

Prof. dr hab. inż. Franciszek Sereżyński  
Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie  
Wydział Matematyczno – Przyrodniczy  
Szkoła Nauk Ścisłych  
ul. Wóycickiego 1/3, 01-938 Warszawa

Warszawa, 12.03.2023

## RECENZJA

*rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Bolka nt.*

**„Wyznaczanie dynamicznej mapy 2D na podstawie wielomodalnych danych rejestrowanych przez urządzenia mobilne”**

*w związku z ubieganiem się o uzyskanie stopnia doktora nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja*

### **1. Problematyka naukowa oraz przedmiot rozprawy**

Obserwowany aktualnie szybki rozwój nowych technologii informatyczno-komunikacyjnych takich jak cloud/fog/edge/ computing, ciągle rosnąca liczba użytkowników sieci telefonii komórkowej korzystających ze smartfonów o coraz większych możliwościach kolekcjonowania, przetwarzania i przesyłania danych multimedialnych, a przede wszystkim rozwój Internetu Rzeczy powoduje, że gwałtownie rośnie objętość informacji o otaczającym nas świecie. Informacja zbierana w określonym geograficznie obszarze, np. skrzyżowanie ulic miasta ma różnoraki charakter, w tym charakter kontekstowy, który zależy od potencjalnego celu jej wykorzystania. Informacja ta musi być nie tylko przechowywana w odpowiedniej formie, ale także w dużej jej części musi być w szybki sposób aktualizowana, by służyć w sposób wiarygodny w charakterze danych wejściowych dla systemów podejmowania decyzji, w tym dla powstających aktualnie systemów tzw., inteligencji otoczenia (ang. Ambient Intelligent).

Jednym z osiągnięć naszej cywilizacji jest przechowywanie takiej informacji w postaci map. Mimo, że mapy w ich najprostszej formie znane są i używane przez ludzi od wielu wieków, to rewolucja informacyjna, która trwa już od kilkadziesiąt lat wpłynęła i dalej wpływa na ewolucję zawartości informacji przechowywanej w mapach i ich funkcjonalności. Dzięki możliwościom współczesnych technik cyfrowych współczesne mapy cyfrowe są w stanie realizować wiele wskazanych wyżej celów związanych z ich funkcjonalnością. Jednak oczekiwania związane z rozwojem nowych usług, w tym usług związanych z kontekstem otoczenia i rozwojem systemów inteligencji otoczenia, znacznie wyprzedzają możliwości funkcjonalne współczesnych cyfrowych map 2D.

Doktorant w swojej rozprawie rozpoznaje szereg aktualnych słabości istniejących we współczesnych mapach cyfrowych. Jedną z nich, na którą wskazuje, to brak możliwości zbierania i przetwarzania informacji mających charakter temporalny, a więc informacji o otaczającym otoczeniu charakteryzujących się dynamiką kilku godzin. Cel jaki stawia sobie w rozprawie jest budowa i weryfikacja systemu, który umożliwi tworzenie mapy 2D na podstawie danych przestrzennych i czasowych uzyskiwanych z wielu źródeł, dzięki której będzie możliwe dostarczenie informacji o położeniu nie tylko obiektów statycznych ale również dynamicznych. Cel rozprawy jest bardzo aktualny i ambitny, a przedstawione w rozprawie wyniki w pełni potwierdzają tezę i cel rozprawy.

## 2. Analiza treści rozprawy oraz uzyskanych wyników

Rozprawa składa się z 5 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 98 pozycji literaturowych. Jest ona poprzedzona streszczeniem w j. polskim oraz w j. angielskim, spisem tabel oraz spisem rysunków. Całość pracy obejmuje 104 strony i ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Najważniejsze rozdziały rozprawy to rozdziały 3 i 4, które zawierają oryginalne wyniki Doktoranta.

We Wstępie rozprawy Doktorant przedstawił zagadnienia związane z problematyką tworzenia cyfrowej mapy 2D na podstawie danych przestrzennych i czasowych oraz motywacje związane z podjęciem tematu rozprawy. Następnie formułuje On tezę rozprawy, jej cel oraz przedstawia krótko treść poszczególnych rozdziałów.

W Rozdziale 2 Doktorant przedstawił literaturowy przegląd związany z poruszonymi w rozprawie zagadnieniami. Pierwszym zagadnieniem, które było przedmiotem Jego analizy były rozwiązania dotyczące algorytmów badania głębi obrazu umożliwiających ocenę odległości. W ramach tego zagadnienia Doktorant wskazuje na trzy istniejące w literaturze podejścia: a) podejście oparte na nadzorowanym uczeniu maszynowym, w tym z użyciem głębokich sieci neuronowych, b) podejście bazujące na estymacji odległości poprzez wykorzystanie samo-nadzorującego się uczenia maszynowego oraz c) metody szacowania odległości wyrażonej w jednostkach metrycznych. Następnym rozpatrywanym zagadnieniem była kwestia detekcji obiektów oraz kwantyzacja modeli. Doktorant wskazuje tu na dwa istniejące rozwiązania: a) detekcja obiektów z wykorzystaniem głębokich sieci neuronowych oraz b) kwantyzacja modeli do detekcji obiektów. Kolejne dwa rozpatrywane przez Doktoranta zagadnienia to algorytmy śledzenia obiektów na obrazie kamery oraz wizualizacja danych przestrzenno-czasowych.

Rozdział 3 jest pierwszym rozdziałem rozprawy, w którym przedstawiono wyniki własne związane z tematyką rozprawy. W tym obszernym rozdziale Doktorant przedstawił zaproponowane rozwiązania i jego składowe. Na wstępie rozdziału Doktorant przedstawia ogólną architekturę systemu, którego celem jest umożliwienie tworzenia mapy 2D na podstawie danych przestrzennych i czasowych. Tworzą ją urządzenia brzegowe: urządzenia mobilne oraz kamery, które poprzez API serwera TCP umożliwiają przekazywanie informacji z urządzeń brzegowych do serwera centralnego *Core*, a dalej do bazy danych (*OrientDB n-nodes*), do której, poprzez podsystem *Load balancer* jest przekazywana już przetworzona informacja. Tworzenie aktualnej wizualizacji regionu odbywa się dzięki modułowi *UI*, a moduł automatycznego trenowania (*ATM*) jest odpowiedzialny za wybór właściwego modelu sieci neuronowej dla urządzeń brzegowych.

Urządzenia brzegowe typu urządzenia mobilne umożliwiają detekcję z użyciem sieci neuronowej określonej klasy obiektów oraz segmentację obrazu z kamery, a kluczowym elementem było opracowanie aplikacji mobilnej algorytmu doprecyzowującego lokalizację widocznego w kamerze obiektu, opartego na rezultatach badania głębi obrazu. Opracowanie takiego algorytmu było związane z wykonaniem szeregu badań testowych. Przetwarzanie danych po stronie urządzeń brzegowych typu kamery wiązało się z kwestią przetwarzania danych z czasie rzeczywistym, co wymagało osadzenia tam sieci neuronowej i środowiska umożliwiającego efektywne przetwarzanie informacji w czasie rzeczywistym. Rozwiązanie tej kwestii wiązało się również z wykonaniem szeregu eksperymentów i testów.

Rozwiązanie problemu przesyłania danych z urządzeń brzegowych do serwera centralnego, synchronizacji, agregacji tych danych oraz dalszego przesyłania przetworzonych danych do bazy danych wymagało również przeprowadzenia całego szeregu badań i testów. Konieczne było rozwiązanie problemu maksymalizacji szybkości obsługi nadsyłanych danych przez serwer jak też wdrożenie systemu szyfrowania *AES-256* zapewniającego bezpieczeństwo danych wysyłanych przez użytkowników. Podobne problemy wiązały się z zagadnieniem efektywnego zapisu/odczytu danych do bazy *noSQL*, co wymagało porównania kilku silników baz danych i wyboru jednego z nich.

Kolejnym bardzo ważnym, a w istocie rzeczy centralnym problemem, z punktu widzenia celów realizowanego projektu, było stworzenie możliwości tworzenia mapy na podstawie danych tempo-

ralnych, co wiązało się z możliwością uzyskania rozwiązania umożliwiającego lokalizację obiektów zmieniających położenie w czasie rzeczywistym. Wiązało się to z koniecznością rozwiązania problemu estymacji lokalizacji obiektów w świecie rzeczywistym zarówno po stronie urządzenia brzegowego jak i po stronie serwera. Wymagało to zbadania efektywności szeregu algorytmów i wyboru algorytmu spełniającego założenia projektu.

Ostatnim zagadnieniem, które wymagało rozwiązania była kwestia optymalizacja procesu wyszukiwania danych z serwerów *Open Street Map* w celu zapewnienia wymaganego, z punktu widzenia opracowywanego systemu, czasu wyszukiwania. Ta kwestia była również rozwiązana przez Doktoranta poprzez zaproponowanie i przetestowanie całkowicie nowej struktury zarządzania bazą danych.

Rozdział 4 zawiera wyniki badań eksperymentalnych wykonanych z użyciem zaproponowanego i zaimplementowanego systemu, których celem była weryfikacja systemu pod kątem prawidłowości oraz szybkości jego działania. Pierwszy opisany w tym rozdziale eksperyment dotyczył algorytmu estymacji odległości na podstawie widoku z kamer. Wyniki eksperymentów przeprowadzonych najpierw na miejskim skrzyżowaniu we Wrocławiu, gdzie wykonywano trening sieci neuronowej pełniącej kluczową rolę w algorytmie, a następnie zweryfikowane w środowisku pozamiejskim potwierdziły dużą efektywność prawidłowej detekcji obiektów. W następnym eksperymencie Doktorant przedstawia prototyp aplikacji mobilnej dla systemów *Android* i *iOS* oraz prezentuje wyniki poprawnej weryfikacji algorytmu doprecyzowania lokalizacji obiektów działającego na urządzeniu mobilnym. Kolejny eksperyment miał na celu weryfikację algorytmu integrującego pomiary położenia obiektów uzyskane z różnych źródeł. W wyniku tego eksperymentu wykazano w szczególności, że badany algorytm wykonywany na lokalnym urządzeniu mobilnym realizujący fuzję danych o obiektach wykrywanych na obrazie umożliwia lokalizację obiektów 3D z dokładnością do 10m. Ostatni prezentowany w pracy eksperyment był związany z testowaniem modułu zwracającego dane do renderingu mapy.

Ostatni z rozdziałów, Rozdział 5 jest podsumowaniem wyników osiągniętych w rozprawie oraz przedstawieniem wniosków wynikających z przeprowadzonych badań.

### **3. Najistotniejsze osiągnięcia przedstawione w rozprawie**

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Bolka zawiera nowe, oryginalne wyniki dotyczące tworzenia map 2D na podstawie danych przestrzennych i czasowych. Do najistotniejszych osiągnięć rozprawy zaliczyć należy:

- Zaproponowanie, implementacja oraz eksperymentalna weryfikacja algorytmu fuzji danych o obiektach wykrywanych na obrazie zapewniającego efektywną lokalizację obiektów 3D,
- Opracowanie, implementacja oraz weryfikacja algorytmu integracji wielu pomiarów położenia obiektów 3D pozwalającego na poprawienie dokładności ich lokalizacji,
- Wykorzystanie głębokich sieci neuronowych w celu efektywnej detekcji obiektów na urządzeniach mobilnych,
- Znaczne zwiększenie procesu wyszukiwania informacji dla celów renderingu mapy przez zastąpienie systemu zarządzania bazą danych *PostgreSQL* w systemie *Open Street Map* przez grafowy system zarządzania bazą danych *OrientDB*,

- Całościowa integracja i wdrożenie systemu tworzenia map 2D zarówno w formie eksperymentalnej umożliwiającej jej dalszy rozwój jak też w formie platformy dla potencjalnych użytkowników systemu nie posiadających wiedzy technicznej.

#### 4. Uwagi merytoryczne

W trakcie czytania rozprawy doktorskiej nasuwają się pewne uwagi, a mianowicie:

- Doktorant wielokrotnie używa w rozprawie pojęcia „wielomodalne dane”, ale nigdzie nie wyjaśnia znaczenia tego terminu pozostawiając go do interpretacji czytelnika,
- Ważnym elementem zbudowanego systemu są głębokie sieci neuronowe, które były wykorzystywane przez Doktoranta. W rozprawie brak informacji bardziej szczegółowej o architekturze wykorzystanych sieci w kontekście rozpatrywanej w pracy zastosowań tych sieci (ile danych wejściowych podawano do sieci, ile warstw posiadała sieć, ile było elementów wyjścia, jakie algorytmy uczenia były stosowane, itp.). Korzystne dla pracy byłoby umieszczenie w niej rozdziału, który wyjaśniał by te kwestie,
- Elementami brzegowymi pozyskiwania danych były kamery oraz urządzenia mobilne. O ile rozumiała jest rola umieszczonych na stałe kamer należących do systemu zbierających informacje w danym otoczeniu, to nie jest jasna rola urządzeń mobilnych, które jak rozumiem, nie są trwałym elementem systemu i należą do osób prywatnych i w pewnych tylko okolicznościach stają się chwilowo również elementem systemu. Prosiłbym o doprecyzowanie tej kwestii,
- Co się dzieje z informacją, która istniała przed jej aktualizacją? Czy ta poprzednia informacja jest dalej przechowywana w jakiś sposób?
- Badanie eksperymentalne różnych elementów systemu były przeprowadzane w różnych geograficznie rejonach Polski – co było powodem tego?
- W ostatnim rozdziale rozprawy (str. 93) Doktorant stwierdza: „Zbudowany system posiada szereg zastosowań, np. wytyczanie nowych ścieżek rowerowych ...”,
  - nie jest jasne czy Doktorant mówi o potencjalnych aplikacjach systemu, czy być może któreś z tych aplikacji zostały zrealizowane,
  - w jaki sposób posiadacz urządzenia mobilnego posiadającego dostęp do zbudowanego systemu mógłby przystąpić np., do wytyczenia dla własnych potrzeb nowej ścieżki rowerowej w okolicy, w której przebywa?

Powyżej przedstawione uwagi wynikają z mojej ciekawości i próby lepszego zrozumienia zaproponowanego przez Doktoranta systemu i nie mają istotnego wpływu na jakość i wagę przedstawionych rozwiązań i w żadnym stopniu nie obniżają wartości pracy. Doceniam wkład pracy Doktoranta przy realizacji pracy i uzyskane wyniki, jak też liczę na interesującą dyskusję w trakcie obrony pracy, podczas której z pewnością zostaną wyjaśnione moje uwagi. Reasumując można stwierdzić, że główne wyniki rozprawy potwierdzają osiągnięcie z powodzeniem założonego w rozprawie celu.

## 5. Uwagi redakcyjne i edytorskie

Rozprawa została napisana w bardzo dobrym stylu zarówno językowym jak i edytorskim. Czyta się ją z przyjemnością. Praktycznie nie mam żadnych uwag redakcyjno-edytorskich, za wyjątkiem jednego, być może dyskusyjnego spostrzeżenia, dotyczącego podpisów pod rysunkami i tablicami. Podpisy dotyczące rysunków umieszcza się tak jak to czyni Doktorant pod rysunkami, natomiast podpisy dotyczące tabel umieszcza się zwykle nad tabelami, natomiast Doktorant umieszcza je również pod tablicami.

## 6. Podsumowanie

Wyniki uzyskane przez Doktoranta w rozprawie mają istotne znaczenie technologiczne i są kolejnym znaczącym krokiem dla przygotowania infrastruktury dla nowych aplikacji informatyczno-komunikacyjnych. W związku z tym stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Bolka nt. „*Wyznaczanie dynamicznej mapy 2D na podstawie wielomodalnych danych rejestrowanych przez urządzenia mobilne*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i pozwala na ubieganie się o uzyskanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. W konsekwencji stwierdzam, że rozprawa może stać się przedmiotem publicznej obrony i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Kamila Bolka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'K. Bolka'.