

# AUTOREFERAT

---

Niniejszy dokument stanowi opis mojego dorobku naukowego, osiągnięć naukowo-badawczych oraz aktywności wdrożeniowej w kontekście poszukiwania praktycznego zastosowania opracowanej metodyki badawczej oraz technologii w latach 2010-2017. Szczególny nacisk położyłem na prezentację zasadniczego osiągnięcia stanowiącego podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka.

## 1. Ogólne informacje o habilitancie

### 1.1 Imię i nazwisko

Janusz Będkowski

### 1.2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania, tytułu rozprawy doktorskiej i nazwisk osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów

Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka nadany uchwałą Rady Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 16 czerwca 2010r. Promotor prof. dr hab. inż. Andrzej Masłowski, recenzenci: dr hab. inż. Piotr Skrzypczyński, prof. dr hab. inż. Jerzy Kurek (plik: Za2.pdf).

Świadectwo ukończenia studiów doktoranckich na Politechnice Warszawskiej, Wydział Mechatroniki w zakresie nauk technicznych automatyka i robotyka (20.10.2010, nr rej. 520/2010, plik: Za5\_1.pdf).

Certyfikat ze szkolenia „Zarządzanie projektami badawczymi” organizowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Warszawa, 2014 (plik: Za5\_2.pdf).

Dyplom Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (02.2014) dla Instytutu Maszyn Matematycznych za projekt pod nazwą „System klasyfikacji danych 3D w czasie On-Line” (twórcy: dr inż. Janusz Będkowski, mgr inż. Paweł Musialik, prof. dr hab. inż. Andrzej Masłowski, plik: Za5\_3.pdf).

Certyfikaty ukończenia szkolenia Top 500 Innovators Programme (Cambridge/Oxford 07-09.2015, pliki: Za5\_4a-d.pdf).

Dyplom – nagroda Rektora „zespołowa II stopnia” z Wydziału Mechatroniki za osiągnięcia naukowe w latach 2010-2011 (plik: Za5\_5.jpg).

Dyplom – certyfikat dla Instytutu Maszyn Matematycznych nadany przez firmę NVIDIA w ramach kierowania CUDA Research Centre (2014-2016) przez dra inż. J. Będkowskiego (plik: Za15\_6.jpg).

Dyplom ukończenia studiów II stopnia, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, kierunku: Inżynieria Komputerowa (plik: Za15\_7.pdf).

### **1.3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, asystent 2009 - 2010, adiunkt 2010 – 2015 (wymiar czasu 1.0 etatu).

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów, ul. Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa, asystent 2008-2010, adiunkt 2010 – 2012 (wymiar czasu 0.5 etatu).

Instytut Maszyn Matematycznych, ul. W. Krzywickiego 34, 02-525 Warszawa, adiunkt 2011–obecnie (wymiar czasu 1.0 etatu).

Instytut Podstawowych Problemów Techniki IPPT PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa adiunkt 2014 – obecnie (wymiar czasu 0.5 etatu).

Instytut Fraunhofera w zespole Kognitywnych Systemów Mobilnych, Wachtberg, Niemcy (09-12.2015, 10-12.2016), „senior researcher” (wymiar czasu 1.0 etatu).

### **1.4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny automatyki i robotyki<sup>1)</sup> zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (wg pkt. 1.2 niniejszych *Zasad prowadzenia postępowań habilitacyjnych*)**

**a) tytuł osiągnięcia naukowego (zgodnie z wnioskiem),**

„Jakościowa przestrzenno-czasowa reprezentacja i rozumowanie dla aplikacji robotycznych”.

**b) wykaz prac naukowych (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, nazwa czasopisma, tom, strony,) <sup>2)</sup>, dokumentujących osiągnięcie (osiągnięcia) naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego,**

#### **Monografia:**

b1. J. Będkowski, „Qualitative Spatio-Temporal Representation and Reasoning for Robotic Applications”, 2015, Computer Science, Academic Publishing House EXIT, ISBN 978-83-7837-041-3

c) omówienie celu naukowego w/w pracy/prac i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

## Cel naukowy

Przesłanką do podjęcia badań naukowych w zakresie jakościowej reprezentacji i rozumowania w aplikacjach robotyki mobilnej było zakończenie prac w ramach rozprawy doktorskiej pt.: „Metodyka sterowania i nadzorowania połączonych w sieć robotów mobilnych z zastosowaniem technologii CUDA”. Zainspirowany pracami [1][2] postanowiłem skupić się na rozwinięciu tematyki rozumowania jakościowego w ujęciu robotyki mobilnej. W Polsce kilka ośrodków badawczych, w tym grupy Prof. Zielińskiego oraz Prof. Siemiątkowskiej (Politechnika Warszawska), grupy Prof. Borkowskiego oraz Prof. Ambroszkiewicza (Polska Akademia Nauk), rozwijają tę tematykę badawczą. Biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy mój wkład polegał na opracowaniu ontologii dla systemu robotów mobilnych oraz na usprawnieniu pozyskiwania oraz przetwarzania danych do automatycznego modelowania otoczenia w kontekście zautomatyzowanego podejmowania decyzji w sensie przetwarzania informacji o charakterze jakościowym.

W związku z tym, zainspirowany pracami Prof. Skrzypczyńskiego [3][4] (Politechnika Poznańska) oraz Prof. Nüchtera [5] (Uniwersytet w Würzburg) postanowiłem rozwinąć zagadnienie SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) w kontekście zastosowania reprezentacji jakościowej do zwiększenia niezawodności oraz precyzji odwzorowania otoczenia robota na bazie pomiarów z laserowego systemu pomiarowego 3D. Nowymi elementami są autorskie metody identyfikacji oraz śledzenia obiektów przestrzennych, które zastosowałem do rozpoznawania otoczenia robota mobilnego. Opracowałem metodykę weryfikacji jakościowej oraz ilościowej odwzorowania otoczenia wykorzystując geodezyjne techniki pomiarowe.

W celu weryfikacji doświadczalnej opracowałem dedykowane demonstratory technologii oraz otwartą bibliotekę programową, która rozszerza obecnie stosowane narzędzia i ma istotne znaczenie edukacyjne. Opracowane demonstratory oraz autorska metodyka badawcza były podstawą nawiązania współpracy z krajowymi oraz zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Przy czym warto wymienić współpracę z Instytutem Fraunhofera FKIE, Wachtberg, Niemcy oraz współpracę w ramach programu DAAD z Uniwersytetem Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Niemcy. W dalszej części autoreferatu zostaną omówione istotne elementy opracowanej metodyki przetwarzania informacji jakościowej w tym: ontologia, konceptualizacja, zagadnienie jednoczesnej budowy mapy i lokalizacji, nowa architektura sterowania robotem mobilnym oraz praktyczne aspekty prowadzonych prac badawczych w kierunku osiągnięcia wysokiego poziomu technologicznego.

## Ontologia

Termin „ontologia” jest znany w informatyce (np. w budowie sieci semantycznych) oraz badaniach nad sztuczną inteligencją i służy jako platforma terminologiczna do gromadzenia informacji, preferencji i wiedzy. Ontologia w robotyce mobilnej stosowana jest między innymi do opisu środowiska robota jak i interakcji robota z tym środowiskiem. Biorąc pod uwagę aktualny stan wiedzy w zakresie tworzenia ontologii warto wskazać pracę [6] dotyczącą systemu wspomagającego projektowanie przestrzenne. W pracy naukowej rozwinąłem podejście znane z [7] (Declarative Spatial Reasoning Framework CLPQS) w kontekście zastosowania rozumowania jakościowego w aplikacjach robotyki mobilnej. Wartością dodaną jest wprowadzenie relacji przestrzenno-czasowych umożliwiających modelowanie zmian stanu obserwowanego środowiska, czy też interakcji robota ze środowiskiem w sensie rozumowania jakościowego. W związku z tym opracowana ontologia składa się z następujących elementów:

- zbiór konceptów (C),
- zbiór relacji (R),
- zbiór aksjomatów (A),
- hierarchia konceptów (CH),
- hierarchia relacji (RH),
- zbiór relacji przestrzenno-czasowych ( $E_{st}$ ).

Definicja ontologii jest następująca:  $O = \langle C, R, A, CH, RH, E_{st} \rangle$ .

Ontologia wspiera proces rozumowania jakościowego. Koncept definiuje podstawowy obiekt przestrzenny o kształcie (S) utworzony przez zbiór poligonów w przestrzeni trójwymiarowej z przypisaną etykietą semantyczną (SL). W niektórych przypadkach przyjąłem następujące uproszczenie: podstawowym kształtem może być pojedynczy punkt w przestrzeni trójwymiarowej z odpowiednią etykietą semantyczną. Kształt charakteryzuje obiekt co wpływa na trudność opisu w sensie jakościowym w związku z tym ontologia definiuje atrybuty ilościowe ( $A_{qn}$ ) oraz jakościowe ( $A_{ql}$ ). Zdefiniowałem następujące atrybuty jakościowe:

- przestrzenna reprezentacja,
- przestrzeń funkcyjna,
- przestrzeń operacyjna,
- przestrzeń zakresu oddziaływania,
- pusta przestrzeń.

Przestrzeń funkcyjna, przestrzeń operacyjna oraz przestrzeń zakresu oddziaływania jest związana bezpośrednio z geometrią. Zagadnienie to zostało omówione w pracach [8,9,10]. Wartością dodaną moich prac badawczych było rozszerzenie zagadnienia związanego z modelowaniem fizycznej reprezentacji obiektu w kontekście robotyki mobilnej. W związku z tym wprowadziłem pojęcie pustej przestrzeni dla planowania ruchu robota. Wprowadziłem nowe atrybuty ilościowe (poza, masa, środek ciężkości, moment bezwładności, materiał) niezbędne w modelowaniu właściwości fizycznych. W związku z tym opracowałem nową definicję konceptu:

$$C = \langle S, A_{qn}, A_{ql}, SL \rangle$$

Zbiór relacji (R) składa się z jakościowych oraz ilościowych przestrzennych relacji znanych z literatury [11]. W związku z tym ontologia definiuje osiem relacji przestrzennych w sensie jakościowym:

- rozłączne (DC),
- połączone zewnętrznie (EC),
- zachodzące na siebie (PO),
- równość (EQ),
- połączone wewnętrznie (TPP) wraz z relacją odwrotną,
- zawieranie się w sobie (NTPP) wraz z relacją odwrotną,

oraz następujące nowe relacje przestrzenne w sensie ilościowym:

- wszystkie stopnie swobody zablokowane,
- stopnie swobody związane z przesunięciem zablokowane, obroty niezablokowane,
- dowolny obrót wokół jednej osi,
- stopnie swobody związane z przesunięciem odblokowane.

Nowe relacje przestrzenne w sensie ilościowym pozwalają na modelowanie środowiska robota np.: drzwi czy inne obiekty dynamiczne. Model jakościowy może być zapisany w formacie COLLABorative Design Activity (COLLADA) [21]. Ważnym, nowym zagadnieniem badawczym było wprowadzenie reprezentacji przestrzenno-czasowej. W związku z tym opracowałem następujący zbiór zdarzeń przestrzenno-czasowych w sensie rozumowania jakościowego:

- wejście (DC->EC->PO),
- wyjście (PO->EC->DC),
- rozpoczęcie bycia wewnątrz (PO->TPP->NTPP),
- zakończenie bycia wewnątrz (NTPP->TPP->PO).

Ten nowy zbiór zdarzeń przestrzenno-czasowych umożliwia modelowanie zdarzeń w środowisku czy też interakcji robota z tym środowiskiem. W celu przechowywania informacji o elementach ontologii opracowałem bazę instancji:

$$IB^0 = \langle I_C^0, I_R^0, I_{Est}^0 \rangle$$

Wartością dodaną moich prac badawczych jest sformalizowane pojęcie modelu semantycznego w kontekście opracowanej ontologii oraz rozumowania jakościowego w dziedzinie robotyki mobilnej. Przyjąłem następującą definicję modelu semantycznego:

$$SM = \langle O, IB^0 \rangle$$

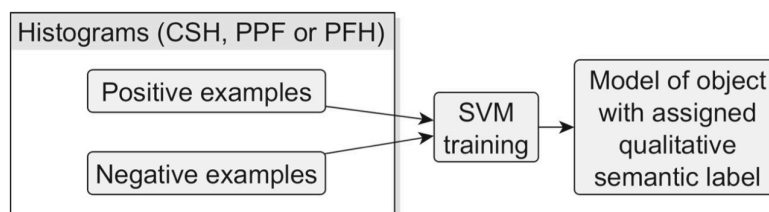
gdzie  $O$  jest wyżej opisaną ontologią,  $IB^0$  jest bazą instancji uzupełnianą podczas procesu tzw. konceptualizacji [22].

Istotnym wkładem naukowym w dziedzinie robotyki mobilnej było zdefiniowanie mapy semantycznej powstającej w wyniku przekształcenia modelu semantycznego w przestrzeń dwu bądź trójwymiarową. Dzięki temu otrzymałem reprezentację otoczenia robota mobilnego zrozumiałą dla człowieka. Warto podkreślić, że wiele prac badawczych opisuje mapę semantyczną, jednakże wprowadzenie formalnego opisu tworzenia tej mapy z zastosowaniem ontologii pozwoliło na stworzenie formalnego opisu algorytmicznego tego procesu. Obiektem elementarnym modelu semantycznego jest koncept w związku z tym wartością dodaną moich prac badawczych było opracowanie procesów automatycznej identyfikacji konceptów na bazie obserwacji robota mobilnego. Wyniki prac nad procesami automatycznej konceptualizacji umożliwiły weryfikację doświadczalną opracowanej ontologii oraz modelu semantycznego pod kątem praktycznego zastosowania [16][18][19][25].

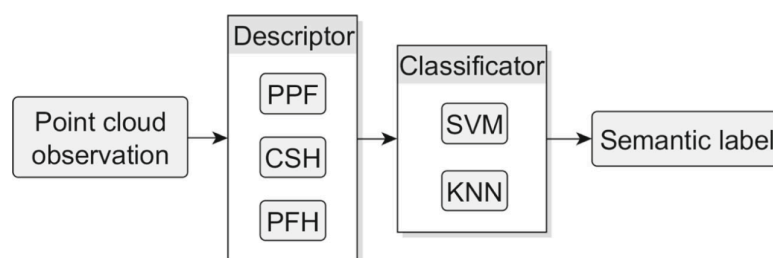
## Konceptualizacja

Konceptualizacja dotyczy procesu tworzenia pojęć (konceptów) na podstawie opracowanej ontologii. W pracach badawczych skoncentrowałem się na automatycznym rozpoznawaniu otoczenia robota. Opracowałem metody szybkiej klasyfikacji punktów pomiarowych z laserowego systemu pomiarowego 3D oraz czujnika RGB-D klasy Kinect [26] na podstawowe obiekty: podłoga, sufit, ściany, schody, roślinność oraz obiekty o kształcie nieregularnym. Wartością dodaną w porównaniu do obecnego stanu wiedzy [23] jest znacznie większa szybkość działania tych algorytmów. Pozwoliło to opracować w 2012 roku algorytm rozpoznający obiekty dynamiczne [16] na bazie informacji geometrycznej. Na bazie obecnego stanu wiedzy stwierdzam, że to zagadnienie badawcze jest ciągle aktualne. Prędkość działania algorytmów przetwarzających dane geometryczne była czynnikiem limitującym dalszych prac badawczych, w związku z tym skoncentrowałem się na dalszych usprawnieniach algorytmów o charakterze przetwarzania równoległego. W konsekwencji osiągnąłem satysfakcjonujące czasy przetwarzania i skoncentrowałem się na dalszej pracy badawczej związanej z zastosowaniem algorytmów uczących się do rozpoznawania otoczenia. Opracowałem nowy deskryptor kształtu tzw. Complex Shape Histogram będący

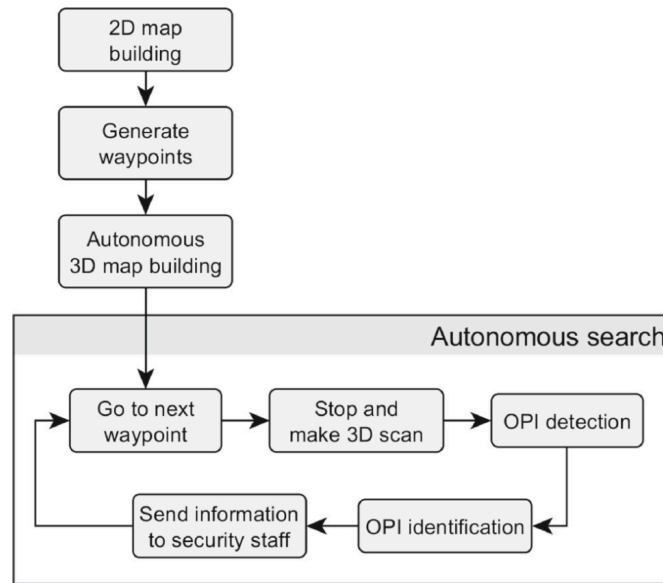
rozszerzeniem Point Pair Feature [17] uwzględniający dodatkowo etykiety semantyczne punktów pomiarowych co czyni to rozwiązanie spójne z opracowaną ontologią. Istotą rozwiązania jest inwariantność względem translacji oraz rotacji, dzięki czemu robot jest w stanie rozpoznać nie tylko różne obiekty obserwowane z różnych punktów odniesienia, ale także zlokalizować się na mapie niezależnie od aktualnego położenia. W pracy [18] przedstawiłem porównanie CSH do obecnego stanu wiedzy: PPF oraz PFH (Point Feature Histogram) w kontekście systemu uczącego się rozpoznawać konkretne obiekty trójwymiarowe. Rysunek 1 przedstawia schemat opracowanego systemu trenowania klasyfikatora SVM (Support Vector Machine) do rozpoznawania obiektów na bazie danych z laserowego systemu pomiarowego 3D. Rysunek 2 przedstawia schemat badanego systemu klasyfikacji obiektów na bazie danych z laserowego systemu pomiarowego 3D w kontekście porównania klasyfikatora SVM oraz KNN. Rysunek 3 przedstawia schemat badanego systemu robotycznego automatycznego poszukiwania obiektów na bazie danych z laserowego systemu pomiarowego 3D oraz zbudowanej mapy otoczenia. Wykazałem większą skuteczność identyfikacji obiektów zainteresowania stosując deskrytor CSH, który wykorzystując informację jakościową do dyskryminacji punktów pomiarowych na podstawowe klasy semantyczne jest spójny z głównym nurtem moich rozważań badawczych w obszarze jakościowej reprezentacji oraz rozumowania w aplikacjach robotyki mobilnej.



Rys 1. Schemat systemu trenowania klasyfikatora Support Vector Machine do rozpoznawania obiektów na bazie danych z laserowego systemu pomiarowego 3D. Wyjaśnienie elementów schematu: Positive examples (przykłady pozytywne), Negative examples (przykłady negatywne), SVM training (moduł trenowania klasyfikatora SVM), Model of object with assigned qualitative semantic label (model obiektu z przypisaną jakościową etykietą semantyczną).



Rys 2. Schemat badanego systemu klasyfikacji obiektów na bazie danych z laserowego systemu pomiarowego 3D w kontekście porównania klasyfikatora SVM oraz KNN. Wyjaśnienie elementów schematu: Point cloud observation (obserwacja w postaci chmury punktów 3D), Descriptor (deskrytor, PPF - Point Pair Feature, CSH – Complex Shape Histogram, PFH – Point Feature Histogram), Classifier (klasyfikator), Semantic label (etykieta semantyczna).



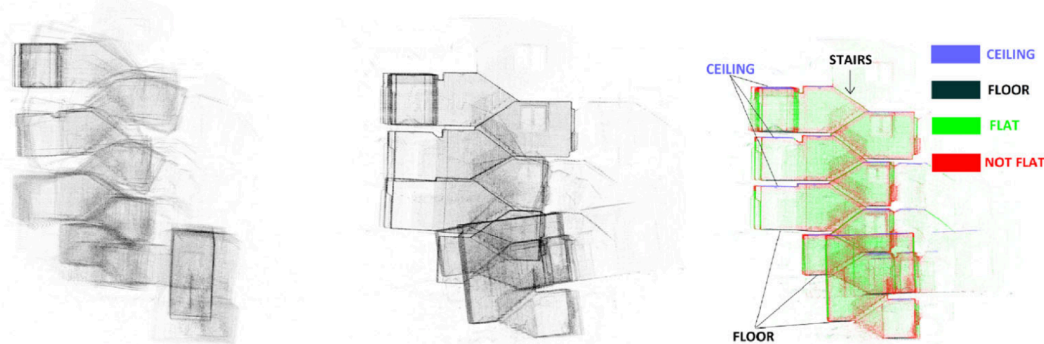
Rys 3. Schemat systemu robotycznego automatycznej klasyfikacji obiektów na bazie danych z laserowego systemu pomiarowego 3D. Wyjaśnienie elementów schematu: 2D map building (budowa mapy 2D), Generate waypoints (wyznaczenie ścieżki w postaci punktów), Autonomous 3D map building (automatyczna budowa mapy 3D), Go to next point (ruch do następnego punktu), Stop and make 3D scan (zatrzymanie i wykonanie pomiaru 3D), OPI detection (detekcja obiektów zainteresowania), OPI identification (identyfikacja obiektów zainteresowania), Send information to security staff (wysłanie informacji do personelu ochrony).

## Jednoczesna budowa mapy i lokalizacja

Zagadnienie jednoczesnej budowy mapy oraz lokalizacji postrzegane było zawsze jako fundamentalne zagadnienie robotyki mobilnej. W pracy badawczej postanowiłem skoncentrować się na zagadnieniu tworzenia mapy na bazie danych z laserowych systemów pomiarowych 3D inspirując się pracami [13, 14]. Czynnikiem limitującym a zarazem nowym zagadnieniem badawczym była poprawa algorytmu tworzenia mapy w sensie zwiększenia dokładności jak i pokonanie bariery złożoności obliczeniowej wykorzystując procesor GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units). Pojawienie się sensora Kinect w 2010 roku znacznie przyspieszyło rozwój oprogramowania dedykowanego przetwarzaniu danych w postaci gęstych chmur punktów 3D. Wartością dodaną mojej pracy badawczej jest opracowanie skalowalnego algorytmu SLAM (Ang. Simultaneous Localisation and Mapping) oraz opracowanie modyfikacji algorytmu uwzględniając reżim czasu rzeczywistego. Poprzez skalowanie należy rozumieć możliwość przetwarzania danych (chmury punktów 3D) pozyskanych na dowolnie dużym obszarze pracy robota przy założeniu wykonywania obliczeń na odpowiedniej maszynie wieloprocessorowej. Wstępne wyniki przedstawiłem w pracy [12], które stały się podstawą kolejnych prac badawczych. Rezultatem pracy jest warsztat badawczy – otwarte oprogramowanie (open-source) składające się z pakietu



autorskich implementacji algorytmów jednoczesnej budowy mapy oraz lokalizacji SLAM<sup>1</sup>. Inspiracją do opracowania tego warsztatu badawczego są dwie biblioteki 3DTK<sup>2</sup> oraz PCL<sup>3</sup>. Motywacją do prowadzenia prac badawczych było ograniczenie możliwości zastosowania w/w bibliotek w rzeczywistych warunkach. Biblioteki te dostarczają algorytmy SLAM, jednakże możliwości zastosowania w praktyce są mocno ograniczone. Po pierwsze metody automatycznej weryfikacji poprawności algorytmów są niewystarczające w praktycznych aplikacjach, po drugie dokładność map nie jest wystarczająca, po trzecie czas wykonywanych obliczeń mocno ogranicza możliwość zastosowania tych algorytmów bezpośrednio na platformie mobilnej. Ograniczenia te były podstawą do opracowania nowych algorytmów usprawniających kluczowe komponenty w/w bibliotek oraz do opracowania metodyki weryfikacji dokładności map [15] wykorzystując geodezyjne techniki pomiarowe. Na rysunku 4 przedstawiłem praktyczny problem tworzenia mapy otoczenia w realnej aplikacji, przy czym wprowadzenie informacji o charakterze jakościowym umożliwiło znaczne zwiększenie dokładności wynikowej mapy.



Rysunek 4: Porównanie wyniku działania klasycznego algorytmu SLAM (rysunek środkowy) do autorskiego rozwiązania wykorzystującego informację o charakterze jakościowym (rysunek po prawej, semantyczne klasy: kształt płaski – „FLAT”, kształt nieregularny – „NOT FLAT”, podłoga - „FLOOR”, sufit - „CEILING”) na bazie danych pozyskanych w realnych warunkach (rysunek po lewej). Zastosowanie informacji jakościowej w kontekście algorytmu SLAM umożliwia znaczne zwiększenie dokładności wynikowej mapy.

W monografii przedstawiłem następujące usprawnienia:

- wprowadzenie informacji jakościowej (dyskryminacja punktów na klasy semantyczne: podłoga, sufit, płaszczyzny, inne) zwiększyło znaczącą dokładność tworzonych map,

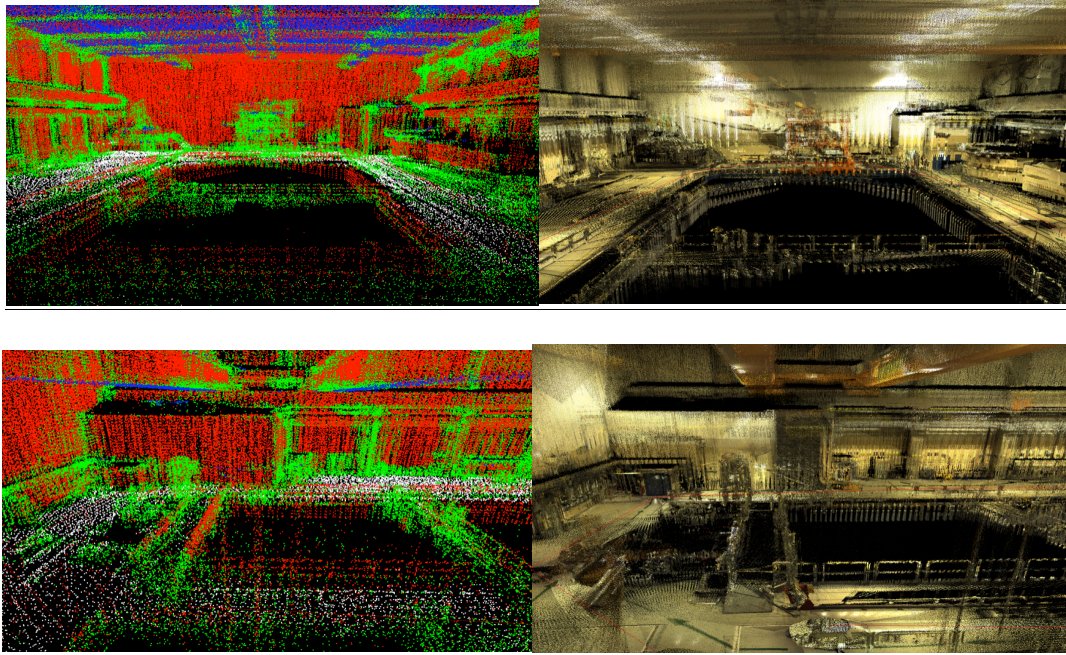
<sup>1</sup> [https://github.com/JanuszBedkowski/gpu\\_computing\\_in\\_robotics](https://github.com/JanuszBedkowski/gpu_computing_in_robotics)

<sup>2</sup> <http://slam6d.sourceforge.net>

<sup>3</sup> <http://pointclouds.org>

- zastosowanie dekompozycji przestrzeni 3D na regularną siatkę oraz wprowadzenie mechanizmu gwarantującego skończoną liczbę obliczeń umożliwiło realizację algorytmów w czasie rzeczywistym,
- wykrywanie zamknięcia pętli kilkoma metodami: stosując informację jakościową (obrazy map semantycznych) oraz entropię, oraz poprzez zastosowanie autorskiego rozwiązania CSH (Complex Shape Histogram) do opisu otoczenia robota w formie wektora cech o charakterze informacji jakościowej,
- różne metryki: punkt do punktu, punkt do rzutu oraz podejście hybrydowe.

Znacząca większość autorskich usprawnień algorytmu SLAM opiera się na zastosowaniu informacji jakościowej gwarantując spójność z opracowaną wcześniej ontologią. Podejście zorientowane na informacje o charakterze jakościowym niewątpliwie wyróżnia przeprowadzone badania na tle obecnego stanu wiedzy. Weryfikacja z obecnym stanem wiedzy nastąpiła podczas ENRICH 2017 (The New European Robotic Hackathon, 19-23 czerwiec 2017, Austria). Zaprezentowane rozwiązanie techniczne mapowania pomieszczenia reaktora w elektrowni atomowej zakładając rzeczywiste warunki operacyjne zostało ocenione przez międzynarodowy zespół ekspertów i wyróżnione nagrodą „Best 3D Mapping” (plik: Za15\_8.pdf). Na rysunku 5 przedstawiłem wykonane mapy semantyczne oraz tożsame wysokorozdzielcze kolorowe mapy 3D podczas eksperymentu. Ekspersi zwrócili uwagę na kluczowe aspekty opracowanej metodyki oraz technologii: szybkość, precyzja oraz przetwarzanie masowych danych w czasie rzeczywistym na komputerze pokładowym robota. Warto podkreślić, że potencjał aplikacyjny (możliwość zastosowania w praktyce) także został pozytywnie oceniony. Po pierwsze technologia może znaleźć zastosowanie w aplikacjach zarządzania kryzysowego w kontekście szybkiego tworzenia map 3D obiektów z ograniczonym dostępem człowieka. Po drugie mapy semantyczne mogą posłużyć do automatycznego wygenerowania map przejezdności dla innego sprzętu (wspomaganie planowania ruchu).



Rysunek 5: Po lewej: mapa semantyczna wnętrza elektrowni atomowej, po prawej: wysokorozdzielcze kolorowe mapy 3D tej samej lokalizacji. Mapy zostały wygenerowane automatycznie przez zdalnie sterowanego robota mobilnego (autorskie rozwiązanie algorytmu SLAM) wyposażonego w laserowy system pomiarowy 3D Velodyne VLP16 oraz zintegrowaną kamerę sferyczną Ladybug 5.

Istotnym zagadnieniem badawczym będącym jednocześnie komplementarnym zagadnieniem do pracy nad SLAM było badanie zastosowania informacji jakościowej oraz szybkich obliczeń równoległych w kontekście lokalizacji robota mobilnego w znanej mapie. W pracy [19] przedstawiłem wynik rozwinięcia filtra cząsteczkowego o dodatkową funkcjonalność w postaci wykorzystania informacji semantycznej (chmura punktów 3D z nadanymi etykietami semantycznymi). Na podstawie obecnego stanu wiedzy stwierdzam, że zagadnienie zastosowania informacji jakościowej w filtrze cząsteczkowym w kontekście semantycznej mapy 3D jest zagadnieniem nowym w robotyce mobilnej. Wykazałem, że zastosowanie informacji jakościowej zwiększa skuteczność lokalizacji robota w znanym środowisku. Podkreślam, że znane środowisko jest w tym eksperymencie opisane poprzez model semantyczny powstały na bazie opisanej wcześniej ontologii, co jest ściśle związane z głównym nurtem rozważań naukowych.

Istotnym zagadnieniem badawczym było opracowanie metodyki weryfikacji dokładności map metrycznych 3D z zastosowaniem technik geodezyjnych wykorzystując dane pozyskane w rzeczywistych warunkach. Opracowana metodyka pozwala na weryfikację algorytmów SLAM i stanowi istotny wkład naukowy w rozwój robotyki mobilnej. Warto podkreślić, że zaobserwowałem korzystny wzrost dokładności patrząc z punktu widzenia autorskich implementacji SLAM. Istotne jest osiągnięcie niskiego poziomu błędów na poziomie

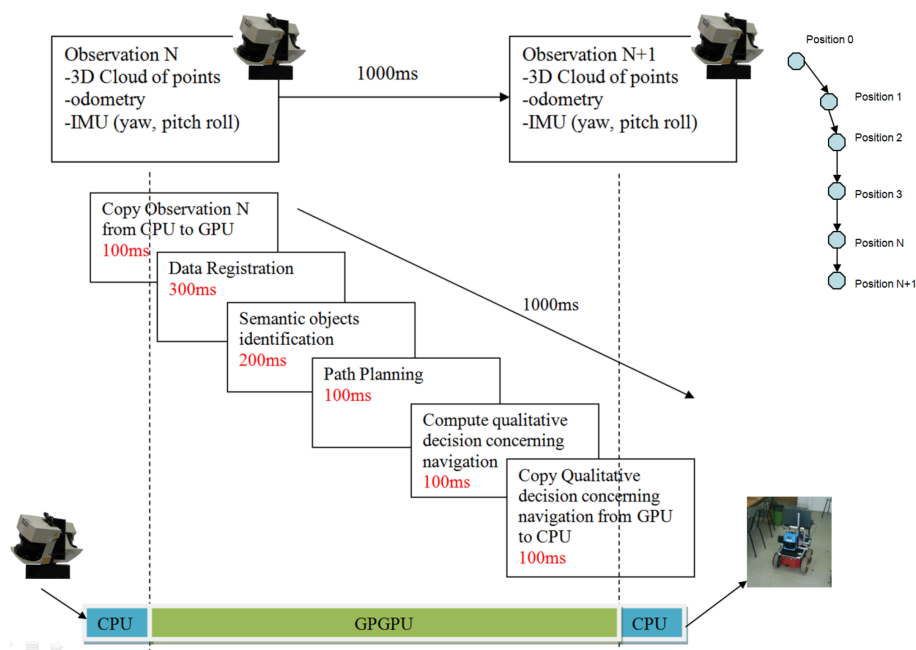
pojedynczych centymetrów co zbliża automatyczne wyrównanie danych do rezultatów klasycznych technik geodezyjnych stanowiąc jednocześnie przesłankę o istotnym wkładzie naukowym. W tabeli 1 przedstawiłem zestawienie wyników dokładnościowych badanych algorytmów SLAM na bazie metodyki i zbioru danych opracowanych w ramach [24]. Kolorem czerwonym zaznaczyłem wyniki dla implementacji algorytmu SLAM w ramach biblioteki Point Cloud Library będącej uznanym źródłem referencyjnych metod przetwarzania danych 3D. Wykazałem, że autorskie modyfikacje algorytmu SLAM znacząco zwiększają dokładność w porównaniu do znanych implementacji. Wyniki badań przedstawiłem w [27]. W ramach eksperymentu wykonano 18 pomiarów wokoło budynku wykorzystując geodezyjny instrument pomiarowy 3D (Z+F IMAGER 5010) – laser 3D. Wyznaczono pozycje lasera (pozycja  $x, y, z$  oraz kąty obrotu wokoło osi  $X, Y, Z$ ) stosując klasyczne techniki geodezyjne [24] jako pomiar referencyjny. Na tej podstawie porównałem wyniki różnych algorytmów SLAM wyznaczających pozycje na podstawie danych 3D. Uzyskane błędy zestawiałem w tabeli 1. Przykładowo, dla autorskiego algorytmu ICP przedział błędów kąta  $X$  wynosi  $(-0.055, 0.06)$  stopnia, a przedział błędów pozycji w osi  $X$  wynosi  $(-0.014, 0.02)$  metra. Stwierdzam, że uzyskałem centymetrową dokładność automatycznego pozycjonowania w porównaniu do milimetrowej dokładności pozycjonowania technikami geodezyjnymi. Moje metody charakteryzują się znacznie wyższą dokładnością pozycjonowania w porównaniu do innych ogólnodostępnych metod rejestracji danych. Determinuje to potencjalne zastosowania praktyczne związane z automatyzacją procesu wyrównywania danych 3D.

Tabela 1: Zestawienie wyników dokładnościowych badanych algorytmów SLAM na bazie metodyki i zbioru danych opracowanych w ramach[24].

Algorytm	Przedział błędu kąta X [stopnie]	Przedział błędu kąta Y [stopnie]	Przedział błędu kąta Z [stopnie]	Przedział błędu pozycji X [m]	Przedział błędu pozycji Y [m]	Przedział błędu pozycji Z [m]
ICP PCL	(0.015, 2.58)	(-1.5, 0.7)	(-0.28, 0.16)	(-0.32, 0.007)	(-1.01, 0.32)	(-3.35, -0.017)
ICP	(-0.055, 0.06)	(-0.1, 0.06)	(-0.001, 0.06)	(-0.014, 0.02)	(-0.045, 0.046)	(-0.23, -0.019)
ICP semantyczne	(0.007, 2.3)	(-0.59, 0.27)	(-0.001, 0.12)	(-0.014, 0.027)	(-0.04, 0.32)	(-2.97, -0.016)
ICP punkt do rzutu	(-0.16, 0.13)	(-0.22, 0.16)	(-0.01, 0.099)	(-0.05, 0.005)	(-0.15, 0.086)	(-0.46, -0.036)
LS3D	(-0.09, 0.19)	(-0.2, 0.04)	(-0.01, 0.12)	(-0.05, 0.004)	(-0.14, 0.097)	(-0.24, -0.018)
NDT PCL	(-0.003, 2.69)	(-0.68, 0.36)	(-0.025, 0.24)	(-0.027, 0.093)	(-0.077, 0.47)	(-3.37, 0.003)
LS3D	(-0.08, 0.07)	(-0.048, 0.035)	(-0.04, 0.02)	(-0.013, 0.11)	(-0.04, 0.02)	(-0.074, 0.017)
LUM euler	(-0.019, 0.05)	(-0.058, 0.035)	(-0.008, 0.03)	(-0.016, 0.065)	(-0.014, 0.03)	(-0.03, 0.009)
LUM euler punkt do rzutu	(-0.034, 0.04)	(-0.12, 0.07)	(-0.031, 0.024)	(-0.013, 0.085)	(-0.04, 0.02)	(-0.09, -0.001)
LUM euler semantyczne	(-0.01, 0.05)	(-0.06, 0.04)	(-0.01, 0.035)	(-0.017, 0.06)	(-0.013, 0.03)	(-0.02, 0.01)
LUM PCL	(-0.07, 0.16)	(-0.17, 0.03)	(-0.009, 0.1)	(-0.04, 0.01)	(-0.11, 0.08)	(-0.19, -0.013)
LUM quat	(-0.03, 0.04)	(-0.06, 0.03)	(-0.007, 0.03)	(-0.019, 0.06)	(-0.013, 0.03)	(-0.05, -0.003)
LUM quat punkt do rzutu	(-0.05, 0.027)	(-0.136, 0.093)	(-0.025, 0.03)	(-0.03, 0.045)	(-0.05, 0.01)	(-0.125, -0.006)
LUM quat semantyczne	(-0.017, 0.04)	(-0.05, 0.03)	(-0.008, 0.037)	(-0.008, 0.036)	(-0.019, 0.053)	(-0.01, 0.038)

## Nowa architektura sterowania robotem mobilnym

W monografii przedstawiłem opracowaną oraz zaimplementowaną architekturę programową robota mobilnego wykorzystującą obliczenia GPGPU (rysunek 6). Dzięki niej możliwe jest wykonywanie procedur w czasie rzeczywistym. Architektura składa się z implementacji metod rejestracji danych (ang. data registration), metod identyfikacji obiektów (ang. semantic objects identification), planowania ścieżki (ang. path planning) oraz podejmowanie decyzji o charakterze jakościowym dotyczących nawigacji (ang. compute qualitative decision concerning navigation). Zademonstrowałem przykłady wyznaczania ścieżki w środowisku typu „indoor”. Wykazałem efektywność metody analizy przejeźności, która składa się z metod rozpoznawania kształtów i na tej podstawie wyznaczania ścieżki. Pokazałem, że proponowana metoda może mieć zastosowanie w środowisku typu „indoor” jak i „outdoor”. Zaletą opracowanej architektury jest to, że większość obliczeń wykonywana jest na procesorze GPGPU, w rezultacie procesor CPU może zostać wykorzystany do innych celów. Takie podejście jest zagadnieniem nowym w robotyce mobilnej. Wyniki badań potwierdzają zasadność podjętej tematyki ze względu na wysoki potencjał aplikacyjny.



Rysunek 6: Nowa architektura sterowania robotem mobilnym. Wyjaśnienie elementów schematu: Observation N, 3D Cloud of points, odometry, IMU, yaw, pitch, roll (Obserwacja N, chmura punktów 3D, odometria, kąty z systemu inercyjnego), Copy Observation N from CPU to GPU (kopiowanie obserwacji z pamięci procesora CPU do pamięci procesora GPU), Data Registration (rejestracja/wyrównanie danych), Semantic objects identification (identyfikacja obiektów semantycznych), Path Planning (planowanie ruchu), Compute qualitative decision concerning navigation (podjęcie decyzji o charakterze informacji jakościowej w kontekście nawigacji), Copy qualitative decision concerning navigation from GPU to CPU (skopiowanie decyzji o charakterze informacji jakościowej w kontekście nawigacji z pamięci procesora GPU do pamięci procesora CPU).

## Aspekty praktyczne prowadzonych prac badawczych

Prowadzone prace badawcze dotyczyły modelowania otoczenia robota mobilnego stosując opracowaną ontologię oraz nowe narzędzia programistyczne. Model otoczenia tzw. model semantyczny ma istotne znaczenie praktyczne. Faktem jest, że dokładne mapy są podstawową informacją w wielu zastosowaniach. Wyniki moich prac naukowych umożliwiają tworzenie map semantycznych tj. map metrycznych 2D/3D z informacją o charakterze jakościowym [25]. Poprawienie dokładności tworzonych map [24], przyspieszenie oraz integracja z modułem podejmowania decyzji w kontekście rozumowania jakościowego otwierają zupełnie nowe potencjalne zastosowania. W monografii przedstawiłem zagadnienie rejestracji danych 3D, aplikację wspomagania nadzorowania robota inspekcyjno-interwencyjnego, aplikację wspomagającą trening operatora robota mobilnego, aplikację integracji robota przemysłowego z istniejącą instalacją przemysłową oraz aplikację zastosowania opracowanej metodyki we wspomaganiu projektowania przestrzennego. Zastosowanie robota mobilnego w aplikacji wspomagania projektowania przestrzennego w kontekście rozumowania jakościowego jest nowym zagadnieniem badawczym patrząc z punktu widzenia obecnego stanu wiedzy.

Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie rynkowe zagadnieniem praktycznym jest opracowana lokalizacja robota mobilnego w znanym otoczeniu. Znane otoczenie jest modelowane przy pomocy opracowanej ontologii, w rezultacie powstały model semantyczny otoczenia otwiera zupełnie nowe możliwości praktycznego zastosowania. Przykładowo, opracowany system lokalizacji [19] może zastąpić ogólnie stosowany w robotyce mobilnej system GPS wprowadzając zupełnie nową jakość. Nowe metody w porównaniu do GPS są bardziej niezawodne, np.: patrząc przykładowo z punktu widzenia sytuacji zaniku sygnału GPS w budynkach, tunelach itp. Badania zorientowane na praktyczne zastosowanie były prowadzone w Instytucie Fraunhofera FKIE (Wachtberg, Niemcy)<sup>4</sup> oraz we współpracy z polską firmą STEKOP S.A. w ramach projektu TARVOS<sup>5</sup>. Jako kierownik naukowy projektu TARVOS byłem odpowiedzialny za opracowanie nowych funkcji robota mobilnego realizowanych w trybie autonomicznym w aplikacji ochrony infrastruktury krytycznej. W ramach projektu wykazałem, że robot jest w stanie poruszać się autonomicznie na poligonie o powierzchni 20ha.

Mapy semantyczne mogą posłużyć jako medium wymiany informacji między maszynami oraz ludźmi [25]. Zaprezentowane możliwości w elektrowni atomowej w Austrii przekonały potencjalnych użytkowników końcowych o przewadze opracowanej technologii w porównaniu do obecnego stanu wiedzy. Zaprezentowana mapa przejezdności może posłużyć do planowania ruchu innych maszyn roboczych.

---

<sup>4</sup> <https://www.fkie.fraunhofer.de/de/forschungsabteilungen/cms-kognitive-mobile-systeme.html>

<sup>5</sup> <http://www.stekopsa.pl/tarvos.html>

Warto podkreślić możliwość zastosowania opracowanej technologii w przemyśle kopalnianym. Opracowana metodyka może być zastosowana w dwóch obszarach: w tworzeniu map metrycznych kopalni oraz w lokalizacji samojezdnych maszyn górniczych (SMG). Wyniki prac w tym zakresie przedstawiłem w pracy [20].

Istotnym aspektem praktycznym o największym oddziaływaniu na społeczeństwo z w/w zastosowań jest możliwość zastosowania opracowanej metodyki w technologii samochodów autonomicznych. Planuję prowadzenie przyszłych prac badawczych w tym zakresie.

## **Bibliografia**

- [1] B. Siemiątkowska, A. Borkowski, R. Chojecki, M. Gnatowski, W. Mokrzycki, J. Szklarski, „Reprezentacja Otoczenia Robota Mobilnego”, 2011, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, pp.1-263
- [2] S. Ambroszkiewicz, A. Borkowski, K. Cetnarowicz, C. Zieliński ( red. ): „Inteligencja wokół nas. Współdziałanie agentów softwarowych, robotów, inteligentnych urządzeń”, 2010, vol. 15, Akademicka Oficyna wydawnicza EXIT, ISBN 978-83-60434-79-6, 405 s.
- [3] P. Skrzypczyński: „Uncertainty models of the vision sensors in mobile robot positioning”, 2005, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 15 (1), pp. 73-88
- [4] P. Skrzypczyński: „Simultaneous localization and mapping: A feature-based probabilistic approach”, 2009, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 19 (4) 575-588
- [5] A. Nüchter, O. Wulf, K. Lingemann, J. Hertzberg, B. Wagner, H. Surmann: „3D Mapping with Semantic Knowledge”, 2005, in: ROBOCUP INTERNATIONAL SYMPOSIUM, pp. 335-346
- [6] M. Bhatt, J. Hois, O. Kutz: „Ontological Modelling of Form and Function for Architectural Design”, 2012, Applied Ontology Journal (AOJ)
- [7] M. Bhatt, J. H. Lee, C. Schultz: „CLP(QS): A Declarative Spatial Reasoning Framework, in: Spatial Information Theory”, 2011, 10th International Conference COSIT, Belfast, ME, USA, Proceedings LNCS-Lecture Notes in Computer Science 6899, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, pp. 210-230
- [8] M. Bhatt, C. Schultz, C. Freksa: „The ‘Space’ in Spatial Assistance Systems: Conception, Formalisation, and Computation”, 2012, Oxford University Press, Explorations in Language and Space. Oxford University Press
- [9] M. Bhatt, F. Dylla, J. Hois: „Spatio-terminological inference for the design of ambient environments”, 2009, proceedings of the 9th international conference on Spatial information theory, COSIT’09, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 371-391
- [10] M. Bhatt, J. Hois, O. Kutz, F. Dylla: „Modelling Functional Requirements in Spatial Design”, 2010, proceedings of the 29th international conference on Conceptual modeling, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, pp. 464-470
- [11] A. P. Galton: „Towards an integrated logic of space, time and motion”, 1993, proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93), pp. 1550-1557
- [12] J. Będkowski: „Parallel implementation of hybrid ICP data registration”, 2011, Elektronika 8/2011 pp. 114-118
- [13] P. J. Besl, N. D. McKay: „A method for registration of 3D shapes”, 1992, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, no.2, pp. 239-256



- [14] D. Qiu, S. May, A. Nüchter: „GPU-accelerated nearest neighbor search for 3d registration”, 2009, proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision Systems: Computer Vision Systems, ICVS '09, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 194-203
- [15] J. Będkowski, K. Majek, P. Musialik, A. Adamek, D. Andrzejewski, D. Czeka: „Towards terrestrial 3D data registration improved by parallel programming and evaluated with geodetic precision”, 2014, Automation in Construction Volume 47, pp. 78-91
- [16] J. Będkowski: „Understanding 3D shapes being in motion”, 2013, Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems, Vol.7, No.1 42-26
- [17] B. Drost, M. Ulrich, N. Navab, S. Ilic: „Model globally, match locally: Efficient and robust 3D object recognition”, 2010, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 998-1005.
- [18] J. Będkowski, K. Majek, P. Majek, P. Musialik, M. Pełka, A. Nüchter: „Intelligent mobile system for improving spatial design support and security inside buildings”, 2015, Mobile Networks and Applications, Volume 21, Issue 2, pp. 313-326
- [19] J. Będkowski, T. Röhling: "Online 3D LIDAR Monte Carlo localization with GPU acceleration", 2017, Industrial Robot: an International Journal, Vol. 44 Issue: 4, doi: 10.1108/IR-11-2016-0309
- [20] J. Schauer, J. Będkowski, K. Majek, A. Nüchter: „Performance comparison between state-of-the-art point-cloud based collision detection approaches on the CPU and GPU”, 2016, proceedings of the 4th IFAC Symposium on Telematics Applications (TA '16), Porto Alegre, Brazil
- [21] <https://www.khronos.org/collada/> (serwis dostępny 2017)
- [22] J. Będkowski: „Qualitative Spatio-Temporal Representation and Reasoning for robotic applications”, 2013, Pomiary, Automatyka, Robotyka 300-303, nr 2/2013
- [23] J. Będkowski, K. Majek, A. Nüchter: „General Purpose Computing on Graphics Processing Units for Robotic Applications”, 2013, Journal of Software Engineering for Robotics, 4(1), pp. 23-33 ISSN: 2035-3928
- [24] J. Będkowski, K. Majek, P. Musialik, A. Adamek, D. Andrzejewski, D. Czeka: „Towards terrestrial 3D data registration improved by parallel programming and evaluated with geodetic precision”, 2014, Automation in Construction, Volume 47, Pages 78-91
- [25] H. Balta, J. Będkowski, S. Govindaraj, K. Majek, P. Musialik, D. Serrano, K. Alexis, R. Siegwart, G. De Cubber: "Integrated Data Management for A Fleet of Search and Rescue Robots", 2016, Journal of Field Robotics, Volume 34, Issue 3, pp. 539-582
- [26] J. Będkowski, J. Naruniec: “On-line range images registration with GPGPU”, Opto–Electronics Review 21(1), 2013, pp. 52-62 2013, DOI: 10.2478/s11772-013-0074-x
- [27] J. Będkowski, T. Röhling, F. Hoeller, D. Schulz, F. E. Schneider: “Benchmark of 6D SLAM (6D Simultaneous Localisation and Mapping) algorithms with robotic mobile mapping systems”, 2017, Foundations of Computing and Decision Sciences, 42(3), (zaakceptowany do druku)

## 1.5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta

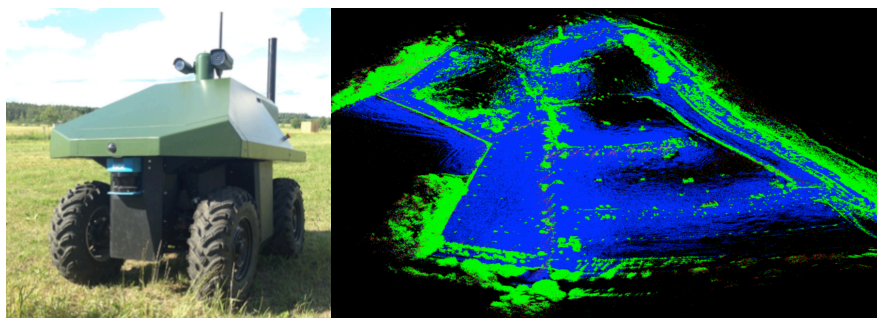
1.5.1 Opracowanie prototypu autonomicznego robota mobilnego mSecurity[1.5.1]. Rysunek B.1 przedstawia prototyp autonomicznego robota mobilnego w zastosowaniu do poszukiwań potencjalnych obiektów niebezpiecznych (np. plecaki, bagaż podręczny) w budynkach infrastruktury krytycznej. Prototyp był testowany w rzeczywistych warunkach na lotnisku w Łodzi oraz w Muzeum Historii Żydów w Warszawie.



Rys. B.1: Prototyp autonomicznego robota mobilnego w zastosowaniu do poszukiwań potencjalnych obiektów niebezpiecznych (np. plecaki, bagaż podręczny) w budynkach infrastruktury krytycznej.

[1.5.1] J. Będkowski, K. Majek, P. Majek, P. Musialik, M. Pełka, A. Nüchter: „Intelligent mobile system for improving spatial design support and security inside buildings”, 2015, Mobile Networks and Applications, Volume 21, Issue 2, pp. 313-326

1.5.2 Udział w opracowaniu prototypu autonomicznego robota mobilnego TARVOS. Jako kierownik naukowy projektu miałem możliwość zaproponowania opracowanej metodyki do autonomicznej nawigacji i lokalizacji robota. Badania potwierdziły, że robot jest w stanie wykorzystać informację jakościową do lokalizacji na mapie semantycznej poligonu o powierzchni 20ha.



Rys. B.2: Autonomiczny robot mobilny TARVOS firmy STEKOP S.A. Mapa semantyczna poligonu badawczego o powierzchni 20ha.

1.5.3 Opracowanie ogólnodostępnej biblioteki programowej (Open-Source) do równoległego przetwarzania danych lidarowych oraz video.

[https://github.com/JanuszBedkowski/gpu\\_computing\\_in\\_robotics](https://github.com/JanuszBedkowski/gpu_computing_in_robotics)

Praca nad ogólnodostępnym oprogramowaniem stanowi istotny wkład badawczy w rozwój dyscypliny naukowej. Oprogramowanie stanowi bazę do tworzenia nowych aplikacji w robotyce mobilnej. W ramach biblioteki zawarte są wszystkie istotne elementy opracowanej metodyki badawczej w tym:

- przetwarzanie chmur punktów 3D (filtracja, rozrzedzanie, wyznaczanie wektorów normalnych),
- klasyfikacja punktów 3D na klasy semantyczne,
- metryki punkt do punktu, punkt do rzutu, powierzchnia do powierzchni, płaszczyzna do płaszczyzny,
- wyrównanie danych (rejestracja) chmura do chmury metodami ICP, ICP semantyczne, LS3D (Least Square Surface Matching), płaszczyzna do płaszczyzny (plane to plane),
- wyrównanie zbioru danych (rejestracja) większej liczby chmur punktów metodami ICP, ICP semantyczne, LS3D (Least Square Surface Matching), płaszczyzna do płaszczyzny (plane to plane),
- metoda wyznaczania ścieżki,
- metoda lokalizacji wykorzystująca filtr cząsteczkowy pracujący na danych semantycznych 3D,
- metoda wyznaczania kolizji geometrycznych dla stacjonarnego robota przemysłowego,
- podstawowe przetwarzanie obrazu 2D w kontekście wyznaczania oraz parowania punktów charakterystycznych na dwóch różnych obrazach.

1.5.4 Opracowanie prototypu autonomicznego robota mobilnego MSAS (ang. Mobile Spatial Assistance System) do wspomagania projektowania przestrzennego. W ramach projektu NCBR LIDER<sup>6</sup> „Badania Mobilnego Systemu Wspomagającego Projektowanie Przestrzenne, 2013-2016, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Instytut Maszyn Matematycznych, którego byłem kierownikiem, opracowałem autonomicznego robota mobilnego wyposażonego w precyzyjny instrument pomiarowy Z+F IMAGER 5010 do tworzenia wysokorozdzielczych map otoczenia oraz algorytmy wspomagające projektowanie przestrzenne. W ramach projektu opracowałem metodykę oceny jakościowej oraz ilościowej algorytmów SLAM.



Rys. B.3: Prototyp autonomicznego robota mobilnego do wspomagania projektowania przestrzennego.

1.5.5 Opracowałem prototyp systemu T&S (Training and Support) w technologii chmurowej [1.5.5]. W ramach projektu „Integrated Components for Assisted Rescue and Unmanned Search operations (ICARUS)”, 2013-2016, EU FP7-IP<sup>7</sup>, w którym byłem liderem WP330 „Training and Support”, (koordynator: Royal Military Academy Bruksela, Instytut Maszyn Matematycznych – polski partner) opracowałem prototyp mobilnego systemu chmurowego zdolnego do gromadzenia, przetwarzania i udostępniania danych z wielu robotycznych systemów mapowania działających współbieżnie w aplikacji wspomagania zarządzania kryzysowego.



Rys. B.4: Prototyp systemu T&S do wspomagania akcji kryzysowych.

[1.5.5] H. Balta, J. Będkowski, S. Govindaraj, K. Majek, P. Musialik, D. Serrano, K. Alexis, R. Siegwart, G. De Cubber: "Integrated Data Management for A Fleet of Search and Rescue Robots", 2016, Journal of Field Robotics, Volume 34, Issue 3, pp. 539-582

---

<sup>6</sup> <http://lider.zms.imm.org.pl>

<sup>7</sup> <http://www.fp7-icarus.eu>

1.5.6 Opracowanie prototypu czujnika RGB-D. Prototyp był testowany w rzeczywistych warunkach w elektrowni atomowej podczas ENRICH 2017<sup>8</sup> (The New European Robotic Hackathon, 19-23 czerwiec 2017, Austria). Zaprezentowane rozwiązanie techniczne mapowania pomieszczenia reaktora w elektrowni atomowej zakładając rzeczywiste warunki operacyjne zostało ocenione przez międzynarodowy zespół ekspertów i wyróżnione nagrodą „Best 3D Mapping” (plik: Za15\_8.pdf).



Rys. B.5: Prototyp nowego czujnika RGB-D.

1.5.7 Opracowanie oraz wdrożenie urządzenia skanującego 3D dla robotyki mobilnej<sup>9</sup>.



Rys. B.6: Wdrożenie urządzenia skanującego 3D dla robotyki.

1.5.8 Utworzenie oraz kierowanie Laboratorium Przetwarzania Obrazów w Zakładzie Modelowania i Symulacji Instytutu Maszyn Matematycznych oraz NVIDIA GPU Research Centre w latach 2014-2016 (plik: Za15\_6.pdf).



.....  
Podpis wnioskodawcy

---

<sup>8</sup> <http://enrich.european-robotics.eu>

<sup>9</sup> [www.mandalarobotics.com](http://www.mandalarobotics.com)