

**RADA NAUKOWA DISCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Wojciecha DUDKA

która odbędzie się w dniu 29 WRZEŚNIA 2021 roku o godzinie 13.00 w trybie
zdalnym na platformie MS Teams*.

Temat rozprawy doktorskiej:

„ Prudent Management of Interruptible Tasks Executed by a Service Robot ”

Promotor : dr hab. inż. Wojciech Szynkiewicz - Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Alicja Mazur – Politechnika Wrocławska

dr hab. inż. Maciej Michałek – Politechnika Poznańska

* Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji dr hab. inż. Pawła Domańskiego: w dniu obrony do godz. 12:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1. Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej : <http://www.elka.pw.edu.pl/Badania-i-nauka/Postepowania-w-sprawach-stopni-naukowych-i-tytulu-naukowego/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Politechniki Warszawskiej
prof. dr hab. inż. Tomasz Starecki

Streszczenie w j. angielskim

Task management is a core ability of living and artificial autonomous entities. In robotics, it is especially crucial for versatile service robots that are tailored to help humans in various duties. In some applications, robots are shared by multiple users that don't agree their requests. Versatile service robots often work in dynamic environments, and their users' needs and preferences change in time. Thus, the robots need an advanced task management ability that includes i.a. dynamic priority assignment, repetitive check of tasks' feasibility and task plans update. Additionally, robots need to foresee the consequences of their task interruption (e.g. leaving a cooker on). Therefore, the problem of prudent task management respecting the danger of interrupting robot's tasks arises. Prudent task management considered in this dissertation is constituted of i.a. safe suspension and resumption of independent tasks, schedule parameters reappraisal invoked by changes in the environment and termination of a queued tasks that are no longer feasible. The research this dissertation describes was targeted to design a model of robot control systems with prudent task management. The model specifies a robot system with an agent-based approach and consists of multiple agents of various classes. A Harmoniser class Agent that manages task requests, initialises tasks and switches their modes of operation following a configurable task management algorithm. The model specifies Dynamic class Agents that execute single tasks described with Hierarchical Finite State Machines (HFSM). States of the HFSM have assigned goals, e.g., a safe suspension management of the current task before a task switch. Thanks to that, the model enables mitigation of the problems in predicting the consequences of the robot's activity interruption. The requirements specified for the conducted study forced convenient configuration of the model to enable its application to various robots executing diverse tasks in different environments. The robot systems are complex, and their overall behaviour is troublesome to describe precisely. Therefore, this dissertation uses a formal method—Embodied Agent Meta-model to specify the robot control system model. Thanks to that, the experiments and the model implementation can be accurately reproduced. What is more, the model can be fitted for other requirements and reused. The model resulted from the research is used to implement two example control systems of different robots (TIAGo mobile robot and Velma mobile manipulator). The robots work in different environments, and various algorithms manage their tasks. The example systems are launched in typical scenarios. The robots' behaviours and their tasks management are confronted with the requirements and constraints of the research.

Keywords: Service robots, System engineering, Finite State Machines, Scheduling, Task analysis

Streszczenie w j. polskim

Zarządzanie zadaniami jest podstawową umiejętnością autonomicznych organizmów żywych i urządzeń. Problem zarządzania zadaniami jest kluczowy dla wszechstronnych robotów usługowych, które pomagają ludziom w wypełnianiu różnych obowiązków. Niekiedy roboty te są współdzielone przez wielu użytkowników, którzy nie uzgadniają ze sobą poleceń dla robota. Wszechstronne roboty usługowe często pracują w zmiennych środowiskach, a do tego ich użytkownicy zmieniają swoje żądania i preferencje. A zatem, takie roboty potrzebują odpowiedniego zarządzania zadaniami. Dzięki niemu robot ustala i aktualizuje priorytety, powtarzalnie sprawdza możliwość wykonania zadań oraz aktualizuje plany wykonania zadań. Ponadto, roboty przerywając obecnie realizowane zadanie, muszą przewidywać konsekwencje wynikające z tego przerwania (np. pozostawienie włączonej kuchenki). System sterowania robota, który posiada wyżej wymienione cechy oraz wstrzymuje/wznawia zadania, odświeża estymaty parametrów szeregowania w reakcji na zmiany w środowisku oraz zamyka zadania oczekujące, które stały się niewykonalne, nazywany jest w tej rozprawie rozważnym.

Problem podejmowany w niniejszej rozprawie to określenie modelu dla systemu sterowania robota, który jest rozważany podczas przełączania zadań. Model ten bazuje na podejściu agentowym i określa wiele agentów, które należą do różnych klas. Agent harmonogramujący zarządza żadaniami zadań, uruchamia zadania oraz zmienia ich tryby pracy według konfigurowalnego algorytmu zarządzania zadaniami. Opracowany model definiuje agenty dynamiczne, które wykonują pojedyncze zadania. Działanie tych agentów jest oparte o hierarchiczne automaty skończone, których stany mają przypisane cele. Przykładowo, wyróżnione są stany zarządzające bezpiecznym wstrzymaniem aktualnego zadania przed wykonaniem przełączenia na inne zadanie. Dzięki temu opracowany model upraszcza problem przewidywania konsekwencji wynikających z przerwania czynności robota oraz umożliwia przeciwdziałanie tym nieporządanym. Jednym z istotnych wymagań dla opisywanych prac jest łatwa i wielokierunkowa konfiguracja modelu. Dlatego możliwe jest wykorzystanie tego modelu w systemach różnych robotów wykonujących rozmaite zadania w zróżnicowanych środowiskach. Model bazuje na rozwiązaniu integrującym wiele robotów, przez co opracowane rozwiązanie może być łatwo zaaplikowane do systemów wielorobotowych. System sterowania wszechstronnego robota usługowego często jest skomplikowany, a opis jego działania jest zawiły i niejasny. W tej rozprawie zastosowano formalną notację agenta upostaciowionego do definicji proponowanego modelu. Dzięki temu model jest szczegółowo przeanalizowany, a efekt pracy, przeprowadzone eksperymenty i implementacja mogą być dokładnie odtworzone.

Wynik opisanych w tej rozprawie badań został wykorzystany do opracowania przykładowych systemów sterowania dwóch robotów: mobilnego robota TIAGo oraz mobilnego manipulatora Velma. Roboty te pracują w różnych środowiskach, a ich zadania są szeregowane przez dedykowane algorytmy. W ramach weryfikacji przeanalizowano opracowany model w kierunku spełnienia założeń postawionych na początku badań. Ponadto skonfrontowano działanie przykładowych systemów sterowania w typowych scenariuszach dla problemu przełączania zadań.

Słowa kluczowe: Roboty usługowe, Inżynieria systemów, Automaty skończone, Szeregowanie, Analiza zadania

**Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Wojciecha Dudka
zatytułowanej "Prudent management of interruptible tasks
executed by a service robot".**

1. Problem badawczy i jego znaczenie.

Problem badawczy rozważany przez autora rozprawy został opisany w rozdziale 1.2. Problem ten obejmuje zaprojektowanie rozważnego systemu sterowania robota usługowego, który pozwoliłby na wykorzystanie robota do realizacji wielu zadań (a więc byłby to robot wielozadaniowy) żądanych przez różnych użytkowników. Robot wielozadaniowy dokonywałby szeregowania zaplanowanych zadań, porzucając zadania nie dające się zrealizować i przechodząc do wykonania kolejnego zadania w taki sposób (nazwany w dysertacji "rozważnym"), aby przerwane zadanie nie było niebezpieczne dla użytkownika (autor podaje sugestywny przykład wyłączenie kuchenki przed przejściem do kolejnego zadania).

Problem badawczy, który był przedmiotem badań autora, jest ściśle związany ze stanem rozwoju robotów usługowych, zwłaszcza robotów społecznych. W dotychczasowych rozwiązaniach robot był przeznaczony do realizacji pojedynczego zadania i dla takiego podejścia były modelowane systemy sterowania. Takim systemem, który był rozwijany w jednostce autora rozprawy, był RAPP. Jednakże podczas prowadzonych badań doktorant zauważył, że naturalnym rozszerzeniem istniejącego systemu byłby system pozwalający na realizację wielu zadań, zgłaszanych przez różnych użytkowników. Opierając się na znanym modelu RAPP oraz wykorzystując teorię automatów skończonych zaproponował swoje rozwiązanie – jest nim system sterowania TaskER.

Znaczenie problemu polega na tym, że zaproponowane rozwiązanie pozwoliłoby na łatwe rozszerzenie funkcjonalności wielu robotów usługowych i społecznych, bez konieczności ponoszenia kosztów przebudowy systemu sterowania, jeśli zaproponowany system byłby modułowy i łatwy do przeprogramowania.

2. Analiza źródeł.

Istnieje kilka sposobów rozwoju systemów cybernetyczno-fizycznych: konwencjonalne, hybrydowe i zwinne. Sposób wyboru odpowiedniego podejścia został zaprezentowany w pracy [41]. Inżynieria oprogramowania oparta na modelu pochodzi z pracy Da Silvy [42]. Model jako abstrakcyjny odpowiednik badanego systemu ma na celu przewidzenie możliwych problemów, które napotkamy w przyszłości.

Kolejną inspiracją do badań był meta-model oparty na agentach, przedstawiony w pracach [49], [38] i [40]. W tym podejściu do specyfikacji systemu jest konieczne zdefiniowanie niezależnych bytów

nazywanych agentami jako pierwotnych części systemu. Agenty współpracują, aby rozwiązać problem będący celem systemu. Systemy oparte na agentach oferują elastyczność i intuicyjną interpretację zachowania systemu. Agenty mogą wpływać na środowisko i przyjmować od niego informację.

Upostaciowiony meta-model agenta znalazł zastosowanie i stał się popularny w systemach cybernetycznych, ze względu na naturalną reprezentację inteligentnego systemu jako współpracujących agentów. Cybernetyczne agenty (oddziałujące na środowisko roboty) ewoluowały do upostaciowionych agentów. Zachowanie agenta jest zbiorem zachowań wszystkich podsystemów tworzących agenta.

Zachowanie podsystemu jest zdefiniowane jako automat skończony. Każde podstawowe zachowanie wykonuje funkcję przejścia (tranzycji) w zależności od stanu wyjścia podsystemu. Mogą zaistnieć także warunki kończące zadanie oraz funkcje błędu.

System RAPP prezentowany w pracy [30] przez C. Zielińskiego i innych, która to pozycja jest zbiorową pracą członków zespołu Politechniki Warszawskiej zatrudniającej doktoranta, był punktem wyjścia do przemyśleń autora rozprawy i podstawą do badań. Pozwalał on na realizację zadań przez kilka robotów, jednak na pojedynczym robocie mogło być wykonane tylko jedno zadanie. Można było za to dodawać zadania do magazynu aplikacji.

Jak widać, autor wybrał odpowiednie pozycje literaturowe i przeanalizował je pod kątem przydatności do prowadzonych przez siebie badań. Etapy poszukiwań źródeł oraz krótkie opisy wyników uzyskanych przez poszczególnych autorów zostały omówione w rozdziale 1.4. Podsumowując, można stwierdzić, że autor poprawnie przeprowadził analizę bibliografii i potrafi umiejscowić swoje wyniki wśród rozwiązań prezentowanych w literaturze światowej.

3. Poprawność rozwiązania.

W rozprawie autor sformułował założenia odnośnie projektowanego rozważnego systemu sterowania robota usługowego, np. możliwość realizacji wielu zadań, możliwość przerwania wykonywanego zadania, jeśli nadejdzie żądanie przejścia do zadania o wyższym priorytecie, uwzględnienie różnorodnych warunków określających konkretne zachowanie systemu, itp.

Przyjęte założenia są słuszne, a z punktu widzenia użytkownika są one oczywiste i intuicyjne, choć nie są łatwe do realizacji. Wielozałaniowe roboty usługowe muszą w odpowiedni sposób zarządzać zadaniami, np. wstrzymywać/wznawiać zadania, zmieniać parametry szeregowania w odpowiedzi na zmiany w środowisku oraz zamykać takie zadania oczekujące, które w międzyczasie stały się niewykonalne.

Pomysł użycia hierarchicznych automatów skończonych jest bardzo trafiony, gdyż np. wyróżnione są stany, które pozwalają na bezpieczne wstrzymanie aktualnego zadania przed przełączeniem na inne, co zazwyczaj wynika z kolejności procesu technologicznego. Automaty skończone umożliwiają zamodelowanie systemu przewidującego konsekwencje nagłego przełączenia zadania, a więc modelowanie ograniczeń.

Z kolei wykorzystanie architektury RAPP oraz upostaciowionych agentów jako punktu wyjścia do modelowania nowego systemu sterowania TaskER okazało się słuszne, gdyż pozwoliło autorowi rozprawy na osiągnięcie zamierzonych celów badawczych. Jest oczywiste, że skoro doktorant wiele lat prowadził badania nad architekturą RAPP to znał od podstaw zasady działania tego systemu. Mając wiedzę na ten temat był w stanie rozszerzyć możliwości wspomnianego systemu na nowe funkcjonalności, oczekiwane jako wyniki badań.

Podsumowując tą część recenzji, można stwierdzić, że wykorzystane narzędzia badawcze są poprawnie dobrane, co pozwoliło na uzyskanie zamierzonych celów naukowych.

4. Wkład autora.

Oryginalność rozprawy polega na tym, że autorowi udało się zamodelować nowy system sterowania robotów, pozwalający na rozszerzenie możliwości dotychczas działających robotów usługowych i społecznych. Takie podejście, pozwalające na łatwe i tanie wykorzystanie istniejących robotów w znacznie szerszym zakresie, nie było dotychczas prezentowane w literaturze przedmiotu. Istotną cechą nowego systemu TasKER jest modułowość oraz wykorzystanie intuicyjnego, a więc łatwego do użycia podejścia agentowego, w szczególności upostaciowionych agentów, podobnych w swym działaniu do agentów pochodzących z systemu RAPP.

W bibliografii przedstawionej na końcu rozprawy znajdują się publikacje, których doktorant jest autorem lub współautorem. O ile w pracach dotyczących systemu RAPP autor rozprawy jest współautorem około 10 pozycji, to jest także jedynym autorem 3 publikacji dotyczących systemu TasKER. To potwierdza tezę, że wyniki zawarte w rozprawie są indywidualnym dorobkiem pana mgr Wojciecha Dudka.

5. Sposób przedstawienia wyników.

Rozprawa jest napisana w sposób zwięzły. Autor poświęcił dużo miejsca na wyjaśnienie istoty badanego problemu, na szczegółowe omówienie poszczególnych elementów systemu TaskER, aplikacji i różnic w porównaniu z dotychczas istniejącymi systemami. Pomimo tego, udało się zachować kompromis pomiędzy jasnością wyводу i obszernością rozprawy.

Dużym walorem edukacyjnym pracy są liczne rysunki, ilustrujące szczegóły omawianych zagadnień, zestawienia i porównania robione także w formie graficznej. Ułatwiają one zrozumienie problematyki przedstawionej w dysertacji.

6. Przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych.

Ze względu na genezę problemu rozważanego w rozprawie, przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych nie budzi wątpliwości. Głównym źródłem inspiracji do badań naukowych przedstawionych w rozprawie był projekt INCARE, w którym autor dysertacji był jednym z wykonawców. Wyniki uzyskane przez doktoranta są wprost aplikowalne do potencjalnych zastosowań będących rozszerzeniem możliwości robotów usługowych i społecznych pracujących obecnie na przypadek wielozadaniowości. Wydaje się, że przypadek robotów realizujących różne zadania i współpracujących z wieloma użytkownikami będzie kolejnym krokiem w projektowaniu robotów usługowych.

7. Podsumowanie.

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez artykuł 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (z późniejszymi zmianami) moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego?

TAK.

B Czy po przeczytaniu rozprawy można stwierdzić, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika?

TAK.

C Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

TAK.

8. Zaliczenie rozprawy do jednej z następujących kategorii:

- a. Nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b. Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c. Spełniająca wymagania,
- d. Spełniająca wymagania z nadmiarem,
- e. Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Podsumowując stwierdzam, że praca pana mgr Wojciecha Dudka stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Doktorant z powodzeniem osiągnął cele badawcze i wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych. Zatem stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Wojciecha Dudka spełnia warunki określone w art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 r. poz. 1789) oraz w związku z art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zm.) wnioskuję o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Alicja Mazur

Alicja Mazur

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Wojciecha Dudka pt.

Prudent Management of Interruptible Tasks Executed by a Service Robot

(Rozważne zarządzanie przerywalnymi zadaniami wykonywanymi przez robota usługowego)

Podstawa prawna: Recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, prof. dra hab. inż. Tomasza Stareckiego, na podstawie uchwały w/w Rady z dnia 18.05.2021 roku.

I Przedmiot i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska tematycznie przynależy do dyscypliny *automatyka i robotyka*, a mianowicie do obszaru informatycznych problemów robotyki, w szczególności do inżynierii oprogramowania w aspekcie projektowania *wysokopoziomowych systemów sterowania autonomicznych robotów usługowych*. Jest to tematyka, którą w ramach nowej klasyfikacji dyscyplin należy zaliczyć do obszaru szeroko rozumianej automatyki będącej częścią dyscypliny *automatyka, elektronika i elektrotechnika*. Problem badawczy poruszany w rozprawie dotyczy opracowania funkcjonalnej i informatycznej struktury (tj. programowego modelu) modułu TaskER (ang. *Task harmonisER*) służącego do szeregowania asynchronicznie zgłaszanych niezależnych zadań w ramach wysokopoziomowego systemu sterowania robota usługowego.

Pomimo coraz częstszego wykorzystania robotyki we współczesnej gospodarce i przez użytkowników prywatnych, zastosowania robotów usługowych w większości przypadków są nadal stosunkowo proste z punktu widzenia problemu szeregowania zadań. Poszerzenie zakresu zastosowań robotyki w szeroko rozumianym obszarze usług (i nie tylko) wymaga dalszego rozwoju układów sterowania systemów cyber-fizycznych. Dlatego w świetle dzisiejszego stanu wiedzy i rozwoju robotyki usługowej tematyka rozprawy jest ważna i aktualna.

Umiejętne szeregowanie zadań, zgłaszanych do realizacji przez użytkowników zewnętrznych, umożliwia wielowątkowość działań robota i tym samym zwiększa elastyczność jego wykorzystania w zastosowaniach praktycznych. Zaproponowana w rozprawie możliwość dynamicznego przerywania, przełączania, wznawiania bądź terminowania zadań w systemie sterowania, z zachowaniem nałożonych warunków bezpieczeństwa i efektywności pracy systemu, przybliża funkcjonowanie robota usługowego do zachowania istot inteligentnych. W konsekwencji, akceptacja takiej maszyny przez ludzi-użytkowników może być szersza i bardziej entuzjastyczna w różnych zastosowaniach usługowych. Pomimo licznych prac opublikowanych na temat szeregowania zadań zagadnienie badawcze poruszane w rozprawie jest nadal aktualne. Czasowo-przestrzenny charakter asynchronicznie zgłaszanych zadań - typowy w zastosowaniach systemów cyber-fizycznych jakimi są roboty usługowe - czyni zagadnienie szeregowania tych zadań problemem trudnym i krytycznym z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz efektywności działania robotów autonomicznych wykonujących misje w rzeczywistym środowisku dynamicznym i w bezpośredniej obecności ludzi. Doktorant zaproponował oryginalne rozwiązanie problemu szeregowania zadań robotów z możliwością ich dynamicznego przerywania i wznawiania, wykorzystując do tego celu agentową architekturę układu sterowania opracowaną dla robotów autonomicznych.

W pierwszym rozdziale rozprawy (punkt 1.3, str. 22) jawnie sformułowano trzy zasadnicze tezy badawcze, zgodnie z którymi Autor stwierdza, że:

- T1. przełączanie niezależnych zadań zgłaszanych w systemie sterowania robota usługowego umożliwia uzyskanie kompromisu między wygodą i bezpieczeństwem ludzi-użytkowników, a także bezpieczeństwem samego robota oraz obiektów obecnych w środowisku jego działania,
- T2. szeregowanie zadań w różnych aplikacjach robota wymaga implementacji różnych (tj. dedykowanych) algorytmów szeregowania i zdefiniowania odpowiednich parametrów szeregujących dla tych algorytmów,



T3. proponowany model TaskER systemu sterowania robota usługowego ma charakter uniwersalny, tzn. jest rekonfigurowalny w aspekcie wyboru: algorytmu szeregowania, parametrów szeregujących, interfejsów zgłaszania zadań, a także dostępnego zbioru zadań realizowanych przez robota; poza tym model TaskER sprzyja bezpieczeństwu oraz wygodzie użytkownika poprzez zarządzanie niezależnymi przerywalnymi zadaniami w dynamicznym środowisku pracy.

Tak postawione tezy są czytelne. Jednak niektóre stwierdzenia w nich zawarte są dość ogólne i przez to niełatwe do wykazania. Kłopotliwe wydaje się jednoznaczne potwierdzenie uzyskania kompromisu wspomnianego w tezie T1, a w szczególności wykazanie wygody użytkownika deklarowanej w тезach T1 i T3 w przypadku braku zdefiniowania obiektywnych miar umożliwiających ocenę tych cech systemu.

Rozprawa przedstawia rozwiązanie problemu szeregowania zadań robota usługowego, które składa się z następujących elementów:

- sformułowanie problemu szeregowania zadań oraz sformułowanie wymagań stawianych układowi sterowania autonomicznego robota usługowego,
- zdefiniowanie ograniczeń, w ramach których proponowane rozwiązanie może działać skutecznie,
- określenie struktury układu sterowania robota usługowego pozwalającej na skuteczną implementację funkcji szeregowania przerywalnych zadań realizowanych w środowisku dynamicznym,
- projekt i opis formalny modelu TaskER modułu zarządzania szeregowaniem zadań kompatybilnego z agentową strukturą RAPP układu sterowania robota autonomicznego,
- implementacja modułu szeregowania zadań w oparciu o model TaskER w środowisku programowym ROS (ang. *Robot Operating System*),
- weryfikacja wybranych scenariuszy szeregowania zadań w symulatorze Gazebo dla robota mobilnego typu TIAGo (platforma mobilna klasy (2,0)) oraz dwuręcznego manipulatora mobilnego Velma (z platformą mobilną klasy (3,0)),
- walidacja doświadczalna wybranego scenariusza zadań usługowych w rzeczywistym środowisku dynamicznym w obecności ludzi z wykorzystaniem fizycznego robota TIAGo wyposażonego w opracowany moduł szeregowania.

II Kompozycja i redakcja rozprawy

Rozprawa została zredagowana w języku angielskim; składa się z pięciu rozdziałów, słownika specjalistycznych terminów i zastosowanych symboli, streszczenia w języku angielskim i języku polskim oraz bibliografii (114 pozycji, w tym 6 odwołań do stron internetowych). Rozdział pierwszy wyjaśnia motywację podjętych badań, wprowadza w problematykę dysertacji, ukazuje tło przeprowadzonych badań, definiuje tezy rozprawy, a także wyjaśnia jej organizację. Rozdział drugi omawia wymagania dotyczące stawianego problemu, ograniczenia narzucone na proponowany system szeregowania zadań, a także zastosowaną notację formalną. Zasadnicze wyniki rozprawy zawarte zostały w rozdziale trzecim, gdzie zaprezentowano strukturę, zasadę działania oraz sposób konfiguracji systemu szeregowania zadań TaskER (ze szczegółowym opisem dwóch podstawowych dla modułu TaskER struktur agentów - agenta dynamicznego i agenta harmonizującego) oraz w rozdziale czwartym, w którym przedstawiono symulacyjną weryfikację jakości działania systemu sterowania z zaproponowanym modułem szeregowania zadań dla wybranych niezależnych scenariuszy działania dwóch różnych robotów usługowych – TIAGo i Velma. Podano także odniesienie do zarejestrowanego filmu wideo z weryfikacji eksperymentalnej systemu szeregowania TaskER. Rozdział piąty zawiera uzasadnienie tez postawionych w rozdziale pierwszym w kontekście uzyskanych wyników, plasuje proponowane rozwiązanie na tle alternatywnych wyników znanych z literatury, podsumowuje dysertację i podaje zarys możliwych przyszłych prac badawczych związanych z dalszym rozwojem zaproponowanego systemu szeregowania.

Zasadniczy tekst rozprawy został przygotowany starannie, z dbałością o stronę językową (klarowność i zwięzłość wypowiedzi, płynność narracji) oraz o logikę wywodu (stosowny układ treści i porządek prezentacji), popartą schematami blokowymi, rysunkami, diagramami, tablicami, przykładowymi algorytmami i wykresami. Znalezione w tekście stosunkowo nieliczne usterki i niezręczności redakcyjne zostały wyszczególnione w punkcie IV.A niniejszej recenzji. Bardzo pomocny w zrozumieniu treści dysertacji jest słownik zasadniczych terminów oraz



lista symboli zebranych na samym początku tekstu (strony 11-15). Notację formalną oraz podstawowe terminy używane w opisie systemu wyjaśniono w rozdziale drugim (punkt 2.4). Uzupełnieniem tekstu są wizualizacje wybranych wyników działania systemu dostępnych poprzez stronę internetową macierzystego Instytutu Doktoranta. Wizualizacje te w intuicyjny sposób ilustrują możliwości oraz jakość działania systemu sterowania z opracowanym modułem TaskER. W konsekwencji idea zaproponowanego systemu szeregowania zadań jest przekonująca i zrozumiała. Mimo to, percepcja szczegółów technicznych przedstawionych w rozprawie nie jest łatwa ze względu na mnogość symboli oraz indeksów o naturze 'informatycznej' zastosowanych w notacji formalnej. Jest to jednak bezpośredni skutek chęci uzyskania ścisłości i jednoznaczności zapisu formuł logicznych i teoriomnogościowych wymaganych przy opisie modelu i analizie tego typu systemów. Zastosowany formalizm opisu wynika również z zamiaru zachowania kompatybilności z notacją stosowaną w ramach istniejącego rodzimego modelu RAPP systemu sterowania robota autonomicznego opartego o koncepcję agentów upostaciowionych (ang. *Embodied Agent Meta-model*).

Zbiór bibliograficzny zawarty w rozprawie, wprowadzenie w tematykę rozprawy podane w rozdziale pierwszym, a także jakościowe porównanie zaproponowanego systemu szeregowania z alternatywnymi rozwiązaniami tego typu znanymi z literatury przedmiotu wykazują dobre rozeznanie Doktoranta w zakresie metodyki projektowania systemów informatycznych dla problemów wysokopoziomowego sterowania systemami cyber-fizycznymi (szczególnie w robotyce usługowej). Ponadto, Doktorant wykazał dobrą znajomość wyników uzyskanych w obszarze robotyki zarówno przez krajowych jak i zagranicznych badaczy. Strona redakcyjna bibliografii nie spełnia jednak najwyższych standardów - liczne elementy bibliografii zostały zredagowane nieprecyzyjnie lub są niekompletne (szczegóły podano w punkcie IV.A recenzji).

III Ocena zastosowanej metodyki badawczej i uzyskanych wyników

Proponowane rozwiązanie problemu szeregowania zadań dla robota usługowego oparto na trzech filarach metodycznych:

- na inżynierii opartej o model systemu (ang. *model-based engineering*),
- na agentowej koncepcji systemu sterowania (w szczególności na koncepcji agenta upostaciowionego ze względu na cyber-fizyczny, a nie czysto informatyczny, charakter poruszanego problemu),
- na opracowanej (także z udziałem Doktoranta) agentowej architekturze RAPP systemu sterowania robotem autonomicznym.

Zastosowanie metodyki wynikającej ze stosownego połączenia trzech wyżej wymienionych koncepcji jest w ocenie recenzenta zasadne i skutkuje modułowym podejściem do projektowania uniwersalnych systemów sterowania robotów autonomicznych. Modułowość systemu pociąga za sobą zwykle dwie ważne cechy rozwiązania, mianowicie skalowalność oraz uniwersalność (elastyczność), a często także względną prostotę implementacji, które mają bardzo istotne znaczenie użytkowe, zwłaszcza w złożonych systemach cyber-fizycznych. Wybór takiej metodyki wydaje się w tym przypadku naturalny, ponieważ Doktorant wywodzi się ze znanej warszawskiej szkoły robotyki rozwijającej od wielu lat systemy sterowania typu agentowego. Wyniki dysertacji przyczyniają się w ten sposób do dalszego rozwoju funkcjonalności oryginalnej architektury RAPP, czyniąc ją jeszcze bardziej elastyczną i atrakcyjną z punktu widzenia jej możliwych zastosowań praktycznych. W mojej ocenie, architektura RAPP rozszerzona o funkcjonalność szeregowania przerywalnych zadań jest oryginalnym i konkurencyjnym rozwiązaniem (w sensie koncepcyjnym i prototypowym) w skali międzynarodowej, o czym mogą świadczyć choćby dwie publikacje powstałe z udziałem Doktoranta, cytowane w dysertacji jako [30] i [58], które zyskały aprobatę recenzentów i edytorów renomowanych czasopism branżowych. Umożliwienie zalgorytmizowanego przerywania zadań i ich wznowienia w zachowaniu bezpieczeństwa działania systemu usługowego pozwoliło Doktorantowi rozszerzyć oryginalną klasyfikację zadań stawianych systemom cyber-fizycznym (podaną w klasycznej publikacji [69]) w kontekście harmonizacji ich wykonania. Jest to kolejny krok w kierunku uelastycznienia wysokopoziomowych systemów sterowania robotów.

Doktorant rozszerzył architekturę RAPP o moduł szeregowania poprzez modyfikację oryginalnego agenta zasadniczego (ang. *Core Agent*) wprowadzając trzy agenty składowe: agenta wywołującego zadanie (ang. *task requester agent*), agenta harmonizującego zadanie (ang. *task harmoniser agent*) oraz agenta wykonawczego (ang.

executor agent). Zadania zgłaszane do systemu zostały podzielone na etapy (ang. *stages*) dwojako rodzaju: przerywalne i blokujące (nieprzerywalne). Wprowadzenie etapów nieprzerywalnych stanowi podstawowy element proponowanego mechanizmu zapewniania bezpieczeństwa działania systemu (podkreślonym w tytule dysertacji wyrażeniem ang. *prudent management*). Etapy blokujące reprezentują bowiem te fragmenty zadania, które nie mogą zostać przerwane bez narażenia na niebezpieczeństwo samego robota i/lub jego otoczenia (przynajmniej w ocenie projektanta systemu, który musi przewidzieć a priori potencjalne konsekwencje przerwania zadania w konkretnych jego etapach). Wyróżniając z kolei etapy przerywalne wydzielono w ten sposób niejako 'czasowo-przestrzenne sloty', w ramach których system szeregowania może bezpiecznie przełączać zadania realizowane przez robota. Zaproponowany mechanizm zachowania bezpieczeństwa może być skuteczny w wielu praktycznych zastosowaniach, wymaga jednak od projektanta systemu dość znacznej wiedzy wstępnej na temat skutków realizacji poszczególnych zadań robota, a także wymaga (raczej żmudnego) niejako 'ręcznego' podziału bardziej złożonych zadań na dwa wyróżnione rodzaje etapów.

Agenty modułu TaskER mogą wymieniać informacje między sobą i z otoczeniem systemowym poprzez wejściowe i wyjściowe bufory danych. Jest to intuicyjny i wygodny sposób wymiany informacji, szeroko stosowany we współczesnych systemach robotycznych. Podstawowe zachowania agentów zakodowano wykorzystując maszyny stanów skończonych (ang. *Finite-State Machines*) zwane też automatami skończonymi. Użycie maszyn stanów skończonych jest zasadne, ponieważ gwarantuje kompletność, niesprzeczność i jednoznaczność realizacji zachowań na podstawie decyzji podjętych przez moduł szeregowania.

Zastosowany z rozdziału trzecim formalny opis podstawowych bytów informatycznych (klasy agentów, bufory danych, automaty skończone), mechanizmów działania (podstawowe zachowania i związane z nimi funkcje przejścia i stany) oraz sposobów wymiany informacji między agentami umożliwia ściśle określenie struktury oraz funkcjonalności modelu TaskER na wysokim poziomie abstrakcji. Taki sposób prezentacji koncepcji systemu pozwala na przenoszenie zaproponowanej idei szeregowania zadań oraz implementację modelu TaskER z wykorzystaniem różnych platform sprzętowo-programowych, a także umożliwia łatwiejszą weryfikację poprawności działania systemu w różnych zastosowaniach. Są to niewątpliwie istotne zalety proponowanego rozwiązania i sposobu jego reprezentacji. Model szeregowania zadań TaskER umożliwia implementację różnych strategii szeregowania (zwykle optymalizujących pewne wybrane lub narzucone funkcje kosztu) wynikających z zaimplementowanych operacji wyznaczających w czasie rzeczywistym decyzje szeregowania na podstawie bieżących wartości tzw. parametrów szeregowania. Na uwagę zasługuje uniwersalność zaproponowanego modelu i elastyczność jego potencjalnego wykorzystania w różnych aplikacjach (nie tylko robotycznych).

Działanie zaprojektowanego systemu szeregowania zadań zostało zweryfikowane symulacyjnie w środowisku Gazebo - popularnym graficznym środowisku symulacyjnym 3D często wykorzystywanym w pracach badawczych w obszarze robotyki. Symulacje wykonano dla dwóch rodzajów scenariuszy usługowych: (1) scenariusza wymagającego realizacji prostych zadań, ale o złożonym mechanizmie szeregowania (robot TIAGo), (2) scenariusza wymagającego realizacji złożonych zadań jednak stosującego względnie prosty mechanizm szeregowania (robot Velma). W celu przeprowadzenia symulacji Autor zaimplementował poszczególne elementy funkcjonalne systemu korzystając ze środowiska ROS. Użycie tego środowiska jest w pełni uzasadnione, gdyż filozofia budowy i wymiany informacji w ramach ROS bardzo dobrze koresponduje z zaproponowanym modelem systemu szeregowania zadań. Doktorant szczegółowo wyjaśnił sposób tworzenia poszczególnych elementów składowych systemu, podał wymagane zestawy parametrów szeregujących, a także przedstawił zastosowany algorytm szeregowania dla scenariusza (1); dla scenariusza (2) takiego algorytmu nie podano w sposób jawny. Opis wyników symulacji uzyskanych dla scenariusza (1) został podany z dbałością o szczegóły, łącznie z wykresami przebiegów wartości parametrów szeregujących oraz z diagramem sekwencji zdarzeń i działań podejmowanych przez system szeregowania. Ponadto, w punkcie 4.2.4 przedstawiono przekonującą analizę spełnienia wymogów R1-R6 (sformułowanych w punkcie 2.2) przez system szeregowania użyty w scenariuszu (1). Niestety, podobnej analizy dla scenariusza (2) nie przedstawiono. Pomimo słownego opisu wyników symulacji, zrozumienie zależności przestrzenno-czasowych dla poszczególnych scenariuszy tylko w oparciu o tekst dysertacji jest trudne dla czytelnika. Dużą pomocą są jednak wizualizacje uzyskanych wyników w postaci filmów (animacji) ilustrujących sekwencję poszczególnych zdarzeń, które zostały udostępnione przez Autora poprzez odnośniki na stronie

macierzystego Instytutu. Wybrany scenariusz działań systemu szeregowania (podobny do scenariusza (1)) poddano także walidacji eksperymentalnej z wykorzystaniem rzeczywistego robota TIAGo poruszającego się w dynamicznym środowisku w obecności ludzi. Uzyskane wyniki zarejestrowano w postaci filmu wideo, również dostępnego poprzez odnośnik na stronie macierzystego Instytutu Doktoranta. Należy podkreślić, że skuteczna walidacja systemu w środowisku rzeczywistym (nawet jeżeli jest ono 'dedykowane') stanowi trudne zagadnienie, a osiągnięcie pozytywnych wyników obserwowanych na filmie istotnie uwiarygadnia zasadność przedstawionej koncepcji i efektywność implementacji systemu szeregowania TaskER. Tym bardziej należy docenić znaczenie zaprezentowanego rozwiązania i uzyskanych wyników.

Pomimo zdecydowanie pozytywnej oceny uzyskanych wyników weryfikacyjnych, zaprezentowane przykłady scenariuszy mają raczej charakter studium przypadku. Trudno zatem jednoznacznie stwierdzić czy proponowany system szeregowania będzie równie skuteczny także w krytycznych warunkach pracy, np. przy większej liczbie niezależnych zadań zgłaszanych do systemu z większą częstotliwością, w przypadku wystąpienia zadań 'egoistycznych' (tj. z przeważającą liczbą stanów blokujących niepozwalających na efektywne przełączanie zadań), czy też przy wystąpieniu takich skutków realizacji zadań, których nie można było precyzyjnie przewidzieć w ramach wymagania R5 ze strony 35. Sprawdzenie działania modułu szeregowania, zwłaszcza w kontekście uzyskania kompromisu między wygodą użytkowników a bezpieczeństwem realizacji zadań, w różnorodnych warunkach pracy (np. przeprowadzając analizę statystyczną Monte Carlo) byłoby ciekawe i umożliwiłoby szerszą ocenę jakości działania systemu. Interesujące byłoby również zdefiniowanie miar jakości działania systemu TaskER i przeprowadzenie analizy ilościowej dla zaproponowanego systemu szeregowania w różnych warunkach pracy (Autor sam uznaje zasadność takich badań definiując problem nr 4 w ramach przyszłych prac badawczych omówionych w punkcie 5.3 na stronach 95-96).

Ciekawym i istotnym dla dysertacji jakościowym podsumowaniem uzyskanych wyników jest dyskusja zawarta w rozdziale piątym, gdzie porównano funkcjonalność i zasadnicze cechy systemu sterowania z modułem TaskER do innych metod rozwiązania problemu szeregowania zadań znanych z literatury (zarówno w kontekście zadań robotów jak i zadań charakterystycznych dla systemów operacyjnych komputerów). W porównaniu tym odniesiono się między innymi do ważnych prac z okresu ostatnich dziesięciu lat, do aktualnie bardzo popularnych metod uczenia maszynowego, a także do wybranych pionierskich prac z zakresu cybernetyki. Taki przekrój odniesień świadczy o tym, że Doktorant zna zarówno współczesne rozwiązania jak i pierwotne źródła wiedzy w zakresie tematyki dysertacji. W rozdziale piątym przeanalizowano zasadnicze cechy i ograniczenia dyskutowanych metod, ukazując na tym tle (w sposób przekonujący) oryginalność i niewątpliwe zalety rozwiązania problemu szeregowania zaprezentowanego przez Doktoranta. Ponadto, w podsumowaniu rozprawy (punkt 5.2) Autor, poprzez bezpośrednie odwołanie się do uzyskanych wyników, zasadnie potwierdził spełnienie wszystkich trzech tez T1-T3 sformułowanych w rozdziale pierwszym w punkcie 1.3.

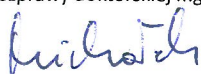
Na podstawie powyższych komentarzy i treści rozprawy stwierdzam, że w mojej opinii oryginalne osiągnięcie Doktoranta składa się z trzech zasadniczych elementów, mianowicie:

- z opracowania koncepcji rozwiązania problemu szeregowania niezależnych i przerywalnych zadań dynamicznie zgłaszanych w cyber-fizycznym systemie robota usługowego z zachowaniem bezpieczeństwa realizacji tych zadań,
- z zaproponowania funkcjonalnego i programowego uniwersalnego modelu rozproszonego systemu szeregowania zadań TaskER (opracowanego w ramach agentowej architektury RAPP) i formalnego opisu jego elementów składowych,
- z przykładowych implementacji modułu TaskER w środowisku ROS i ich symulacyjnej oraz eksperymentalnej weryfikacji dla wybranych scenariuszy misji sformułowanych dla robotów usługowych.

IV Komentarze, pytania oraz uwagi krytyczne i polemiczne

IV.A Uwagi krytyczne i wyjaśniające

[UK1] Stany ze zbioru 'fsmState' wymienione w ramach formuły (3.15) na stronie 47 nie zostały wyjaśnione w tekście, co utrudnia zrozumienie tego fragmentu rozprawy. Proszę o wyjaśnienie znaczenia tych stanów.



[UK2] W formule (3.21) na stronie 51 wprowadzono warunek '*timer(.)*', którego znaczenie nie zostało wyjaśnione w tekście (ani odwołane do tablicy ze słownika na str. 15). Dalej, w formule (3.23) na stronie 52 brakuje warunków logicznych wykonania poszczególnych funkcji 'pf' - czy te funkcje są wykonywane bezwarunkowo? Poza tym z zapisu (3.23) nie jest jasne w jaki sposób są wykonywane dwie funkcje 'pf' - czy jest to sekwencja operacji?

[UK3] W różnych miejscach tekstu (np. na str. 52) Autor pisze o tzw. 'hipotetycznych parametrach szeregowania'. Ten aspekt nie został dostatecznie jasno przedstawiony. Czym w ogólności są te hipotetyczne parametry i jaką rolę mogą odgrywać w systemie szeregowania zadań? Który element systemu jest odpowiedzialny za wyznaczanie tych hipotetycznych parametrów?

[UK4] Uwagi terminologiczne:

- Zastosowana terminologia jest zasadniczo poprawna i akceptowalna. Wątpliwości budzi jednak stosowanie terminu 'parametr/parametry' na określenie (jak się wydaje) tzw. zmiennych szeregujących, których wartości mogą ulegać zmianie w wyniku rzeczywistych pomiarów realizowanych przez robota lub w wyniku działania innych agentów wpływających na decyzje szeregujące (np. ostatnie zdanie na str. 32). Terminem 'parametry' należałoby nazywać raczej te wielkości projektowe, które nie zależą od stanu środowiska robota czy też stanu samego robota, a wynikają raczej z procesu 'strojenia' algorytmu szeregowania zadań przez projektanta systemu.
- Termin '*constant-task*' użyty w punkcie 2 listy na stronie 64 jest mylący; raczej powinno być *non-interruptible task*.

[UK5] Tytuły punktów 4.2 i 4.3 wydają się językowo wątpliwe – parametry nie mogą być ani złożone ani proste. Czy Autorowi chodziło tu o złożony lub prosty mechanizm szeregowania? Poza tym jak należy rozumieć wyrażenie '*the first derivative of the task cost*' użyte w czwartej linii od dołu strony 70 i jakie ta 'pochodna' ma znaczenie dla mechanizmu szeregowania zadań?

[UK6] Definicja kosztu ze wzoru (4.5), w którym koszt zmniejsza się wraz ze wzrostem czasu oczekiwania użytkownika (tj. czasu stania '*t_{stand}*' lub czasu siedzenia '*t_{sit}*') wydaje się mało intuicyjna, albo podana interpretacja tego kosztu nie została wystarczająco czytelnie wyjaśniona w tekście. Proszę wyjaśnić interpretację kosztu (4.5) i sposób jego wykorzystania w procesie szeregowania zadań.

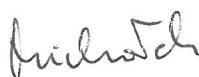
[UK7] Opis kosztów składowych podany w ramach listy na stronie 76 jest niejasny. Jak takie koszty są obliczane/wyznaczane? Jaka jest interpretacja tych kosztów i jakie jest ich znaczenie dla problemu szeregowania zadań?

[UK8] Zaprezentowane w pracy wyniki działania systemu uzyskano dla dwóch wybranych scenariuszy zadań w warunkach 'nominalnych', co nie pozwala jeszcze na potwierdzenie skuteczności systemu TaskER w bardziej ogólnych warunkach pracy, np. w warunkach krytycznych. Proszę zatem skomentować możliwe konsekwencje działania systemu szeregowania TaskER w następujących warunkach:

- przy większej liczbie niezależnych zadań zgłaszanych z różnych źródeł z dużą częstotliwością,
- w przypadku zgłaszania wielu zadań z przeważającą liczbą stanów blokujących,
- przy wystąpieniu skutków realizacji zadań robota, których nie można było precyzyjnie przewidzieć a priori (jak tego wymaga warunek R5 ze strony 35).

[UK9] Zastosowanie symbolu 'x' w tablicy 3.1 na str. 54 (wartość częstotliwości w Hz) jest mylące, ponieważ ten sam symbol użyto potem na str. 56 do oznaczenia bufora (komentarz pod formułą (3.38)), a następnie znowu (w tym samym komentarzu) jako częstotliwość.

[UK10] Kropka na końcu linii przed równaniem (3.21) na stronie 51 jest niewłaściwa.



[UK11] Brakuje zamknięcia nawiasu na końcu tekstu w opisie czwartej 'kropki' z listy na stronie 57.

[UK12] W kilku miejscach Autor odnosi się w treści rozprawy do numerów równań, które jeszcze nie zostały wprowadzone (np. na stronach: 39, 46-47, 53, 56-58, 81). Jakkolwiek takie odniesienia są dopuszczalne w tekstach anglojęzycznych, nie jest to jednak dobra praktyka, ponieważ wymaga od czytelnika albo przeskoków podczas czytania tekstu (brak płynności), albo wprowadza niebezpieczeństwo konfundowania czytelnika.

[UK13] Nie wszystkie elementy użyte w opisie notacji wprowadzonej w punkcie 2.4 zostały w pełni wyjaśnione - niejasne jest znaczenie symbolu 'exa' przy pierwszym jego wprowadzeniu (druga linia nad równaniem (2.1) na stronie 39) i w konsekwencji symboli ${}^R A_{\text{exa}}$ i ${}^I A_{\text{exa}}$ (elementy w równaniach (2.3) i (2.4)). Podobnie nie wyjaśniono indeksu 'j' w symbolu FSM_j na stronie 40. Ponadto zastosowano ten sam symbol 's' do oznaczenia 'systemu' (str. 39) oraz 'stanu' (str. 40), co jest mylące. W tablicy oznaczeń na stronie 15 indeks 'r' przy symbolach zbiorów 'D', 'F' i 'G' zamiast prawym-dolnym powinien być raczej indeksem lewym- górnym (tj. 'D', 'F' i 'G'), aby zachować spójność symboliki wprowadzonej dla zbiorów (por. np. wzór (2.4)).

[UK14] Sposób przytaczania wzorów w treści punktów 1, 5 i 6 z listy na stronie 64 jest z językowego punktu widzenia niezgrabny i niepełny (nie komponuje się z sensem poszczególnych zdań); podobne niezręczności można znaleźć na stronach 78-79 i 82.

[UK15] Odwołania do algorytmów Alg.1 oraz Alg. 2 na stronach 68 i 71 oraz do algorytmu Alg. 3 na stronie 71 są istotnie oddalone od miejsc, w których przedstawiono te algorytmy, co utrudnia orientację w treści rozdziału czwartego. Formuły (4.3)-(4.4) oraz jedna nienumerowana formuła przed (4.3) nie są połączone treściowo z tekstem (lub kropka umieszczona na końcu linii przed tymi formułami jest błędna). Odwołanie na stronie 71 do linii nr 22 algorytmu 2 wydaje się nieprawidłowe (odwołanie raczej powinno dotyczyć linii 23 lub obu linii 22-23 tego algorytmu).

[UK16] Górne indeksy w symbolach oznaczających stany na rysunku 4.2 (np. $S_{dy}^{st,1,1}$) nie są w pełni zgodne z symbolami użytymi w tekście i w podpisie rysunku 4.2. Wydaje się, że z lewej strony wzorów (4.7) i (4.10) brakuje litery 'p' (raczej powinno być: $p f^{compSP1}$). W opisie osi czasu na rysunkach 4.5 i 4.6 brakuje jednostek czasu (podobnie brakuje jednostek w tekście przy zapisie typu 'time=2450'). Jakże to są jednostki? Wydaje się, że na rysunku 4.9(b) chwile czasu powinny być oznaczone jako t_1 , t_2 i t_3 (a jest t_1 , t_1 i t_2).

[UK 17] Zdanie '*Hence, the requirement R5 ... is satisfied.*' zostało niepoprawnie zredagowane w liniach 2-3 tekstu licząc od góry strony 80 (problem edycyjny).

[UK18] Bibliografia nie jest ułożona alfabetycznie, co znacznie utrudnia poruszanie się po niej. Treść wielu pozycji bibliograficznych zawiera skróty lub nazwy, które zredagowano małymi literami, a powinny być pisane dużymi literami – są to pozycje [5], [18], [20], [25], [27], [28], [30], [31], [37], [41], [45], [46], [48], [49], [52], [53], [55], [61], [63], [70], [75], [82], [84], [86], [91], [98], [101], [104], [114]]. Przy niektórych pozycjach literatury brakuje numerów stron lub miejsca publikacji – są to pozycje [39], [59], [64], [75], [90], [94], [98], [114]].

IV.B Komentarze i uwagi polemiczne

[UP1] W pracy przedstawiono zarówno wymagania stawiane systemowi szeregowania jak i narzucono pewne ograniczenia (rozważanie wyłącznie zadań realizowanych przez pojedynczego robota; rozważanie scenariuszy, w których pojedynczy robot może realizować pojedyncze zadanie i tylko jedno zadanie z danej chwili, str. 38). Nie podano jednak pewnych istotnych z praktycznego punktu widzenia założeń, które należy spełnić, aby system szeregowania (a z nim cały system sterowania) mógł skutecznie działać w rzeczywistym układzie sterowania z fizycznymi platformami mobilnymi. W szczególności narzucają się dwa takie założenia:

- o dostępie do informacji o dostatecznie wysokiej wiarygodności (często wynikającej jednak z realizacji rzeczywistych i niepewnych pomiarów robota), na podstawie której wyznaczane są decyzje szeregowania zadań (założenie potrzebne w celu zapewnienia determinizmu i adekwatności podejmowanych decyzji),
- o wystarczająco efektywnej komunikacji sieciowej (tj. o wystarczająco małym opóźnieniu komunikacyjnym i braku efektu zrywania połączeń) między agentami w celu skutecznej wymiany informacji w przypadku rozproszonej implementacji systemu na różnych fizycznych maszynach obliczeniowych.

Proszę skomentować powyższe założenia – czy są one istotne i czy są one silne (tj. trudne do spełnienia w warunkach operacyjnych)? Czy przykładowo pojedynczy agent, działający na innym komputerze i połączony z systemem TaskER wąskim gardłem komunikacyjnym może zdestabilizować cały system szeregowania zadań?

[UP2] Jaka jest skalowalność systemu TaskER w kontekście: (A) liczby uruchomionych agentów dynamicznych związanych z realizacją zadań przez wiele robotów, a także (B) liczby fizycznych maszyn (komputerów), na których system sterowania z modułem TaskER jest zaimplementowany?

[UP3] Doktorant nie zdefiniował miar, które umożliwiłyby ilościową ocenę efektywności szeregowania zadań przez zaproponowany moduł TaskER. Jakie miary do oceny ilościowej można byłoby potencjalnie zaproponować dla systemu TaskER?

[UP4] Modułowość oraz rozproszony charakter systemu sterowania w architekturze RAPP wraz z zaproponowanym podsystemem TaskER umożliwia jego zastosowanie także w przypadku systemu wielu robotów (Autor wspomina o tym w drugim akapicie podrozdziału 2.3.2 na str. 38). Problem szeregowania zadań dla systemu wielorobotowego był tematem kilku ostatnio opublikowanych prac. Proszę o jakościowe odniesienie się do następujących publikacji i uplasowanie wyników zawartych w rozprawie na tle wskazanej niżej literatury:

- [a1] H. Wang, W. Chen, J. Wang: **Coupled task scheduling for heterogeneous multi-robot system of two robot types performing complex-schedule order fulfillment tasks**, Robotics and Autonomous Systems, 131: 103560, 2020
- [a2] E. Bischoff, F. Meyer, J. Inga, S. Hohmann: **Multi-Robot Task Allocation and Scheduling Considering Cooperative Tasks and Precedence Constraints**, <https://arxiv.org/abs/2005.03902v1>, 2020
- [a3] V. Tereshchuk: **Multi-Robot Task Allocation and Scheduling for Efficient Aircraft Structure Assembly**, PhD Thesis, University of Washington, 2020
- [a4] Y. Zhang, W. Smith: **Achieving Multi-Tasking Robots in Multi-Robot Tasks**, <https://arxiv.org/abs/2007.00775>, 2020

[UP5] Opracowanie modułu TaskER poprzedzono specyfikacją wymogów (punkty R1-R6 na str. 34-35, a także komentarz do wymogu R5 w przypisie nr 5 na stronie 80), które muszą być spełnione, aby móc skutecznie zastosować proponowaną koncepcję szeregowania. Niektóre zapisy w ramach wymagania R5 wydają się dość silne, szczególnie te związane z koniecznością przewidywania zmian w środowisku będących efektem realizacji zadań przez robota. Tego typu przewidywanie *a priori* ma charakter predykcji niejako 'w torze otwartym' (tj. bez możliwości korekty prognozy w trakcie działania systemu). Czy wobec tego wymaganie R5 (w zakresie przewidywania) jest realistyczne w warunkach rzeczywistych, przy niepewnych pomiarach oraz w dynamicznie zmiennym i nieprzewidywalnym środowisku robota? Jakich trudności w procesie szeregowania zadań można się spodziewać przy nieprecyzyjnej predykcji?

[UP6] Autor posługuje się pewną częstotliwością do wyzwalania podstawowego zachowania agenta harmonizującego (str. 56-57). Jaka jest rola tego mechanizmu wyzwalania okresowego i jakie są zasady doboru częstotliwości wyzwalania? Czy istnieje jakaś ściśle określona górna granica tej częstotliwości wyzwalania, której przekroczenie grozi destabilizacją systemu szeregowania? W obszarze sterowania adaptacyjnego z przełączanymi sterownikami lub z szeregowaniem parametrów wprowadza się pojęcie czasu przestoju (ang. *dwell time*), który zapobiega pojawieniu się efektu drgań sterowania (ang. *chattering*) oraz możliwej destabilizacji systemu przy zbyt dużej częstotliwości przełączeń. Czy w przypadku systemu szeregowania TaskER zachodzi podobne zjawisko?

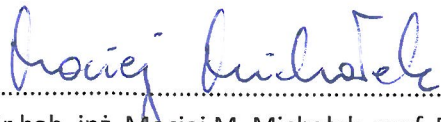
[UP7] W punkcie 3.5.3 na stronie 64 (podpunkt 2 listy) Autor opisuje reakcję systemu szeregowania w przypadku,

gdy przyjdzie żądanie uruchomienia nowego zadania w trakcie wykonywania etapu blokującego wcześniejszego zadania agenta dynamicznego. Reakcją tą jest zignorowanie sygnału wstrzymania bieżącego zadania. Jak w takim przypadku powinien zachować się agent oryginalnie zgłaszający nowe zadanie, którego żądanie wykonania zostało zignorowane? Czy powinien: ponowić próbę później w losowo wybranej chwili, ponawiać próbę okresowo, czy może powinien odesłać wiadomość o braku możliwości wykonania zadania?

V Podsumowanie i konkluzja końcowa

Zasadniczy wynik rozprawy w postaci opracowanego modelu szeregowania zadań TaskER może znaleźć szerokie zastosowanie praktyczne zarówno do celów projektowania wysokopoziomowych systemów sterowania robotów usługowych, jak i do projektowania systemów zarządzania innego typu rozproszonymi systemami cyber-fizycznymi. Uwagi krytyczne sformułowane w punkcie IV.A nie są kluczowe z punktu widzenia jakości zasadniczej treści dysertacji i nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę oryginalnego osiągnięcia oraz wyników zawartych w rozprawie. W mojej ocenie Doktorant zaprezentował bardzo dobrą praktyczną znajomość problematyki szeregowania zadań oraz projektowania wysokopoziomowych systemów sterowania w układach cyber-fizycznych (szczególnie w robotyce usługowej), rozwiązał trudny problem szeregowania przerywalnych zadań dynamicznie zleczanych robotom usługowym stosując zarówno klasyczne (automaty skończone, klasy, bufory danych) jak i nowoczesne narzędzia i koncepcje informatyki oraz inżynierii systemów (środowisko ROS, powiązanie z obliczeniami chmurowymi, rozproszona architektura agentowa RAPP), a także wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych w obszarze robotyki autonomicznej.

W konkluzji końcowej stwierdzam zatem, że przedłożona do recenzji rozprawa **spełnia wymagania ustawowe**¹ sformułowane w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2016 poz. 882). **W konsekwencji wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Wojciecha Dudka do publicznej obrony.**


.....
dr hab. inż. Maciej M. Michałek, prof. PP

1 Kategoria 'c. spełniająca wymagania' z listy zawartej w dokumencie pt. *Informacje i zalecenia dla recenzentów rozpraw doktorskich dla Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej*.

