



INSTYTUT INFORMATYKI STOSOWANEJ
POLITECHNIKA ŁÓDZKA

ROZPRAWA DOKTORSKA

Metodyka projektowania systemu
interakcji człowiek-robot dedykowanego
dla zdalnej nawigacji bezzałogową
platformą jezdną

STRESZCZENIE

Autor:

mgr inż.

Sylwester BŁASZCZYK

Promotor:

prof. dr hab. inż.

Dominik SANKOWSKI

Promotor pomocniczy:

dr inż.

Krzysztof STRZECHA

8 marca 2015

Spis treści

1	Cel i teza rozprawy	5
1.1	Cel pracy	5
1.2	Teza rozprawy	6
2	Komunikacja człowiek-maszyna	8
3	Robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min	9
4	Konsola Operatora robota mobilnego	11
4.1	Metodyka projektowania systemu interaktywnego konsoli operatora .	11
4.2	Tryby pracy Systemu Konsoli Operatora	13
5	Algorytmy systemu sterowania platformy jezdnej	14
5.1	Algorytm integracji danych obrazowych przy użyciu procesora sygnałowego	15
5.2	Algorytm detekcji ruchu w oparciu o czujniki bliskiego zasięgu	15
6	Wnioski końcowe	16

Wstęp

W ciągu ostatnich lat obszar zastosowań dla mobilnych pojazdów robotycznych znacząco się rozrósł. Stały się one wysoko rozwiniętymi narzędziami, zdolnymi do pracy w środowisku charakteryzującym się wysoką dynamiką oraz nieusystematyzowaną architekturą, a nawet mogącymi poruszać się również w częściowo nieznanym otoczeniu. Również zmieniły się metody w jaki człowiek komunikuje się z robotem. Obecnie, operator robota steruje jego pracą często z odseparowanych, bardzo odległych od siebie miejsc.

Motywacja

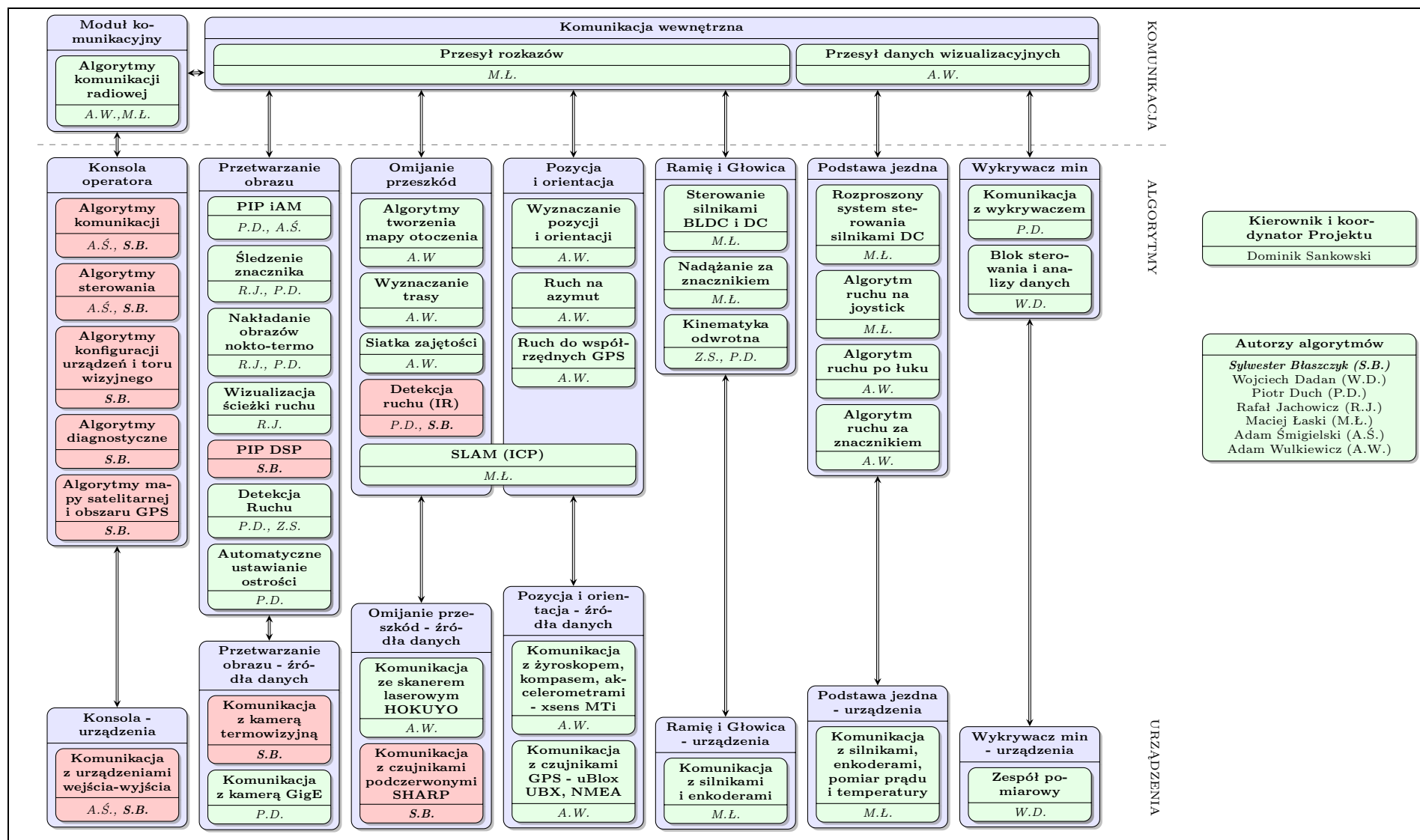
Pożądanym kierunkiem rozwoju robotów mobilnych jest dążenie do opracowania pojazdów będących w stanie przemierzać wrogi, nieprzyjazny oraz niedostępny dla ludzi teren. **Szczególnie w obszarze robotyki wojskowej dąży się do opracowania rozwiązań, które będą w stanie wyręczać jego operatora w realizacji szczególnie niebezpiecznych zadań w sposób zdalny** jak np. detekcja i oznaczanie min, podkładanie ładunków neutralizujących niewybuchy. W zadaniach zwiadu wojskowego wrogiego terenu ryzyko zagrożenia życia żołnierza może zostać zredukowane poprzez wysłanie robota jako pierwszego zwiadowcy. Aby było to możliwe, wciąż są rozwijane i udoskonalane różnorodne gałęzie technologiczne. Na przykład, dla zadań zwiadowczych istotny jest rozwój technik prezentacji otoczenia robota po stronie jego operatora. Równie istotna jest wizualizacja danych odnośnie podzespołów robota, które umożliwiają człowiekowi oddziaływanie na otoczenie robota (np. prezentacja aktualnego ułożenia manipulatora).

Prace związane z rozwojem systemów sterowania robotami mobilnymi przeznaczonymi do celów militarnych są prowadzone całym światem. **Pomimo tak szeroko zakrojonych badań w tym obszarze, opracowywane rozwiązania wciąż w pełni nie rozwiązują podstawowego problemu robotyki wojskowej, którym jest nadmierne skupienie uwagi operatora na robocie w trakcie realizowanych zadań** (Jeżewski i inni, 2009).

Niniejsza praca stanowi część większego projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „*Autonomiczny robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min*” (umowa nr. O R00 0010 05 0010/1/R/T00/2008/05). Projekt ten był zrealizowany przez zespół osób 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 Błaszczyk**, 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 mające znaczący wkład w jego realizację: dr inż. Sławomir Jeżewski, mgr inż. Adam Śmigielski. Opracowany w ramach tego projektu system robota mobilnego został przedstawiony na rys. 1. **Liczba linii kodu całego przedsięwzięcia wyniosła około 200 tysięcy z czego autor niniejszej pracy opracował około 40 tysięcy.**

Autor rozprawy opublikował wyniki przeprowadzonych badań w 15 artykułach naukowych w tym: pięć rozdziałów w monografii wydanej przez renomowane wydawnictwo World Scientific i jeden rozdział w monografii wydanej przez wydawnictwo Springer.



Rysunek 1: Schemat blokowy opracowanych algorytmów w ramach grantu „Autonomiczny robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min”. Kolorem różowym oznaczone są algorytmy opracowane, zaimplementowane i zweryfikowane przez autora niniejszej rozprawy mgr inż. Sylwestra Błaszczyka.

Rozdział 1

Cel i teza rozprawy

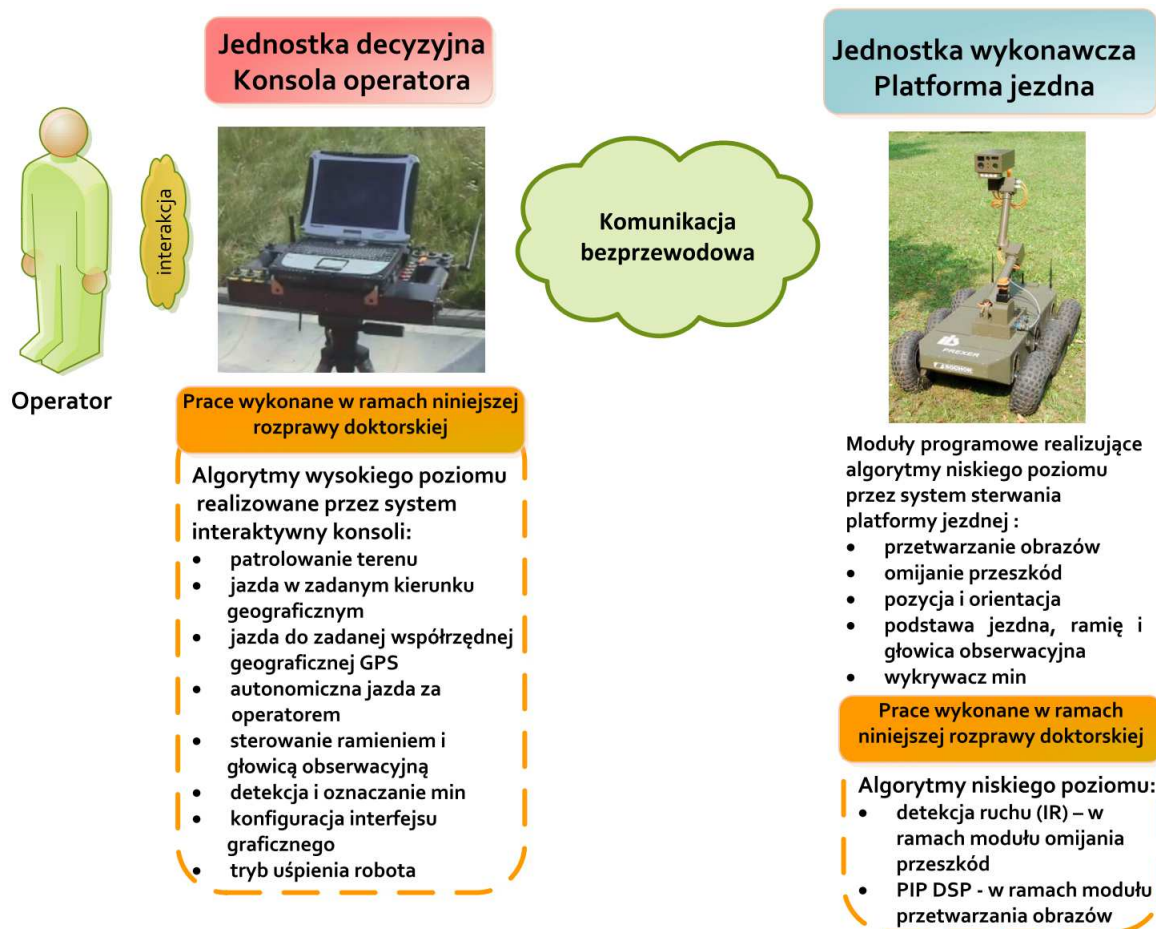
1.1 Cel pracy

Celem niniejszej pracy było **opracowanie własnej metodyki projektowania systemu interaktywnego umożliwiającego operatorowi robota wydawania złożonych, wysoko-poziomowych rozkazów nawigacyjnych**. Cel ten wymagał z jednej strony opracowania metod interakcji operatora z robotem w taki sposób, aby proces ten przebiegał w jak najbardziej naturalny sposób dla człowieka. Z drugiej strony wymagał rozważenia zagadnień związanych z robotem takich jak np. projektowanie jego zachowań semi-autonomicznych pozwalających na wykonywanie zadań przy jak najmniejszej interwencji człowieka.

Opracowane, zaimplementowane i zweryfikowane zgodnie z opracowaną metodyką autorskie algorytmy komunikacji człowieka z robotem w bezzałogowym robocie mobilnym umożliwiają jego kontrolę w sposób zdalny.

Zamieszczone rozwiązania stanowią część projektu realizowanego w ramach grantu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR) wspomnianego we wstępie. Część autorska projektu w ujęciu schematycznym została przedstawiona na rys.1.1. Wyszczególnione zostały na nim prace informatyczne, które zostały zrealizowane w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej.

Realizacja opisanych w niniejszej rozprawie prac badawczych (rys. 1.1) przebiegała zgodnie z przygotowaną przez autora metodyką projektową. Niewątpliwie, kluczowym zagadnieniem było opracowanie w konsoli operatora metod wizualizacji otoczenia robota oraz stanu poszczególnych modułów platformy jezdnej robota (mechanicznych oraz elektroniczno-informatycznych). Ma to szczególne znaczenie w sytuacji, gdy robot musi opuścić pole widzenia operatora. Interfejs użytkownika konsoli udostępnia możliwość wydawania szeregu wysoko-poziomowych rozkazów, przy jednoczesnym zachowaniu możliwości dostosowania jego wyglądu do indywidualnych potrzeb operatora. Zrealizowana **architektura systemu interaktywnego jed-**



Rysunek 1.1: Schematyczne ujęcie prac zrealizowanych przez autora niniejszej rozprawy w ramach projektu *Autonomiczny robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min*.

nostki decyzyjnej zapewnia możliwość jego adaptacji do nowych funkcjonalności bez konieczności zmiany jego struktury wewnętrznej. **Opracowane algorytmy w ramach systemu sterowania jednostki wykonawczej** (rys. 1.1) odciażają operatora od konieczności ciągłego monitorowania oraz kontroli zadań realizowanych przez system sterowania platformy jezdnej w zakresie zarządzania systemem wizyjnym oraz operacji detekcji przeszkód znajdujących w otoczeniu robota.

1.2 Teza rozprawy

W niniejszej rozprawie doktorskiej postawiono i udowodniono następującą tezę:

Możliwe jest opracowanie metodyki projektowania systemów interakcji człowiek-robot pozwalającej uzyskać semi-autonomię bezzałogowych mobilnych platform robotycznych. Zrealizowane to zostało z wykorzystaniem opracowanych w rozprawie autorskich algorytmów i protokołów komunikacyjnych.

Udowodnienie powyższej tezy wymagało:

- wnikliwego przeglądu literatury naukowej obejmującej metodyki projektowania systemów interaktywnych umożliwiających komunikację ludzi i maszyn, w szczególności zagadnień z obszar nauki interakcja człowiek-komputer (*ang. Human-Computer Interaction HCI*) oraz interakcja człowiek-robot (*ang. Human-Robot Interaction HRI*)
- opracowania oraz zweryfikowania autorskiej metodyki projektowania systemu interakcji człowiek-robot w rzeczywistym obiekcie badawczym,
- opracowania, zaimplementowania i zweryfikowania autorskich algorytmów:
 1. składania obrazów z wielo-kamerowego systemu wizyjnego robota, który został zaimplementowany na procesorze sygnałowym TMS320DM642,
 2. wykrywania obiektów ruchomych, który został zaimplementowany na procesorze sygnałowy TMS320F28335,
 3. realizujących wymagane tryby pracy Systemu Konsoli Operatora:
 - patrolowanie terenu,
 - jazda w zadanym kierunku geograficznym,
 - jazda do zadanej współrzędnej geograficznej GPS,
 - autonomiczna jazda za operatorem,
 - sterowanie ramieniem oraz głowicą obserwacyjną,
 - detekcja i oznaczanie min,
 - konfiguracja interfejsu graficznego,
 - tryb uśpienia robota.
- przeprowadzenie procesu integracji opracowanego Systemu Konsoli Operatora w jednostce decyzyjnej z systemem sterowania platformy jezdnej robota.

Rozdział 2

Komunikacja człowiek-maszyna

Tematyka niniejszej rozprawy powiązana jest ściśle z zagadnieniami komunikacji człowiek-maszyna. W przeciwieństwie do komunikacji między-ludzkiej, proces interakcji ludzi i maszyn jest ograniczony przez szereg barier. Z jednej strony są one spowodowane niskim poziomem technologicznym dostępnych narzędzi. Z drugiej strony maszyny nie posiadają naturalnej ludzkiej inteligencji przez co nie potrafią interpretować tak jak ludzie sytuacji w której się znajdują oraz adaptować się do wydarzeń nieprzewidzianych przez ich system kontroli.

Badania nad metodami komunikacji ludzi i maszyn prowadzone są od momentu pojawienia się pierwszych maszyn w życiu codziennym człowieka. W początkach industrializacji, dziedziną zajmującą się tymi zagadnieniami była interakcja człowiek-maszyna (*ang. Human-Machine Interaction HMI*). Rozwój sprzętu oraz oprogramowania komputerowego spowodował, że w obrębie dziedziny HMI, ukształtował się nowy obszar nauki, interakcja człowiek-komputer (*ang. Human-Computer Interaction HCI*). Głównym celem prac prowadzonych przez specjalistów z tej dziedziny jest dostarczenie rozwiązań, które wspomagałyby projektantów w opracowywaniu wydajnych oraz przyjaznych w użyciu komputerowych systemów interaktywnych. Natomiast rozwój badań nad inteligentnymi systemami w obrębie dziedziny robotyki spowodował, że w obszarze HMI pojawiła się kolejna interdyscyplinarna dziedzina, interakcja człowiek-robot (*ang. Human-Robot Interaction HRI*).

Dziedzina HRI jest względnie nowym obszarem nauki, dlatego w swych badaniach nad opracowaniem własnych metodyk oraz reguł projektowych posiłkują się osiągnięciami z innych dziedzin. **Szczególnie wciąż otwartą tematyką są zagadnienia związane z opracowaniem własnych metodyk projektowania systemów interakcji człowiek-robot, które w dalszej części pracy określane są również terminem systemów interaktywnych.** Opis prac badawczych zawartych w niniejszej rozprawie są próbą opracowania rozwiązań, które choć częściowo

wypełnią tę lukę.

Rozdział 3

Robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min

Prace badawcze prowadzone przez autora rozprawy doktorskiej były wykonywane w ramach grantu „Autonomiczny robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min”. Został on zrealizowany w Katedrze Informatyki Stosowanej, (a od 1 czerwca 2012 Instytucie Informatyki Stosowanej) Politechniki Łódzkiej we współpracy z przedsiębiorstwami: PREXER sp. z o.o., Sohor sp. z o.o. sp. komandytowa i Green-Point sp. z o.o. Celem tego projektu rozwojowego było opracowanie i wykonanie inteligentnego robota mobilnego wyposażonego w nowoczesne układy mikroprocesorowe, czujniki telemetryczne oraz system wizyjny. Koncepcja projektu zakładała implementację w opracowywanym prototypie robota rozwiązań, które miałyby wspomóc człowieka w realizacji czynności o dużym stopniu zagrożenia życia w zadaniach takich jak:

- zwiad - inspekcja nieznanego terenu w celu dostarczania informacji obrazowych oraz danych telemetrycznych żołnierzowi – operatorowi robota poprzez poruszanie się w sposób cichy i niezauważony,
- wykrywanie min - detekcja i oznaczanie znalezionych min przeciwpiechotnych w zadanym obszarze w sposób nienadzorowany,
- transport rannych,
- rozpoznanie chemiczne, biologiczne itp.

Realizacja projektu wymagała przeprowadzenia prac teoretycznych i praktycznych związanych z zagadnieniami mechanicznymi, elektronicznymi oraz informatycznymi. W wyniku prowadzonych prac powstała sześciokołowa, bezzałogowa platforma jezdna (rys. 3.1) wyposażona w konstrukcje mechaniczne oraz elektroniczne, które pod względem funkcjonalnym można zestawić w postaci następujących modułów:

- moduł napędowy - obejmujący podstawę jezdną, ramię oraz głowicę obserwacyjną,
- moduł nawigacji - obejmujący kamery, skaner laserowy 2D, GPS, kompas, żyroskop, akcelerometr,
- moduł konsoli operatora,
- moduł wykrywacza min,
- moduł komunikacji.



Rysunek 3.1: Robot mobilny pola walki zrealizowany w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ. (fot. Adam Wulkiewicz)

Aby zapewnić pełną kontrolę nad zastosowanymi modułami został opracowany hierarchiczny system sterowania w oparciu o architekturę warstwową. Opracowany system enkapsuluje funkcjonalności w postaci samodzielnych modułów. Opracowana architektura programowa rozwijana jest pod kątem budowy uniwersalnego, skalowalnego systemu sterowania jednostkami jezdny, który nie jest ograniczony do rodzaju napędu, typu oraz rozmiaru podstawy jezdnej. Szczegóły opracowanych algorytmów w ramach każdego z tych modułów można odnaleźć w publikacjach

(Błaszczuk *i inni*, 2014; Duch, Błaszczuk, 2013; Duch, Błaszczuk *i inni*, 2014; Duch, Błaszczuk *i inni*, 2014; Jachowicz, Błaszczuk *i inni*, 2014; Jachowicz, Błaszczuk *i inni*, 2012; Łaski, Błaszczuk *i inni*, 2014; Łaski, Błaszczuk *i inni*, 2012; Sankowski, Błaszczuk *i inni*, 2014; Sankowski, Błaszczuk *i inni*, 2012; Wulkiewicz, Błaszczuk *i inni*, 2014; Wulkiewicz, Błaszczuk *i inni*, 2012) (Błaszczuk *S. i inni*, 2012; Jachowicz i Duch 2011; Jeżewski i Wulkiewicz 2009; Jeżewski i Łaski 2009; Jeżewski i Błaszczuk *S.* 2009, 2011; Jeżewski i Duch 2009; Jeżewski *i inni*, 2009; Ostalczyk *i inni*, 2013; Sankowski *i inni*, 2010a,d)

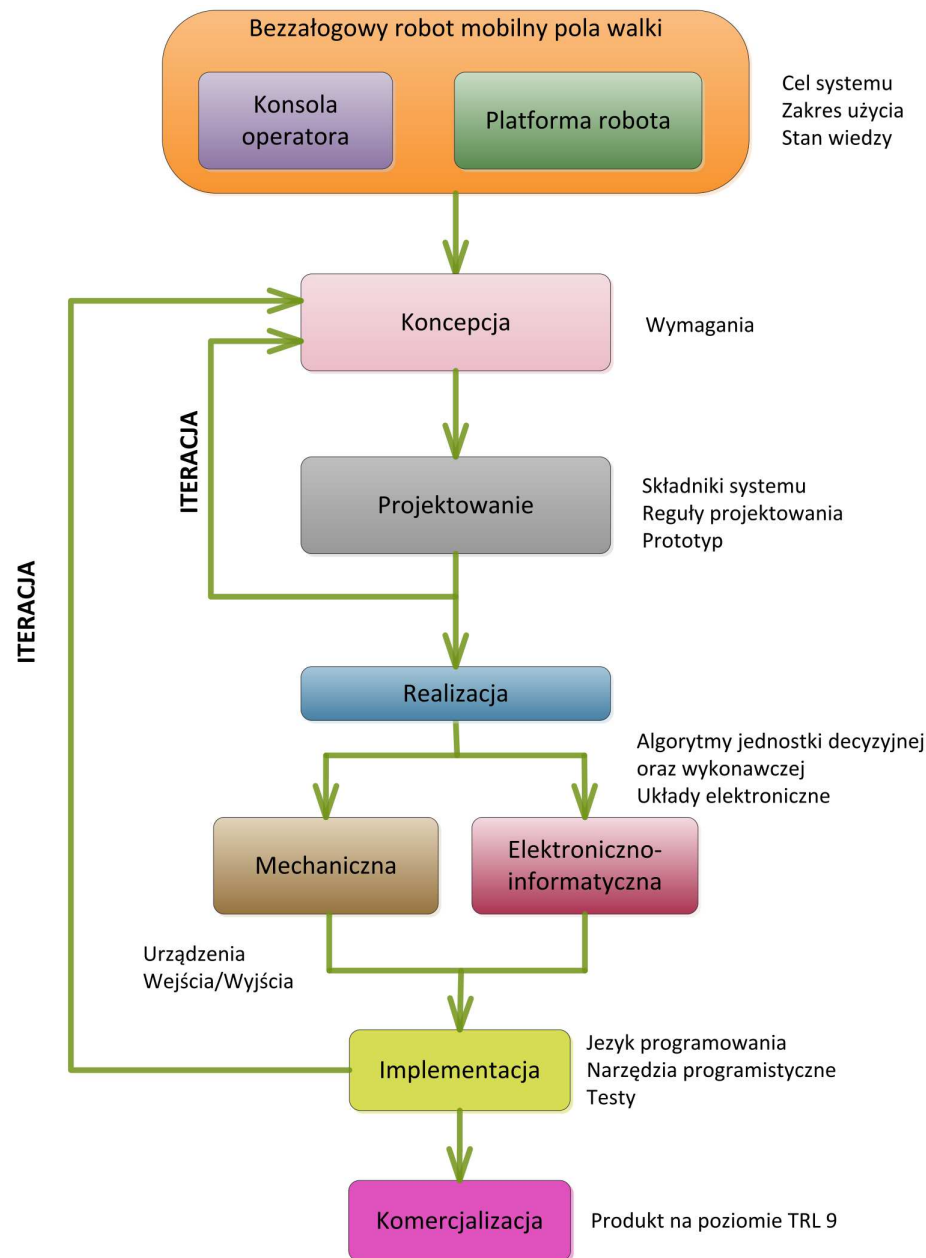
Rozdział 4

Konsola Operatora robota mobilnego

4.1 Metodyka projektowania systemu interaktywnego konsoli operatora

W zaprojektowanym oraz zrealizowanym w Instytucie Informatyki Stosowanej robocie, system sterowania platformy jezdnej złożony jest z szeregu heterogenicznych modułów elektroniczno-informatycznych. **Elementem pełniącym rolę warstwy pośredniczącej w wymianie danych pomiędzy platformą robota a jego operatorem jest osobny moduł - konsola operatora.** Ze względu na brak jasno sformułowanych reguł projektowych w ramach dziedziny interakcja człowiek-robot (*ang. Human-Robot Interaction HRI*) autor rozprawy zaprojektował, opracował, zaimplementował oraz zweryfikował system

interaktywny modułu konsoli operatora w oparciu o własną metodykę projektową 4.1.



Rysunek 4.1: Metodyka projektowania modułu konsoli operatora bezzałogowego robota mobilnego pola walki

Opracowana metodyka projektowania systemu interaktywnego modułu konsoli operatora składa się z następujących głównych etapów:

- **opracowanie bazy wiedzy** - zadaniem którego jest wyspecyfikowanie celów podjętych prac badawczych, zakres projektu oraz przeprowadzenie analizy aktualnie istniejących rozwiązań,
- **opracowanie koncepcji projektu** - zadaniem którego jest wyspecyfikowanie wymagań funkcjonalnych oraz нефункциональных,

- **projektowanie** - zadaniem którego jest wyspecyfikowanie głównych składników architektury systemu oraz reguł zgodnie z którymi należy zrealizować poszczególne elementy interfejsu użytkownika,
- **realizacja modułu mechanicznego oraz elektroniczno - informatycznego** - zadaniem którego jest praktyczna realizacja opracowanego prototypu konsoli operatora,
- **komercjalizacja** - zadaniem którego jest wprowadzenie na rynek opracowanych rozwiązań w postaci gotowego produktu.

4.2 Tryby pracy Systemu Konsoli Operatora

Weryfikacja opracowanej metodyki została dokonana poprzez przeprowadzenie szeregu prac programistycznych. Autor rozprawy w oparciu o opracowaną metodykę zaprojektował, opracował, zaimplementował oraz zweryfikował praktyczny, intuicyjny System Konsoli Operatora. Zrealizowane w ramach tego systemu algorytmy umożliwiają operatorowi robota wydawanie szeregu złożonych oraz wysoko-poziomowych rozkazów, które następnie są wysyłane do platformy jezdnej robota za pośrednictwem nadawczo-odbiorczego modułu radiowego. Odebrane przez moduł komunikacyjny platformy jezdnej robota rozkazy, są następnie analizowane i przekazywane do realizacji dedykowanym modułom programowym systemu sterowania.

Funkcjonalność algorytmów Systemu Konsoli Operatora pozwala wprowadzać robota w następujące tryby pracy:

- **Patrolowanie terenu (Spy)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości wydawania za pomocą wbudowanych w konsolę joystick-ów prostych rozkazów nawigacyjnych typu jedź do przodu, jedź do tyłu, obróć się. Jednocześnie udostępnia on możliwość podglądu obrazu z kamer systemu wizyjnego robota, który obejmuje kamerę światła widzialnego, kamerę termowizyjną oraz kamerę o podwyższonej czułości.
- **Jazda w zadanym kierunku geograficznym (Compass)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości wyznaczenia za pomocą ekranu dotykowego kierunku geograficznego w którym oraz prędkości z jaką musi poruszać się platforma jezdna robota.
- **Jazda do zadanej współrzędnej geograficznej GPS (GoToGps)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości wskazania punktu na wyświetlanej mapie za pośrednictwem ekranu dotykowego do którego ma dojechać platforma mobilna. Udostępnia on również opcje wysłania rozkazu powrotu platformy do pozycji w której znajduje się konsola operatora.

- **Autonomiczna jazda za operatorem (Pattern)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości wydania rozkazu podążania platformy w sposób samodzielny za jego operatorem.
- **Sterowanie ramieniem oraz głowicą obserwacyjną (Arm)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości sterowania ramieniem o czterech stopniach swobody oraz zamontowaną na nim głowicą obserwacyjną za pomocą wbudowanych w konsolę joystick-ów oraz interfejsu graficznego.
- **Detekcja i oznaczanie min (Sapper)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości wyznaczenia za pośrednictwem ekranu dotykowego obszaru terenu na wyświetlanej w konsoli mapie, który robot musi w sposób samodzielny przeszukać w celu zlokalizowania występujących tam min.
- **Konfiguracja interfejsu graficznego (Settings)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości konfiguracji danych, które mają być prezentowane w interfejsie graficznym dla poszczególnych, wymienionych trybów pracy. Służy on również celom diagnostycznym.
- **Uśpienie robota (Sleep)** - zadaniem trybu jest udostępnienie operatorowi możliwości wprowadzenie platformy jezdnej robota w stan bezczynności.

Rozdział 5

Algorytmy systemu sterowania platformy jezdnej

Aby odciążyć operatora od konieczności ciągłego koncentrowania uwagi na detalach sterowania robotem, członkowie zespołu projektowego (rys. 1) wdrożyli szereg rozwiązań algorytmicznych, które automatyzują szereg operacji wykonywanych przez system sterowania platformy jezdnej. Dzięki temu operator z jednej strony posiada możliwość nawigacji robotem przy pomocy naturalnych, łatwo zrozumiałych dla człowieka rozkazów, a z drugiej może zlecić realizację pewnych zadań systemowi sterowania platformy jezdnej, a samemu większą uwagę poświęcić szczegółom realizowanej misji.

5.1 Algorytm integracji danych obrazowych przy użyciu procesora sygnałowego

W ramach systemu sterowania platformy jezdnej autor rozprawy zaprojektował, opracował, zaimplementował oraz zweryfikował algorytm udostępniający operatorowi robota możliwość intuicyjnej konfiguracji zintegrowanego obrazu otoczenia robota (Jeżewski i Błaszczuk S. 2011) za pomocą prostych rozkazów typu: „ustaw widok jako obraz główny”. Obraz otoczenia jest złożeniem danych pochodzących z kamer systemu wizyjnego oraz obrazu wytwarzanego w oparciu o czujniki odległości znajdujących się w platformie jezdnej robota. Implementacja algorytmu została zrealizowana w oparciu o układ peryferyjny Enhanced Direct Memory Access (EDMA) na procesorze sygnałowy TMS320DM642.

5.2 Algorytm detekcji ruchu w oparciu o czujniki bliskiego zasięgu

Autor niniejszej rozprawy na potrzeby rozwoju cech autonomicznych robota zaprojektował, opracował, zaimplementował oraz zweryfikował algorytm detekcji ruchu wykorzystujący dane z czujników podczerwonych SHARP 2Y0A02 (Jeżewski i Błaszczuk S. 2011). Opracowany algorytm został zaimplementowany w mikrokontrolerze TMS320F28335. W systemie nawigacyjnym robota pozwala na wykrycie oraz określenie prędkości poruszających się obiektów w jego otoczeniu. Ponadto umożliwia stwierdzenie czy obiekt znajduje się na kursie kolizyjnym z robotem mobilnym. Jednak działania jego ograniczają się do detekcji obiektów znajdujących się w pojedynczym punkcie przestrzeni otoczenia robota. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie tego algorytmu dla czujników umożliwiających pomiar odległości w przestrzeni trójwymiarowej 3D np. lidarów typu

HDL-32E lub HDL-64E firmy Velodyne.

Rozdział 6

Wnioski końcowe

Autor rozprawy dla potrzeb zespołowego projektu badawczego „*Autonomiczny robot pola walki przeznaczony do zadań zwiadu i wykrywania min*” zaproponował nową, oryginalną metodykę projektowania systemu interakcji człowiek - robot. Z jednej strony realizuje ona reguły projektowania komputerowych systemów interaktywnych. Z drugiej strony uwzględnia ona złożoność oraz dynamikę systemu sterowania platformy jezdnej robota. Weryfikacja opracowanej metodyki została dokonana poprzez przeprowadzenie szeregu prac programistycznych. Autor rozprawy zaprojektował, opracował, zaimplementował oraz zweryfikował:

- praktyczny, intuicyjny System Konsoli Operatora,
- protokoły komunikacji odpowiedzialne za wymianę danych pomiędzy Systemem Konsoli Operatora a urządzeniami znajdującymi się w tej konsoli,
- autorskie algorytmy realizujące wymagane tryby pracy Systemu Konsoli Operatora.

Zrealizowany System Konsoli Operatora cechuje się wysokim komfortem użytkowania. W przyjazny dla użytkownika sposób można wysłać robotowi zarówno podstawowe rozkazy takie jak na przykład: jedź prosto, skręć, spójrz w lewo, jak również bardziej złożone, „wysoko poziomowe” rozkazy, typu dojedź do zadanych współrzędnych GPS, jedź w zadanym kierunku geograficznym, przeszukaj zaznaczony obszar w celu detekcji min i oznacz miejsca ich wystąpienia w interfejsie graficznym konsoli operatora.

Pełna implementacja opracowanej metodyki **wymagała również opracowania dedykowanych oryginalnych algorytmów systemu sterowania platformy jezdnej** (jednostki wykonawczej). Autor niniejszej rozprawy zaprojektował, opracował, zweryfikował oraz zaimplementował:

- algorytm zwalniający operatora robota z konieczności nadzoru nad zarządzaniem konfiguracją zintegrowanego obrazu otoczenia robota, który jest złożeniem danych pochodzących z kamer systemu wizyjnego oraz obrazu mapy otoczenia robota,
- algorytm detekcji poruszających się obiektów wykorzystujący dane z czujników bliskiego zasięgu. Zastosowanie tego algorytmu w systemie sterowania robota wymagało wykorzystanie procesora sygnałowego najnowszej generacji.

Osiągnięte wyniki przeprowadzonych badań zostały wdrożone w rzeczywistym obiekcie badawczym - robocie mobilnym pola walki przeznaczonym do zadań zwiadu i wykrywania min. Stanowią one jednocześnie jeden z głównych elementów raportu końcowego, który został przekazany do Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w 2012 roku (Sankowski *i inni*, 2012). Działanie kompletnego systemu zostało zweryfikowane na poligonach straży pożarnej oraz wojskowym. Zgromadzony materiał z przeprowadzonych badań poligonowych znajdują się w archiwach Instytutu Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej. Ze względu na poufny charakter całego projektu nie został on zawarty w rozprawie.

Opracowany System Konsoli Operatora stanowi przykład zastosowania opracowanej metodyki projektowania systemów interakcji człowiek-robot. Zaimplementowane w jednostce decyzyjnej (konsola operatora) metody interakcji, umożliwiają operatorowi robota intuicyjne zarządzanie platformą mobilną. Wdrożenie w systemie zarządzania platformy jezdnej robota autorskich algorytmów integracji obrazów oraz detekcji ruchu dopełnia główne założenia opracowanej metodyki. Funkcjonalności wdrożonych rozwiązań algorytmicznych pozwalają odciążyć operatora od konieczności ciągłego monitorowania oraz kontroli wybranych zadań realizowanych przez system platformy jezdnej robota. **Biorąc powyższe pod uwagę można stwierdzić, że cele pracy zostały osiągnięte, a jej teza wykazana.**

Rozważania zawarte w rozprawie doktorskiej są bezpośrednio związane z technikami zdalnej kontroli bezzałogowymi pojazdami mobilnymi przeznaczonymi do zastosowań w obszarze robotyki wojskowej. Głównym priorytetem jest wypracowanie metod nawigacji, które będą mogły być wdrożone również w pojazdach wykorzystywanych w innych gałęziach gospodarki, jak np. straży pożarnej.

Wyniki swoich prac doktorant opublikował (będąc pierwszym autorem lub współautorem) w 15 artykułach naukowych, w tym: pięć rozdziałów w monografii wydanej przez renomowane wydawnictwo World Scientific (Błaszczuk *i inni*, 2014; Duch, Błaszczuk *i inni*, 2014; Jachowicz, Błaszczuk *i inni*, 2014; Łaski, Błaszczuk *i inni*, 2014; Wulkiewicz, Błaszczuk *i inni*, 2014) i jeden rozdział w monografii wydanej przez wydawnictwo Springer (Duch, Błaszczuk *i inni*, 2014). Ponadto były one pre-

zentowane na konferencjach o zasięgu krajowym i międzynarodowym, m.in.: Proceedings of the 6th Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications oraz w monografiach takich jak Advances In the Theory and Applications of Non-integer Order Systems, Computer Vision in Robotics and Industrial Applications.

Dalsze kierunki rozwoju

Rozwiązania algorytmiczne, które zostały wdrożone w zakresie systemu interaktywnego robota mobilnego, stanowią dobrą podbudowę dalszych prac badawczych w obszarze dziedziny interakcja człowiek-robot. Wciąż pozostaje otwarta tematyka w zakresie **badania nad algorytmami nawigacji w oparciu o dane z czujników umożliwiającymi pomiar odległości w przestrzeni trójwymiarowej**. Kolejnym etapem będzie **rozwój cech autonomicznych w systemie zarządzania jednostką wykonawczą robota**, które będą umożliwiały platformie mobilnej na samodzielne poruszanie się w każdych warunkach oświetleniowych.

Bibliografia

Błaszczak 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*, 17(4):39–44, 2012.

(cytowanie na stronie **11**)

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

(cytowania na stronach **11** i **17**)

Duch P., **Błaszczak 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*. Grenoble, France, 2013.

(cytowanie na stronie **11**)

Duch P., Łaski M., **Błaszczak 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, 2014a.

(cytowania na stronach 11 i 17)

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

(cytowania na stronach 11 i 17)

Jachowicz R., **Błaszczak 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*. World Scientific, 2014.

(cytowania na stronach 11 i 17)

Jachowicz R. i Duch P. „Algorytm wyszukiwania i śledzenia prostych wzorców w czasie rzeczywistym”. *Zeszyty naukowe AGH*, 15(3):357–364, 2011.

(cytowanie na stronie 11)

Jachowicz R., Duch P., Łaski M., **Błaszczak S.**, Wulkiewicz A. i Sankowski D. „Enhancement of desired features as a result of multiple source image fusion”. *Image Processing & Communications*, 17(4):79–84, 2012.

(cytowanie na stronie 11)

Jeżewski S. i Wulkiewicz A. „Wizualizacja przestrzeni percepcyjnej robota mobilnego”. *Zeszyty naukowe AGH*, 13(3):1321–1327, 2009.

(cytowanie na stronie 11)

Jeżewski S. i Łaski M. „Przegląd i porównanie środowis symulacji robotów mobilnych”. *Zeszyty naukowe AGH*, 13(3):1095–1106, 2009.

(cytowanie na stronie 11)

Jeżewski S. i **Błaszczak S.** „Porównywanie algorytmów wykrywania krawędzi do zadań rekonstrukcji trójwymiarowego kształtu obiektu”. *Zeszyty naukowe AGH*, 13(3):1311–1320, 2009.

(cytowanie na stronie 11)

Jeżewski S. i **Błaszczak S.** „Realizacja systemu picture in picture z użyciem procesora sygnałowego tms320dm642”. *Zeszyty naukowe AGH*, 15(3):365–376, 2011.

(cytowania na stronach 11 i 15)

Jeżewski S. i Duch P. „Algorytmy segmentacji obrazów barwnych w rozpoznawaniu obiektów na obrazach satelitarnych i lotniczych”. *Zeszyty naukowe AGH*, 13(3):

891–900, 2009. ISSN: 1429-3447.

(cytowanie na stronie 11)

Jeżewski S., Sankowski D. i Dadan W. „Koncepcja autonomicznego robota pola walki przeznaczonego do zadań zwiadu i wykrywania min”. *Zeszyty naukowe AGH*, 13(3):1107–1116, 2009.

(cytowania na stronach 2 i 11)

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*. World Scientific, 2014.

(cytowania na stronach 11 i 17)

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

(cytowanie na stronie 11)

Ostalczyk P., Brzeziński D., 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.

(cytowanie na stronie 11)

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”. 2012. Raport techniczny 0010/1/R/T00/2008/05, Instytut Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej.

(cytowanie na stronie 17)

Sankowski D., Jeżewski S. i Łaski M. „Lokalizacja robota mobilnego w czasie rzeczywistym w oparciu o dane ze skanera laserowego”. *Zeszyty naukowe AGH*, 14(3/1):501–513, 2010a.

(cytowanie na stronie 11)

Sankowski D., Jeżewski S., Duch P. i **Błaszczak S.** „Wykrywanie obiektów ruchomych na podstawie danych z czujników odległościowych w robocie mobilnym”. *Zeszyty naukowe AGH*, 14(3/1):489–499, 2010b.

(cytowanie na stronie 11)

Sankowski D., Jeżewski S., Duch P., Stolarski Z. i **Błaszczak S.** „Algorytmy ustawiania ostrości kamer w systemie stereowizyjnym robota mobilnego”. *Zeszyty*

naukowe AGH, 14(3/1):353–356, 2010c.

(cytowanie na stronie 11)

Sankowski D., Jeżewski S. i Wulkiewicz A. „Uogólniony model dwuwymiarowego czujnika pomiaru odległości dla systemu operacyjnego robota mobilnego”. *Zeszyty naukowe AGH*, 14(3/1):515–524, 2010d.

(cytowanie na stronie 11)

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*. World Scientific, 2014.

(cytowania na stronach 11 i 17)

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*, 17(4):143–150, 2012.

(cytowanie na stronie 11)