie horyzontalnej i 180° w płaszczyźnie pionowej. Efektem manipulatora jest specjalistyczna głowica obserwacyjna wyposażona w zestaw urządzeń obserwacyjnych takich jak: kamera światła widzialnego, kamera termowizyjna, kamera o podwyższonej czułości, dalmierz i oświetlacz.

Kinematyka odwrotna ramienia obserwacyjnego

W dotychczas stosowanych robotach mobilnych obsługiwanie ramienia przez operatora sprawia dużo trudności. Konsola operatora przeciętnego robota wykorzystwanego w wojskach NATO skonstruowana jest tak, że każdym przegubem manipulatora steruje się za pomocą dwóch przycisków. Operator nie ma możliwości kontroli prędkości poruszania się każdego z przegubów. Występuje także wpływ przegubów znajdujących się na początku łańcucha kinematycznego na te, które znajdują się dalej, przez co sterowanie jest bardzo utrudnione. Natomiast człowiek, który zamierza chwycić jakiś przedmiot porusza jednocześnie wszystkimi stawami (przegubami) swojego ramienia. Problem ten, związany z obliczaniem konfiguracji przegubów w oparciu o zadaną pozycję efektora manipulatora, nazwany jest kinematyką odwrotną. Narzędzie to idealnie wpasowuje się w problematykę intuicyjnego dla operatora sterowania manipulatorem platformy mobilnej. Przez intuicyjne sterowania rozumie się w tym przypadku ruch podobny ruchu ramienia ludzkiego. Dzięki zastosowaniu takiej techniki, każdy przeciętny człowiek może sterować ramieniem bez specjalnego przeszkolenia i długotrwałych treningów (Duch *et al.* 2013a) (Ostalczyk *et al.* 2013).

W celu umożliwienia wygodnego sterowania ramieniem obserwacyjnym zaprojektowane zostały cztery tryby obsługi wykorzystujące zagadnienia kinematyki odwrotnej. Do trybów obsługi należą:

1. Sterowanie końcówką (głowicą) w układzie kartezjańskim za pomocą joysticka
2. Sterowanie końcówką (głowicą) w układzie kartezjańskim za pomocą panelu dotykowego
3. Ustawianie konfiguracji ramienia w zapamiętanych wcześniej położeniach
4. Sterowanie końcówką (głowicą) poprzez odtwarzanie wcześniej zdefiniowanych trajektorii.

Rozdział 9

Modyfikacja i implementacja algorytmu ICP (Iterative Closest Point)

Problem lokalizacji robota mobilnego

Lokalizacja robota mobilnego jest to proces polegający wyznaczeniu jego dokładnej pozycji w sześciu stopniach swobody (Sankowski *et al.* 2010) (Jeżewski *et al.* 2010) (Wulkiewicz *et al.* 2012). Pod uwagę jest więc brana translacja $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ i rotacja $(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma)$ platformy mobilnej względem punktu, z którego rozpoczął się ruch lub dowolnego punktu w pewnym, zdefiniowanym wcześniej, globalnym układzie odniesienia. Uproszczonym przypadkiem może być lokalizacja trójwymiarowa, gdzie założeniem jest iż robot porusza się wyłącznie po płaskim terenie. Poszukiwana jest wtedy translacja $((\Delta x, \Delta y)$ w dwóch kierunkach i rotacja $(\Delta\alpha)$. Jest to uzależnione od sposobu percepcji danych, z których położenie jest wyznaczane oraz celu w jakim lokalizacja ma zostać użyta. Znajomość dokładnego położenia robota jest fundamentem dla algorytmów nawigacyjnych, takich jak: omijanie przeszkód czy obliczenie i optymalizowanie ścieżki ruchu.

Problem lokalizacji robota można rozwiązać na wiele sposobów. Rozważa się podejście inkrementalne, oparte o odometrię, polegające na sukcesywnym aktualizowaniu pozycji robota obliczane na podstawie informacji o ilości obrotów jakie wykonały koła platformy. Rozwiązanie to daje najlepsze rezultaty dla platform o układzie dyferencyjnym, gdzie nie występuje zerwanie przyczepności kół podczas wykonywania manewrów skręcania. Niestety w przypadku gąsiennicowego układu bieżnego czy platform wielokołowych metoda wprowadza duży błąd, ponieważ występuje poślizg, który jest niemierzalny w rzeczywistych warunkach pracy robota

mobilnego.

CZEŚĆ IV: PODSUMOWANIE

Niniejsza rozprawa doktorska stanowiła część większego projektu, którego celem było zrealizowanie autonomicznej platformy mobilnej służącej do wykonywania zwiadu i wykrywania min. Autor rozprawy był członkiem zespołu programistów, którzy podjęli się realizacji tego zadania. W wyniku prac realizowanych w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej powstał robot wyposażony między innymi w **komputerowy System Zarządzania Platformą Mobilną**. System ten został **zaprojektowany przez autora rozprawy**, wykorzystując do tego celu metodykę AADL Projektowania Rozproszonych Systemów Czasu Rzeczywistego.

Osiągnięcie określonych na wstępie celów pracy, wymagało przeprowadzenia analizy wymagań stawianych platformie mobilnej służącej do zadań zwiadu i wykrywania min. Na podstawie wyników tych analiz wykorzystując narzędzia dostępne w metodyce projektowania systemów czasu rzeczywistego AADL przeprowadzono dekompozycję systemu (rozdział 6) na moduły funkcjonalne zajmujące się realizacją ściśle określonych zadań. W ramach zrealizowanego systemu **autor rozprawy zaimplementował moduły funkcjonalne wyposażone w autorskie algorytmy:**

1. zarządzania zasilaniem (Rozdział 6) – układy zapewniające wydajne i stabilne zasilanie dla wszystkich elementów platformy mobilnej (Sankowski, Łaski *i inni*, 2012);
2. sterowanie ruchem sześciokołowej platformy mobilnej (Rozdział 7) – zrealizowane zostały algorytmy niezależnej regulacji prędkości kół, wymiany danych z jednostką centralną, zabezpieczenia elementów wykonawczych, oraz **autorskie algorytmy kontroli trakcji** pozwalające zmniejszyć zużycie energii oraz prawie dwukrotnie zwiększyć zasięg mobilności platformy (Łaski *i inni* 2014; Ostalczyk, Łaski *i inni*, 2013);
3. sterowania ramieniem obserwacyjnym (Rozdział 8) – moduł ten przeznaczony był w szczególności do wykonywania zadań zwiadu. Podczas realizacji modułu zaimplementowane zostały algorytmy regulacji prędkości kątowej w przegubach manipulatora, algorytmy kinematyki prostej i kinematyki odwrotnej oraz **autorskie algorytmy umożliwiające realizację intuicyjnego sterowania** (Duch, Łaski *i inni*, 2013; Duch, Łaski *i inni*, 2013b);
4. lokalizacji i budowy mapy otoczenia (Rozdział 9) – moduł realizujący zadania jednoczesnej budowy mapy nieznanego otoczenia i lokalizacji w oparciu o dane pochodzące ze skanera laserowego. Moduł wykorzystuje znany algorytm ICP **zmodyfikowany przez autora tak, aby działał na procesorach sygnałowych o niskiej częstotliwości taktowania i ograniczonym poborze energii** (Jeżewski, Łaski *i inni*, 2010; Sankowski, Łaski *i inni*, 2010);

Zrealizowanie tak skomplikowanego urządzenia wymagało licznych prób i testów kompletnego systemu realizowanych przez wieloosobowy zespół. System Zarządzania Platformą Mobilną został wdrożony w praktyce, w rzeczywistym robocie przeznaczonym do zadań zwiadu i wykrywania min (Rozdział 6). Funkcjonalność i działanie zostały zweryfikowane podczas testów na poligonach wojskowym i straży pożarnej. Szczegółowe raporty z przeprowadzonych badań poligonowych i weryfikacji zgodności sprzętu wojskowego z normą wojskową znajdują się w archiwach Instytutu Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej (Sankowski, Łaski *i inni*, 2012). Ze względu na poufny charakter całego projektu nie zostały zamieszczone w pracy.

Wymienione wcześniej moduły dostarczają funkcjonalności wysokiego poziomu, czyli takich, które umożliwiają człowiekowi intuicyjne zarządzanie platformą mobilną. Do funkcjonalności tych należą: jazda w zadanym kierunku i do wyznaczonego celu z omijaniem przeszkód, sterowanie ramieniem w układzie kartezyjskim za pomocą jednego dżojstika lub poprzez zadawanie położenia głowicy na ekranie konsoli. Uruchamianie i realizacja funkcji jest prosta i intuicyjna, dzięki czemu robot może być obsługiwany przez człowieka bez specjalnego przeszkolenia. Systemy robota testowane były przez specjalistów ze straży pożarnej na poligonie znajdującym się w Pionkach pod Warszawą. Strażacy byli w stanie operować robotem mimo iż był to ich pierwszy kontakt z tym urządzeniem. **Potwierdza to tezę przedstawioną na początku rozprawy.**

Wyniki prac związanych z tematyką rozprawy zawarte zostały w 15 publikacjach naukowych w tym: jedna z listy Filadelfijskiej (Ostalczyk, Łaski *i inni*, 2013), pięciu rozdziałach w monografii wydanej przez wydawnictwo World Scientific (Stany Zjednoczone) (Błaszczuk, Łaski *i inni*, 2014; Duch, Łaski *i inni*, 2014; Jachowicz, Łaski *i inni*, 2014; Łaski *i inni* 2014; Wulkiewicz, Łaski *i inni*, 2014) i jednym rozdziale w monografii wydanej przez wydawnictwo Springer (Duch, Łaski *i inni*, 2013).

Dalsze kierunki rozwoju

Zrealizowany System Zarządzania Platformą Mobilną znalazł swoje zastosowanie w rzeczywistym zrealizowanym robocie. Dzięki jego zastosowaniu możliwe jest zarówno zdalne sterowanie pracą platformy, jak i wykonywanie zadań jazdy autonomicznej. Kolejnymi etapami rozwoju Systemu Zarządzania Platformą Mobilną będzie jego **adaptacja do innych platform** oraz udoskonalanie go poprzez projektowanie nowych **algorytmów wykonujących zadania autonomiczne** takie jak patrolowanie terenu, dowóz ładunków w wyznaczone miejsca i inne, na które będzie zapotrzebowanie przez odbiorców i użytkowników sprzętu. Istotnym aspektem będzie również wykonanie badań i rozwój algorytmów w kierunku **współpracy wielu platform**.

Publikacje autora pracy

Błaszczczyk S., Wulkiewicz A., Duch P., Łaski M., Jachowicz R. i Sankowski D. „The concept of subsystem for mobile robot management from the operator console”. *Image Processing & Communications ISSN 1425-140X*, 17(4):39–44, 2012.

(Cytowanie na stronie **13**.)

Błaszczczyk S., Duch P., Jachowicz R., Wulkiewicz A., Łaski M., Sankowski D. i Ostalczyk P. „Application of fractional-order derivative for edge detection in mobile robot system”. Sankowski D., redaktor, *Computer Vision in Robotics and Industrial Applications*, wolumen 3, strony 159–173. World Scientific, 2014.

(Cytowania na stronach **2**, **12** i **20**.)

Duch P., Łaski M., Błaszczczyk S. i Ostalczyk P. „Variable-, fractional-order dead-beat control of a robot arm”. Mitkowski W., Kacprzyk J. i Baranowski J., redaktorzy, *Advances in the Theory and Applications of Non-integer Order Systems*. Springer International Publishing, 2013a.

(Cytowania na stronach **2**, **12**, **15**, **17**, **19** i **20**.)

Duch P., Błaszczczyk S., Łaski M., Krzeszewski R. i Ostalczyk P. „Likewise - radar fractional-order edge detector”. *Proceedings of the 6th Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications.*, strony 647–652, Grenoble, France, February 2013b.

(Cytowania na stronach **12**, **15** i **19**.)

Duch P., Jachowicz R., Błaszczczyk S., Wulkiewicz A., Łaski M., Sankowski D. i Ostalczyk P. „Partial fractional-order difference in the edge detection”. Sankowski D., redaktor, *Computer Vision in Robotics and Industrial Applications*, wolumen 3, strony 139–159. World Scientific, 2014.

(Cytowania na stronach **2**, **12** i **20**.)

Jachowicz R., Duch P., Łaski M., Błaszczczyk S., Wulkiewicz A. i Sankowski D. „Enhancement of temperature feature as a result of double source image fusion”. *Image Processing & Communications ISSN 1425-140X*, 17(4):79–84, 2012.

(Cytowania na stronach **10** i **12**.)

Jachowicz R., Błaszczczyk S., Duch P., Łaski M., Wulkiewicz A., Sankowski D. i Ostalczyk P. „Pattern recognition algorithms for the navigation of mobile platform”. Sankowski D., redaktor, *Computer Vision in Robotics and Industrial Applications*, wolumen 3, strony 117–139. World Scientific, 2014.

(Cytowania na stronach **2**, **12** i **20**.)

Jeżewski S. i Łaski M. „Przegląd i porównanie środowisk symulacji robotów mobilnych”. *Zeszyty naukowe AGH ISSN: 1429-3447*, 2009.

(Cytowanie na stronie **12**.)

Jeżewski S., Łaski M. i Nowotniak R. „Comparison of algorithms for simultaneous localization and mapping problem for mobile robots”. *Zeszyty naukowe AGH ISSN: 1429-3447*, 2010.

(Cytowania na stronach **18** i **19**.)

Łaski M., Błaszczak S., Duch P., Jachowicz R., Wulkiewicz A. i Sankowski D. „Distributed mobile platform management system”. *Image Processing & Communications ISSN 1425-140X*, 17(4):137–142, 2012.

(Cytowania na stronach **9**, **10**, **13** i **15**.)

Łaski M., Błaszczak S., Duch P., Jachowicz R., Wulkiewicz A., Sankowski D. i Ostalczyk P. „Management software for distributed mobile robot system”. Sankowski D., redaktor, *Computer Vision in Robotics and Industrial Applications*, wolumen 3, strony 73–93. World Scientific, 2014.

(Cytowania na stronach **2**, **9**, **10**, **12**, **19** i **20**.)

Ostalczyk P., Brzeziński D. W., Duch P., Łaski M. i Sankowski D. „The variable, fractional-order discrete-time pd controller in the iisv1.3 robot arm control”. *Central European Journal of Physics*, 11(6):750–759, June 2013.

(Cytowania na stronach **2**, **12**, **15**, **17**, **19** i **20**.)

Sankowski D., Jeżewski S. i Łaski M. „Lokalizacja robota mobilnego w czasie rzeczywistym w oparciu o dane ze skanera laserowego”. *Zeszyty naukowe AGH ISSN: 1429-3447*, 2010.

(Cytowania na stronach **18** i **19**.)

Sankowski D., Ostalczyk P., Bąkała M., Błaszczak S., Duch P., Jachowicz R., Krzeszewski R., Łaski M. i Wulkiewicz A. „Raport techniczny i dokumentacja realizacji grantu rozwojowego”. Raport techniczny 0010/1/R/T00/2008/05, Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, 2012.

(Cytowania na stronach **19** i **20**.)

Wulkiewicz A., Łaski M., Błaszczak S., Duch P., Jachowicz R. i Sankowski D. „The concept of the modularized subsystem performing mobile platform navigation tasks”. *Image Processing & Communications ISSN 1425-140X*, 17(4):143–150, 2012.

(Cytowania na stronach **12**, **13** i **18**.)

Wulkiewicz A., Jachowicz R., Błaszczak S., Duch P., Łaski M., Sankowski D. i Ostalczyk P. „Advanced vision systems in detection and analysis of characteristic features of objects”. Sankowski D., redaktor, *Computer Vision in Robotics and Industrial Applications*, wolumen 3, strony 93–117. World Scientific, 2014.

(Cytowania na stronach **2**, **10**, **12** i **20**.)