

dr hab. inż. Dariusz Horla, prof. PP
Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska

Poznań, dnia 14. maja 2022 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Adaptacyjny system wymiany informacji w rozproszonych układach sterowania**

Autor rozprawy: **mgr inż. Przemysław Strzelczyk**

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Krzysztof Tomczewski, prof. PO**

Dziedzina: **nauki techniczne**

Dyscyplina: **automatyka, elektronika i elektrotechnika**

1. Uwagi ogólne

Tematyka rozpatrywana w opiniowanej rozprawie dotyczy sformułowania koncepcji oprogramowania typu middleware (pośredniczącego) dedykowanego do rozproszonych systemów sterowania składających się z modułów, odnoszących się do konkretnych maszyn czy urządzeń z dziedziny robotyki. Oprogramowanie takie powinno cechować się możliwością zastosowania niezależnie od używanej warstwy sprzętowej, na wzór choćby powszechnie znanego w nowoczesnej robotyce Robot Operating System (ROS). Zastosowanie oprogramowania, którego koncepcja jest przedstawiona w rozprawie istotnie skraca proces integrowania do potrzeb nowej aplikacji, do istniejącego systemu i pozwala na uzyskanie możliwości komunikacji między różnymi modułami w określonej aplikacji, czy między różnymi aplikacjami sterującymi w obrębie jednej sterowanej struktury.

W pracy przedstawiono i opisano architekturę oprogramowania, którego cechy czynią je dedykowanym do zagadnień związanych z problemami szeroko pojętego sterowania, w szczególności dla systemów rozproszonych, włączając w nie możliwość zapewnienia efektywnych algorytmów komunikacji lokalnej i globalnej, automatyzację wykrywania nowych węzłów systemu rozproszonego, adaptację do zdarzeń zewnętrznych, w tym do utraty komunikacji z węzłów (lub utraty samych węzłów), dla systemu sterowania, którego struktura może zmieniać się w sposób dynamiczny.

Wstępna identyfikacja rozwiązań istniejących na rynku, w tym wspomnianego oprogramowania ROS, pozwoliła Doktorantowi na opracowanie koncepcji, architektury i postawienie funkcjonalnościom przedmiotowego oprogramowania pośredniczącego określonych wymagań, jak i też określenia możliwości wdrożenia proponowanego rozwiązania. Wdrożenie takie mogło być przeprowadzone w robotach, systemach sterowania złożonych układów napędowych, systemach rekonfigurowalnych, czy systemach z cechą adaptacji do warunków otoczenia.

Podobnie jak w ROS, rozwiązanie to opiera się na mechanizmie publikacji i subskrypcji, co umożliwia uzyskanie cechy dostosowywania się do aktualnej struktury systemu sterowania, w tym uzyskanie informacji o awarii czy wyeliminowaniu określonego podzespołu. Dodatkowo, dla proponowanego rozwiązania przeprowadzono również analizę wydajności poszczególnych warstw komunikacyjnych i przedstawiono rozwiązanie dotyczące synchronizacji.

Uwzględniona możliwość samoczynnej rekonfiguracji pozwoliła na opisanie oczekiwanych reakcji na zmiany w konfiguracji sieci sterowania rozproszonego, a także umożliwiła uzyskanie rozwiązania skalowalnego do większych problemów.

Celem opiniowanej rozprawy jest zaproponowanie koncepcji systemu wymiany informacji między węzłami w sposób adaptacyjny, zbadania wydajności poszczególnych warstw komunikacji systemu adaptacyjnego, a wreszcie przetestowanie rozwiązania na zbudowanym prototypie egzoszkieletu kończyny górnej. Egzoszkielet zaprojektowano tak, aby wspierał procesy rehabilitacyjne w zakresie wykonywania ruchów, realizacji zaprogramowanych sekwencji ruchu przy ograniczeniach konfiguracji węzłów oraz zapewniał bezpieczeństwo swojemu użytkownikowi w procesie poprawy możliwości ruchowych. Ta skomplikowana struktura jest sterowana przez system wymiany informacji, który adaptacyjnie przez wykrycie zmian w konfiguracji węzłów zapewnia dostarczenie aktualnej informacji o stanie podsystemów.

Zakres pracy wynikający z przedstawionego celu rozprawy jest szeroki i obejmuje następujące zagadnienia:

- a) grupę zagadnień informatycznych, powiązanych z zaprojektowaniem architektury adaptacyjnego systemu wymiany informacji,
- b) testowanie efektywności komunikacji między warstwami,
- c) badanie układu napędowego dla fragmentu egzoszkieletu,
- d) przedstawienie działania stanowiska do badań systemu,
- e) podsumowania uzyskanych wyników.

Z uwagi na uniwersalność koncepcji systemu rozproszonego z adaptacyjną wymianą informacji, możliwy zakres zastosowań omawianego rozwiązania jest znaczny, w szczególności przez cechę skalowalności, możliwość wprowadzania na bieżąco zmian sprzętowych w trakcie działania, jak napisał Doktorant – ze szczególnym uwzględnieniem skomplikowanych systemów dedykowanych do nowoczesnej medycyny.

Rozprawa ma charakter programistyczno-eksperymentalny, a dalsza działalność publikacyjna Doktoranta, po napisaniu rozprawy, jasno wskazuje na aktualność podjętego problemu.

2. Przedmiot, zakres i ocena merytoryczna pracy

2.1. Zawartość rozprawy

Rozdział 1. rozprawy omawia przykładowe obszary zastosowania oprogramowania pośredniczącego, podaje oczekiwany zakres jego własności oraz dokonuje klasyfikacji oprogramowania pośredniczącego z uwagi na różne typy architektur.

Rozdział 2. zawiera informację o celu, zakresie i tezie pracy. Definiuje pewne początkowe czynności jakie należało podjąć przed zidentyfikowaniem niszy, którą praca ma za zadanie wypełnić, następnie podaje tezę i przedstawia zestaw celów szczegółowych. Przedstawiony zostaje tu potencjalny obszar zastosowania proponowanego rozwiązania, a także zgubnie omówiona jego koncepcja.

Rozdział 3. pracy szczegółowo omawia wielowarstwową strukturę oprogramowania pośredniczącego, przechodząc przez warstwę lokalnej i globalnej wymiany informacji, warstwę automatycznej detekcji węzłów, warstwę zapewniającą własność adaptacji oraz abstrakcyjną warstwę sprzętową.

W **rozdziale 4.** poruszono dogłębnie zagadnienia badania wydajności mechanizmów wymiany informacji w warstwach lokalnej i globalnej, prezentując wyniki odpowiednich testów w zależności od rozmiaru pojedynczego pakietu, przedstawiając krzywe regresji i dokonując analizy uzyskanych wyników. W ramach badań warstwy globalnej wspomniane testy obciążeniowe zostały wykonane w dwóch konfiguracjach sprzętowych, dla dwóch różnych schematów komunikacji, co dało łącznie cztery konfiguracje warstw.

Rozdział 5. omawia wyniki badań układu napędowego fragmentu egzoszkieletu wspomagającego ruch ręki. Po przedstawieniu obszarów zastosowań egzoszkieletów i podaniu przykładowych rozwiązań sprzętowych, Doktorant przedstawia swoją koncepcję jego struktury, modele matematyczne napędu i układu sterowania, a także szczegółowe modele matematyczne odpowiednich złącz, przedstawiając interpolowane powierzchnie obrazujące m. in. skomplikowaną zależność momentu bezwładności względem wartości położeń kątowych odpowiednich złącz. W końcowej części są przedstawione założenia odnośnie doboru nastaw regulatorów, a także zależności tych nastaw od położeń kątowych odpowiednich złącz.

Rozdział 6. przedstawia stanowisko eksperymentalne, informując o zastosowanych jednostkach napędowych, zakresach ruchu, a także o samej strukturze stanowiska laboratoryjnego do badań. Przedstawia również tryby pracy aplikacji odpowiedzialnej za sterowanie egzoszkieletem, podział funkcjonalny tego programu, omawia funkcjonalność węzła-lidera i zasady bezpieczeństwa. Wreszcie przedstawia wyniki w postaci przebiegów sygnałów pochodzących z tensometrów, czujników położenia i prędkości kątowej dla różnych scenariuszy ruchu

W **rozdziale 7.** zamieszczono wnioski.

Ostatnia część rozprawy (**Bibliografia**) zawiera 141 pozycji, w tym 3 pozycje współautorstwa Autora. Wyłączając instrukcje i karty katalogowe, około 19% pozycji literaturowych jest z ostatnich 5 lat, około 31% z przedziału 6-10 lat, natomiast 50% starszych niż 10 lat. Bibliografia stanowi reprezentatywny przegląd prac poświęconych zagadnieniom stanowiącym temat rozprawy doktorskiej.

2.2. Merytoryczna ocena pracy

Celem rozprawy jest opracowanie koncepcji działania adaptacyjnego systemu wymiany informacji posiadającego cechy i funkcjonalność oprogramowania typu middleware, zbudowanie rozproszonego systemu wymiany informacji oraz zbadania działania i wydajności tego systemu, w tym na zbudowanym prototypie egzoszkieletu.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych pracy zaliczam:

- opracowanie autorskiej architektury oprogramowania pośredniczącego wraz z testami wydajnościowymi,
- opracowanie modułowego systemu sterowania zbudowanym egzoszkieletem i implementacja programów sterujących, wraz z przeprowadzeniem badań eksperymentalnych.

Na podkreślenie zasługuje staranność Autora w prezentowaniu wprowadzanych pojęć, głęboka wiedza informatyczna, liczne rysunki umożliwiające łatwe śledzenie toku pracy, a waga niezręczności edycyjnych jest mało istotna. Rysunki są celowo dobrane i dobrze dopracowane graficznie.

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne o charakterze ogólnym:

- 1) czy możliwość opracowania i zaimplementowania schematu reakcji oprogramowania na zdarzenia zewnętrzne nie powinna być immanentną cechą systemu, niejako wbudowaną od razu jako cecha podstawowa? (patrz: s. 5₁₁)
- 2) przedstawiona na s. 14 teza pomija cechę, która powinna stanowić istotny wyróżnik proponowanego rozwiązania, a więc cechę adaptacyjności do zachodzących zdarzeń; dodatkowo sama cecha nie zawiera żadnego kwantyfikatora odnoszącego się do „jakości” uzyskanego rozwiązania w postaci warstwy komunikacyjnej, a więc trywializując – każde opracowanie programowej warstwy komunikacyjnej dowodzi prawdziwości wspomnianej cechy?
- 3) w jaki sposób adres statyczny zabezpiecza możliwość adaptacji w omawianym podejściu? Zmiana użytkownika powinna powodować wydaję się zmianę adresu, tak aby umożliwić dynamiczne ich przydzielanie przez warstwę pośredniczącą; (patrz: s. 30₂)
- 4) proszę wyjaśnić zachowanie się oprogramowania w skrajnym przypadku, gdy w mechanizmie zapytań o aktualną konfigurację systemu wszystkie wiadomości będą opóźnione, a więc zostaną odrzucone? Wydaje się, że na tym etapie sytuacja taka powinna zostać obsłużona w sposób zabezpieczający działanie całego systemu, przy czym wyjaśnienie takiej dla konfiguracji brak (patrz: s. 40₃);
- 5) aby właściwie podejść do problemu szacowania za pomocą krzywych regresji, należałoby po pierwsze zwiększyć liczbę punktów testowych, po drugie – zwielokrotnić pomiar, tak aby uzyskać odpowiednie statystyki, po trzecie – skorzystać z np. metody ważonej najmniejszych kwadratów do przedstawienia krzywej regresji; brakuje wyjaśnienia metodologii działania dla tego rodzaju sytuacji, przedstawienia plus minus odchylenia standardowego oraz informacji o wielkości próby; (s. 73, rys. 4.2 i podobne)
- 6) zgodnie z literaturą sterowanie typu gain-scheduling jest uznawane jako rodzaj sterowania adaptacyjnego, ciężko jest więc zgodzić się z odniesieniem do „quasi-”; (patrz: s. 95₃₋₁)
- 7) proszę o wyjaśnienie na jakiej zasadzie odbywa się przełączanie między poszczególnymi zestawami nastaw; czy jest to liniowa kombinacja wypukła poszczególnych wektorów nastaw, czy też przełączanie się w ramach banku modeli, czy wreszcie podejście typowe dla układów liniowych typu piecewise-affine? (patrz: s. 100₉)
- 8) brakuje szczegółów dotyczących obliczeń samych nastaw, w tym kryteriów zatrzymania algorytmu genetycznego, informacji o faktycznym czasie obliczeń, statystyk dotyczących powtarzalności uzyskiwanych rezultatów a wreszcie – przebiegów czasowych porównujących stan „przed strojeniem” i „po strojeniu”; proszę o przedstawienie tego rodzaju danych na jednym, reprezentatywnym przykładzie oraz o informację czy prezentowane w rozdziale 5 zależności współczynników wzmocnień regulatora złącza barkowego pozwalają otrzymać porównywalne przebiegi czasowe procesu regulacji dla różnych położeń kątowych? (patrz: s. 124₁₄)

Podział tekstu rozprawy na rozdziały jest prawidłowy, materiał ilustracyjny jest bogaty i czytelny, a przedstawiona bibliografia jest reprezentatywna dla problematyki poruszanej przez Autora.

Praca nie ma zasadniczych wad, można jednak wykazać drobne uchybienia lub elementy dyskusyjne:

- strona tytułowa: tytuł pracy jest mało szczęśliwie dobrany, ponieważ nie wyszczególnia o jakie rozproszone układy sterowania w pracy będzie chodzić (egzoszkielet), przez co można by pomyśleć, że chodzi o dowolne, ogólnie, rozproszone układy sterowania;
- s. 5₂: na tym etapie nie wiadomo czym jest „górna część” aktywnego egzoszkieletu ręki, ani czym byłaby dolna część;
- s. 7₁₃: zastosowane pojęcia nie są ostre – czym różni się „rozbudowany” system sterowania od systemu „dużego”? Ze zdania wynika jakby system duży był podzbiorem systemu rozbudowanego, a prawdopodobnie chodzi o tą samą skalę systemów;
- s. 8¹⁶, 8₁₈: w pracy pojawiają się wyrazy-kalki wynikające najprawdopodobniej z bezpośredniego przetłumaczenia nazw angielskich; jednym z przykładów jest „kontrola”, przykładowo kontrola chwytaka, kontrola bezzałogowych obiektów podwodnych, która odnosi się do pojęcia „sterowanie”, znacznie lepiej kojarzonego z postawionym przez regulatorem zadaniem;
- s. 10¹: zamienić „oparty o” na „oparty na”, przy czym ta błędna składnia występuje w wielu miejscach pracy;
- s. 10₁₂: zgodnie ze stanowiskiem Rady Języka Polskiego „posiadać” znaczy „być właścicielem czegoś, co ma dużą wartość materialną”, a więc ma wyznaczony zakres łączliwości leksykalnej; czasownik ten jest użyty poprawnie wyłącznie, gdy można go zastąpić zwrotem „być posiadaczem”; w pracy jednak pojawia się w wielu miejscach, w których powinien być zastąpiony odpowiednią formą „mieć”;
- s. 12¹⁴, na tym etapie nie wyjaśniono co oznacza odbiór przez API wiadomości „w sposób blokujący”. Czy chodzi tutaj o możliwość wywłaszczania procesów?
- s. 12¹⁵: nie podano charakterystyki kolejki, czy jest to np. FIFO, FILO, etc.;
- s. 14: brak spójnego zapisu listy wyliczeń – góra strony prezentuje listę od małych, dół – od dużych liter;
- s. 14₁₈: zamienić „określenie” na „określenia”;
- s. 16¹⁴: nie określono na czym uproszczenie procesu wykorzystania kodu ma polegać – oszczędność czasu przy wykonywaniu kodu, dostępu do pamięci, procesu ponownego pisania kodu?
- s. 19¹³: skrót HAL powinien być zdefiniowany wcześniej, z uwagi na jego wcześniejsze wykorzystanie;
- s. 20, rys. 3.2: w treści akapitu jest „konstrukcja klasy”, natomiast ten i podobne rysunki przedstawiają „budowę klasy”; dodatkowo, przy pierwszym tego rodzaju rysunku, oczekiwałbym dobrego opisu co on, i podobne, prezentują;
- s. 20₁₀: jest mowa o konstruktorze klasy, nie ma natomiast jakiegokolwiek odnośnika do destruktora klasy; jak zachowuje się semafor po wywołaniu, czy jego stan jest przechowywany na zewnątrz przestrzeni roboczej?
- s. 21⁵: treść o kolejności uruchamiania powinna być umieszczona wcześniej, na stronie 12; dodatkowo czy stosuje się tutaj inne mechanizmy synchronizacji, oprócz samych semaforów (komunikaty, monitory, zmienne synchronizujące współdzielone, etc.)?
- s. 24₁₂: brakuje informacji czy obiekt `std::mutex` ma inną zasadę działania niż omawiany wcześniej semafor?
- s. 25₃: w tekście występuje „struktura klasy”, natomiast na rysunku „budowa klasy”?
- s. 25¹: czy informację odbiera się „od strony” klienta, czy „ze strony” klienta?

- s. 29, rys. 3.12: brak nawiasu w kroku „Pobierz adres użytkownika”, powinno być *messageContent()*;
- s. 32¹⁰: w punkcie 3.2.10 występuje „transportowanie informacji”, natomiast w punkcie 3.2.11 już „przesyłanie informacji”; drugi termin wydaje się właściwszy, jako niebędący bezpośrednią kalką z terminologii anglojęzycznej;
- s. 44₉: brakuje informacji o sposobie generowania numeru zapytania, tak aby pozostał on unikalnym w określonym przedziale czasowym;
- s. 46⁵⁻⁶: funkcja *getAllNodeInfo* odnosi się do węzłów, natomiast linię niżej jest mowa o elementach systemu rozproszonego; w samej pracy jest również mowa raczej o węzłach, niż o elementach;
- s. 48⁶: sekcja 3.5 po raz pierwszy definiuje automatyczną rekonfigurację systemu, lecz na etapie przed sekcją 3.5.1 nie ma literalnie wspomnianej definicji cechy adaptacji (jest „rekonfiguracja systemu”); definicja taka, choć znów bez słowa adaptacja pojawia się w sekcji 3.5.8, na dole strony 57;
- s. 49₁: zamienić „notyfikacji” na „powiadomienia”;
- s. 51, rys. 3.26: pomiędzy modułem #2 a modułem #n brakuje symbolu wielokropka. Inaczej można przyjąć $n=3$;
- s. 61⁴: zamiast kropki powinien wystąpić dwukropek;
- s. 61₁₆: zamiast odnosić się do nazwy podrozdziału, lepiej jest podać jego numer wprost;
- s. 62₅: użyć „położenia” zamiast „pozycji”, ponieważ występują czujniki położenia wału, a nie czujniki pozycji wału;
- s. 71²⁻⁴: trzykrotne powtórzenie pochodnych wyrazu „opracowano”;
- s. 73, tab. 4.1: powinno korzystać się z ogólnie przyjętych symboli jednostek, a tak występuje [bajt], a dwa wiersze niżej „B”; podobna sytuacja występuje w całym rozdziale, choćby s. 76⁵;
- s. 77, tab. 4.2: brak standaryzacji w przedstawianiu jednostek – powinno używać się np. nawiasów kwadratowych;
- s. 88₁₆: brak ujednolicenia w sposobie cytowania wielu publikacji za jednym razem – czasem jest zestaw identyfikatorów w jednej parze nawiasów kwadratowych, czasem wiele par wymienionych po przecinku;
- s. 89: zapis strony tekstu bez akapitów, wcięć akapitowych i wyraźnego, optycznego, podziału tekstu czyni przeczytanie takiej ilości tekstu trudne do prześledzenia;
- s. 89²: brak po pierwsze spójności jednostek (czasem to [mm], czasem to [m]), po drugie – oddzielenie miejsc dziesiętnych powinno następować za pomocą przecinka;
- s. 93, tab. 5.1: brak wspomnienia o jednostkach w jakich są podane wartości skrzywienia czy kąta. Dodatkowo w pracy stosuje się naprzemiennie niejako wartości w [rad] oraz [°], co wymagałoby ujednolicenia;
- s. 93₃: należy sprecyzować na czym polega „quasi-adaptacja”;
- s. 95₃₋₁: na tym etapie należałoby zasygnalizować metodologię wyznaczania wzmocnień;
- s. 97³⁻⁴: wzory (5.2) oraz (5.3) nie są znormalizowane względem przyjętych oznaczeń – duże i małe litery oznaczają np. wektory, a duże – macierze. Prowadzi to do problemów z interpretacją;
- s. 97, (5.4): wzory są częścią zdania i wymagają stosowania się do zasad interpunkcji;
- s. 99, rys. 5.3: rysunek wygląda na ucięty z prawej strony;
- s. 99₈₋₁: z tekstu wynika, że „obszar” to „region”;

- s. 100¹⁸: czy oczekiwane wartości kątów przedramienia są również zadawane z algorytmu genetycznego? Prowadziłoby to do niespójności między wolą użytkownika egzoszkieletu, a działaniem algorytmu genetycznego;
- s. 102₉: we wcześniejszej partii tekstu odległości były podawane w [mm], patrz Tab. 5.2;
- s. 103²⁻⁷: problem występujący również na stronach 105, 114, 115, a dotyczący jednostek – zgodnie z Tab. 5.1 powinny to być wartości w [rad], tak aby ujednocilić przekaz; podobnie na rysunkach przedstawiających interpolowane zależności z rozdziału 5;
- s. 110, rys. 5.15: na tym i podobnych rysunkach nie widać zmian przy interpolacji dla różnych pozycji kątowych złącza łokciowego; powinno być to albo przedstawione na jednym wykresie, albo dobrze opisane w tekście rozprawy;
- s. 124₁₄: wprowadzenie ograniczeń do zadania optymalizacji mogło by nie być jakkolwiek konieczne, gdyby wstępna trajektoria ruchu została wygładzona np. za pomocą optymalizacji z wykorzystaniem modelu procesu, jak MPC, tak aby zredukować prędkości, przyspieszenia i ich pochodne poniżej wymaganych progów;
- s. 125, rys. 5.39: literówka w „łociowego”;
- s. 134/135: stosowana jest jednostka [rpm], podczas gdy w opisach rysunków jest [obr], np. rys. 6.12;
- s. 139: na stronie pojawia się trzykrotnie lista wypunktowana, za każdym razem bez dwukropka w zdaniach poprzedzających te listy;
- s. 152, [8]: brak podania roku wydania.

W pracy na końcach poszczególnych wierszy występują nagminnie wdowy, które przed finalnym złożeniem jej treści, powinny być zostać usunięte.

3. Ocena końcowa i wnioski

Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych, które nie dotyczą zasadniczego dorobku Doktoranta, uważam, że postawiony cel pracy ma charakter naukowy i został konsekwentnie zrealizowany. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej oraz opanował ogólną wiedzę teoretyczną stojącą niejako na styku różnych dyscyplin w zakresie prezentowanym w rozprawie.

Wobec powyższych uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Strzelczyka *Adaptacyjny system wymiany informacji w rozproszonych układach sterowania* spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

/Dariusz Horla/

