



**AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**FIELD OF SCIENCE: ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

**SCIENTIFIC DISCIPLINE: AUTOMATION, ELECTRONIC AND ELECTRICAL  
ENGINEERING**

## **SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION**

---

*Occupancy grid environmental modeling for automotive applications*

---

Author: *Jakub Porębski*

Supervisor: *dr hab. inż. Paweł Skruch, prof.AGH*

Assisting supervisor: *dr inż. Krzysztof Kogut*

Completed in: *AGH University of Science and Technology  
Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science  
and Biomedical Engineering  
Department of Automatic Control and Robotics*

Kraków, 2022

## 1 Abstract

Reliable vehicle environmental modeling is a fundamental prerequisite for advanced driver assistance and autonomous driving systems. A commonly used representation of environment is the occupancy grid map. It divides the vehicle surroundings into a grid of cells and estimates the occupancy state for each cell, assuming the cells are independent of each other. This perception system builds a model of the driving environment by fusing measurements from multiple perceptual sensors including LIDARs, radars, vision sensors, etc.

In state-of-the-art research, many methods have been developed to build a perception system using the occupancy grid, but these methods are only tailored to specific sensor configurations, and their performance is not verified on the existing automotive hardware. Nowadays, car manufacturers, within a single model, offer a wide range of vehicle options that may differ in mounted sensors or driving comfort features. The occupancy grid algorithm offers a single point of reference for environment perception and can work with almost any set of sensors. This in turn can enable cost reduction of the overall system.

This thesis proposes a modular and scalable architecture for the occupancy grid algorithm that can be customized to a variety of sensor configurations, allowing the proposed solution to be easily adapted to different vehicle variants. Presented architecture allows for an effective reduction of measurement uncertainties, which is confirmed by experiments in this work. Guidelines for tuning the occupancy mesh algorithm are also described. Furthermore, the first application of the Dezert-Smarandache fusion method in a three-state automotive occupancy grid is shown. The results of the dissertation show a successful integration of the occupancy grid algorithm in the automated vehicle that can be easily implemented in production.

## 2 Motivation

The occupancy grid has become an increasingly interesting area of research in both industry and academia nowadays. The algorithm is considered a well-known solution in the field of robotics, where it is used to solve the simultaneous localization and mapping problem. In the research reports, the occupancy grid algorithm is presented as applicable to a variety of experimental vehicles, but the series automotive applications are still limited.

The long-term objective of the occupancy grid development is to embed the perception module on cars commercialized on the automotive market. This intends to enable cars to monitor their driving environment by using multiple sensors mounted on board. As aforementioned, the perception system must be robust and provide high quality output regardless of neither environmental conditions nor the sensor uncertainties.

## 3 Research questions and the work thesis

The main work thesis can be summarized as: "The occupancy grid algorithm can be used as an automated vehicle perception system." In order to meet that condition, the occupancy grid algorithm should:

- Be easy to adapt for various types of vehicles models, which may vary in number of used sensors (scalability) and their types (modularity).
- The algorithm allows modeling, perception and fusion of sensor data.
- The algorithm quality can be measured analytically.
- Occupancy grid environment representation reduces overall system uncertainties.
- Implementation executes in real time on an automotive grade computing unit.

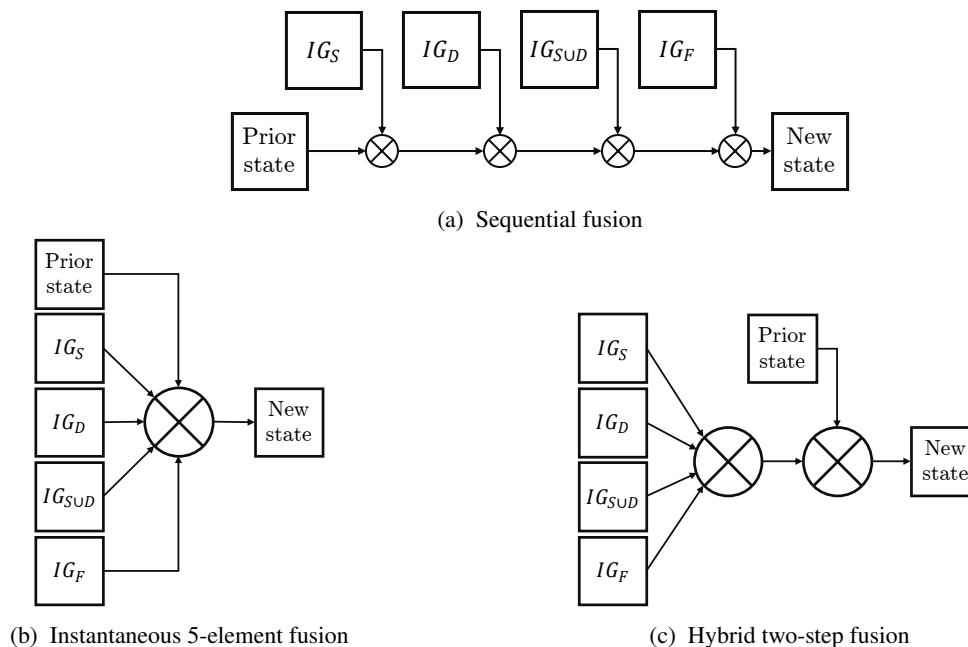
## 4 Contributions

The main achievement of the thesis is a developed occupancy grid algorithm solution that delivers an environmental model for the automated vehicle perception system. Prepared C++ library can operate in real time in the vehicle computing unit and is fully customizable for various vehicle sensor setups.

The thesis presents different improvements applied to the algorithm which made it capable for automotive application. Most important contributions are presented in this section of the summary.

### 4.1 A novel multilevel information fusion architecture

Traditional occupancy grid algorithm has a rigid architecture, strictly tailored for specific sensor setup (Figures 1a and 1b). In the thesis, the author proposes a multilevel information fusion architecture, which uses intermediate grids to solve sensor conflicts and speed up the algorithm computation (Figure 1c). Full description of the proposed architecture is presented in Section 4.2 of the dissertation.



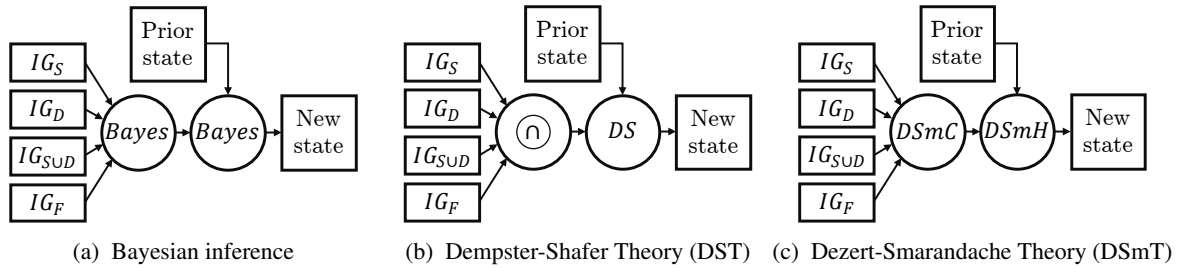
**Figure 1.** Fusion architectures designed for combination of intermediate grids into prior occupancy grid cell states. The symbol  $\otimes$  represents fusion operation.

### 4.2 Application of the Dezert-Smarandache rule of combination in the three-state automotive occupancy grid environment

The theory of plausible and paradoxical Dezert-Smarandache inference has not yet been applied to the automotive occupancy grid algorithm. The thesis presents how the seminal Dezert-Smarandache rules of combination can be applied in a field of occupancy grids. The Dezert-Smarandache fusion framework allows faster sensor conflict resolution than frequently applied Dempster-Shafer rule of combination. Hyperset definitions and derivation of required equations is presented in Section 4.1.3 and 4.3 in the dissertation.

### 4.3 Comparison of Bayesian, Dempster-Shafer and Dezert-Smarandache approaches for grid fusion

Analysis presented in chapter 4.3.2 compares three different approaches for the occupancy grid fusion using proposed two-step approach (Figure 2).



**Figure 2.** Developed hybrid fusion architectures tailored for usage within different fusion frameworks. Symbol  $\cap$  represents conjunctive fusion rule,  $DS$  – Dempster rule of combination,  $DSmC$  and  $DSmH$  – classical and hybrid Dezert-Smarandache rules accordingly.

Each fusion rule has different advantages and disadvantages described in detail in sections 4.3.2, 7.4 and 7.5 in the thesis. In short, Bayesian fusion rule is the simplest one and its main advantage is speed of computations. Dempster-Shafer and Dezert-Smarandache fusion can both estimate more than two states of the grid cells. Dezert-Smarandache fusion rule is slightly more computationally complex than Dempster-Shafer, but it allows faster sensor conflict resolution. An example of the occupancy grids generated using these three frameworks can be presented in Figure 3.

### 4.4 A new method of an occupancy grid quality assessment

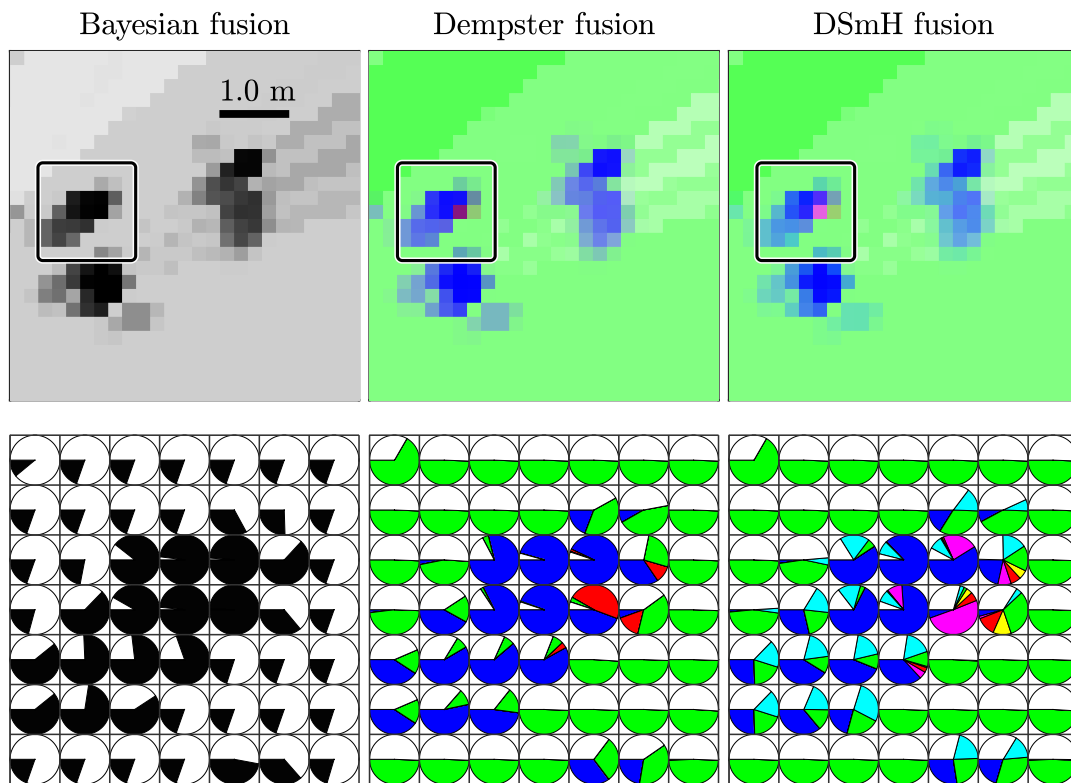
The measurement of the algorithm quality of operation is crucial for tuning and ensuring safety of the delivered perception solution. Proposed and developed method for an occupancy grid quality assessment relies on analysis of map representation of pole-like road objects such as traffic signs, guardrails or bollards.

The grid representation of a pole should preserve the number of objects in the real world, limit their variance, and maintain the object's shape. To meet these requirements, the pole-like object's representation must be compact (without any gaps), occupy the finest space, and have low sensor conflict associated (low entropy). These attributes are the basis of a KPI definition described in section 5.2 of the thesis.

Presented evaluation method has been tested in simulation and experimental conditions. The method can evaluate the algorithm using only a small amount of ground truth information by analyzing only the map representation of specific road objects.

### 4.5 Analysis of the impact of multiple sensor and system uncertainties on the quality of occupancy grid

Understanding of the parameters which drives the quality of the occupancy grid algorithm is a key to deliver a versatile mapping solution. In order to compute occupancy grid environment model, the algorithm must deal with different types of uncertainties in the system. In the thesis four types of uncertainties has been evaluated: data synchronization delays, sensor detection characteristics, sensor mounting vibrations and host positioning uncertainties. Effect of each uncertainty type on the occupancy grid quality has been measured in simulation environment. Quantitative results of this evaluation are presented in Figure 4. Based on the common levels of uncertainty levels present in real



**Figure 3.** Comparison of Bayesian, Dempster and DSmH fusion rules based on the starting vehicle example described in section 7.3.2 in the thesis.

vehicles, the detection and synchronization uncertainty have a major impact on the occupancy grid quality. Experimental procedures and qualitative results are presented in Chapter 6 of the dissertation.

#### 4.6 Guideline for tuning of the occupancy grid algorithm

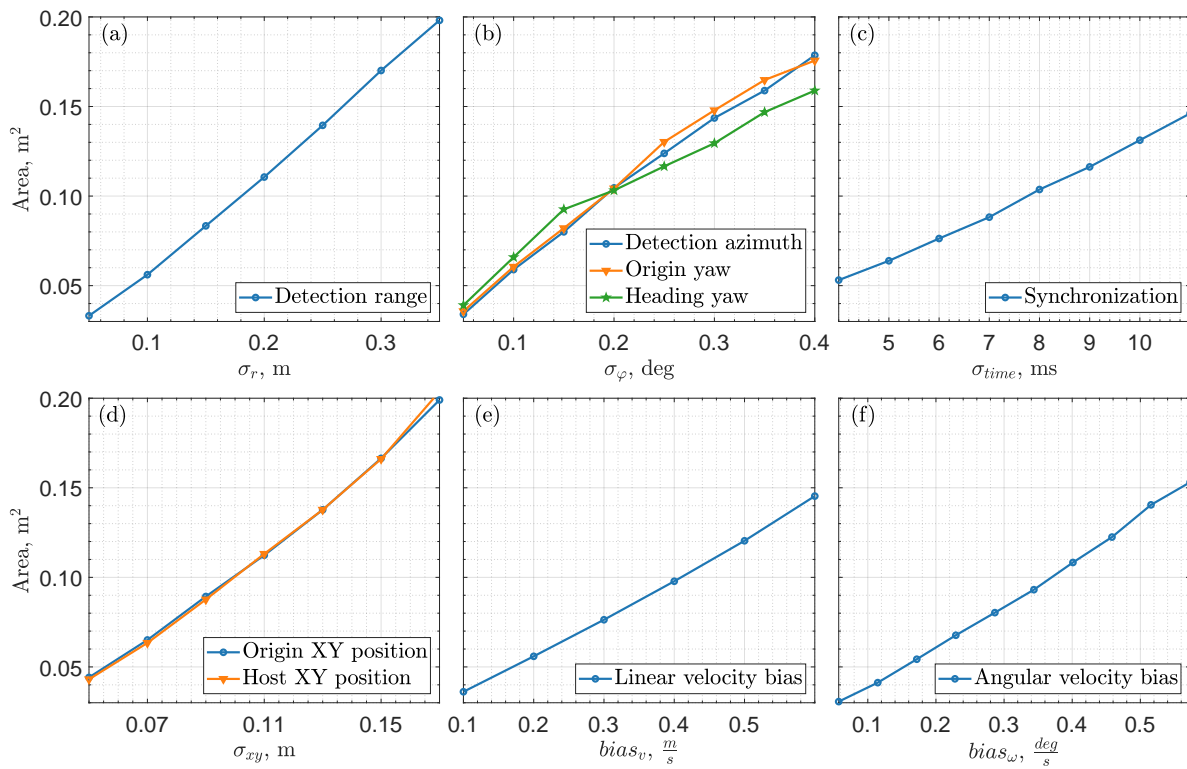
A grid filtering capabilities investigation allowed to prepare a guideline for tuning the algorithm on a specific vehicle setup. Described method helps to obtain a measurable mapping quality which meets the perception system requirements – Section 7.2.

#### 4.7 Summary

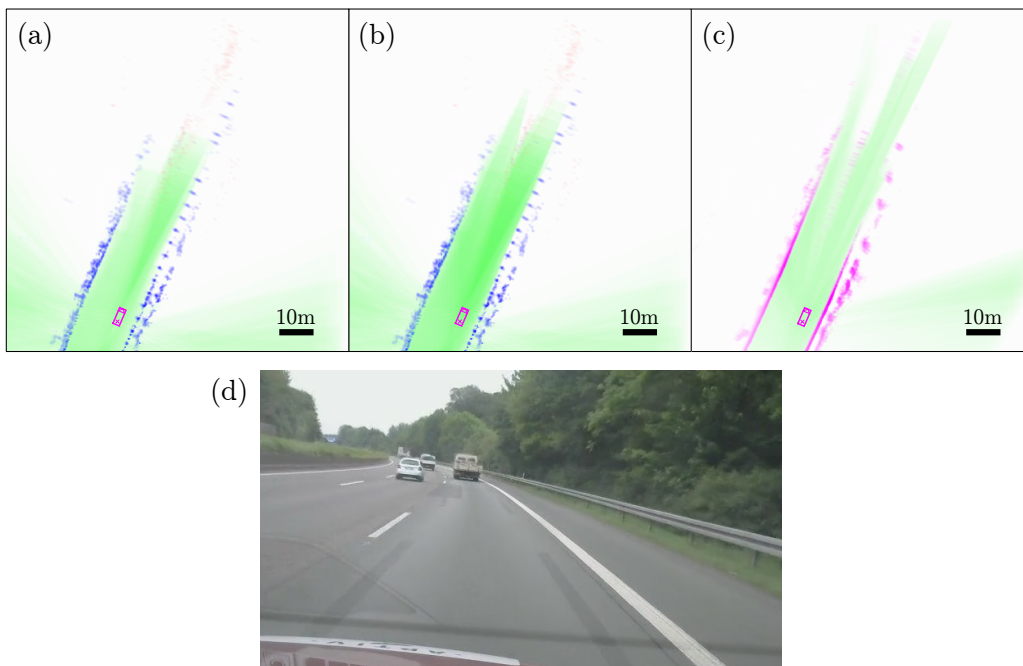
The thesis describes all steps needed to prepare an occupancy grid mapping algorithm tailored for automotive application. Author developed fully functional occupancy grid algorithm library written in C++, which can operate in vehicle computing unit in real time.

Performance tests on a single core of the Cortex-A72 CPU show that algorithm iteration evaluates in less than 20 ms, which allow real-time operation with more than 20 Hz frequency (Section 7.5 in the dissertation).

The occupancy grid architecture presented in this thesis is designed to operate with all possible combinations of automotive sensors sources. Following that, the prepared algorithm implementation can support radar, vision, free space, and LIDAR sensors. An example of the occupancy grid output generated using a typical combination of these sensor sources is presented in Figure 5 (Section 7.6).



**Figure 4.** Plots showing mean landmark representation area for different noise types and levels.



**Figure 5.** Grid output using different sensor sets: four corner radars (a), corner radars and front vision free space system (b) and LIDAR sensor (c). Reference camera image of the scene is presented at the bottom (d).

## 5 List of relevant publications and author's achievements

List of relevant author's publications:

1. **J. Porebski**, K. Kogut, P. Markiewicz, and P. Skruch. Occupancy grid for static environment perception in series automotive applications. *IFAC-PapersOnLine*, 52(8):148–153, 2019. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.08.063
2. **J. Porebski**. Customizable inverse sensor model for bayesian and dempster-shafer occupancy grid frameworks. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 1225–1236. Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-50936-1\_102
3. P. Markiewicz and **J. Porebski**. Developing occupancy grid with automotive simulation environment. *Applied Sciences*, 2020. doi: 10.3390/app10217629
4. **J. Porebski** and K. Kogut. Performance evaluation of the highway radar occupancy grid. *Sensors*, 2021. doi: 10.3390/s21062177

List of pending patents co-authored during preparation of the thesis:

1. P. Markiewicz, D. Sasin, and **J. Porebski**. Method and system for mapping a physical environment by means of an occupancy grid, 2020. URL <https://lens.org/019-723-872-035-825>
2. M. Rózewicz, K. Kogut, **J. Porebski**, R. Burza, and D. Borkowski. Methods and systems for determining alignment parameters of a radar sensor, 2022. URL <https://lens.org/046-488-618-203-143>
3. **J. Porebski**, K. Kogut, and M. Rózewicz. System and method for mapping a vehicle environment, 2022. URL <https://lens.org/098-750-944-435-676>
4. M. A. Moawad, A. Sorrentino, N. Chen, M. H. Laur, **J. Porebski**, A. Somanath, A. Sommer, K. Zhang, U. Iurgel, A. Ioffe, K. Kogut, C. Karabulut, and D. Karanovic. Vehicle localization based on radar detections, 2022. URL <https://lens.org/034-927-046-417-379>
5. N. Chen, A. Somanath, M. A. Moawad, A. Sorrentino, M. H. Laur, **J. Porebski**, A. Sommer, K. Zhang, U. Iurgel, A. Ioffe, K. Kogut, C. Karabulut, and D. Karanovic. Radar reference map generation, 2022. URL <https://lens.org/047-914-343-702-511>
6. A. Sorrentino, M. A. Moawad, N. Chen, M. H. Laur, **J. Porebski**, A. Somanath, A. Sommer, K. Zhang, U. Iurgel, A. Ioffe, K. Kogut, C. Karabulut, and D. Karanovic. Radar reference map generation, 2022. URL <https://lens.org/022-704-305-791-995>
7. A. Somanath, M. A. Moawad, M. H. Laur, N. Chen, A. Sorrentino, A. Sommer, K. Zhang, **J. Porebski**, and K. Kogut. Vehicle routing based on availability of radar-localization objects, 2022. URL <https://lens.org/116-343-669-635-878>
8. **J. Porebski** and K. Kogut. Free space estimation, 2022. URL <https://lens.org/094-727-099-689-386>



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

**DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA**

**AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

---

*Modelowanie otoczenia pojazdu za pomocą siatek zajętości  
w zastosowaniach automatyki samochodowej*

---

Autor: *Jakub Porębski*

Promotor pracy: *dr hab. inż. Paweł Skruch, prof.AGH*

Promotor pomocniczy: *dr inż. Krzysztof Kogut*

Praca wykonana: *Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki  
i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Automatyki i Robotyki*

Kraków, 2022



## 1 Streszczenie

Wiarygodne modelowanie środowiska pojazdu jest podstawowym warunkiem wstępnym dla zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy i jazdy autonomicznej. Powszechnie stosowaną formą reprezentacji środowiska jest mapa siatki zajętości (*ang. occupancy grid*). Dzieli ona środowisko na siatkę komórek i szacuje stan zajętości dla każdej komórki, zakładając, że komórki siatki są od siebie niezależne. Ten system percepcji buduje model środowiska jazdy poprzez połączenie pomiarów z wielu czujników percepcyjnych, w tym LIDAR-ów, radarów, czujników wizyjnych itp.

W najnowocześniejszych badaniach opracowano wiele metod budowy systemu percepcji wykorzystujących siatkę zajętości, jednak metody te są dostosowane tylko do określonych konfiguracji czujników, a ich wydajność nie jest weryfikowana na istniejącym sprzęcie samochodowym. Obecnie producenci samochodów, w ramach jednego modelu, oferują szeroki zakres opcji, które mogą różnić się zamontowanymi czujnikami lub funkcjami zwiększającymi komfort jazdy. Algorytm siatki zajętości oferuje pojedynczy punkt odniesienia dla percepcji otoczenia i może współpracować z niemal dowolnym zestawem czujników, co z kolei może umożliwić redukcję kosztów całego systemu.

W niniejszej pracy zaproponowano modułarną i skalowalną architekturę dla algorytmu siatki zajętości, która może być dostosowana do różnych konfiguracji czujników, co pozwala na łatwe dostosowanie proponowanego rozwiązania do różnych wariantów pojazdów. Prezentowana architektura pozwala na efektywną redukcję niepewności pomiarowych, co zostało potwierdzone eksperymentalnie w niniejszej pracy. Opisano również wskazówki dotyczące dostrajania opisanego algorytmu. Ponadto przedstawiono pierwsze zastosowanie metody fuzji Dezerta-Smarandache'a w trójstanowej samochodowej siatce zajętości. Wyniki rozprawy przedstawiają udaną integrację algorytmu siatki zajętości w zautomatyzowanym pojeździe, który może być łatwo wdrożony do produkcji.

## 2 Motywacja

Algorytm siatki zajętości jest obecnie dynamicznie rozwijany zarówno w zastosowaniach przemysłowych jak i pracach badawczych. Algorytm ten jest powszechnie stosowany w dziedzinie robotyki do rozwiązywania problemu jednoczesnej lokalizacji i mapowania. Badania naukowe sugerują, że algorytm siatki zajętości może być wykorzystany również w przemyśle samochodowym, jednak jego seryjne zastosowania motoryzacyjne są nadal ograniczone.

Długoterminowym celem rozwoju algorytmu siatki zajętości jest osadzenie modułu percepcyjnego w samochodach komercjalizowanych na rynku motoryzacyjnym. Ma to umożliwić samochodom monitorowanie środowiska jazdy za pomocą wielu czujników zamontowanych na pokładzie. System percepcji musi być odporny i zapewniać wysoką jakość danych wyjściowych niezależnie od warunków środowiskowych i niepewności czujników.

## 3 Teza pracy

Przygotowana rozprawa doktorska bada tezę: „Algorytm siatki zajętości można wykorzystać jako algorytm percepcji samochodu i może on spełniać wymagania przemysłu samochodowego”. Rozwiązanie (algorytm siatki zajętości) realizujące powyższą tezę powinno:

- Pozwalać na łatwe przestrajanie oraz rekonfigurację do różnych wariantów pojazdów, które mogą różnić się liczbą czujników (skalowalność) oraz ich typami (modułarność).
- Umożliwiać zadanie modelowania, percepcji i fuzji danych sensorycznych.
- Redukować niepewności pomiarowe systemu.
- Jakość pracy algorytmu da się wyznaczyć analitycznie.
- Implementacja algorytmu może pracować w czasie rzeczywistym na komputerze pokładowym samochodu.

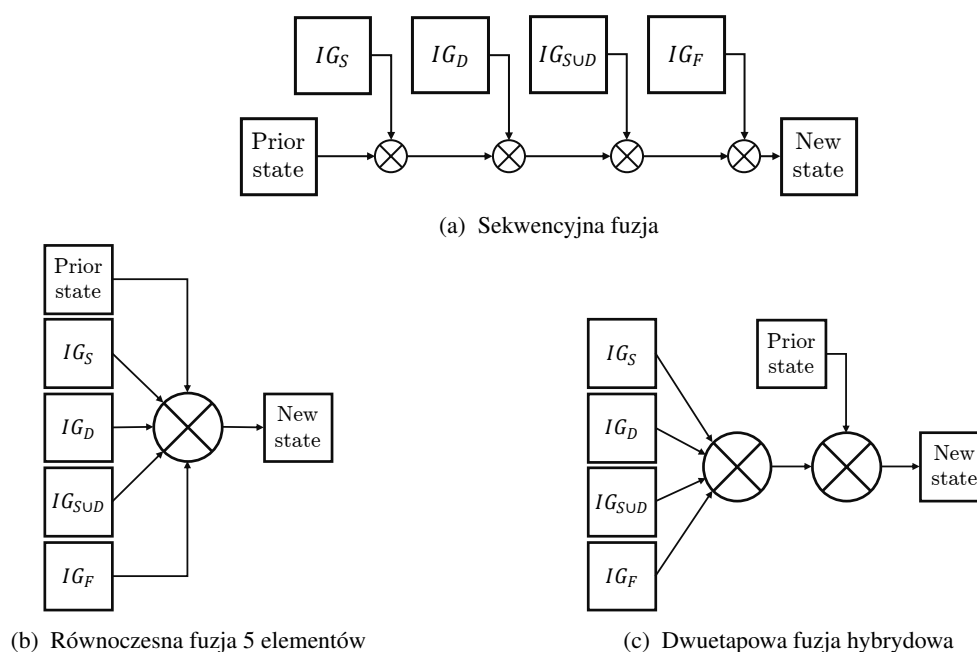
## 4 Najważniejsze wyniki pracy

Głównym osiągnięciem pracy jest opracowane rozwiązanie algorytmu siatki zajętości, które dostarcza model środowiska dla systemu percepcji pojazdów zautomatyzowanych. Przygotowana przez autora pracy biblioteka C++ implementująca omawiany algorytm, może działać w czasie rzeczywistym w jednostce obliczeniowej pojazdu i jest w pełni konfigurowalna dla różnych konfiguracji czujników pojazdu.

W pracy przedstawiono różne ulepszenia zastosowane w algorytmie, które umożliwiły jego zastosowanie w motoryzacji. Najważniejsze wyniki pracy zaprezentowano jako podsekcje tego podsumowania.

### 4.1 Nowa wielopoziomowa architektura fuzji informacji

Tradycyjny algorytm siatki zajętości ma sztywną architekturę, ściśle dopasowaną do konkretnego ustawienia czujników (rysunki 1a and 1b). W rozprawie autor proponuje wielopoziomową architekturę fuzji, która wykorzystuje siatki pośrednie do rozwiązania konfliktów czujników i przyspieszenia obliczeń algorytmu (rysunek 1c). Pełny opis proponowanej architektury został przedstawiony w sekcji 4.2 rozprawy.



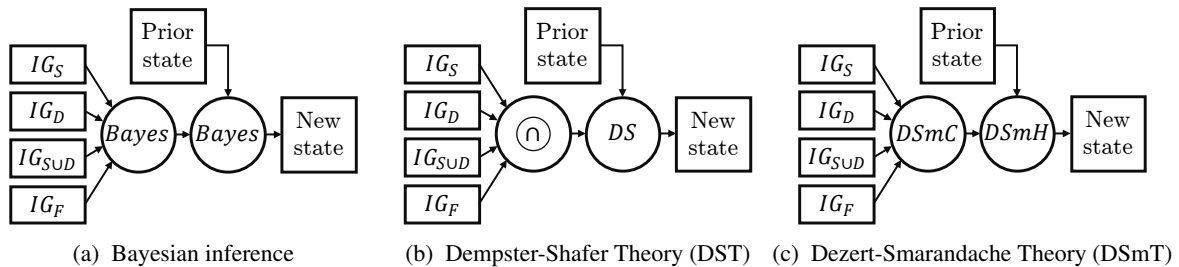
**Rysunek 1.** Różne architektury fuzji przeznaczone do łączenia siatek pośrednich. Symbol  $\otimes$  reprezentuje operację fuzji.

### 4.2 Zastosowanie metody kombinacji Dezerta-Smarandache'a w trójstanowym algorytmie siatki zajętości

Teoria wiarygodnego i paradoksalnego wnioskowania Dezerta-Smarandache'a nie była dotychczas stosowana w algorytmie siatki zajętości stosowanym w przemyśle automotive. W pracy przedstawiono sposób zastosowania reguł kombinacji Dezerta-Smarandache'a w dziedzinie siatek okupacyjnych. Metoda fuzji Dezert-Smarandache pozwalają na szybsze rozwiązywanie konfliktów czujników niż obecnie stosowana reguła kombinacji Dempstera-Shafera. Definicja hiperzbiorów i wyprowadzenie wymaganych równań przedstawiono w podrozdziałach 4.1.3 i 4.3 rozprawy.

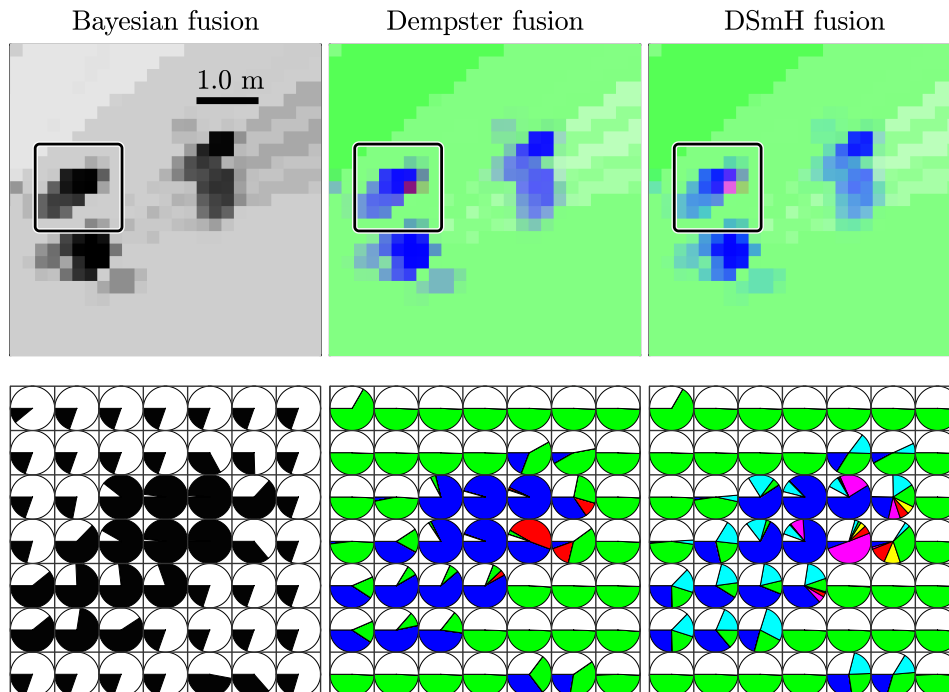
### 4.3 Porównanie różnych metod fuzji: Bayesowskiej, Dempstera-Shafera oraz Dezerta-Smarandache'a

Analiza przedstawiona w rozdziale 4.3.2 porównuje trzy różne podejścia do fuzji siatki zajętości z wykorzystaniem proponowanego podejścia dwuetapowego (rysunek: 2).



**Rysunek 2.** Opracowane hybrydowe architektury fuzji dostosowane do użycia w różnych strukturach fuzji. Symbol  $\odot$  reprezentuje koniunktywną metodę fuzji,  $DS$  – metodę kombinacji Dempstera,  $DSmC$  and  $DSmH$  – klasyczną oraz hybrydową metodę fuzji Dezerta-Smarandache'a.

Każda reguła fuzji ma inne zalety i wady opisane szczegółowo w rozdziałach 4.3.2, 7.4 i 7.5 rozprawy. W skrócie, Bayesowska reguła fuzji jest najprostsza, a jej główną zaletą jest szybkość obliczeń. Zarówno fuzja Dempstera-Shafera jak i Dezerta-Smarandache'a mogą estymować więcej niż dwa stany komórek siatki. Reguła fuzji Dezerta-Smarandache'a jest nieco bardziej złożona obliczeniowo niż Dempstera-Shafera, ale pozwala na szybsze rozwiązywanie konfliktów czujników. Przykład siatki zajętości wygenerowanej przy użyciu tych trzech różnych metod fuzji można zobaczyć na rysunku 3.



**Rysunek 3.** Porównanie reguł fuzji Bayesa, Dempstera i DSmH na przykładzie ruszającego pojazdu (przykład opisany w podsekcji 7.3.2 doktoratu).

#### 4.4 Nowa metoda oceny jakości sieci zajętości

Pomiar jakości działania algorytmu jest kluczowy dla dostrojenia i zapewnienia bezpieczeństwa dostarczanego rozwiązania percepcyjnego. Zaproponowana i opracowana metoda oceny jakości siatki zajętości opiera się na analizie reprezentacji na siatce obiektów drogowych podobnych do słupków takich jak znaki drogowe, barierki ochronne czy pachołki.

Siatkowa reprezentacja słupa powinna zachowywać liczbę istniejących obiektów, ograniczyć ich wariancję i zachować kształt obiektu. Aby spełnić te wymagania, reprezentacja obiektu typu słup musi być zwarta (bez dziur, czy przerw), powinna zajmować jak najmniejszą przestrzeń oraz mieć niski poziom konfliktów sensorycznych związanych z obiektem (niska entropia). Atrybuty te są podstawą definicji KPI opisanej w rozdziale 5.2 rozprawy.

Zaprezentowana metoda oceny została przetestowana w warunkach symulacyjnych i eksperymentalnych. Metoda ta jest w stanie ocenić algorytm przy wykorzystaniu niewielkiej ilości informacji o otoczeniu, analizując jedynie reprezentację mapową określonych obiektów drogowych.

#### 4.5 Analiza wpływu niepewności czujników i systemu na jakość sieci zajętości

Zrozumienie parametrów, które kontrolują jakość algorytmu siatki zajętości jest kluczem do dostarczenia wszechstronnego rozwiązania mapowania. W celu obliczenia siatki zajętości, algorytm musi radzić sobie z różnymi rodzajami niepewności w systemie. W pracy oceniono cztery rodzaje niepewności: opóźnienia w synchronizacji, charakterystykę detekcji czujników, drgania czujników oraz niepewność pozycjonowania pojazdu. Wpływ każdego rodzaju niepewności na jakość sieci zajętości został zmierzony w środowisku symulacyjnym. Ilościowe wyniki tej oceny przedstawiono na rysunku 4. W oparciu o powszechne poziomy niepewności występujące w rzeczywistych pojazdach, niepewność detekcji i synchronizacji mają główny wpływ na jakość siatki zajętości. Procedury eksperymentalne i wyniki jakościowe zostały przedstawione w rozdziale 6 rozprawy.

#### 4.6 Wytyczne do strojenia algorytmu siatki zajętości

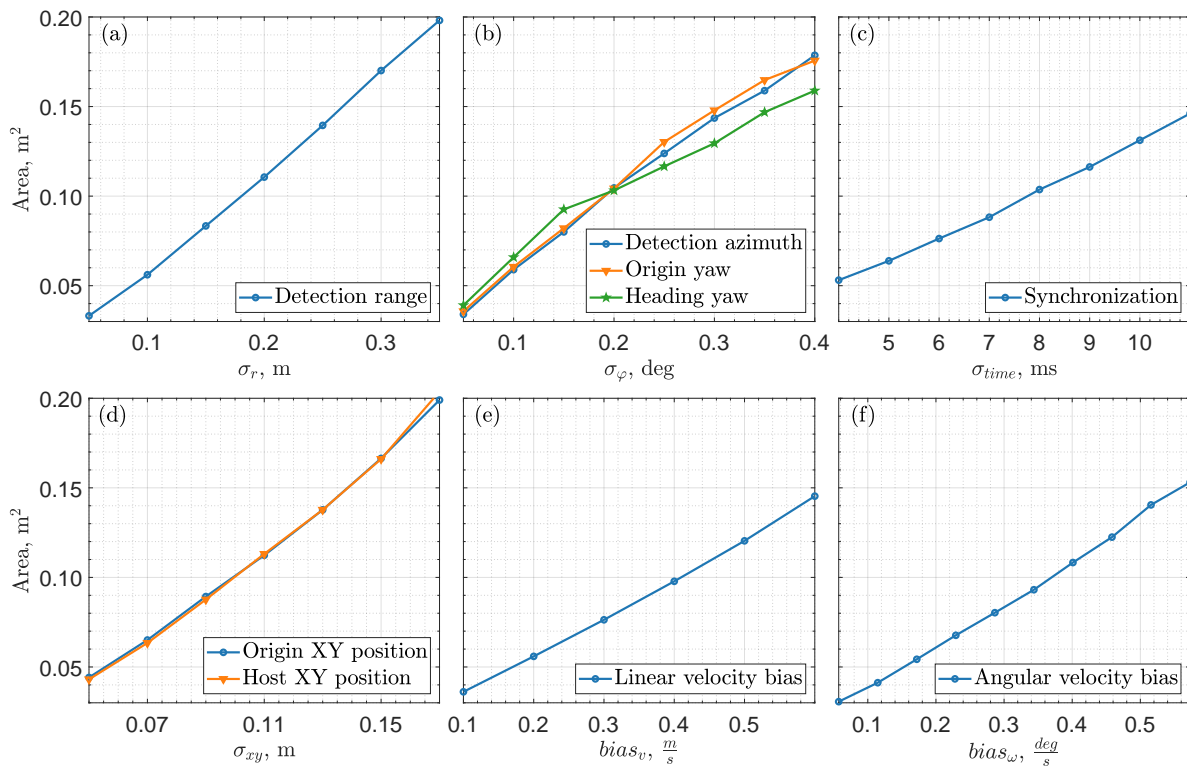
Badanie możliwości algorytmu siatki zajętości pozwoliło na przygotowanie wytycznych do strojenia algorytmu na konkretnym zestawie czujników w pojeździe. Opisana metoda pozwala uzyskać mierzalną jakość odwzorowania, która spełnia wymagania systemu percepcji – rozdział 7.2 doktoratu.

#### 4.7 Podsumowanie

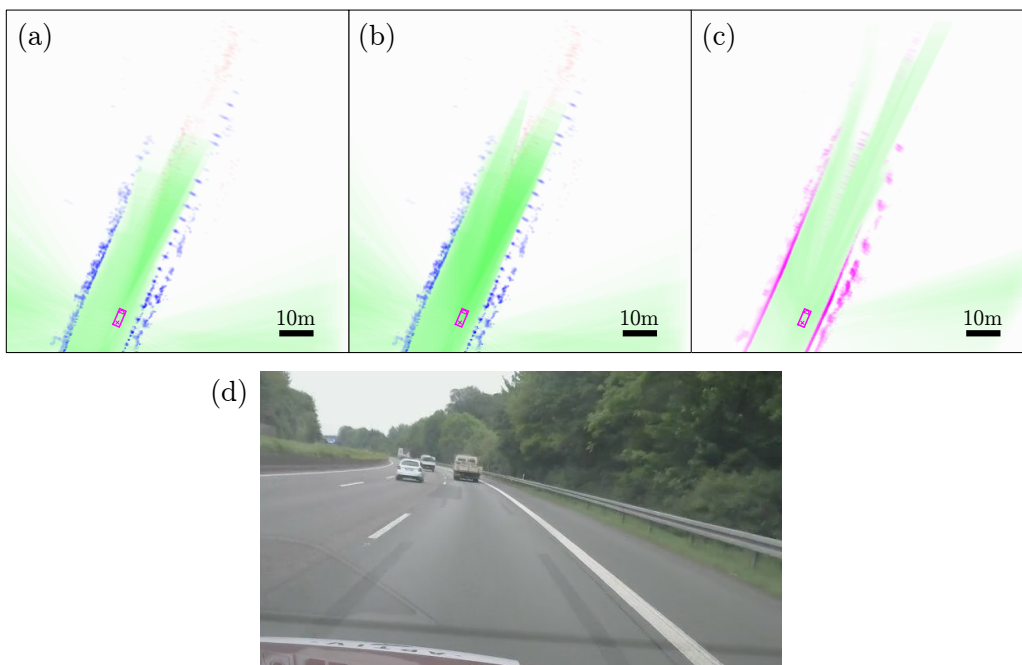
W pracy opisano wszystkie kroki potrzebne do przygotowania algorytmu odwzorowania siatki zajętości, dostosowanego do aplikacji motoryzacyjnej. Autor opracował w pełni funkcjonalną bibliotekę algorytmu siatki zajętości napisaną w języku C++, która może działać w jednostce obliczeniowej pojazdu w czasie rzeczywistym.

Testy wydajnościowe na pojedynczym rdzeniu procesora Cortex-A72 pokazują, że iteracja algorytmu ocenia się w czasie poniżej 20 ms, co pozwala na pracę w czasie rzeczywistym z częstotliwością większą niż 20 Hz (rozdział 7.5 w rozprawie).

Przedstawiona w niniejszej pracy architektura siatki zajętości może współpracować ze wszystkimi możliwymi kombinacjami źródeł czujników wykorzystywanych w przemyśle samochodowym. W ślad za tym przygotowana implementacja algorytmu może obsługiwać czujniki radarowe, wizyjne oraz LIDARy. Przykładowe siatki zajętości wygenerowane z wykorzystaniem typowej kombinacji tych źródeł czujników przedstawiono na rysunku 5 (rozdział 7.6).



**Rysunek 4.** Wykresy pokazujące jak powierzchnia reprezentacji słupek zmienia się wraz ze wzrostem poszczególnych rodzajów niepewności.



**Rysunek 5.** Siatki zajętości powstałe przy użyciu różnych zestawów czujników: cztery radary zamontowane w rogach pojazdu (a), radary narożne oraz system wizyjny raportujący wolną przestrzeń (b) oraz sam, wysokorozdzielczy LIDAR (c). Referencyjny obraz sceny przedstawiony jest na dolnym rysunku (d).

## 5 Wykaz publikacji i osiągnięć autora

Wykaz publikacji autora:

1. **J. Porebski**, K. Kogut, P. Markiewicz, and P. Skruch. Occupancy grid for static environment perception in series automotive applications. *IFAC-PapersOnLine*, 52(8):148–153, 2019. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.08.063
2. **J. Porebski**. Customizable inverse sensor model for bayesian and dempster-shafer occupancy grid frameworks. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 1225–1236. Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-50936-1\_102
3. P. Markiewicz and **J. Porebski**. Developing occupancy grid with automotive simulation environment. *Applied Sciences*, 2020. doi: 10.3390/app10217629
4. **J. Porebski** and K. Kogut. Performance evaluation of the highway radar occupancy grid. *Sensors*, 2021. doi: 10.3390/s21062177

Wykaz patentów zgłoszonych w trakcie trwania doktoratu:

1. P. Markiewicz, D. Sasin, and **J. Porebski**. Method and system for mapping a physical environment by means of an occupancy grid, 2020. URL <https://lens.org/019-723-872-035-825>
2. M. Różewicz, K. Kogut, **J. Porebski**, R. Burza, and D. Borkowski. Methods and systems for determining alignment parameters of a radar sensor, 2022. URL <https://lens.org/046-488-618-203-143>
3. **J. Porebski**, K. Kogut, and M. Różewicz. System and method for mapping a vehicle environment, 2022. URL <https://lens.org/098-750-944-435-676>
4. M. A. Moawad, A. Sorrentino, N. Chen, M. H. Laur, **J. Porebski**, A. Somanath, A. Sommer, K. Zhang, U. Iurgel, A. Ioffe, K. Kogut, C. Karabulut, and D. Karanovic. Vehicle localization based on radar detections, 2022. URL <https://lens.org/034-927-046-417-379>
5. N. Chen, A. Somanath, M. A. Moawad, A. Sorrentino, M. H. Laur, **J. Porebski**, A. Sommer, K. Zhang, U. Iurgel, A. Ioffe, K. Kogut, C. Karabulut, and D. Karanovic. Radar reference map generation, 2022. URL <https://lens.org/047-914-343-702-511>
6. A. Sorrentino, M. A. Moawad, N. Chen, M. H. Laur, **J. Porebski**, A. Somanath, A. Sommer, K. Zhang, U. Iurgel, A. Ioffe, K. Kogut, C. Karabulut, and D. Karanovic. Radar reference map generation, 2022. URL <https://lens.org/022-704-305-791-995>
7. A. Somanath, M. A. Moawad, M. H. Laur, N. Chen, A. Sorrentino, A. Sommer, K. Zhang, **J. Porebski**, and K. Kogut. Vehicle routing based on availability of radar-localization objects, 2022. URL <https://lens.org/116-343-669-635-878>
8. **J. Porebski** and K. Kogut. Free space estimation, 2022. URL <https://lens.org/094-727-099-689-386>