



Prof. dr hab. Marcin Szpyrka
Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Informatyki Stosowanej
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel.: 012 617 51 94
e-mail: mszpyrka@agh.edu.pl

Kraków, 29 maja 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Wojnakowskiego pt. *Analysis of Boundedness and Safeness in a Petri Net-Based Specification of Concurrent Control Systems*

Rozprawa doktorska została opracowana na Uniwersytecie Zielonogórskim w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja.

1. Cel i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Wojnakowskiego dotyczy metod analizy ograniczoności i bezpieczeństwa systemów specyfikowanych sieciami Petriego niskiego poziomu. Celem tych działań jest wykazanie, że sieć jest ograniczona, a co za tym idzie jej zbiór znakowań osiągalnych jest zbiorem skończonym. W takim przypadku możliwa jest analiza własności systemu bazująca na przeglądzie pełnego zbioru stanów osiągalnych, np. wykorzystanie technik weryfikacji modelowej.

Podstawowym celem rozprawy jest analiza bieżących algorytmów wykorzystanych do analizy ograniczoności sieci Petriego, a także zaproponowanie nowych, bardziej wydajnych metod. Biorąc pod uwagę fakt, że w ogólnym przypadku istniejące algorytmy mają złożoność wykładniczą, zaproponowanie lepszych rozwiązań ma istotne znaczenie dla analizy systemów współbieżnych opisanych sieciami Petriego. Tematykę poruszaną w pracy należy więc uznać za ważną i aktualną.

Tezy pracy zostały formalnie zdefiniowane jako „*Analysis of boundedness and safeness of concurrent control systems specified by Petri nets can be performed effectively and efficiently*”. Doktorant postawił sobie za cel:

- dokonać przeglądu metod analizy własności ograniczoności i bezpieczeństwa sieci Petriego,
- zaproponować nowe algorytmy analizy ograniczoności i bezpieczeństwa,
- zweryfikować poprawność i wydajność zaproponowanych metod.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim. Praca składa się z siedmiu rozdziałów wliczając w to wstęp i podsumowanie. Zawiera ponadto streszczenie w języku

polskim i angielskim, spis rysunków, spis algorytmów, słownik haseł, spis skrótów, wykaz literatury oraz jeden dodatek. Praca liczy łącznie 147 stron. Wspomniany wykaz literatury zawiera łącznie 176 numerowanych pozycji. Do rozprawy została dołączona płyta CD, która zawiera elektroniczną wersję rozprawy doktorskiej wraz z informacjami o dorobku naukowym doktoranta.

- Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do problematyki pracy, w szczególności przedstawiono w nim motywację do podjęcia opisanych w rozprawie badań, zdefiniowano tezy i cele pracy i w skrócie przedstawiono strukturę rozprawy.
- Rozdział 2 zawiera przede wszystkim wprowadzenie do teorii sieci Petriego. Rozdział rozpoczyna przytoczenie podstawowych definicji dotyczących złożoności obliczeniowej algorytmów. Podano w nim podstawowe definicje dotyczące klas sieci, które rozważane są w rozprawie oraz ich własności. Przedstawiono również wprowadzenie do metod analizy sieci bazujących na grafach osiągalności i reprezentacji algebraicznej sieci (macierz incydencji).
- Rozdział 3 zawiera przegląd literatury poświęconej metodom analizy ograniczoności i bezpieczeństwa znakowanych sieci Petriego. W rozdziale podano m.in. algorytmy generowania grafu pokrycia oraz wyznaczanie niezmienników miejsc sieci.
- W rozdziale 4 przedstawiono propozycje autorskich metod weryfikacji własności ograniczoności i bezpieczeństwa. W rozdziale przedstawiono 5 algorytmów, które są propozycjami optymalizacji istniejących rozwiązań.
- Rozdział 5 zawiera informacje o wynikach praktycznej weryfikacji zaproponowanych metod. Wykorzystano w tym celu bazę przykładów opracowaną na Uniwersytecie Zielonogórskim. Pełne zestawienie wyników zamieszczono w dodatku. W rozdziale przedstawiono najciekawsze cząstkowe wyniki, których celem jest pokazanie, że zastosowanie metod zaproponowanych przez doktoranta przynosi korzyści przy analizie sieci.
- W rozdziale 6 przedstawiono przykład wykorzystania metod weryfikacji opracowanych przed doktorantem do weryfikacji modelu rzeczywistego systemu produkcyjnego.
- Ostatni rozdział zawiera krótkie podsumowanie rozprawy oraz pewne sugestie prac badawczych mających być jej kontynuacją.

Prezentacja materiału przedstawionego w pracy dokonana jest w sposób relatywnie czytelny i zrozumiały. Stosowana terminologia i symbole nie budzą w zasadzie zastrzeżeń. Drobne uwagi dotyczące składu i języka prezentacji zawarto w dalszej części recenzji.

3. Ocena rozprawy

Główne wyniki naukowe opisane w rozprawie doktorskiej dotyczą modyfikacji istniejących algorytmów analizy sieci Petriego. Zmiany te mają na celu jak najszybsze dostarczenie informacji dotyczących własności ograniczoności lub bezpieczeństwa sieci bez potrzeby budowania pełnego grafu osiągalności (właściwie w pracy wykorzystywane są grafy pokrycia) lub wyznaczania wszystkich niezmienników miejsc. Optymalizacja taka była możliwa ze względu na zredukowany zbiór własności, które analizuje doktorant. Ponieważ analizę sprowadzamy właściwie tylko do badania własności ograniczoności (bezpieczeństwo jest szczególnym przypadkiem ograniczoności), to możliwe jest przerwanie danego algorytmu, gdy natrafimy na dowód, że własność ta nie jest zachowana. W ogólnym przypadku nie otrzymujemy algorytmu o mniejszej złożoności obliczeniowej, ale statystycznie obliczenia będą w licznych przypadkach realizowane szybciej.

Do najważniejszych osiągnięć doktoranta przedstawionych w ocenianej rozprawie doktorskiej należy zaliczyć:

1. Zaproponowanie metod optymalizujących algorytm generowania grafów pokrycia. W algorytmie zaproponowana modyfikacja polega na przerwaniu algorytmu generowania grafu pokrycia w sytuacji, gdy pojawi się pierwsza współrzędna ω wskazująca na występowanie nieograniczonego miejsca w sieci. W algorytmie 4.4 zaproponowana modyfikacja polega na przerwaniu algorytmu generowania grafu pokrycia w sytuacji, gdy pojawi się pierwsza współrzędna większa niż 1.
2. Zaproponowanie metod optymalizujących algorytm generowania niezmienników miejsc. W algorytmie 4.2 zaproponowana modyfikacja polega na przerwaniu procedury generowania niezmienników miejsc, gdy na podstawie dotychczas wyznaczonych niezmienników można stwierdzić, że sieć jest pokryta niezmiennikami. W algorytmie 4.5 zaproponowana modyfikacja polega na przerwaniu procedury generowania niezmienników miejsc, których nośniki są maszynami stanowymi znakowanymi jednym znacznikiem, gdy na podstawie dotychczas wyznaczonych niezmienników można stwierdzić, że sieć jest pokryta takimi niezmiennikami.
3. Zaproponowanie algorytmu bazującego na macierzy incydencji, który po wykonaniu eliminacji Gaussa sprawdzane jest, czy istnieją wiersze opisane w twierdzeniach 4.1 i 4.2, które wskazują, że sieć nie jest pokryta przez niezmienniki.
4. Weryfikacja zaproponowanych metod na bazie 243 modeli sieci Petriego dostępnych w systemie Hippo.
5. Opracowanie modelu rzeczywistego systemu produkcyjnego i pokazanie na tym przykładzie skuteczności opracowanych metod w analizie bardziej złożonych modeli.

3.1. Uwagi ogólne

1. Autor nie zdefiniował precyzyjnie jakiej klasy sieci Petriego dotyczy jego rozprawa doktorska. W definicji 2.9 nie podano czym jest znakowanie początkowe \vec{M}_0 (moim zdaniem niepotrzebny jest tu symbol wektora). Określenie, że jest to wektor nie jest wystarczające. Brak jest informacji, jakie wartości mogą przyjmować współrzędne tego wektora. Z opisu bezpośrednio pod definicją 2.9 wynikałoby, że dopuszczalne są tylko wartości 0 i 1. Jednak zaczynając od definicji 2.22 mowa jest już o k -ograniczoności i możliwości zgromadzenia w jednym miejscu sieci wielu znaczników. Również niekompletna jest definicja 2.27 sieci interpretowanej, nie została też ona zilustrowana żadnym przykładem.
2. Stosowanie zaproponowanych przez doktoranta metod ma sens przy założeniu, że analizę własności ograniczamy do problemu ograniczoności sieci. W zasadzie cel stosowania tych metod, to sprawdzenie, czy przestrzeń stanów modelu jest skończona. Metoda jest użyteczna w pierwszych iteracjach w rozwoju modelu, gdy nieograniczoność sieci traktujemy jako błąd modelu i chcemy szybko sprawdzić, czy ten problem występuje. W sytuacji, gdy chcemy przeprowadzić pełną analizę własności sieci (żywołność, odwracalność, znakowania własne itp.) musimy wygenerować pełny graf osiągalności. W takim przypadku trudno znaleźć korzyści z zaproponowanych algorytmów.
3. Definicja 2.21 dotycząca grafów osiągalności jest niepoprawna. Po pierwsze nie wiadomo co autor rozumie pod pojęciem *collection*. Po drugie para (\mathbb{M}, Σ) w żaden sposób nie opisuje struktury grafu osiągalności, który jest grafem. Biorąc pod uwagę, że grafy osiągalności/pokrycia stanowią istotny punkt wyjścia dla rozwiązań zaproponowanych przed doktoranta, w pracy należało zawrzeć poprawną definicję tego pojęcia.

3.2. Uwagi szczegółowe

1. Str. 6 – Pomysł, aby wartość bezwzględna z liczby wyznaczać przez podniesienie jej do kwadratu, a później wyznaczenie pierwiastka kwadratowego jest fatalny z perspektywy złożoności obliczeniowej.
2. Str. 7 – Biorąc pod uwagę poprzednie zastrzeżenie trudno uznać, że przedstawiony algorytm ma złożoność liniową.
3. Str. 8 – uporządkowane pary powinny być oznaczane jako (x, y) , a nie $\{x, y\}$. Nawiasy klamrowe kojarzą się ze zbiorami, które nie są uporządkowane.
4. Str. 9 – Symbol \times w matematyce służy do oznaczania iloczynu wektorowego, a nie skalarnego.
5. Str. 11 – W definicji 2.19 użyto termin *a finite sequence σ of transitions firings*. Termin ten nie został zdefiniowany w pracy.
6. Str. 13 – Oznaczenie $M(p)$ (oczywiste w teorii sieci Petriego), nie zostało zdefiniowane w pracy, w szczególności w kontekście pierwszej uwagi ogólnej.
7. Str. 13 – W definicji 2.27 brakuje informacji o związku zbiorów X i Y z pozostałymi elementami sieci. Brak jest przykładu ilustrującego funkcjonowanie sieci interpretowanych.
8. Str. 14 – Definicja 2.28 jest wyjątkowo skomplikowana. Wystarczy zapisać, że deadlock jest znakowaniem, przy którym nie jest aktywna żadna tranzycja.
9. Str. 14 – Tak podana definicja macierzy incydencji jest prawdziwa tylko przy założeniu, że sieć nie zawiera ciasnych pętli. W rozprawie brak jest takiego założenia.
10. Str. 15 – Jak należy interpretować $\vec{x} \geq 0$? Czy nie powinno być $\vec{x} \geq \vec{0}$? (takie przypadki zdarzają się w kilku miejscach).
11. Str. 16 – Twierdzenie 2.1 zawiera w sobie definicję. Powinna ona być zdefiniowana poza twierdzeniem.
12. Str. 17 – Pojęcie podsieci jest niezdefiniowane w rozprawie.
13. Str. 18 – Definicje 2.34 i 2.37 są bliźniacze, więc należałoby zastosować podobne zapisy.
14. Str. 19 – Co oznacza oznaczenie $\bullet p(p\bullet)$?
15. Str. 19 – Ostatni warunek w definicji 2.40 powinien mieć postać $|p_1 \bullet| \subseteq |p_2 \bullet|$.
16. Str. 26 – Przedstawiony algorytm odpowiada za generowanie grafu pokrycia (ang. coverability).
17. Str. 32, 34 – Te algorytmy są trywialne. Zamiast pseudokodu można było podać proste twierdzenia/wnioski.
18. Str. 43 – Twierdzenie 4.2 jest źle sformułowane. Zapis „there exists at least one row containing only ones” sugeruje, że w macierzy musi istnieć wiersz cały wypełniony jedynekami. Wydaje się, że powinny być same jedyнки po jedyńce wiodącej.
19. Str. 56 – Większość czasów podanych w tabeli 5.1 jest tak mała, że trudno zauważyć istotne różnice.
20. Str. 66 – W rozdziale stosowana jest sieć interpretowana. W rozprawie nie opisano zasad pracy tej klasy sieci.

3.3. Uwagi techniczno-redakcyjne

Pod względem edytorskim oceniana rozprawa doktorska lokuje się zdecydowanie powyżej przeciętnej. Została dość starannie złożona z użyciem systemu składu L^AT_EX. Tym niemniej autor nie ustrzegł się kilku „typowych” błędów, np.: używanie dwukropka zamiast polecenia `\colon` (np. przy definiowaniu funkcji).

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona w pracy problematyka dotyczy aktualnych i interesujących zagadnień naukowych związanych z problemem analizy ograniczoności znakowanych sieci Petriego w szczególności w kontekście weryfikacji systemów sterujących. Rozprawa doktorska zawiera szereg interesujących oryginalnych wyników pracy badawczej autora, które praktycznie zweryfikowano na dużym zbiorze modeli. Mimo przedstawionych wcześniej uwag krytycznych, rozprawę doktorską jako całość oceniam pozytywnie.

Stwierdzam, że autor wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja, trafnie sformułował problem naukowy i następnie przedstawił jego oryginalne rozwiązanie. Podsumowując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pt. *Analysis of Boundedness and Safeness in a Petri Net-Based Specification of Consurrent Control Systems* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę *Prawo o Szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. (z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Marcina Wojnackowskiego do publicznej obrony.