



Gliwice, 22.05.2024
SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 6. 06. 2024

Recenzja rozprawy doktorskiej

Zarejestrowano pod nr

Podpis 

Tytuł rozprawy: Adaptacja modelu matematycznego czujnika radarowego na potrzeby testów zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy w środowiskach wirtualnej jazdy
Dyscyplina: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Autor rozprawy: mgr inż. Michał Jasiński
Promotor: dr hab. inż. Paweł Skruch, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Mateusz Komorkiewicz

1. Znaczenie podjętej tematyki

Średnia liczba ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w Europie wynosiła 46 ofiar na milion mieszkańców w 2022 r. Jednak w tym czasie Polska osiągnęła rekordowo niski poziom 60 ofiar śmiertelnych wypadków drogowych na milion mieszkańców. Zaraz za Litwą, Polska znalazła się na czele krajów Unii Europejskiej, którym taka redukcja się udała. Sukces przypisuje się istotnemu podniesieniu kar za naruszenia przepisów. Przewiduje się, że dalszą istotną redukcję liczby wypadków drogowych uda się w Polsce uzyskać w wyniku zgęszczenia sieci fotoradarów i zmian w prawie, które pozwolą na skuteczniejsze automatyczne wystawianie i egzekwowanie mandatów. Takie ekstensywne metody redukcji liczby ofiar zdają się jednak w Europie wyczerpane. W latach 2021–2022 liczba ofiar śmiertelnych wypadków drogowych w Europie wzrosła o 4%. Wprawdzie wzrost ten przypisuje się nie samochodom, ale rosnącemu udziałowi w ruchu rowerów elektrycznych, to jednak remedium szuka się w wyposażeniu właśnie samochodów we właściwe systemy ostrzegające. Kolejnym istotnym zagrożeniem dla użytkowników dróg jest mikrosen, gdyż zmęczenie jest przyczyną około 25% wszystkich wypadków. Zgodnie z nowymi przepisami od lipca 2022 roku wszystkie nowe modele pojazdów na rynku europejskim muszą posiadać zaawansowane zabezpieczenia. Należą do nich technologie wykrywające zmęczenie

i rozproszenie uwagi kierowcy, ulepszone strefy uderzenia, aby zmniejszyć obrażenia pieszych i rowerzystów, a także systemy minimalizujące martwe pole samochodów ciężarowych i autobusów. Oczekuje się, że inicjatywy te znacznie zmniejszą liczbę ofiar śmiertelnych i obrażeń w całej UE. UE dąży do niemal całkowitego wyeliminowania ofiar śmiertelnych i poważnych obrażeń do 2050 r. w ramach inicjatywy „Vision Zero”. Co więcej, regulacje te mają wspierać większą zautomatyzowaną mobilność oraz zwiększać innowacyjność i konkurencyjność europejskiego sektora motoryzacyjnego.

Podjęta przez Doktoranta tematyka wpisuje się wprost w zakres dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Należy również podkreślić, że tematyka rozprawy doktorskiej jest niezwykle ważna i aktualna zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia. Opracowane metody w zakresie modelowania znajdują zastosowanie w doskonaleniu systemów wspomagania kierowcy.

2. Cel pracy i tezy

Celem pracy jest usprawnienie procesu walidacji algorytmów implementowanych w zaawansowanych systemach wspomagania kierowcy (ang. *Advance Driver Assistance Systems, ADAS*) takich jak np. aktywny tempomat (ang. *Adaptive Cruise Control, ACC*), inteligentny asystent kontroli prędkości (ang. *Intelligent Speed Assistance, ISA*) czy system awaryjnego utrzymania pojazdu w pasie ruchu (ang. *Emergency Lane-Keeping System, ELKS*). Systemy te i im podobne, przed dopuszczeniem do instalowania w pojazdach, które będą później eksploatowane na drogach publicznych, muszą przejść drobiazgowy i długotrwały proces walidacji. Celem tego procesu jest wykrycie możliwie wszystkich błędów sprzętowych i programowych w ich konstrukcji. Wiadomo, że nie da się w ogólnym przypadku formalnie – tak jak robią to matematycy dowodząc swoich twierdzeń – udowodnić poprawności działania ani sprzętu ani oprogramowania. Pozostaje zatem czasochłonne i żmudne testowanie urządzeń i systemów, które ostatecznie i tak niczego nie gwarantuje. Zmniejsza tylko prawdopodobieństwo przekazania do eksploatacji systemu z poważnymi wadami. W przypadku przemysłu motoryzacyjnego nie można w tym procesie pominąć żadnego etapu przekazując użytkownikowi produkt nie do końca sprawdzony, ponieważ w sposób oczywisty grozi to poważnymi następstwami z możliwością spowodowania katastrofy w ruchu lądowym włącznie. Co więcej każda modyfikacja certyfikowanego systemu, w tym taka która wiąże się z usunięciem błędów dostrzeżonych dopiero przez użytkowników końcowych, wymaga powtórzenia całego procesu testowania.

W przypadku samochodów chodzi o jazdy testowe na dystansie rzędu miliona kilometrów, co w daje przypadku pojedynczego pojazdu 3 lata nieprzerwanego ruchu. Remedium na tą złożoność jest testowanie algorytmów i systemów z wykorzystaniem symulatorów prowadzące do koncepcji testów SIL (ang. *software in the loop*) oraz HIL (ang. *hardware in the loop*). Doktorant w badaniach postanowił wdrożyć teoretyczną koncepcję uproszczonego modelu czujnika radarowego stosowanego powszechnie w pojazdach samochodowych do praktyki testów SIL i HIL. Model ten ignoruje szczegóły propagacji fal elektromagnetycznych w symulowanym środowisku jazdy oraz ich odbicia i ugięcia na istniejących w wirtualnym świecie przeszkodach. Zamiast tego eksplorowana jest koncepcja centrów rozpraszania – praktycznie punktowych obszarów na stałe związanych z obiektami wirtualnego świata, które są wyłącznym źródłem sygnałów odbitych. Prowadzi to do ogromnego uproszczenia obliczeń, jako że problem numerycznej symulacji propagacji fal elektromagnetycznych w scenariuszach i okolicznościach typowych dla codziennych działań ludzi jest sam w sobie problemem złożonym, który dopiero od niedawna potrafimy w miarę rozwiązać. Aby swój cel osiągnąć Doktorant najspierw formalnie zdefiniował, skutecznie co rozumie przez 1) wiarygodność modelu, 2) wydajność modelu i 3) użyteczność modelu. Następnie model taki zaimplementował, przetestował, zaproponował istotne jego ulepszenia i modyfikacje i ponownie testował powtarzając proces modyfikacji i testowania wielokrotnie, aż do uzyskania pożądanych rezultatów. W końcu Doktorant mógł przedstawić model czujnika radarowego, który posiada wymienione wyżej własności i nadaje się do wykorzystania w ustandaryzowanym środowisku symulacyjnym do testowania podsystemów pojazdów drogowych. Na tej podstawie Doktorant postawił następującą tezę, którą przytaczam poniżej dosłownie:

Możliwa jest adaptacja sztucznego zbioru danych wygenerowanego przy użyciu modelu matematycznego czujnika radarowego bazującego na koncepcji centrów rozpraszania pod kątem użyteczności w kontekście testów systemu klasy ADAS w czasie rzeczywistym w symulatorze jazdy.

3. Zawartość

Praca pana mgr Michała Jasińskiego obejmuje 167 stron maszynopisu, na co składa się 9 rozdziałów razem z Podsumowaniem, spis literatury, lista skrótów, opis użytej notacji, wykaz rysunków i wykaz tabel.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki pracy doktorskiej. Przytoczone zostają wymagania Unii Europejskiej w stosunku nowo rejestrowanych pojazdów samochodowych. Czytelnik dowiaduje się w nim o złożoności procesu walidacji poszczególnych urządzeń i systemów pojazdu samochodowego oraz o roli testów symulacyjnych w przemyśle motoryzacyjnym. Podkreślona zostaje też kluczowa rola czujników radarowych dla działania wszystkich podsystemów systemu wspomagania kierowcy i waga problemu ich właściwego modelowania. W rozdziale tym zdefiniowano pojęcia 1) wiarygodności modelu; 2) wydajności modelu i 3) użyteczności modelu. Definicje te stanowią podstawę sformułowania w omawianym rozdziale tezy pracy doktorskiej.

Rozdział drugi poświęcony jest omówieniu zasady działania czujników radarowych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym. Autor podaje typologię radarów oraz krótko wspomina ich historię. Więcej miejsca poświęca omówieniu radarów z falą ciągłą, które są najpowszechniej wykorzystywane przy konstrukcji systemów wspomagania kierowcy. Dużą uwagę autor przykład do wyjaśnienia zasady działania i metod przetwarzania sygnałów, które pozwalają wyodrębnić z fizycznych sygnałów położenie oraz składową radialną prędkości względnej przeszkód odbijających sygnał radaru.

Rozdział trzeci omawia standardy dotyczące symulacji w przemyśle samochodowym. Omówione zostają szczegóły standardów, które mają zastosowanie w przypadku modelu czujnika radarowego. Standardy te dotyczą w głównej mierze formatu wymiany danych pomiędzy poszczególnymi elementami symulatora. Dzięki zachowaniu standardów każdy podsystem symulatora, a w szczególności model czujnika radarowego, może być rozwijany niezależnie od pozostałych, co generuje liczne korzyści począwszy od etapu rozwoju a skończywszy na eksploatacji.

Rozdział 4. skupia się na typologii i zasadzie konstrukcji uproszczonych modeli czujnika radarowego. Modele te oddają szczegóły działania rzeczywistego czujnika radarowego znacznie dokładniej niż tzw. czujnik generyczny, ale pomijają symulację wielu istotnych a jednocześnie złożonych zjawisk, jak np. propagacja fal elektromagnetycznych, co istotnie poprawia wydajność modelu w sensie zdefiniowanym przez Doktoranta. Ostatecznie autor zdecydował się na implementację modelu symulacyjnego działającego na poziomie wykryć i korzystającego z geometrycznego opisu wirtualnej rzeczywistości.

Rozdział 5. zawiera opis implementacji modelu czujnika radarowego wybranego przez Doktoranta. Sam model podany został przez A. Martowicza z AGH w Krakowie. Doktorant

szczegółowo opisuje w tym rozdziale proces przekształceń geometrycznych, który w ramach modelowania, prowadzi od opisu geometrii przeszkód w wirtualnym środowisku do zbioru centrów rozpraszania i dalej do zbioru wykryć. Na tym etapie model czujnika może przyjmować dane opisujące środowisko w formacie w jakim zwracają je systemy detekcji obiektów w strumieniu wideo i generuje zbiór wykryć w takim samym formacie w jakim robi to rzeczywisty czujnik radarowy. Dzięki temu możliwe jest porównanie na przykładzie rzeczywistej jazdy testowej zbioru wykryć zwracanego przez rzeczywiste czujniki radarowe samochodu ze zbiorem wykryć generowanym przez modele tych czujników na podstawie opisu rzeczywistości zwracanego przez detektory obiektów. *Ground truth* stanowi w tym przypadku zapis wideo. Dzięki wysokiej wiarygodności detektorów obiektów można w takim teście pominąć ich wpływ na wiarygodność modeli czujników. Wynik takiego testu okazał nie niezbyt korzystny dla modelu A. Martowicza.

W rozdziale 6. Doktorant wprowadza swoje własne, istotne rozszerzenia do modelu A. Martowicza. Chodzi o ograniczenie rozdzielczości symulowanych przyrządów w dziedzinie przestrzeni i prędkości, eliminację wykryć maskowanych przez zakłócenia oraz generowanie fałszywych wykryć. Odpowiednie modele zostały przez Doktoranta sparametryzowane, tak aby stworzyć możliwość dostrojenia wykryć generowanych przez model do tych uzyskiwanych eksperymentalnie. Ogólna liczba parametrów modelu wynosi 6 i obejmują one 1) wzmocnienie testu statystycznego, 2) rozdzielczość radialną 3) rozdzielczość kątową, 4) odchylenie standardowe generatora fałszywych wykryć dla pozycji wzdłużnej, 5) odchylenie standardowe generatora zakłóceń dla pozycji poprzecznej, 6) liczba fałszywych wykryć dla pojedynczego cyklu pomiarowego.

Rozdział 7. poświęcony jest metodologii dostrajania parametrów zaproponowanego modelu czujnika radarowego. Celem jest jak najwierniejsze odwzorowanie zbioru wykryć, traktowanego jako obraz, a zwracanego przez model czujnika do zbioru wykryć zwracanego w tym samym scenariuszu drogowym przez rzeczywisty czujnik radarowy. Doktorant, aby uprawdopodobnić rozważane scenariusze drogowe bierze pod uwagę zawsze czwórkę czujników rozmieszczoną w narożnikach obrysu przenoszącego je pojazdu jako jedną całość, dostarczającą w wyniku połączenia wszystkich wykryć całościowego obrazu otoczenia pojazdu. Doktorant proponował swoją własną, autorską miarę odległości pomiędzy zbiorami wykryć. Aby określić odległość między dwoma zbiorami wykryć Doktorant w pierwszym kroku każdy zbiór wykryć sprowadzana do dyskretnego rozkładu

prawdopodobieństwa, a w drugim kroku mierzy odległość między rozkładami korzystając z odległości Wassersteina. Dzięki temu może dalej zastosować wybrane metody optymalizacji, aby dobrać parametry modelu czujnika minimalizujące, zdefiniowaną wcześniej, średnią odległość między wykryciami rzeczywistymi a syntetycznymi. Rozdział kończy się jakościową oceną wyników optymalizacji.

W rozdziale 8. Doktorant w istocie stara się zweryfikować prawdziwość sformułowanej tezy. W tym celu szacuje czasową złożoność obliczeniową algorytmów angażowanych w działanie modelu czujnika radarowego. To w celu wykazania, że model jest wydajny w sensie sformułowanym przez Doktoranta. W rozdziale tym Doktorant ponownie dokonuje też oceny jakości wykryć generowanych przez model czujnika. W tym celu angażuje algorytmy rekonstrukcji figur brzegowych na podstawie wykryć radarowych. Odległość Jaccarda zbioru figur utworzonych na podstawie syntetycznych wykryć od zbioru figur utworzonych na podstawie wykryć rzeczywistego czujnika jest miarą jakości działania modelu czujnika. Im mniejsza ta odległość, tym lepsze odwzorowanie działania rzeczywistego czujnika. I tu Doktorant pokazał, że model czujnika z optymalnymi nastawami parametrów produkuje na ogół bryły brzegowe bardziej zbliżone do tych, które produkowane są w wyniku działania czujnika rzeczywistego niż modele z innymi nastawami. Niezależnie od stopnia skomplikowania realizowanego scenariusza jazdy można było pokusić się o wyznaczenie ograniczenia górnego na wartość miary jakości, co stanowi dowód, że model Doktoranta spełnia warunek wiarygodności.

Rozdział 9. podsumowuje wyniki uzyskane przez Doktoranta w trakcie realizacji przez niego projektu doktorskiego.

4. Źródła

Bibliografia zawiera 148 pozycji, w tym 4 prace, których współautorem jest Doktorant. Literaturę starannie dobrano. Doktorant odwołał się między innymi do reprezentatywnych prac z zakresu pojazdów autonomicznych, systemów aktywnego bezpieczeństwa w branży motoryzacyjnej, systemów radarowych wizyjnych oraz wizyjnych, systemów pomiarowych, a także analizy dużych zbiorów danych.

5. Ogólna ocena rozprawy

Doktorant osiągnął postawione cele stosując odpowiednią metodykę badawczą. Przyjęte założenia są przez Doktoranta szczegółowo uzasadniane. Odwołania do literatury Doktorant

podał w sposób przejrzysty. Cele rozprawy doktorskiej zostały osiągnięte poprzez wybór dobrze znanego modelu czujnika radarowego, sprawdzenie jego wad i zalet w eksperymencie angażującym jazdy testowe, a następnie zaproponowanie niezbędnych modyfikacji modelu, tak aby stał się bardziej wiarygodnym. Doktorant zaproponował w pracy formalne definicje i algorytmy, wykorzystujące istniejące narzędzia matematyczne, służące pomiarowi wiarygodności modelu czujnika. W rezultacie rozprawa zawiera autorskie propozycje metodologiczne oceny jakości modelu czujnika radarowego poprzez systematyczne badanie jego wydajności, wiarygodności i wnioskowaniu na tej podstawie o jego użyteczności. Proponowana metodyka daje się uogólnić na inne rodzaje czujników stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym. Do najważniejszych osiągnięć doktoranta można zaliczyć:

- 1) Przetestowanie modelu samochodowego czujnika radarowego autorstwa A. Martowicza z AGH w Krakowie i porównanie jego działania z działaniem czujnika rzeczywistego w serii jazd testowych.
- 2) Wskazanie tych obszarów, w których model A. Martowicza wykazuje istotne niedoskonałości.
- 3) Uzupełnienie wspomnianego modelu matematycznego o wykrycia obiektów statycznych, generację wykryć fałszywych oraz wprowadzenie efektu skończonej rozdzielczości czujnika, co w dużym stopniu łagodzi niedostatki oryginalnej wersji modelu.
- 4) Zaproponowanie nowej miary odległości między zbiorami wykryć i wykorzystanie jej celem optymalizacji nastaw parametrów zaproponowanych uzupełnień modelu A. Martowicza.
- 5) Podanie formalnej definicji wiarygodności, wydajności i użyteczności modelu czujnika.
- 6) Implementacja zaproponowanego modelu czujnika radarowego w formie właściwej dla standardu ASAM OSI.
- 7) Zaproponowanie autorskiej metody oceny wiarygodności i wydajności modelu i wykorzystanie jej celem wykazania użyteczności zaproponowanego modelu sensora dla wirtualnej walidacji systemów ADAS.

6. Uwagi krytyczne

1) Doktorant w podrozdziale 7.3 proponuje tzw. wskaźnik jakości, pozwalający na porównanie rzeczywistego zbioru wykryć ze zbiorem syntetycznym. Wydaje się, że zaproponowany wskaźnik jest odległością między zbiorami wykryć. Autor pozostawia to domysłności czytelników. Powstają pytania:

- a) Czy rzeczywiście Autorowi chodziło o odległość w ścisłym matematycznym sensie?
- b) Czy użyty wskaźnik rzeczywiście musi spełnić wszystkie warunki odległości?
- c) Jeżeli natomiast Autorowi chodziło o odległość czy mógłby formalnie wykazać, że mamy do czynienia z odległością?
- d) Czy tak zdefiniowaną odległość można stosować w przypadku dowolnych zbiorów dyskretnych czy też ogranicza się ona tylko do zbioru wykryć radarowych?

2) Rozważmy definicję wiarygodności modelu czujnika podaną w pracy:

Wiarygodność – model matematyczny uznaje się za wiarygodny, kiedy wartości wyliczone dla przyjętych wskaźników jakości mieszczą się w ustalonym przedziale błędu, niezależnie od poziomu skomplikowania i charakterystyki scenariusza wirtualnej jazdy, w którym uruchomiono dany model.

„...ustalony przedział błędu...” wydaje się sformułowaniem bardzo arbitralnym. Być może, chodzi o to, że można podać ograniczenie górne na szerokość tego przedziału, ale z drugiej strony jeżeli uwzględnimy, że „matematyk uzyskuje ograniczenie górne na długość swojej brody mnożąc prędkość światła przez wiek wszechświata” może to być nadal sformułowanie mało użyteczne. Czy Autor mógłby podać jakieś wskazówki praktyczne jak rozsądnie ustalić szerokość rzeczzonego przedziału?

3) Podobny problem powstaje w rozdziale 8. Autor proponuje tu nowy wskaźnik ilościowy do pomiaru odległości zbiorów figur ograniczających przeszkody. Przy jakiej wartości tego wskaźnika można powiedzieć, że jest dobrze – zbiory są „podobne” albo bliskie sobie? Czy można tu podać jakieś wskazówki praktyczne?

4) Wydaje się, że zbiory wykryć rzeczywistych i syntetycznych można potraktować jako realizacje jakiejś zmiennej lub procesu losowego. Pozwala to wykorzystać cały aparat statystyki matematycznej opracowany do wykrywania istotnych statystycznie różnic

między realizacjami. Autor w pracy zupełnie takie metody pomija. Czy mógłbym prosić o skomentowanie tego?

- 5) Praca Autora dotyczy wirtualnej walidacji systemów ADAS. Dlaczego nigdzie w pracy nie wykorzystano np. symulatora jazdy? Być może jest to błąd metodologiczny. Prowadzono optymalizacje i eksperymenty, ale żaden z nich nie odbył się w środowisku symulowanym. Może tam wszystko wygląda inaczej? Czy mógłbym prosić o komentarz?

- 6) Weźmy pod uwagę sformułowanie tezy:

Możliwa jest adaptacja sztucznego zbioru danych wygenerowanego przy użyciu modelu matematycznego czujnika radarowego bazującego na koncepcji centrów rozpraszania pod kątem użyteczności w kontekście testów systemu klasy ADAS w czasie rzeczywistym w symulatorze jazdy.

Konstrukcja językowa „adaptacja ... pod kątem ... w kontekście...” sprawiła, że miałem wiele trudności ze zrozumieniem jej. Proponuję wykorzystać konstrukcję „adaptacja ... do ...”. Bardzo prosiłbym Autora o przeformułowanie tezy.

- 7) W pracy znaleźć można wiele błędów typograficznych, z których najbardziej irytujące są spójniki „wiszące” na końcu wiersza. Jest jednak prawdą, że detaliczna znajomość zasad typografii polskiej, choć użyteczna i mile widziana, nie jest dla doktorantów obowiązkowa.

7. Wnioski

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Jasińskiego spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, które zostały określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Michała Jasińskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie.

Jednocześnie, z uwagi na wysoki poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej, wdrożenie wyników badań w praktyce firmy Apitv, a także opublikowanie wyników badań w recenzowanym czasopiśmie naukowym z kwartyłu Q1 dyscypliny *General Computer Science* wg. bazy *Scopus* (jako pierwszy autor) oraz materiałach międzynarodowych konferencji naukowych wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Jack Izydorczyk