



Gdańsk, 29.08.2024 r.

Dr hab. inż. Jacek Rak, prof. PG
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł: Application Relocation in an Edge-Enabled 5G-System
Autor: Mgr inż. Grzegorz Piotr Panek
Promotor: Dr hab. inż. Halina Tarasiuk

Rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Panka dotyczy zagadnienia relokacji aplikacji brzegowych (ang. edge applications), tj. zmiany lokalizacji instancji aplikacji pomiędzy węzłami systemu brzegowego (ang. edge hosts) w celu spełnienia silnych wymagań jakościowych oraz nieprzerwanego świadczenia usług dla mobilnego użytkownika systemu 5G. Rozpatruje ona zatem łącznie kwestie jakości usług oraz niezawodności transmisji, koncentrując się w szczególności na mechanizmach nieprzerwanej dostępności usług (ang. uninterrupted service). Zagadnienia te są istotne oraz aktualne w odniesieniu do systemów 5G, w stosunku do których sformułowane wymagania w zakresie przepustowości, opóźnień transmisji oraz generalnie dostępności usług są wysokie. Stopień trudności analizowanego zagadnienia podnosi założenie dotyczące mobilności użytkowników końcowych.

Rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Panka została napisana w języku angielskim. Struktura pracy jest ogólnie poprawna i obejmuje dziewięć rozdziałów, kolejno: wprowadzenie (Rozdział 1) ukazujące motywację pracy, opis najważniejszych osiągnięć oraz organizację rozprawy; omówienie w Rozdziale 2 kluczowych dla rozprawy zagadnień związanych z systemami 5G; dyskusję rozwiązań dotyczących przetwarzania na brzegu sieci (ang. edge computing) – Rozdział 3; przegląd literatury w zakresie istniejących metod rozwiązania problemu relokacji aplikacji (Rozdział 4); szczegółowy opis rozważanej w rozprawie architektury systemu 5G umożliwiającej relokację aplikacji (Rozdział 5); formalne zdefiniowanie problemu relokacji aplikacji (Rozdział 6); opis proponowanego algorytmu heurystycznego wyboru węzła docelowego relokacji aplikacji (Rozdział 7); opis autorskiego algorytmu relokacji wykorzystującego koncepcję uczenia maszynowego (Rozdział 8); podsumowanie pracy (Rozdział 9) oraz trzy części nienumerowane: bibliografia, wykaz rysunków i wykaz tabel. Bibliografia obejmuje 107 adekwatnie dobranych publikacji.

Należy podkreślić, że oceniana rozprawa jest wynikiem realizacji tzw. doktoratu wdrożeniowego i jest wynikiem współpracy Orange Innovation Poland z Politechniką Warszawską, a Doktorant jest zatrudniony w w/w firmie na stanowisku inżyniera badawczego. Wyniki pracy Doktoranta zostały zaprezentowane w szczególności w jednym artykule w czasopiśmie IEEE Communications Magazine (200 pkt MNiSW) oraz dwóch artykułach (po 70 pkt MNiSW każdy) opublikowanych w materiałach konferencji IEEE ICC 2023 w Rzymie oraz IEEE Globecom 2023 w Kuala Lumpur. Doktorant zaprezentował wyniki swoich prac również na innych konferencjach branżowych z ramienia Orange, m.in. KubeCon 2022 w Walencji.

1. Jaki jest cel naukowy rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Celem pracy Doktoranta było opracowanie efektywnych mechanizmów relokacji aplikacji w zintegrowanej architekturze obejmującej system 5G oraz rozwiązania mobile edge computing (MEC). Cel ten jest jasno naświetlony i umotywowany w pierwszych czterech rozdziałach rozprawy, mimo że rozprawa nie zawiera bezpośrednio sformułowanej tezy.

W mojej opinii cel ten jest niewątpliwie trafnie sformułowany z uwagi na duży stopień mobilności użytkowników systemu 5G decydujący o dynamicznym charakterze architektury systemu oraz implikujący potrzebę wdrożenia mechanizmów elastycznej konfiguracji w celu podtrzymania ciągłości dostępności usług przy zadanych charakterystykach QoS.

Zakres zrealizowanych przez Doktoranta prac opisanych w rozprawie obejmuje opracowanie algorytmów relokacji aplikacji, projekt i implementację demonstratora, jak i weryfikację charakterystyk właściwości proponowanych rozwiązań. Zakres ten jest w ogólności właściwy. Również poziom trudności powyższych prac należy uznać za adekwatny dla badań naukowych na poziomie doktorskim.

2. Na czym polega oryginalny dorobek Autora i jakie jest znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Do oryginalnego dorobku Autora można moim zdaniem zaliczyć:

- 1) projekt zgodnej z założeniami ETSI i 3GPP architektury systemu 5G uwzględniającej mechanizmy edge computing i pozwalającej na relokację aplikacji brzegowych oraz opis demonstratora (ang. proof-of-concept – PoC) wykorzystującego m.in. platformę Kubernetes zaprezentowany w rozdziale 5 rozprawy;
- 2) zdefiniowanie problemu relokacji aplikacji w rozdziale 6 rozprawy;
- 3) propozycję heurystycznego algorytmu EAR-Heuristic relokacji aplikacji brzegowych uwzględniającego wymagania aplikacji oraz zgodnego ze strategią równoważenia obciążenia opisanego w rozdziale 7 rozprawy;
- 4) propozycję algorytmu wyboru węzła docelowego relokacji aplikacji wykorzystującego strategię uczenia maszynowego do rozwiązania postawionego problemu opisanego w rozdziale 8 rozprawy,

a także:

- 5) zaprezentowany w rozdziale 2 rozprawy opis najważniejszych elementów składowych architektury systemu 5G; zobrazowanie scenariuszy, w których przetwarzanie na brzegu sieci odgrywa kluczową rolę dla użytkowników mobilnych; wyjaśnienie zasad integracji technologii MEC z systemem 5G; szczegółowa prezentacja motywów (w tym mobilność użytkowników, degradacja poziomu QoS, problemy serwera MEC w zakresie dalszego wspierania aplikacji) oraz scenariuszy (np. pojazdy autonomiczne, drony czy strumieniowanie ruchu wideo), w których koncepcja relokacji aplikacji ma kardynalne znaczenie w podtrzymywaniu ciągłości świadczenia usług przy zadanych parametrach QoS;
- 6) zawarta w rozdziale 4 analiza rozwiązań dostępnych w literaturze dotyczących problemu relokacji aplikacji.

Dorobek zaprezentowany w ocenianej rozprawie ma istotne znaczenie praktyczne poparte realnym zaangażowaniem Doktoranta we współpracę z jednostką otoczenia gospodarczego (w tym przypadku Orange Innovation Poland) podczas realizacji zadań rozprawy.

Problem rozpatrywany w rozprawie przez Doktoranta należy uznać za rozwiązany. Sam sposób rozwiązania postawionego problemu także nie budzi większych zastrzeżeń. Zastosowana przez Doktoranta metodologia jest adekwatna dla badań naukowych na poziomie doktorskim.

3. Jakie są słabsze strony rozprawy?

Uwagi natury ogólnej

- a) Praca została napisana ogólnie dobrze pod względem językowym (praca w języku angielskim). Jednakże czasami występują w niej pewne niedociągnięcia językowe, jak np.:
 - pisownia rozłączna wyrażenia „three fold” zamiast typowej łącznej („three-fold” lub „threefold”) – str. 7 rozprawy;
 - niewłaściwe użycie sformułowania „proceedings” w odniesieniu do czasopisma IEEE Communications Magazine na str. 17;
 - nadmiarowe użycie rodzajnika „the” np. przed odwołaniami do rozdziałów (przykładowo, zamiast „the chapter 4” na str. 17 powinno być „chapter 4”);
 - „dedicated for” → „dedicated to” na str. 18;
 - „represents a notable improvements” → usunąć „a” na str. 19;
 - „The main MEO responsibility is to ...maintain, ...select, ...trigger...” (a nie „maintaining”, „triggering” na str. 22-23);
 - „Indeed, its reduce the number...” → „Indeed, it reduces the number...” (na str. 89).



- b) Dla skrótu "UE" używanego np. na str. 24 pełna nazwa jest podana dopiero na str. 28 rozprawy.
- c) W pracy bardzo często występują określenia pisane z wielkie litery, mimo, że co najmniej w przypadku niektórych z nich wydaje się to nieuzasadnione (np. „Life-Cycle” na str. 28).
- d) Zauważalna jest niespójność formatowania pełnych nazw: wyrazy rozpoczynają się raz z wielkiej litery, innym razem z małej (np. „ultra-high definition” – str. 31). Trudno jest wychwycić zasadę, którą Autor się w tym kontekście posługuje.
- e) Tytuł rozdziału 2 („Background”) jest zbyt krótki i z tego powodu nie odzwierciedla jego zawartości.
- f) Zawartość rozdziału 3 dotycząca wyzwań w zakresie wdrażania rozwiązań edge computing stanowi naturalne rozszerzenie treści rozdziału 2. Z tego powodu wydaje się, że lepiej pozycjonowałaby się ona jako sekcja rozdziału 2, a nie jako oddzielny rozdział.
- g) Zawartość pól tekstowych rysunku 5.3 jest mało czytelna (czcionka o zbyt małym rozmiarze). W tym kontekście lepszym rozwiązaniem byłoby zaprezentowanie rys. 5.3 w układzie pionowym jako obiektu zajmującego całą stronę.
- h) Użycie symbolu V w kontekście łączy systemu w rozdziale 6 nie jest fortunne, gdyż typowo symbol V jest zarezerwowany dla wierzchołków grafu. W przypadku łączy zwyczajowo stosuje się symbol E (od ang. edges) dla łączy dwukierunkowych lub symbol A (ang. arcs – skierowane łuki) w przypadku łączy jednokierunkowych.
- i) W celu zwiększenia poziomu czytelności modelu optymalizacyjnego z rozdziału 6, wskazane byłoby pogrupowanie opisu składowych modelu w części obejmujące symbole, zmienne, stałe, a dopiero w dalszej kolejności funkcję kryterialną i warunki ograniczające.
- j) Sekcja 6.5 zatytułowana „Edge Relocation Simulator” nie pasuje tematycznie do rozdziału 6 omawiającego aspekty modelowania matematycznego dla problemu optymalizacyjnego.
- k) W rozdziale 6 w przypadku iloczynu liczb powinien być zastosowany prosty operator $\cdot$ zamiast operatora $\times$. Ten drugi ma zastosowanie w przypadku iloczynu kartezjańskiego zbiorów.
- l) W rozdziale 7 zastosowanie przedrostka „O-” w nazewnictwie wariantów algorytmu oraz sam tytuł rozdziału 7.2.5: „Heuristic and Optimal comparison” mogą być dla czytelnika mylące, gdyż mogą sugerować rozwiązania uzyskane w wyniku rozwiązania zadania optymalizacyjnego z rozdziału 6 (podczas gdy w pracy brakuje jednoznacznej informacji o wykorzystaniu konkretnego narzędzia (tzw. solvera) w tym zakresie oraz, w konsekwencji tego, przeprowadzenia analizy porównawczej).
- m) Znaczna część treści zawartej na rysunku 8.3 jest trudna do odczytania z uwagi na bardzo mały rozmiar czcionki.

7266

Uwagi szczegółowe

1. Pomimo, że rozdział 4.1 relatywnie szczegółowo prezentuje najważniejsze cechy rozwiązań dostępnych w literaturze (ang. state-of-the-art – SoTA), pozostawia pewien niedosyt w kontekście szerszej identyfikacji otwartych problemów, czy też analizy stopnia możliwości dalszej poprawy charakterystyk istniejących rozwiązań. Rozszerzenie prezentacji o powyższe aspekty podkreśliłoby lepiej rolę osiągnięć Doktoranta w stosunku do rozwiązań SoTA.
2. W rozprawie brakuje jednoznacznej informacji o tym, czy zdefiniowany w rozdziale 6 model optymalizacyjny (dotyczący problemu określenia najlepszych lokalizacji dla relokacji aplikacji) został (czy też nie został) użyty w dalszej części rozprawy w analizie porównawczej. Wątpliwości w tym zakresie są uzasadnione m.in. brakiem jednoznacznej informacji odnośnie użytego środowiska obliczeniowego (solvera) dla problemu optymalizacyjnego z rozdziału 6 oraz jego konfiguracji. Zasadne jest więc pytanie o komentarz w zakresie stopnia optymalności (ang. optimality gap) w odniesieniu do jakości rezultatów (mierzonych wartością funkcji kryterialnej) uzyskanych w wyniku użycia algorytmów z rozdziałów 7 i 8.
3. Dodatkowe uzasadnienie wydaje się niezbędne w kontekście modelowania w rozprawie wartości opóźnień end-to-end (rozdział 6.5.2) bazując jedynie na wartościach opóźnień na łączach systemu.
4. Analiza efektywności algorytmu heurystycznego omówionego w rozdziale 7 byłaby pełniejsza, gdyby obejmowała ocenę złożoności obliczeniowej rozpatrywanego algorytmu. Pozwoliłoby to np. na dokładniejszą analizę stopnia skalowalności algorytmu.

Powyższe uwagi nie wpływają na moją pozytywną łączną ocenę rozprawy.

4. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a/ nie spełniająca wymagań,
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c/ spełniająca wymagania,
- d/ wykraczająca ponad poziom zadawalający (spełniająca wymagania z nadmiarem),
- e/ wybitna?

Podsumowując, moja recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Piotra Panka jest **pozytywna**. Wartość merytoryczna rozprawy jak i sposób prezentacji wyników kwalifikują w mojej ocenie rozprawę mgr inż. Grzegorza Piotra Panka do kategorii **c/ spełniająca wymagania** ustawowe stawiane rozprawom doktorskim.

Z powodów powyższych, wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Piotra Panka do publicznej obrony.



