Tytuł, stopień, imię i nazwisko
prof. dr hab. inż. Bogdan Kwolek

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA
02 -06- 2020
WPŁYNĘŁO

data 14.05.2020

PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
prof. dr hab. inż. Andrzej Kasiński

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
przygotowana dla Rady dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika
Politechniki Poznańskiej

Tytuł rozprawy: Architektury sprzętowo-programowe jako procesory kamer inteligentnych pracujących w sieciach automatycznego nadzoru

Autor rozprawy: mgr inż. Michał Fularz

1. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska dotyczy projektowania architektur sprzętowo-programowych dla inteligentnych kamer automatycznego monitoringu i nadzoru. Prace badawcze dotyczyły projektowania architektur sprzętowych dla inteligentnych kamer dedykowanych systemom monitoringu i nadzoru. Istotna część prac dotyczyła zagadnień związanych z programowymi architekturami dla inteligentnych kamer. Zaproponowano ogólną i uniwersalną architekturę logiczną i sprzętową dla kamery inteligentnej, dedykowanej dla heterogenicznych układów reprogramowalnych. Wynikiem końcowym rozprawy jest uniwersalna architektura dla kamery inteligentnej oraz moduły sprzętowe i programowe, które można łatwo łączyć oraz rozszerzać o akceleratory sprzętowe. W oparciu o zaproponowaną architekturę zaimplementowano akceleratory sprzętowo-programowe, które występują w typowym potoku przetwarzania kamery inteligentnej dla systemów monitoringu i nadzoru. Wspomniane akceleratory umożliwiają wydzielenie ruchomych obiektów w sekwencjach obrazów, detekcję i dopasowanie cech punktowych, a także klasyfikację obiektów zainteresowania. Dla łatwiejszego wykorzystania architektury sprzętowej opracowano warstwową architekturę programową, która ułatwia rozszerzenie o wybrane algorytmy. Na autorski wkład składają się także rozwiązania programowe dla sterowania przepływem informacji oraz analizy aktywności na analizowanych scenach w celu obniżenia zapotrzebowania na pobór energii przez sieć kamer. Praca ma charakter badawczo-doświadczalny. Autor zaproponował oryginalne rozwiązania sprzętowe i programowe dla sieci kamer inteligentnych. W ramach prac eksperymentalnych zgromadzono repozytorium poetykietowanych obrazów, które wraz z opracowanym oprogramowaniem udostępnione jest w sieci Internet. Zasadniczym celem naukowym było opracowanie architektury i bardziej szczegółowych rozwiązań, w tym także modułów sprzętowo-programowych, dzięki którym możliwe jest zmniejszenie wymaganych nakładów pracy związanych z wprowadzeniem rozwiązań sprzętowych o mniejszym poborze mocy zamiast tradycyjnych rozwiązań opartych o procesory ogólnego przeznaczenia. Wyniki badań eksperymentalnych są przekonywujące. Badania doświadczalne pokazały, jakie korzyści

odnieść można w razie wykorzystania zaproponowanych rozwiązań w systemach monitoringu i nadzoru, zamiast rozwiązań opartych o procesory ogólnego przeznaczenia.

Tezy pracy zostały postawione w rozdziale pierwszym. Pierwsza teza pracy wyraża się w przekonaniu iż zastosowanie architektur sprzętowo-programowych i układów reprogramowalnych w projekcie kamery inteligentnej pozwala na istotne pogłębienie lokalnej analizy strumienia obrazów przy jednoczesnym znacznym obniżeniu zapotrzebowania na energię. Druga teza stwierdza iż realizacja zadań przetwarzania obrazu bezpośrednio w kamerze inteligentnej pozwala na stworzenie skalowalnej sieci automatycznego nadzoru wizyjnego. Tezy pracy są jasno postawione i konsekwentnie rozwijane w całej rozprawie. Prawdziwość tez została wykazana empirycznie. Tematyka rozprawy jest w pełni uzasadniona, interesująca i aktualna.

2. Rozprawa napisana jest w języku polskim. Praca liczy 148 stron i składa się z 6 rozdziałów, podsumowania i bibliografii. W rozprawie odwołano się do 232 pozycji bibliograficznych. Następstwo rozdziałów jest logiczne i przedmiotowo uzasadnione. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do problematyki pracy. W następnym rozdziale zamieszczono przegląd prac poświęconych kamerom inteligentnym oraz systemom automatycznego nadzoru. W kolejnych dwóch rozdziałach omówiono układy reprogramowalne oraz algorytmy przetwarzania obrazu w systemach automatycznego nadzoru. W rozdziale piątym zaprezentowano przyjętą metodologię, proponowaną architekturę sprzętową i logiczną kamery inteligentnej oraz implementacje elementów składowych. W rozdziale szóstym omówiono wyniki badań eksperymentalnych. Zestawienie oryginalnych w końcowej części rozprawy jest rzetelne i umożliwia określenie oryginalnego wkładu Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka i robotyka.

   W rozdziale pierwszym, po krótkim wprowadzeniu w problematykę badań, zaprezentowano motywację podjęcia badań, tezy rozprawy oraz zestawiono znaczenie rezultatów rozprawy w kontekście potencjalnych zastosowań. W końcowej części rozdziału przedstawiono zakres oraz zawartość rozprawy. Motywacja podjęcia tematu wynika wprost z poprawnie zidentyfikowanego zapotrzebowania na inteligentne kamery o małym poborze mocy do budowy sieci kamer oraz ograniczeń i wad obecnych rozwiązań w obszarze monitoringu i nadzoru. Wnioski wyciągnięte z analizy pokrewnych rozwiązań doprowadziły do postawienia oryginalnych hipotez naukowych. W rozdziale 2 zamieszczono przegląd prac poświęconych kamerom inteligentnym oraz systemom automatycznego nadzoru. W dwóch podrozdziałach Autor zaprezentował systemy automatycznego nadzoru wizyjnego oraz przybliżył rozwiązania stosowane we współczesnych kamerach inteligentnych. W rozdziale 3, po przedstawieniu układów FPGA oraz układów SoC Zynq firmy Xilinx, omówiono metody projektowania układów reprogramowalnych. W końcowej części rozdziału zaprezentowano metodologię frAGILE autorstwa M. Krafta. Prezentacja układów reprogramowalnych jest wyczerpująca. W kolejnym rozdziale omówiono wybrane algorytmy przetwarzania obrazów, które znajdują zastosowanie w systemach automatycznego nadzoru. Omówiono funkcjonalności, jakie oczekiwane są przez projektantów systemów monitoringu wizyjnego. Algorytmy i rozwiązania przedstawione są poprawnie pod względem merytorycznym. W rozdziale 5 omówiono autorskie implementacje algorytmów przetwarzania obrazów na platformie sprzętowej typu SoC. Szczegółowo omówiono architekturę całego układu, a także budowę bloków składowych. Zaprezentowano także koncepcję *IP core*. Prezentowane rozwiązania są oryginalne i kompletne.

W rozdziale 6 zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych. Analizowano wykorzystanie zasobów układów FPGA, skalowalność tych układów do wymagań aplikacji, a także szybkość działania w odniesieniu do alternatywnych platform. Na autorski wkład składają się wyniki uzyskane w oparciu o zaproponowany generator drzew decyzyjnych dla układów programowalnych. W końcowej części zaprezentowano wyniki prac eksperymentalnych nad algorytmami do zarządzania siecią kamer inteligentnych.

Język pracy jest poprawny. Recenzowana praca doktorska jest dobrze zredagowana. Autor jasno przedstawia hipotezy badawcze, formułuje cel główny i cele cząstkowe. Zagadnienie badawcze przedstawione są poprawnie pod względem merytorycznym. Zaproponowane rozwiązania mają znaczący potencjał aplikacyjny oraz są należycie udokumentowane. Rozdziały pozostają w odpowiednim związku przyczynowo-skutkowym. Zaproponowane rozwiązania, sformułowanie problemów badawczych, sposób przeprowadzenia badań naukowych oraz analiza uzyskanych wyników świadczą o niezbędnej erudycji doktoranta i przygotowaniu do realizacji prac badawczych. Lektura rozprawy pozwala prześledzić realizację założonego celu. Wnioski prezentowane w podsumowaniu pracy mają oparcie w proponowanych rozwiązaniach oraz wynikach empirycznych.

3. Na wartościowy i oryginalny element pracy składa się sprzętowa architektura kamery wizyjnej dla potrzeb budowy inteligentnych systemów monitoringu. Wspomniana architektura wspomaga projektowanie układów FPGA oraz łączenie heterogenicznych modułów w całość, a także wspiera integrowanie zasobów SoC z rdzeniami ogólnego przeznaczenia oraz logiką programowalną. Dzięki opracowanym rozwiązaniom strumieniowe akceleratory sprzętowe mogą być łatwo wkomponowane w system. Na oryginalny dorobek składa się także zestaw modułów programowych, które umożliwiają dobór i sterowanie parametrami akceleratorów sprzętowych. Autor poprawnie zidentyfikował, a następnie przebadał wąskie gardła związane z transmisją danych do/z pamięci zewnętrznej, które powinny być brane pod uwagę na etapie analizy wymagań. Opracowane rozwiązania są oryginalne.

   Nowatorskie rozwiązania dotyczą także projektowania efektywnych algorytmów przetwarzania obrazów do detekcji, śledzenia opisu i klasyfikacji obiektów znajdujących się w polu widzenia kamery inteligentnej, w szczególności w kontekście efektywnego wykorzystania ograniczonych zasobów, ograniczeń łączy transmisyjnych oraz ograniczeń energetycznych dla poszczególnych węzłów systemu. Do istotnych osiągnięć zaliczają się także autorskie metody sterowania przepływem informacji w pojedynczym węźle oraz w całej sieci, a także koncepcja IP-core, które umożliwiają wykorzystanie modułów sprzętowych w dowolnej skonfigurowanej architekturze. W pracy zaimplementowano akceleratory sprzętowo-programowe do realizacji operacji przetwarzania obrazów w typowym potoku przetwarzania w kamerze inteligentnej. W pracy pokazano, że dzięki wybraniu znanego algorytmu przybliżonej mediany w połączeniu z dodatkowymi filtrami do detekcji obiektów ruchomych możliwe jest wykorzystanie pełnego potencjału układu reprogramowalnego. Do detekcji, a następnie dopasowania cech punktowych zaimplementowano sprzętowe akceleratory detektora cech punktowych FAST oraz binarnego deskryptora BRIEF. Dzięki opracowanym rozwiązaniom uzyskano możliwość skalowania do potrzeb aplikacji poprzez elastyczny moduł dopasowania. Klasyfikacja obiektów realizowana jest w oparciu o znany deskryptor LBP oraz drzewa decyzyjne. Do implementacji omawianych akceleratorów wykorzystywano zaproponowaną uniwersalną architekturę logiczną i sprzętową. Autor opracował także narzędzia do automatycznej translacji modelu klasyfikatora do postaci

sprzętowej, które zostały udostępnione w sieci Internet. Autor opracował także komponenty programowe do detekcji nowych węzłów, przesyłania komunikatów, aktualizacji oprogramowania pokładowego, sterowania parametrami kamer i wizualizacji stanu sieci. Na autorski wkład składa się metoda sterowania aktywnością kamer w kontekście mniejszego zużycia energii. Wspomniany cel osiągnięto dzięki zaproponowanej metodzie regulacji w oparciu o wykryte zawczasu obiekty oraz komunikacji pomiędzy węzłami sieci w celu ich aktywacji bądź dezaktywacji.

Praca wzbogaca naszą wiedzę, jest inspirująca i stanowi bardzo dobry materiał do dalszych prac. Rozwiązania zaproponowane w pracy są całościowe i mają nowatorski charakter. Autorskie propozycje rozwiązań wskazują na dobrą znajomość zagadnień związanych z przedmiotem rozprawy oraz na dobre wyczucie istoty prac o charakterze badawczym. Podjęty temat ma istotne walory praktyczne oraz poznawcze. Wyniki badań eksperymentalnych są spójne, przekonujące i należycie udokumentowane.

4. Słabych stron rozprawy jest niewiele i są one mniej istotne. Od strony poznawczej pracę wzbogaciłoby zaprezentowanie możliwości współczesnych układów GPU w kontekście projektowania i konstrukcji inteligentnych kamer dla potrzeb inteligentnego monitoringu, w tym także z wykorzystaniem mobilnych układów GPU (np. typu NVIDIA Jetson TX2, Jetson Nano, SoC Tegra). Z pewnością warto byłoby odnieść się do oferowanych możliwości oraz ograniczeń tych technologii, w tym także w kontekście prędkości przetwarzania sekwencji obrazów, wnoszonych opóźnień, skalowalności oraz zapotrzebowania na energię. Pracy nie zaszkodziłoby odniesienie się do projektowania układów sprzętowych w oparciu o OpenCL (zob. np. Waidyasooriya i inni: Design of FPGA-Based Computing Systems with OpenCL, 2018). Pracy nie zaszkodziłaby wzmianka o RT-Linux, w szczególności kontekście prezentowanych wyników w podrozdziale 6.2. Przy starannym przejrzeniu rozprawy dostrzegłem szereg błędów o charakterze edycyjnym – niemniej liczba potknięć nie odbiega od normy.
   1) Pracy nie zaszkodziłoby zacytowanie prac dedykowanym akceleratorom FPGA dla sieci neuronowych, np.:
      - Mittal: "A survey of FPGA-based accelerators for convolutional neural networks", 2018.
      - Guo et al.: "A Survey of FPGA-Based Neural Network Inference Accelerator", 2018.
   2) Pracy nie zaszkodziłoby zacytowanie prac przeglądowych, dedykowanym układom FPGA:
      - Garcia et al.: "A Survey on FPGA-Based Sensor Systems: Towards Intelligent and Reconfigurable Low-Power Sensors for Computer Vision, Control and Signal Processing", Sensors, 2014,
      - Abdelouahab et al.: "Accelerating CNN inference on FPGAs: A Survey", 2018.

      Interesujące byłoby przeanalizowanie zaproponowanych rozwiązań i odniesienie ich do rozwiązań zaproponowanych w powyższych pracach. W przeglądzie literatury w niniejszej rozprawie dominują prace opublikowane kilka lub kilkanaście lat temu i z pewnością pracy nie zaszkodziłoby przywołanie bardziej aktualnych prac.

   Powyższe uwagi mają specyficzny charakter, gdyż nie umniejszają w najmniejszym stopniu wartościowych osiągnięć, a ukierunkowane są na uczynienie z bardzo dobrej rozprawy jeszcze lepszej.

5. Wkład Autora w rozwój dyscypliny związanej z tematyką rozprawy jest namacalny oraz został należycie udokumentowany. Reasumując, stwierdzam, iż Pan mgr inż. Michał Fularz wykazał się znaczącą wiedzą w obszarze projektowania i implementacji algorytmów inteligencji maszynowej. Autor rozprawy wykazał się znajomością literatury oraz umiejętnością jej wykorzystania. Zagadnienia badawcze przedstawiono przystępnie i w sposób pozwalający na łatwe umiejscowienie uzyskanych wyników. Proponowane rozwiązania są oryginalne i zostały zaprezentowane w logicznym układzie. Doktorant sformułował oryginalne tezy i wykazał ich prawdziwość zgodnie z zasadami naukowymi. Uważam, że doktorant uzyskał wartościowe wyniki, nie tylko poszerzające naszą wiedzę w obszarze rozwiązań sprzętowych dla potrzeb przetwarzania obrazów, ale co istotne, posiadające bardzo wysoki potencjał aplikacyjny. W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgra inż. Michała Fularza spełnia z wyraźnym nadmiarem wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim, zarówno pod względem zawartości, jak i formy. Stwierdzam niniejszym, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia kryteria określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65/2003, poz. 565 z późn. zm.). Stąd wnoszę o dopuszczenie Pana Michała Fularza do dalszych czynności przewodu doktorskiego w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka.

Bogdan Kwolek