



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA  
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

## **AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Algorytmy kalibracji i auto-kalibracji sensorów radarowych  
dla systemów aktywnego bezpieczeństwa i jazdy  
autonomicznej

Autor: mgr inż. Rafał Michał Burza

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Krzysztof Duda, prof. AGH  
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Dariusz Borkowski

Praca wykonana: Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii  
Biomedycznej

Kraków, 2025

## Spis treści

Skróty	2
Spis symboli i oznaczeń	3
Słownik terminów	4
1 <b>Tematyka badawcza</b>	5
2 <b>Analiza racjonalności prowadzonych badań</b>	6
3 <b>Teza badawcza</b>	8
4 <b>Udokumentowany wkład badawczy</b>	8
5 <b>Struktura rozprawy doktorskiej</b>	9
6 <b>Wpływ błędu kąta montażowego na systemy ADAS i AD</b>	11
7 <b>Kalibracja statyczna za pomocą wychylanej płyty</b>	12
8 <b>Dynamiczna trójosiowa adiustacja radaru z kompensacją prędkości</b>	17
9 <b>Trójosiowa kalibracja post-factum z kompensacją prędkości</b>	20
10 <b>Wyniki dynamicznej trójosiowej adiustacji z kompensacją prędkości metodą sympleksu Nelder-Meada</b>	22
11 <b>Analiza wybranych wyników</b>	24
12 <b>Wnioski</b>	26
13 <b>Potencjalne kierunki rozwoju</b>	27

## Skróty

**AD** *Autonomous Driving*. Jazda autonomiczna.. 2, 5, 6, 8, 11

**ADAS** *Advanced Driver-Assistance System*. Zaawansowane systemy wspierania kierowcy.. 2, 5, 6, 8, 11

**ECU** *Electronic Control Unit*. Elektroniczna jednostka sterująca.. 5

**EOL** *End Of the Line*. Proces przeprowadzany na końcu linii produkcyjnej.. 8

**FMCW** *Frequency-Modulated Continuous-Wave*. Technologia polegająca na generowaniu ciągłej fali radarowej z modulowaną częstotliwością.. 9

**KPI** *Key Performance Indicators*. Kluczowe wskaźniki jakości.. 24, 26

**RMSE** *Root Mean Square Error*. Średnia kwadratowa błędu.. 24

**VCS** *Vehicle Coordinate System*. Układ współrzędnych pojazdu. Z reguły posiada on punkt zerowy w środku tylnej osi pojazdu. Oś X, przebiega przez środek pojazdu w kierunku jego przodu.. 3, 6

## Spis symboli i oznaczeń

° Stopień jako jednostka miary kąta płaskiego. Używany w tej pracy ze względu na częste operowanie na małych wartościach.. 12, 21, 22, 24

$A_{fp}$  Amplituda fali elektromagnetycznej odbitej od stalowej płyty.. 4, 14–16

$\alpha_b$  Oczekiwana horyzontalna orientacja radaru.. 18

$\alpha_{fp}$  Kąt pod którym widziana jest stalowa płyta.. 16

$\alpha_m$  Wartość kątowa horyzontalnego błędu montażowego.. 16, 18–25

$\alpha_n$  Horyzontalny kąt detekcji radarowej.. 18, 19

$\alpha_{VCS}$  Horyzontalny kąt detekcji w układzie VCS.. 18–21

$\mathbf{b}^{(n)}$  Wartość optymalizowanego wektora parametrów w momencie  $n$ .. 19, 20

$b$  Pojedynczy element wektora optymalizowanych parametrów np.  $i$ -ty  $b_i$ .. 3, 15, 16

$\mathbf{b}^{(n+1)}$  Wartość optymalizowanego wektora parametrów w momencie  $n + 1$ .. 19, 20

$\beta_{fp}$  Wychylenie stalowej płyty w jej własnym układzie współrzędnych.. 14, 15

$\beta_m$  Wartość kątowa wertykalnego błędu montażowego.. 14–16, 18–25

$\beta_n$  Wertykalny kąt detekcji radarowej.. 18, 19, 21

$\beta_{VCS}$  Wartość wertykalnego kąta detekcji w układzie VCS.. 18–21

$\eta$  Współczynnik określający, jaka część wyestymowanego kroku ma zostać wykonana; współczynnik uczenia.. 19, 20, 22

$\gamma_m$  Kąt skręcenia radaru.. 18–25

$\mathbf{J}$  Macierz Jacobiego.. 19, 20

$K_r$  Liczba radarów.. 21

$k_v$  Współczynnik kompensacji prędkości radaru.. 18–22, 24

$\lambda_m$  Parametr Marquardt’a stosowany w metodzie najmniejszych kwadratów.. 20

$N_d$  Liczba detekcji.. 20

$\mathbf{R}$  Macierz residuów składająca się z elementów  $\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & \dots & R_n \end{bmatrix}^T$  .. 4, 19, 20

$R$  Residuum.. 4

$R_{\dot{r}}$  Residuum  $\dot{r}$ .. 19, 20

$\dot{r}$  Prędkość radialna.. 4, 18–21

$\sigma$  Odchylenie standardowe.. 4, 15, 16

$\sigma_{A_{fp}}^2$  Wariancja amplitudy fali elektromagnetycznej odbitej od stalowej płyty.. 15, 16

$\Sigma_{svd}$  Wartość macierzy  $\Sigma$  z dekompozycji SVD.. 20

$V_{\omega_x}$  Komponent prędkości samochodu wzdłuż osi wzdłużnej powstały w wyniku ruchu obrotowego pojazdu.. 18, 20, 21

$V_{\omega_y}$  Komponent prędkości samochodu wzdłuż osi poprzecznej powstały w wyniku ruchu obrotowego pojazdu. Wykorzystywany zamiennie z  $V_y$ .. 18, 20, 21

$U_{svd}$  Wartość macierzy  $U$  z dekompozycji SVD.. 20

$V_{svd}$  Wartość macierzy  $V$  z dekompozycji SVD.. 20

$V_x$  Prędkość liniowa.. 18–21

$V_y$  Komponent prędkości samochodu wzdłuż osi poprzecznej powstały w wyniku ruchu obrotowego pojazdu. Wykorzystywany zamiennie z  $V_{\omega_y}$ .. 4

## Słownik terminów

**dataset** Zbiór danych. W kontekście tej pracy termin używany do określenia danych z radarów nagranych podczas jazd testowych.. 9

**misalignment** Odchylenie od oczekiwanej wartości pozycji i orientacji sensora.. 8, 14

**outlier** Obserwacja odstająca od pozostałych elementów próby.. 8

## 1 Tematyka badawcza

Jazda autonomiczna (AD), początkowo traktowana jako zagadnienie, które można wdrożyć na przestrzeni dekady, okazała się najbardziej wymagającym wyzwaniem w dziedzinie motoryzacji. Technologia stale ewoluje, aby wprowadzić pojazdy o piątym poziomie autonomiczności do powszechnego użytku. Aby to osiągnąć, producenci mikroprocesorów skupiają się na tworzeniu coraz potężniejszych jednostek obliczeniowych, które obejmują przyspieszanie sieci neuronowych oraz równoległe przetwarzanie złożonych algorytmów. Zapotrzebowanie na różnorodne funkcje w pojazdach osobowych przyspiesza wzrost złożoności systemów, zarówno pod względem liczby jednostek sterujących (ECU), jak i rozmiaru oprogramowania, stwarzając nowe wyzwania związane z inżynierią oprogramowania, cyberbezpieczeństwem oraz złożonością samego procesu rozwoju produktów.

Pojawiają się nowe projekty radarów, dążące do zmniejszenia rozmiaru i kosztów tych urządzeń. W tym celu badacze opracowują m.in. radary przeznaczone do zastosowań motoryzacyjnych z antenami zintegrowanymi w układzie scalonym. Taki kierunek może doprowadzić do obniżenia kosztów produkcji oraz wymiarów sensorów, jednocześnie zachowując oczekiwaną wydajność. To z kolei może przyczynić się do większej dostępności zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy (ADAS) dla społeczeństwa oraz umożliwić montaż większej liczby radarów w pojazdach.

Zwiększone pokrycie skanowania otoczenia pojazdu za pomocą czujników może zwiększyć kompleksowość systemu, umożliwiając działanie w każdych warunkach, lecz rozwój jazdy autonomicznej wymaga również przemyślanego projektowania infrastruktury drogowej. Pomimo tego, że czujniki i elektroniczne elementy wykonawcze zazwyczaj reagują szybciej niż kierowca, to odpowiednio przemyślana infrastruktura drogowa może zwiększyć zasięg percepcji, zmniejszając szansę na wystąpienie potrzeby gwałtownego hamowania, jednocześnie zwiększając komfort pasażerów.

Radary także ewoluują, poprzez nowe konstrukcje anten, które pomimo niewielkich rozmiarów potrafią określać zarówno kąty poziome, jak i pionowe. Wzrost mocy obliczeniowej mikroprocesorów umożliwia przetwarzanie większej liczby danych z radarów i przekazywanie ich do jednostek sterujących pojazdem (ECU). Zapewnienie takiej funkcjonalności wymaga szybkiego połączenia pomiędzy czujnikiem a ECU, co można osiągnąć między innymi dzięki protokołowi SOME/IP opartemu na sieci Ethernet, oferującemu przepustowość 100 Mbit/s z możliwością osiągnięcia 1 Gbit/s.

Chociaż projekty sensorów stają się coraz bardziej złożone i poszerzają ich możliwości, to wciąż istnieje potrzeba monitorowania stanu sensorów i raportowania ich do systemu. Funkcjonowanie sensora może zostać zakłócone przez obiekt, który go zasłania. W przypadku sensorów narożnych, źle ustawiony lub pomalowany zderzak może utrudnić propagację fali radarowej lub ją zakrzywić. Producenci pojazdów powinni uwzględniać te aspekty podczas projektowania i montażu samochodów, aby minimalizować skutki przejścia fali elektromagnetycznej przez materiał zderzaka. Podobne wyzwania mogą pojawić się również w trakcie eksploatacji pojazdu, gdy sensor jest zanieczyszczony błotem lub śniegiem. Ochrona systemu przed negatywnymi skutkami takich zdarzeń wymaga zaimplementowania algorytmicznych metod wykrywania przysłonięcia sensora.

Systemy AD i ADAS, które składają się z wielu sensorów, wymagają sprowadzenia ich pomiarów do wspólnego układu współrzędnych pojazdu (VCS), o początku, który znajduje się na środku tylnej osi pojazdu. Wymaga to dokładnych informacji o pozycji montażu sensora oraz kącie montażu. Dla niektórych sensorów dokładność horyzontalna może być lepsza niż  $1^\circ$ , spełniając tym samym wymagania dotyczące dokładności radarów w kontekście AD i ADAS, jednak dokładność kąta montażu, która wprowadza systematyczny błąd do wszystkich pomiarów z danego sensora, stanowi nadal wyzwanie. Choć producenci pojazdów mogą podejmować skomplikowane kroki w celu poprawy dokładności montażu, to wciąż wymaga on ciągłego procesu weryfikacji i korekty algorytmicznej. Problem narasta, gdy radar jest wymieniany w warsztacie, bez dostępu do specjalistycznego sprzętu. Przykładem może być wymiana radaru po kolizji lub awarii. W takim przypadku proces montażu może wprowadzić błędy znacznie większe niż te, wynikające z algorytmów wykrywania kąta przez radar, co negatywnie wpływa na dokładność systemu. Błędy położenia kąтового mogą również powstawać podczas typowego użytkowania pojazdu, na przykład w wyniku zużycia elementów mocujących lub wystąpienia niewielkich kolizji, które mogą wpłynąć na pozycję sensora lub zderzaka przed nim.

Szybki rozwój systemów ADAS oraz badania nad jazdą autonomiczną wymagają niezawodnych i precyzyjnych czujników, które dostarczą bogatych informacji o otoczeniu oraz zachowaniu innych użytkowników dróg. W praktyce nie jest możliwe zapewnienie idealnego kąta montażu sensora przez cały cykl jego życia. W przypadku radarów, nieprecyzyjny montaż może prowadzić do błędnych lub niedokładnych informacji o obiektach oraz problemów z algorytmem śledzenia lub obniżeniem mocy fali odbitej od celu. Problemy spowodowane przekrzywieniem czujnika mogą być minimalizowane na dwa sposoby: poprzez korektę niedokładnego kąta za pomocą wyestymowanej wartości lub poprzez informowanie innych komponentów systemu o potencjalnej degradacji działania czujnika, jeśli wykryty błąd kątowy wychodzi poza akceptowalny zakres.

Kąt montażu sensora jest jedną z konfigurowalnych wartości, która może być zmieniona bez ingerencji w jego fizyczne podzespoły. Niestety niemożliwe jest zapewnienie, że wartość zadana w konfiguracji radaru będzie zawsze poprawna. Ze względu na problemy wskazane wcześniej, niemożliwe do przewidzenia przemieszczenia sensora – spowodowane kolizjami – a także błąd ludzki, konieczne staje się kalibrowanie sensora. Idealny proces kalibracji powinien zniwelować wszelkie zniekształcenia percepcji radaru, które mogą być spowodowane geometrią zderzaka, zastosowaną farbą, wadami anten lub fizycznymi przemieszczeniami. Co więcej działanie takiego algorytmu kalibracji powinno być możliwe w tle, podczas codziennej pracy radaru, bez potrzeby podłączania zewnętrznych urządzeń lub wykonywania dodatkowych procedur.

## 2 Analiza racjonalności prowadzonych badań

Analizując historię przemysłu motoryzacyjnego, można wskazać następujące etapy rozwoju technologii bezpieczeństwa samochodów osobowych:

1. **Wczesny projekt (1886-1939)** – okres, w którym następowały diametralne zmiany w koncepcji samochodu oraz jego popularyzacja, rozpoczął się wynalezieniem pierwszej „bezkonnej karety”, a zakończył na projekcie samochodu o aerodynamicznym kształcie.

2. **Era pasywnego bezpieczeństwa (1945-1991)** – okres, który rozpoczął się pracami nad wprowadzeniem pierwszych elementów pasywnego bezpieczeństwa, którymi były miękkie obicia deski rozdzielczej, a zakończył się wprowadzeniem pierwszych systemów nawigacji w samochodach.
3. **Era aktywnego bezpieczeństwa oraz zaawansowanych systemów wspomagania kierowcy (1991-obecnie)** – okres zapoczątkowany przez pojawienie się wyświetlaczy umożliwiających nawigację, a który zakończy się wprowadzeniem pierwszych zupełnie autonomicznych pojazdów.

Na przestrzeni ostatniego wieku można zaobserwować, że dużą uwagę producentów i konsumentów cieszą się innowacje wprowadzające:

1. **Zwiększenie bezpieczeństwa** poprzez systemy pasywnego i aktywnego bezpieczeństwa oraz opracowanie standardów definiujących reguły projektowania samochodów oraz ujednociających kluczowe elementy.
2. **Zwiększenie komfortu** poprzez redukcję czynników powodujących dyskomfort kierowcy i pasażerów, takich jak wibracje samochodu lub niewłaściwa temperatura w kabinie, a także wyręczenie kierowcy w trakcie żmudnych zadań jak jazda w korku lub parkowanie.
3. **Zmniejszenie kosztów** poprzez optymalizację procesu produkcji, redukcja kosztów zaawansowanych systemów, tak aby stawały się dostępne dla szerszej liczby konsumentów, a także redukcja kosztów eksploatacji pojazdu poprzez wprowadzanie bardziej wydajnych silników oraz systemów planowania trasy, które pozwalają na uniknięcie utrudnień na trasie.

Prace badawcze w każdym z przedstawionych kierunków są wartościowe i cieszą się znaczną popularnością. W niniejszej rozprawie podjęto badania, które mogą wspomóc wdrożenie jazdy autonomicznej oraz rozwijanie systemów aktywnego bezpieczeństwa. Ten wybór uzasadniony jest faktem, że jazda autonomiczna jest postępowaniem na wszystkich trzech zdefiniowanych kierunkach rozwoju. W pełni autonomiczna jazda powinna charakteryzować się wyższym poziomem bezpieczeństwa. Zwiększy komfort jazdy, ponieważ kierowca będzie mógł poświęcić swoją uwagę na rzeczy niezwiązane z jazdą. Kabina samochodu będzie mogła zostać przeprojektowana, tak aby zwiększyć komfort kierowcy. W pojazdach autonomicznych nie będzie konieczne zapewnienie dobrej widoczności i precyzji sterowania manualnego. Docelowo pełna autonomia pojazdu będzie mogła umożliwić redukcję kosztów poprzez współdzielenie pojazdu. Jednym z przykładów takiego zastosowania jest przekazanie pojazdu, kiedy nie jest używany do autonomicznej floty „taksówek” – część dochodu pozwalałaby pokryć koszty eksploatacji takiego samochodu. Innym przykładem są rodziny mieszkające w jednym domu lub w bliskim sąsiedztwie, które często posiadają kilka samochodów, pozwalających na dojazd do pracy oraz na zakupy. W przypadku takich rodzin kilka samochodów mogłoby zostać zastąpione jednym, który jest w stanie odwieźć wszystkich do pracy, szkoły, na zakupy, a także w międzyczasie odebrać zakupy i odwiedzić myjnię automatyczną. Pozwoliłoby to na znaczne oszczędzenie czasu oraz kosztów eksploatacji.

Kolejnym argumentem, który wskazuje na atrakcyjność prowadzenia badań związanych z jazdą autonomiczną jest fakt, że są to badania umożliwiające przełom generacyjny. Pełna autonomia pojazdu, może

nie tylko zmienić sposób, w jaki z nich korzystamy, ale także znacząco wpłynąć na technologię, gospodarkę oraz społeczeństwo. W pełni autonomiczne autobusy mogłyby zapewnić sieć połączeń w miejscach, które są obecnie wykluczone transportowo z powodu nieopłacalności linii związane z potrzebą zatrudnienia wykwalifikowanego kierowcy, lub brakiem osób chętnych do zajęcia takiego stanowiska, niosąc korzyści gospodarcze (dojazd do nieosiągalnych wcześniej miejsc pracy) oraz społeczne (wyrównanie szans dostępu do edukacji, służby zdrowia i usług). Dodatkowo zwiększone zapotrzebowanie na nowe technologie, umożliwiające jazdę autonomiczną, może stać się motorem napędowym postępu w innych dziedzinach życia.

### 3 Teza badawcza

Możliwe jest zaimplementowanie algorytmu automatycznej kalibracji radaru, który bazując na punktowych detekcjach radarowych, spodziewanym kącie montażu sensora oraz informacji o kinematyce pojazdu, będzie w stanie wyznaczyć trójosiowy błąd kątowy montażu i wykorzystać go do korekty pomiarów przy zachowaniu złożoności obliczeniowej, pozwalającej na wykonanie algorytmu na wbudowanym procesorze radarowym.

### 4 Udokumentowany wkład badawczy

1. **Armin Talai, Rafał Burza i Sashi Praveen Kalli. „Radar System Calibration with Bistatic Sidelobe Compensation”.** US Patent 17,407,071 [1] (US202117407071A, CN115707991A, US20230056655A1, EP4137841A1).

W wyniku prowadzonych prac badawczych i wdrożeniowych udało się opracować algorytm statycznej kalibracji radaru, przeprowadzanej po montażu sensora. Jest to jeden z końcowych procesów produkcji samochodu, wykonywany na końcu linii produkcyjnej (EOL). W wyniku prac zaimplementowano unikalny algorytm minimalizacji wpływu prążków bocznych odbicia z celu kalibracyjnego na dokładność kalibracji. Usprawnienie to zostało opisane i opublikowane w formie patentu, wkładem własnym autora było opracowanie algorytmu filtracji outlierów, który jest głównym elementem wynalazku.

2. **Rafał Burza i Dariusz Borkowski. „Methods and Systems for Determining Alignment Parameters of a Radar Sensor”.** EP3907521A1 [2] (wraz z późniejszymi zmianami CN113608182A, EP3907522A2, US20210341599A1).

Głównym celem prowadzonych prac badawczych było opracowanie algorytmu automatycznej kalibracji radaru, która wykonywana na procesorze radarowym i bazująca na informacjach dostępnych dla radaru jest w stanie dokonać trójosiowej estymacji błędu kąta montażowego sensora. Opracowany algorytm został zaimplementowany w produkcie komercyjnym oraz opublikowany w formie patentu.

3. **Rafał Burza. „Overview of Radar Alignment Methods and Analysis of Radar Misalignment’s Impact on Active Safety and Autonomous Systems”.** Sensors 2024, 24, 4913. [3]

Wykonano kompleksowy przegląd wpływów przesunięcia kąтового radaru na systemy ADAS i AD.



Wnioski zostały podparte podstawami teoretycznymi, symulacjami oraz przeprowadzonymi obliczeniami. Dokonano również kompleksowego przeglądu literatury, który posłużył do opisanie metod korekcji błędów montażu sensora. W ostatniej części publikacji zaproponowana została metoda odniesienia, wskaźniki jakości dla algorytmów adjustacji oraz zostały wyliczone kluczowe wskaźniki jakości, bazujące na otwartym zbiorze danych - RadarScenes.

4. **Rafał Burza. „Application of Neural Networks for Validation of Data Integrity in Large Automotive Radar Datasets”**. SPA Conference 2023. [4]

Opracowano metodę oceny danych wejściowych, bazującą na głębokiej sieci neuronowej. Zastosowana metoda pozwoliła na wskazanie nagrań z jazdy testowych, które mogą być uszkodzone lub zawierać niewiarygodne dane.

## 5 Struktura rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska została podzielona na segmenty mające na celu stopniowe wprowadzenie czytelnika w tematykę kalibracji i auto-kalibracji radarów. Pierwsza część, na którą składają się rozdziały 2-4 stanowi ogólne wprowadzenie do tematyki aktywnego bezpieczeństwa. Następną część złożoną z rozdziałów 5-7 wprowadza czytelnika w bardziej szczegółowe zagadnienia dotyczące: fuzji multisensorycznej, radarów oraz metod optymalizacji. Oryginalne wyniki badań przedstawiono w rozdziałach 8-11, które są skupione wyłącznie wokół zagadnień związanych z algorytmami kalibracji oraz związanymi z nimi pracami.

Rozdział 2 przedstawia tło historyczne, umożliwiające zapoznanie się z historią przemysłu samochodowego oraz trendami, które da się w nim zauważyć na przestrzeni dziesięcioleci. Przedstawiony zarys historyczny jest użyty do analizy racjonalności badań naukowych w podjętej dziedzinie.

Rozdział 3 przybliży tematykę zaawansowanych systemów wspomaganie kierowcy i wymienia najważniejsze systemy należące do tej kategorii. W rozdziale opisano zależności funkcjonalności od elementów wykonawczych i sensorów koniecznych do ich działania. Opisany jest także trend rozwoju systemów aktywnego bezpieczeństwa, jakim jest komunikująca się sieć transportowa.

Rozdział 4 wyjaśnia poziomy autonomii oraz architekturę systemów jazdy autonomicznej. Wyjaśnione są warstwy jazdy autonomicznej: percepcji, decyzyjna, wykonawcza i nadzorcza. Rozdział przedstawia również potencjalne błędy, jakie mogą wystąpić podczas jazdy autonomicznej: błędy percepcji, decyzji i akcji. Omówiono również potencjalne korzyści oraz wyzwania stojące przed jazdą autonomiczną.

Rozdział 5 przybliży temat fuzji multisensorycznej, która jest podstawowym elementem jazdy autonomicznej oraz złożonych systemów aktywnego bezpieczeństwa. Poruszona tematyka przedstawia model fuzji danych i jego podstawowe elementy, do których należy wzbogacanie obiektów oraz wzbogacanie sytuacji. Omówione są stosowane architektury fuzji danych: scentralizowana, rozproszona i hybrydowa oraz wyzwania, z jakimi muszą się mierzyć systemy fuzji.

Rozdział 6 ma na celu przybliżyć podstawowe zagadnienia z zakresu radarów stosowanych w przemyśle samochodowym. Omówiono w nim tematy związane z budową anten radarowych oraz przetwarzaniem sygnału w radarach wykorzystujących falę ciągłą z modulacją częstotliwościową (FMCW). Ta część rozprawy

ma na celu wyjaśnienie podstaw teoretycznych, pozwalających na zrozumienie, jak odebrany przez anteny sygnał radiowy zamienia się w wykryty obiekt widoczny z poziomu ECU.

Rozdział 7 stanowi przegląd popularnych metod optymalizacji, które są adekwatne do tematu rozprawy doktorskiej. Wyjaśnia on działanie metod bezgradientowych (Hooke'a-Jeevesa i sympleksu Neldera-Meada) oraz metod gradientowych (największego spadku, nieliniowych najmniejszych kwadratów oraz nieliniowych całkowitych najmniejszych kwadratów). Opisane metody są później użyte w części praktycznej rozprawy doktorskiej.

Rozdział 8 składa się z dwóch części. W pierwszej dokonano kompleksowego przeglądu metod kalibracji i auto-kalibracji radarów. Opisane zostały fizyczne metody adiustacji oraz metody algorytmiczne, jakimi są: statyczna i dynamiczna kalibracja, a także kalibracja na torze oraz kalibracja post-factum. W drugiej części przeprowadzono szczegółową analizę wpływów błędu orientacji radaru na systemy wspomaganie kierowcy oraz jazdy autonomicznej. W wyniku prac stworzono oryginalne wyprowadzenia wzorów oraz analizy wpływu przekrzywienia na:

- całkowite lub częściowe przysłonięcie czujnika (autorska analiza);
- spadek maksymalnego zasięgu (autorska analiza, w kontekście, który nigdy nie był rozważany w literaturze);
- rozróżnialność celu od szumu (autorska analiza, w kontekście, który nigdy nie był rozważany w literaturze);
- przemieszczenie detekcji (znane w literaturze);
- niedokładność wektora prędkości celu (na podstawie autorskich wyprowadzeń wzorów);
- problemy z asocjacją danych (udowodnione autorskimi symulacjami);
- lokalizacja i mapowanie (autorska analiza i wyprowadzenie).

Rozdział 9 zawiera opis opracowanych autorskich metod kalibracji:

- Opracowana metoda kalibracji statycznej za pomocą wychylanej stalowej płyty, która zawiera autorskie rozwiązanie problemu pomiarów odstających za pomocą iteracyjnej średniej odpornej. Rozwiązanie to zostało zgłoszone w formie kilku międzynarodowych wniosków patentowych [1] (US202117407071A, CN115707991A, US20230056655A1, EP4137841A1).
- Opracowana autorska trójosiowa kalibracja radaru z kompensacją prędkości, która jest bezpośrednio związana z tezą rozprawy doktorskiej i została zgłoszona w formie patentów [2] (EP3907521A1, CN113608182A, EP3907522A2, US20210341599A1).
- Metoda opracowana poza pierwotnie zakładanym planem doktoratu wdrożeniowego pozwalająca na trójosiową estymację błędu orientacji wraz z współczynnikiem kompensacji prędkości nawet w przypadku, gdy radar nie umożliwia pomiaru elewacji detekcji.

Rozdział 10 zawiera opis danych używanych podczas prac oraz zaproponowaną sieć neuronową o autorskiej architekturze, która może zostać użyta do wstępnej walidacji danych testowych, opublikowaną w [4]. W ostatniej części rozdziału opisana jest metoda wzbogacania danych z otwartego zbioru o syntetyczny pomiar kąta elewacji.

Rozdział 11 przedstawia zaproponowane przez autora kluczowe wskaźniki jakości, które pozwalają na ocenę poprawności działania algorytmów pomimo braku informacji na temat oczekiwanych kątów korekcy detekcji. W rozdziale zaproponowano metodę odniesienia, która estymuje jednowymiarowe przekrzywienie radaru na podstawie detekcji punktowych w otoczeniu radaru pochodzących ze stacjonarnych obiektów. Celem metody odniesienia jest umożliwienie analizy porównawczej zaproponowanych algorytmów względem powszechnie stosowanej metody korekcy kąta horyzontalnego. W dalszej części rozdziału przedstawione zostały wyniki analizy działania zaimplementowanych algorytmów trójosiowej korekty kąta montażu radaru:

- trójosiowej metody post-factum z kompensacją prędkości na danych rzeczywistych;
- dynamicznej trójosiowej adiustacji z kompensacją prędkości przy zastosowaniu czterech rozważanych metod optymalizacji (metody największego spadku, nieliniowej metody najmniejszych kwadratów, nieliniowych całkowitych najmniejszych kwadratów, sympleksu Nelder-Meada).

Rozdział 12 zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac, wnioski wraz z argumentacją popierającą udowodnienie założonej tezy badawczej. Ostatnia część rozdziału zawiera potencjalne kierunki rozwoju w obrębie poruszonych w rozprawie tematów.

## 6 Wpływ błędu kąta montażowego na systemy ADAS i AD

W trakcie doktoratu wykonane zostały autorskie analizy potencjalnych błędów montażu na systemy samochodowe. Dokładne wyprowadzenia oraz symulacje zostały zaprezentowane w Rozdziale 8 rozprawy doktorskiej. Do przeanalizowanych problemów należą:

- całkowite lub częściowe przysłonięcie czujnika;
- spadek maksymalnego zasięgu;
- rozróżnialność celów od szumu;
- przemieszczenie detekcji i utrata pokrycia w obszarach zainteresowania;
- niedokładności wektora prędkości celu;
- problemy z asocjacją danych;
- niedokładna lokalizacja pojazdu i mapowanie.

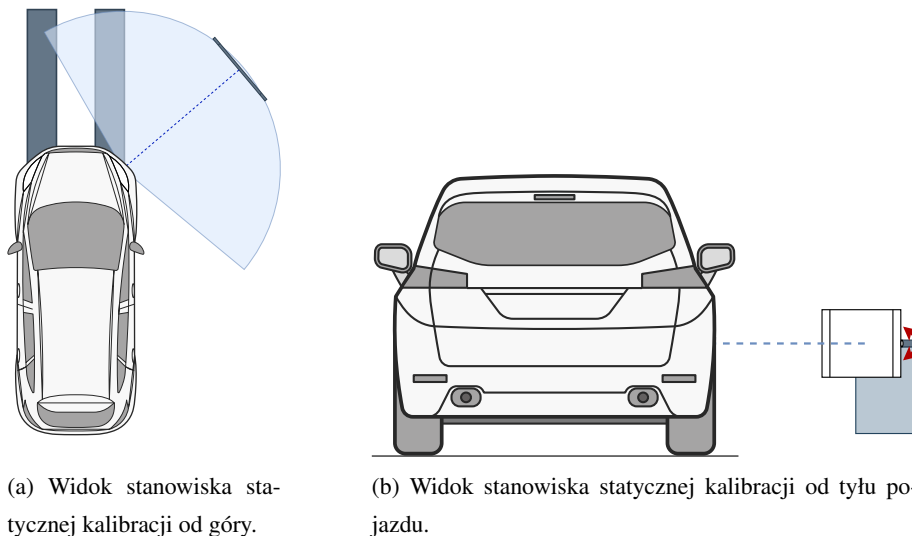
## 7 Kalibracja statyczna za pomocą wychylanej płyty

Kalibracja przeprowadzana w fabryce jest procesem generującym wysokie koszty dla producentów samochodów. Z tego względu procedura kalibracyjna przeprowadzana na linii montażowej musi być wykonywana w czasie, który jest na tyle krótki, że nie spowalnia linii produkcyjnej.

Środowisko, w którym musi działać kalibrowany radar, jest wyjątkowo niekorzystne, ze względu na mnogość metalowych powierzchni odbijających fale radarowe i wpływających negatywnie na estymację kąta nadejścia. Od algorytmu kalibracji oczekuje się wysokiej precyzji w odniesieniu do oszacowania:

- kąta korekty pomiaru azymutu;
- kąta korekty pomiaru elewacji;
- oszacowania maksymalnej amplitudy odbieranej przez radar.

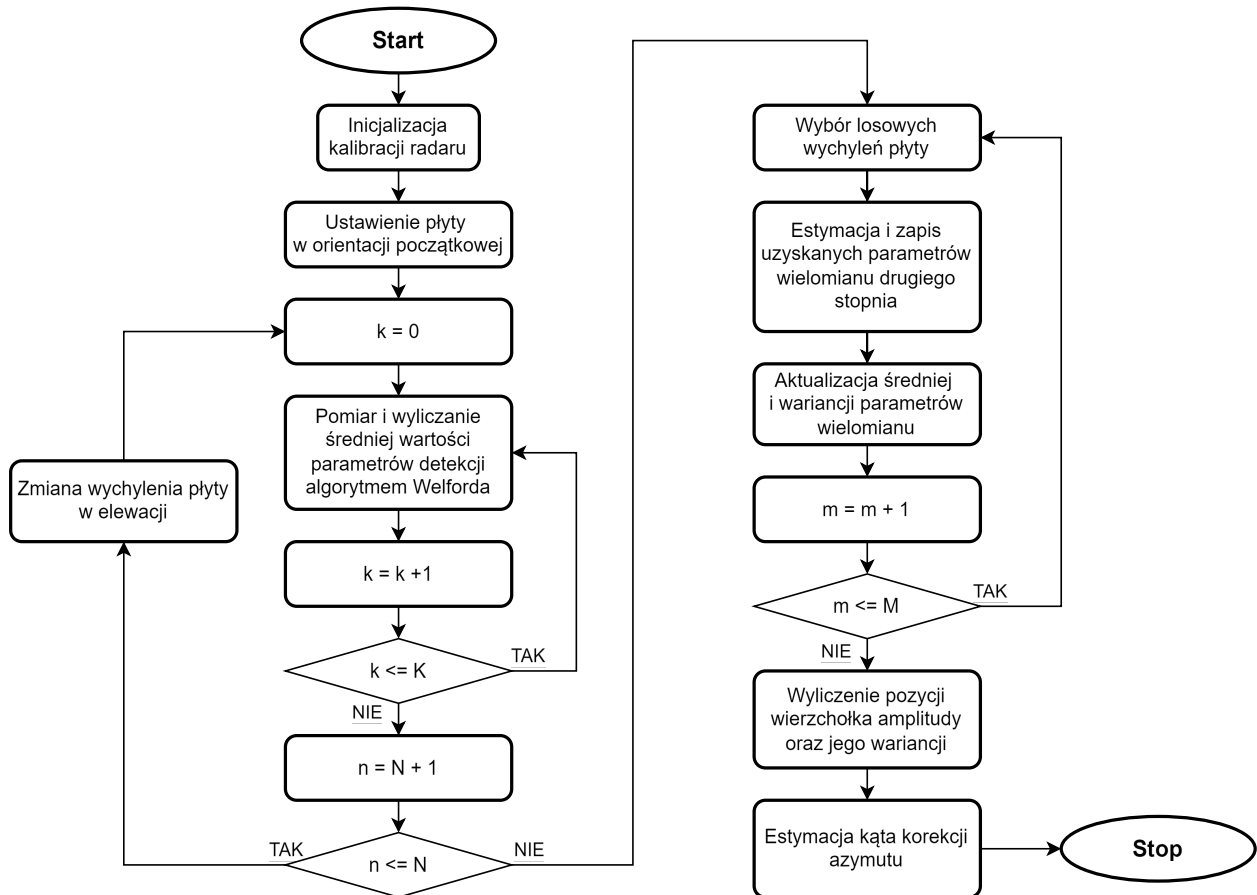
Aby uzyskać wymienione wartości kalibracyjne, postanowiono użyć znanej metody kalibracji orientacji radaru za pomocą metalowej płyty, zamontowanej na precyzyjnym serwomechanizmie, który pozwala na wychylenie płyty w kierunku podłogi i sufitu z zadaniem kątem. Z kolei samochód na linii produkcyjnej jest precyzyjnie pozycjonowany, tak aby stalowa płyta znajdowała się bezpośrednio przed kalibrowanym radarem. Ilustracja poglądowa na stanowisko widoczna jest na rysunku 1.



Rysunek 1: Ilustracja przedstawiająca schemat stanowiska kalibracyjnego przedniego prawego sensora w fabryce. Samochód prowadzony po linii produkcyjnej jest pozycjonowany tak, aby bezpośrednio przed nim znajdowała się stalowa płyta, której wychylenie w elewacji może być precyzyjnie sterowane przez serwomechanizm.

Po dokładnym wypoźycjonowaniu samochodu stacja kalibracyjna przesyła do radaru polecenie inicjacji procedury kalibracyjnej przedstawionej na rysunku 2. Następnie stalowa płyta lub lustro zamieszczone na serwomechanizmie wychyla się w kierunku podłogi o zadany kąt (w tym przypadku  $5^\circ$ ) i przesyła do radaru informację o starcie procedury kalibracyjnej, która sprawia, że radar poszukuje odbicia w precyzyjnie

określonej lokalizacji. W trakcie trwania procedury wyliczana jest średnia amplitudy i azymutu oraz ich wariancja za pomocą algorytmu Welforda, dla  $K$  skanów radarowych (w praktyce 10-50, w zależności od kalibracji, co sprawia, że czas zbierania pomiarów dla jednej pozycji może trwać od ułamka sekundy do kilku sekund).



Rysunek 2: Uproszczony schemat procesu kalibracyjnego dla parametrów:  $K$  - liczba detekcji pobieranych podczas jednego wychylenia płyty,  $N$  - liczba kroków w orientacji płyty,  $M$  - liczba losów do estymacji wariancji uzyskanych estymat.

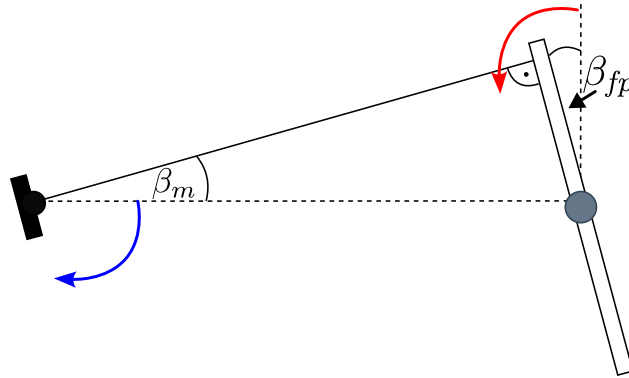
Po zebraniu odpowiedniej liczby detekcji, radar wysyła do stacji kalibracyjnej informację, że przerywa zbieranie pomiarów i należy wychylić płytę do następnego zadanego kroku. Pomiaru są w ten sposób powtarzane dla  $N$  wychyleń płyty, a po ich zebraniu w pamięci następuje przejście do estymacji wartości maksymalnej amplitudy, kąta korekcji elewacji oraz azymutu. Na wyjściu z tej części algorytmu w pamięci znajduje się macierz  $N \times 3$ , która przedstawia kolejno: wartości  $N$  wychyleń w elewacji stałowej płyty,  $N$  średnich azymutów oraz  $N$  średnich amplitud pobranych dla tych wychyleń. Wartość  $N$  jest konfigurowalna, ale w praktyce nie stosowano więcej niż 11 pozycji.

Wyznaczenie błędu wertykalnego kąta montażowego jest w przypadku tej metody kalibracji uzyskiwane na podstawie estymacji kąta wychylenia stałowej płyty oraz pomiaru amplitudy z odbicia, które od niej pochodzi. Radary stosowane w samochodach posiadają znaczący spadek uzysku kierunkowego w elewacji, ponieważ są projektowane do obserwacji szerokiego horyzontalnego pola widzenia, ale tylko na tym samym

poziomie co samochód. W związku z tym można, sterując wychyleniem stalowej płyty, obserwować różnice amplitudy odbitej fali radarowej pochodzącej ze zwracanych detekcji. Amplituda ta będzie miała największą wartość w przypadku, gdy fala radarowa uderza w powierzchnię płyty pod kątem prostym i trafia z powrotem do radaru. Taka sytuacja jest zademonstrowana na rysunku 3, gdzie widać, że dla wychylenia płyty  $\beta_{fp}$  związek pomiędzy wychyleniem celu i radaru może zostać przedstawiony wzorem:

$$\beta_m = -\beta_{fp}^*, \text{ gdzie } \beta_{fp}^* = \max_{\beta_{fp}} A_{fp}(\beta_{fp}), \quad (1)$$

gdzie  $A_{fp}$  oznacza amplitudę fali radarowej odbitej od wychylanej płyty. Kąt wertykalnego misalignmentu jest przeciwny do wertykalnego wychylenia płyty. Zakładając, że kąty dodatnie oznaczają skierowanie obiektu w stronę podłoża, to znalezione maksimum amplitudy, dla płyty skierowanej w stronę podłoża, będzie oznaczać, że radar jest przekrzywiony wertykalnie w górę.

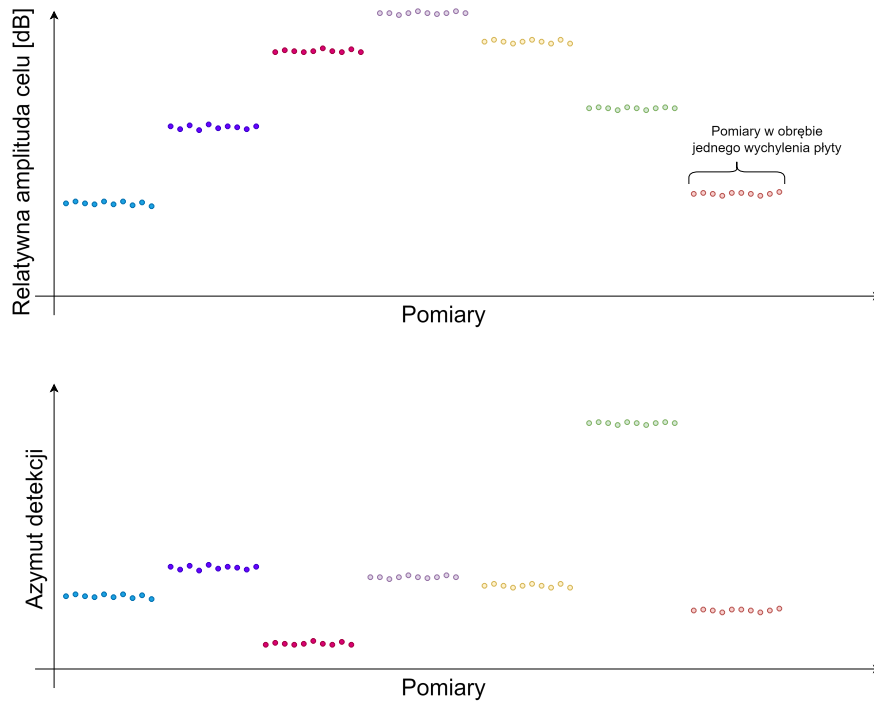


Rysunek 3: Schemat obrazujący działanie statycznej kalibracji za pomocą wychylanej płyty. Radar (z lewej) przekrzywiony w górę o kąt  $\beta_m$  obserwuje maksymalną amplitudę detekcji, gdy płyta (z prawej) jest wychylona o kąt  $\beta_{fp}$  w kierunku podłoża. Strzałki wskazują kąt zaczepiony w zerze i zwrócony w kierunku dodatnim dla pochylenia radaru (niebieski) i płyty (czerwony). Kąt dodatni oznacza pochylenie obiektu w kierunku podłoża.

Problem przedstawiony we wzorze (1) może wydawać się trywialny, jednak jego rozwiązanie w środowisku przemysłowym, pełnym metalowych obiektów, w reżimie czasowym oraz przy braku możliwości dokładnej synchronizacji staje się problematyczne. Wykonanie płynnego, powolnego ruchu stalowej płyty mogłoby dostarczyć najlepszych rezultatów, jednak problemem w tym wypadku była komunikacja ze stacją kalibracyjną, która podlegałaby znaczącym opóźnieniom. Z tego powodu stosowano opisane wcześniej  $N$  kroków stalowej płyty, którymi można było łatwo sterować, zapewniając, że jej pozycja jest zgodna z oczekiwaną.

Mała liczba kroków, wymuszona ograniczeniami czasowymi, sprawia, że znacznym problemem może się okazać dyskretyzacja pomiaru, a także systematyczne błędy tych pomiarów, spowodowane istnieniem w środowisku metalowych obiektów. W trakcie prototypowania algorytmu napotkano na wiele sytuacji, w których pozostawiony w pobliżu celu kalibracyjnego niepożądany obiekt, np. skrzynka z narzędziami, zakrzywiała oczekiwany pomiar dla niektórych wychyleń stalowej płyty. W toku testów stało się jednak jasne, że wykonywane pomiary, które miały wartości przybliżone do zilustrowanych na rysunku 4, są stabilne w

obrębie jednej orientacji płyty, a więc mogą zostać uśrednione, a estymowana funkcja  $A_{fp}(\beta_{fp})$ , może być aproksymowana funkcją kwadratową.



Rysunek 4: Ilustracja prezentująca przykładowy przebieg pomiarów z wychylanej wertykalnie płyty. Kolory rozróżniają detekcje pochodzące z kolejnych orientacji celu.

W celu estymacji wiarygodności pomiaru zastosowano metodę samowsporną, polegającą na losowym wybieraniu podzbiorów trzech spośród wykonanych pomiarów, wykonaniu na ich podstawie aproksymacji wielomianu drugiego stopnia i wyliczaniu na uzyskanych parametrach funkcji kwadratowej pozycji maksimum, które odpowiadało przeciwności  $\beta_m$  jak w (1) oraz jego wariancji.

Aproksymacja wielomianu drugiego stopnia:

$$A_{fp}(\beta_{fp}) = b_1\beta_{fp}^2 + b_2\beta_{fp} + b_3, \quad (2)$$

została wykonana poprzez wykorzystanie metody najmniejszych kwadratów z wagami:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{A}_{fp}, \quad (3)$$

gdzie:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \beta_{fp1}^2 & \beta_{fp1} & 1 \\ \beta_{fp2}^2 & \beta_{fp2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \beta_{fpn}^2 & \beta_{fpn} & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_{fp} = [A_{fp1} \quad A_{fp2} \quad \dots \quad A_{fpn}]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{W} = \text{diag} \left( \left[ \frac{1}{\sigma_{A_{fp1}}^2} \quad \frac{1}{\sigma_{A_{fp2}}^2} \quad \dots \quad \frac{1}{\sigma_{A_{fpn}}^2} \right] \right), \quad (6)$$

a  $\sigma_{A_{fpn}}^2$  oznacza wariancję pomiaru amplitudy w  $n$ -tej pozycji płyty. Zastosowane równanie posiada dodatkowe korzystne własności, jakimi jest symetria macierzy  $\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X}$ , dzięki której jej odwrotność jest również symetryczna. Pozwoliło to na redukcję liczby wymaganych operacji obliczeniowych przez pominięcie wyliczania powielonych wartości, redukując czas wykonania na procesorze wbudowanym we wdrożonej metodzie. Znalezienie wychylenia stalowej płyty, dla której amplituda zwróconej fali radarowej jest największa, oraz powiązanego z nim wertykalnego kąta przekrzywienia zostało uzyskane za pomocą własności równania kwadratowego:

$$\beta_m = \frac{b_2}{2b_1}. \quad (7)$$

Na podstawie znalezionej ekstremum, dla poprawnie działającego procesu kalibracji, w którym amplituda sygnału posiada maksimum, można obliczyć estymowaną wartość maksymalnej amplitudy wykorzystywaną do sprawdzenia poprawności przejścia fali radarowej przez zderzak samochodowy:

$$\max A_{fp} = A_{fp} \left( -\frac{b_2}{2b_1} \right). \quad (8)$$

Kolejnym parametrem estymowanym w wyniku przedstawianego algorytmu jest horyzontalny kąt przekrzywienia radaru, który okazał się najbardziej problematyczny. W przypadku celu kalibracyjnego o oczekiwanej pozycji bezpośrednio przed radarem, można go wyznaczyć za pomocą:

$$\alpha_m = -\alpha_{fp}, \quad (9)$$

gdzie  $\alpha_{fp}$  oznacza kąt, pod którym obserwowane jest odbicie ze stalowej płyty.

Ze względu na charakterystykę anteny oraz celu, a także istnienie wielu ścieżek fali radarowej w otoczeniu, spowodowanych dużą liczbą metalowych obiektów, zebrane kąty nadejścia zawierały w sobie wiele próbek odstających, jak na rysunku 4. W wyniku kilkumiesięcznych badań stwierdzono, że żadna z modernizacji stanowiska kalibracyjnego, która mogłaby poprawić estymację kąta nadejścia, nie jest możliwa do wykonania ze względu na wymagania klienta. Dodatkowa analiza zebranych pomiarów nie pozwoliła na znalezienie korelacji odstających pomiarów kąta azymutu z innymi parametrami detekcji. W związku z tym, postanowiono na wykorzystanie średniej odpornej do estymacji azymutu, a innowacje zgłoszono w patencie [1].

Algorytm średniej odpornej polega na iteracyjnym polepszaniu wyniku, w którym dokonuje się wyliczenia średniej i wariancji zbioru, a następnie odrzuca pomiary odstające o konfigurowaną wartość od średniej. W wypadku tego algorytmu zdecydowano się na dwie iteracje odrzucające pomiary oddalone od średniej o dwa odchylenia standardowe.



## 8 Dynamiczna trójosiowa adiustacja radaru z kompensacją prędkości

Stosowany algorytm statycznej kalibracji nie pozwala na poprawienie jednego z kluczowych wejść do systemu aktywnego bezpieczeństwa, jakim jest pomiar prędkości samochodu. Najczęściej przyjmuje się, że jest on obciążony stałym błędem, który wpływa proporcjonalnie na zmierzoną wartość. Wynika to z faktu, że jest on dostarczany na podstawie prędkości obrotowej kół samochodu, a na obwód koła może wpłynąć wiele czynników tj. zmiana opony, jej niedopompowanie lub zmiana temperatury.

Konieczność zaimplementowania dodatkowej metody poza statyczną kalibracją dyktuje również fakt, że od czasu wyjazdu samochodu z fabryki lub autoryzowanego warsztatu, radary mogą zostać poddane wielu czynnikom, które wpłyną na jakość ich pomiaru. Mogą to być kolizje, samodzielnie przeprowadzane naprawy lub powolna degradacja elementów montażowych, która może poskutkować obsunięciem się czujnika.

Aby upewnić się, że radar działa poprawnie podczas całego cyklu życia, należy wykorzystać możliwości płynące z nienadzorowanych metod dynamicznej kalibracji, a także stosować algorytmy badające, czy czujnik nie został zasłonięty oraz monitorować stan jego wyjść. Analiza literatury wykazała, że pomimo istnienia obiecujących algorytmów dynamicznej adiustacji, to wszystkie z nich są w stanie dokonać korekty jedynie horyzontalnego i wertykalnego kąta przekrzywienia radaru.

Radar może dokonać przesunięcia i przekrzywienia w trzech osiach, z tego względu modele pozwalające na korektę wyłącznie dwóch osi nie pozwalają na zupełną korektę błędów detekcji. Przykład takiej sytuacji widoczny jest na rysunku 5. Widać na nim, że nawet gdy skoryguje się horyzontalne i wertykalne przekrzywienie radaru, to jego skrócenie nadal ma znaczący wpływ na pozycję detekcji oddalonych od centrum pola widzenia. Co więcej, można zauważyć, że ocena, czy radar jest przekrzywiony na podstawie samego położenia detekcji lub ich kształtu, wydaje się być bardzo trudna ze względu na złożoność otoczenia.



Rysunek 5: Ilustracja przedstawiająca wpływ przekrzywienia radaru na detekcje radarowe. Czerwone punkty przedstawiają detekcje radarowe naniesione na układ współrzędnych samochodu nie posiadającego informacji o przekrzywieniu radaru, zielone punkty oznaczają skorygowane detekcje, niebieskie strzałki oznaczają wektor korygujący detekcje.

W trakcie prac wdrożeniowych interesującą wydała się hipoteza, że estymacja trójosiowego błędu orientacji radaru, a następnie korekcja błędu pozwoli na zwiększenie precyzji pomiarów pozycji otaczających obiektów. Aby wykonać taką operację i przedstawić detekcję pod kątem zgodnym z układem współrzędnych samochodu, należy zastosować na pomiarach azymutu i elewacji radaru opracowane przez autora wzory:

$$\alpha_{VCS} = \alpha_b + \alpha_m + \alpha_n \cos \gamma_m - \beta_n \sin \gamma_m, \quad (10)$$

$$\beta_{VCS} = \alpha_b + \beta_m + \beta_n \cos \gamma_m + \alpha_n \sin \gamma_m, \quad (11)$$

gdzie  $\gamma_m$  oznacza skręcenie czujnika.

Skręcenie radaru przedstawione za pomocą wzorów (10) i (11) zostało zamodelowane poprzez zastosowanie macierzy rotacji na detekcji w sferycznym układzie współrzędnych sensora wokół punktu centralnego pola widzenia sensora, a następnie translację uzyskanych punktów o oczekiwany kąt montażu oraz błąd kątowy. Uzyskanie parametrów  $\alpha_m$ ,  $\beta_m$ ,  $\gamma_m$  jest zadaniem nietrywialnym, m.in. ze względu na korelację parametrów, które są związane ze sobą poprzez  $\gamma_m$ . Istnieje niewiele zjawisk, które są jednoznacznie z nimi związane i są wystarczająco dokładne, żeby pozwolić na ich estymację. Najbardziej wiarygodnym modelem, który sprawia, że można związać kąt detekcji z inną mierzoną przez radar wartością wydaje się równanie prędkości radialnej stacjonarnych detekcji:

$$\dot{r} = -(k_v V_x - V_{\omega_x}) \cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS} - V_{\omega_y} \sin \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS}, \quad (12)$$

gdzie  $k_v$  jest współczynnikiem korekcji prędkości samochodu, a  $V_x$ ,  $V_{\omega_x}$ ,  $V_{\omega_y}$  są pomiarami kinematyki pojazdu dostarczonymi przez system, lub wyprowadzonymi na podstawie dostarczanych pomiarów.

Aby wyznaczyć wartości parametrów  $k_v$ ,  $\alpha_m$ ,  $\beta_m$  i  $\gamma_m$  można posłużyć się metodami gradientowymi, które wymagają wyliczenia wartości ich pochodnych cząstkowych, które są dane kolejno wzorami:

$$\frac{\partial \dot{r}}{\partial k_v} = -V_x \cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \dot{r}}{\partial \alpha_m} = -(V_{\omega_x} - V_x k_v) \sin \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS} - V_{\omega_y} \cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \dot{r}}{\partial \beta_m} = -(V_{\omega_x} - V_x k_v) \cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} + V_{\omega_y} \sin \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{r}}{\partial \gamma_m} = & V_x \alpha_n k_v (\cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \cos \gamma_m - \cos \beta_{VCS} \sin \alpha_{VCS} \sin \gamma_m) \dots \\ & - V_x \beta_n k_v (\cos \beta_{VCS} \sin \alpha_{VCS} \cos \gamma_m + \cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \sin \gamma_m) \dots \\ & + V_{\omega_x} \alpha_n (\cos \beta_{VCS} \sin \alpha_{VCS} \sin \gamma_m - \cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \cos \gamma_m) \dots \\ & + V_{\omega_x} \beta_n (\cos \beta_{VCS} \sin \alpha_{VCS} \cos \gamma_m + \cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \sin \gamma_m) \dots \\ & + V_{\omega_y} \alpha_n (\cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS} \sin \gamma_m + \sin \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \cos \gamma_m) \dots \\ & + V_{\omega_y} \beta_n (\cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS} \cos \gamma_m - \sin \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \sin \gamma_m) \dots \end{aligned} \quad (16)$$

Analizując przedstawione komponenty gradientu proponowanego modelu, można zauważyć powtarzające się fragmenty, a ich istnienie może zostać wykorzystane do napisania optymalnego kodu na procesor sygnałowy. Jak można zauważyć, po prawidłowej optymalizacji, dla obliczenia gradientu jednej detekcji

będzie konieczne obliczenie tylko sześciu operacji trygonometrycznych, jakimi są sinus i kosinus kątów:  $\alpha_{VCS}$ ,  $\beta_{VCS}$  i  $\gamma_m$ . Pomimo efektywnej implementacji na niektórych procesorach wykonanie tak dużej liczby operacji zmiennoprzecinkowych, może okazać się niemożliwe w wymaganym reżimie czasowym. Aby zredukować liczbę obliczeń związanych z komponentem  $\gamma_m$ , można ograniczyć wykonanie algorytmu tylko do przypadków, kiedy samochód porusza się prosto i zredukować model do postaci:

$$\dot{r} = -k_v V_x \cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS}. \quad (17)$$

Gradient takiego modelu będzie składał się z komponentów:

$$\frac{\partial \dot{r}}{\partial k_v} = -V_x \cos \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial \dot{r}}{\partial \alpha_m} = V_x k_v \sin \alpha_{VCS} \cos \beta_{VCS}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \dot{r}}{\partial \beta_m} = V_x k_v \cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{r}}{\partial \gamma_m} = & V_x \alpha_n k_v (\cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \cos \gamma_m - \cos \beta_{VCS} \sin \alpha_{VCS} \sin \gamma_m) \dots \\ & - V_x \beta_n k_v (\cos \beta_{VCS} \sin \alpha_{VCS} \cos \gamma_m + \cos \alpha_{VCS} \sin \beta_{VCS} \sin \gamma_m). \end{aligned} \quad (21)$$

Proponowane ograniczenie działania do sytuacji, w której samochód jedzie prosto, nie będzie możliwe do zaimplementowania w przypadku każdego projektu. W zależności od miejsca użytkowania samochodu oraz stylu jazdy może się okazać, że takie obwarowanie sprawi, że algorytm będzie mógł działać kilkunastokrotnie rzadziej lub wcale. W przypadku rozpatrywania ograniczeń działania algorytmu należy zauważyć, że zaproponowane modele wymagają poruszającego się pojazdu do działania. W przeciwnym wypadku istnieje nieskończenie wiele rozwiązań tych równań. W trakcie prac wdrożeniowych przyjęto, że minimalna prędkość pojazdu, która powinna pozwolić na dokładne działanie algorytmu wynosi 5 m/s. Im większa prędkość pojazdu, tym detekcje ze stacjonarnego otoczenia dostarczają bogatszej informacji o prędkości radialnej, co poprawia dokładność algorytmu.

Uzyskane gradienty mogą zostać wykorzystane w metodzie największego spadku, zapisanej jako:

$$\mathbf{b}^{(n+1)} = \mathbf{b}^{(n)} - \eta \mathbf{J}^T \mathbf{R}_{\dot{r}}, \quad (22)$$

gdzie  $\mathbf{R}_{\dot{r}}$  oznacza residua prędkości radialnej. Parametr  $\eta$  może być zarówno skalar, lub osobnym współczynnikiem dla każdego estymowanego parametru. W przypadku dobrania go jako skalar odwrotny do długości  $\mathbf{R}_{\dot{r}}$ , metoda największego spadku będzie podążać za średnim gradientem tych detekcji. W kontekście prac wdrożeniowych zadowalające rezultaty były osiągnięte dla parametru  $\eta$ , który był dany wektorem:

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_{k_v} & \eta_{\alpha_m} & \eta_{\beta_m} & \eta_{\gamma_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-6} & 10^{-3} & 10^{-2} & 10^{-2} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Odpowiednie dobranie  $\boldsymbol{\eta}$  sprawia, że zmiany parametru  $k_v$  nie wpływają destrukcyjnie na estymację  $\beta_m$  i  $\gamma_m$ , które mają znacznie mniejszy wpływ na wartość  $\dot{r}$ , co pozwala na zbieżność algorytmu do oczekiwanych wartości.

Gradyenty mogą zostać również wykorzystane do nieliniowej metody najmniejszych kwadratów, która po dodaniu do niej parametru Marquardta ( $\lambda_m$ ) przyjmuje postać:

$$\mathbf{b}^{(n+1)} = \mathbf{b}^{(n)} - \eta (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda_m \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J} \mathbf{R}_{\dot{r}}, \lambda_m > 0. \quad (24)$$

Parametr Marquardta pozwala ustabilizować parametry, których zbieżność może zostać zaburzona przez niedokładności pomiaru oraz złe uwarunkowanie danych wejściowych, spowodowane np. zgrupowaniem detekcji w pobliżu siebie (w jednym obszarze pola widzenia). W przypadku nieliniowej metody najmniejszych kwadratów zastosowano  $\lambda_m = 10$  oraz:

$$\eta = \begin{bmatrix} 10^{-3} & 10^{-2} & 10^{-2} & 10^{-2} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Implementacja nieliniowej metody całkowitych kwadratów, wymagała modyfikacji rozkładu wartości osobliwych do postaci:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{svd\mathbf{J}} & \mathbf{U}_{svd\mathbf{R}_{\dot{r}}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Sigma_{svd\mathbf{J}} & 0 \\ 0 & \Sigma_{svd\mathbf{R}_{\dot{r}}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{svd\mathbf{J}\mathbf{J}} & \mathbf{V}_{svd\mathbf{J}\mathbf{R}_{\dot{r}}} \\ \mathbf{V}_{svd\mathbf{R}_{\dot{r}}\mathbf{J}} & \mathbf{V}_{svd\mathbf{R}_{\dot{r}}\mathbf{R}_{\dot{r}}} \end{bmatrix} = svd \left( \begin{bmatrix} \mathbf{J} & \eta \mathbf{R}_{\dot{r}} \end{bmatrix} \right), \quad (26)$$

w której został zastosowany skalarny parametr  $\eta = 2 \cdot 10^{-4}$ , pozwalający na ustabilizowanie optymalizacji. Iteracja nieliniowej metody całkowitych najmniejszych kwadratów może zostać zapisana jako:

$$\mathbf{b}^{(n+1)} = \mathbf{b}^{(n)} - \mathbf{V}_{svd\mathbf{J}\mathbf{R}_{\dot{r}}} \mathbf{V}_{svd\mathbf{R}_{\dot{r}}\mathbf{R}_{\dot{r}}}^{-1}. \quad (27)$$

Ostatnią zaimplementowaną metodą optymalizacji opracowanego modelu była bezgradientowa metoda sympleksu Nelder-Meada, w której zastosowano funkcję kosztów daną wzorem:

$$f(k_v, \alpha_m, \beta_m, \gamma_m) = \sum_{i=1}^{N_d} (\dot{r}_i + (k_v V_{x_i} - V_{\omega_{x_i}}) \cos \alpha_{VCS_i} \cos \beta_{VCS_i} + V_{\omega_{y_i}} \sin \alpha_{VCS_i} \cos \beta_{VCS_i})^2, \quad (28)$$

gdzie  $N_d$  oznacza liczbę detekcji użytych do wyznaczenia wartości funkcji kosztów. Zwiększenie parametru  $N_d$  pozwala na zmniejszenie chaotycznych kroków spowodowanych niedokładnościami pomiaru, poprzez uśrednienie ich błędów. Ze względu na wiążący się z tym zwiększony czas obliczeń, starano się wyznaczyć liczbę detekcji wystarczającą do wyliczenia funkcji kosztów w jednej iteracji. W wyniku testów wartość  $N_d = 16$  dała zadowalające rezultaty.

## 9 Trójosiowa kalibracja post-factum z kompensacją prędkości

Na końcowym etapie realizacji doktoratu stało się jasne, że opracowane metody mogą zostać wykorzystane na precyzyjnych radarach narożnych najnowszej generacji. W trakcie realizacji doktoratu stosowano dane zebrane w przedsiębiorstwie, jednak opublikowanie ich w rozprawie doktorskiej jest niemożliwe z uwagi na konieczność ochrony własności intelektualnej oraz szczegółowych parametrów radaru, co mogłoby nieumyślnie ujawnić informacje strategiczne konkurencyjnym podmiotom. Niestety, pomimo poszukiwań nie udało się odnaleźć otwartego zbioru danych radarowych, który posiadałby pomiar elewacji detekcji i zawierał w sobie długie fragmenty ciągłej jazdy, pozwalające na testowanie algorytmów dynamicznej kalibracji.

Dostępne zbiory danych, które spełniały wymaganie, co do długich fragmentów jazdy, posiadały jedynie pomiary kąta horyzontalnego.

Ze względu na chęć udowodnienia tezy, że trójosiowa estymacja błędu kąta montażowego jest możliwa na otwartym zbiorze danych, poza projektem wdrożeniowym został opracowany algorytm, który działając na otwartym zbiorze danych, bez żadnych modyfikacji detekcji radarowych, będzie w stanie oszacować trójosiowe przekrzywienie radaru, pozwalające na redukcję błędu prędkości radialnej stacjonarnych detekcji. Taka estymacja, ze względu na brak informacji o kącie elewacji detekcji, musi działać z pewnymi spodziewanymi założeniami:

- algorytm ma dostęp do pomiarów z wszystkich radarów, w obrębie samochodu;
- nieistniejący pomiar elewacji jest wypełniany losową wartością o rozkładzie równomiernym:

$$\beta_n \in [-0,02; 0,06] \text{ rad}, \quad (29)$$

przesunięcie rozkładu równomiernego względem zera odzwierciedla przesunięcie pomiarów względem podłoża;

- przynajmniej jeden z zestawu radarów musi mieć mały błąd kąta elewacji (ale nie musi być wskazany algorytmowi);
- estymowana jest wartość bezwzględna kąta elewacji, co oznacza, że uzyskane wartości elewacji i skręcenia mogą mieć przeciwny znak do rzeczywistych.

Proponowany algorytm powtarza w iteracji estymację współczynnika  $k_v$  kątów  $\alpha_m$ ,  $\beta_m$  i  $\gamma_m$  dla wszystkich radarów jednocześnie za pomocą metody całkowitych nieliniowych najmniejszych kwadratów.

Wartości początkowe parametrów zostają ustawione na:

$$\begin{bmatrix} k_v & \alpha_{m_k} & \beta_{m_k} & \gamma_{m_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0^\circ & 1,5^\circ & 0^\circ \end{bmatrix} \quad (30)$$

Funkcja kosztów w algorytmie dana jest wzorem:

$$f(k_v, \alpha_{m_1}, \beta_{m_1}, \gamma_{m_1}, \dots, \alpha_{m_{K_r}}, \beta_{m_{K_r}}, \gamma_{m_{K_r}}) = 0,1 \cdot k_v + \dots \quad (31)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{K_r} (\dot{r}_k + (k_v V_{x_k} - V_{\omega_{x_k}}) \cos \alpha_{VCS_k} \cos \beta_{VCS_k} + V_{\omega_{y_k}} \sin \alpha_{VCS_k} \cos \beta_{VCS_k})^2,$$

gdzie  $K_r$  oznacza liczbę radarów. Gradienty szukanych parametrów sprowadzają się do wartości jak we wzorach (14), (15) i (16). Pochodna cząstkowa parametru  $k_v$ , ze względu na dodatkowy element w funkcji kosztów dana jest wzorem:

$$\frac{\partial f}{\partial k_v} = 0,1 - \sum_{k=1}^{K_r} V_x \cos \alpha_{VCS_k} \cos \beta_{VCS_k}, \quad (32)$$

Do obliczenia wartości kroków parametrów  $k_v$ ,  $\alpha_m$ ,  $\beta_m$  i  $\gamma_m$  użyto metody nieliniowych całkowitych najmniejszych kwadratów, działającej na zestawie 256 losowo wybranych detekcji z każdego z 4 radarów dostępnych w danych testowych. Macierz Jacobiego ma rozmiar  $256 \times 13$  i została wzbogacona o wyliczone

residua jak we wzorze (26), używając  $\eta = 10^{-4}$ . Kroki algorytmu zostały uzyskane korzystając ze wzoru (27).

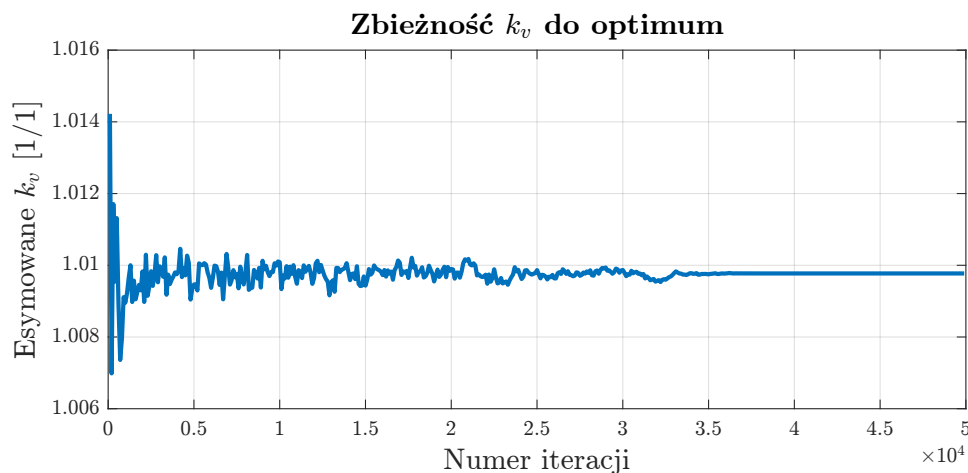
Przedstawiony algorytm jest wykonywany przez zadaną liczbę kroków. Ze względu na wyznaczanie metody poza środowiskiem samochodu można wykorzystać dużą liczbę iteracji oraz dużą liczbę detekcji w jednej iteracji. W metodzie nieliniowych całkowitych najmniejszych kwadratów, konieczne jest stosowanie znacznej liczby detekcji pomiarowych, a poprawa jej działania jest widoczna po przekroczeniu 128 detekcji na radar.

## 10 Wyniki dynamicznej trójosiowej adiustacji z kompensacją prędkości metodą sympleksu Nelder-Meada

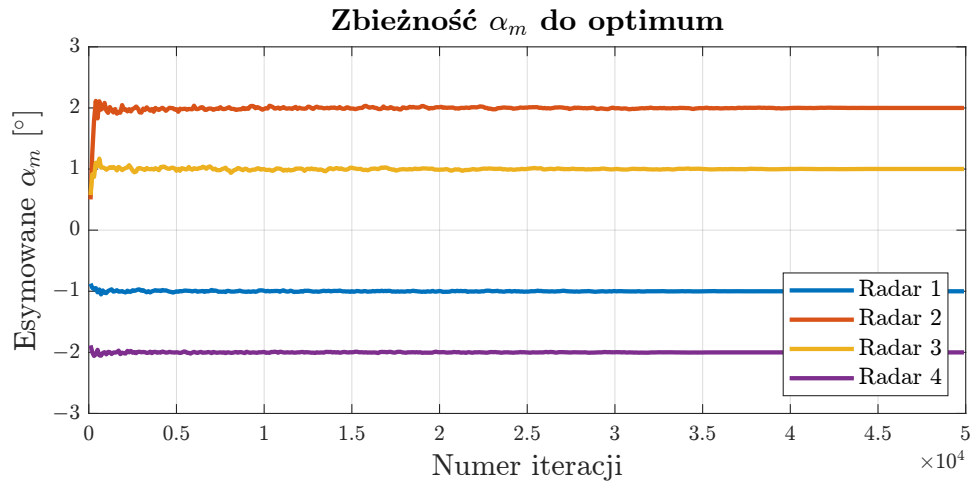
W rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki algorytmów dynamicznej trójosiowej adiustacji z kompensacją prędkości, w których zastosowano metody optymalizacji, takie jak metoda największego spadku, nieliniowa metoda najmniejszych kwadratów, nieliniowa metoda całkowitych najmniejszych kwadratów oraz metoda sympleksu Nelder-Meada. Tabele 1, 2 oraz rysunki 6, 7, 8, 9 przedstawiają wyniki metody Nelder-Meada, która okazała się najbardziej obiecująca w kontekście implementacji na procesorze radarowym.

Tabela 1: Uzyskane wyniki estymat dynamicznej kalibracji z kompensacją prędkości metodą sympleksu Nelder-Meada.

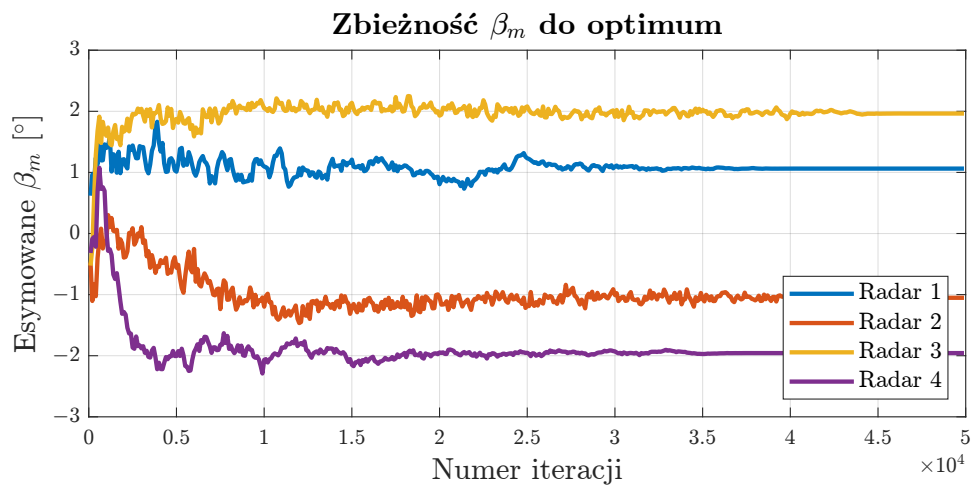
Radar	$k_v$	$\alpha_m$ °	$\beta_m$ °	$\gamma_m$ °
1		-1,0006	1,0624	1,9483
2	1,0098	1,9997	-1,0517	1,1350
3		1,0010	1,9636	-0,9833
4		-2,0007	-1,9570	-1,9935



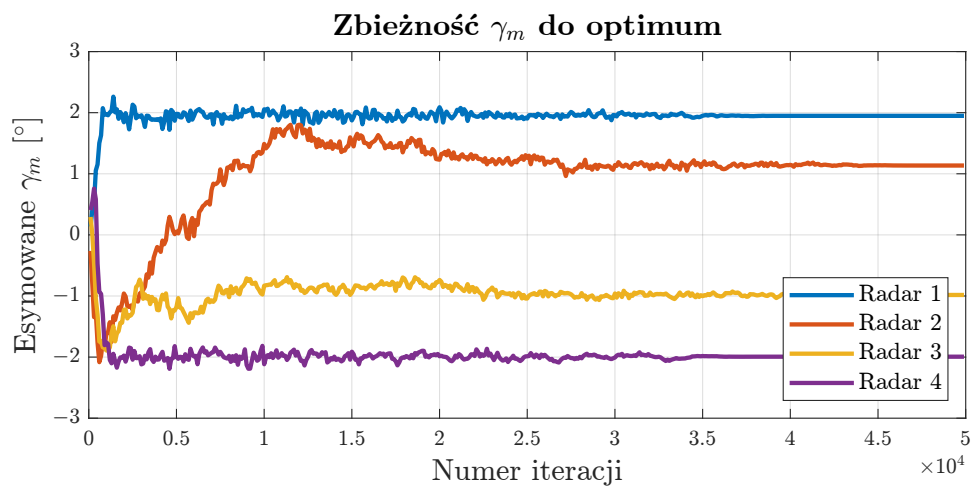
Rysunek 6: Ilustracja przedstawiająca zbieżność do wartości optymalnej  $k_v$  znalezionej przez algorytm sympleksu Nelder-Meada.



Rysunek 7: Ilustracja przedstawiająca zbieżność do wartości optymalnej  $\alpha_m$  znalezionej przez algorytm sympleksu Nelder-Meada.



Rysunek 8: Ilustracja przedstawiająca zbieżność do wartości optymalnej  $\beta_m$  znalezionej przez algorytm sympleksu Nelder-Meada.



Rysunek 9: Ilustracja przedstawiająca zbieżność do wartości optymalnej  $\gamma_m$  znalezionej przez algorytm sympleksu Nelder-Meada.

Tabela 2: Wyniki KPI algorytmu dynamicznej kalibracji z kompensacją prędkości metodą sympleksu Nelder-Meada.

	Oryginalne detekcje	Algorytm referencyjny	Algorytm sympleks
Zbieżność (iteracje)		24379	6971
Wychylenie $k_v$		$6,6303 \cdot 10^{-6}$	$2,9854 \cdot 10^{-5}$
Wychylenie $\alpha_m$ °		0,0184	0,0106
Wychylenie $\beta_m$ °		—	0,1380
Wychylenie $\gamma_m$ °		—	0,0912
RMSE	0,2045	0,0275	0,0272
Skośność	0,2459	-0,0271	-0,0201
Kurtoza	2,1019	3,1994	3,2126

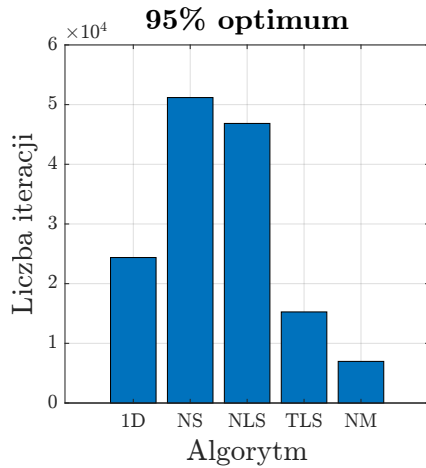
## 11 Analiza wybranych wyników

Jedną z rozważanych we wdrożeniu metod optymalizacji był sympleks Nelder-Meada. Jest on prosty obliczeniowo, ponieważ daje zadowalające rezultaty, co widać na rysunkach 6, 7, 8 i 9 już przy użyciu zaledwie 16 detekcji w funkcji kosztu. Niewątpliwą zaletą jest brak konieczności obliczania kosztownych gradientów, które są wrażliwe na szum. Metoda sympleksu charakteryzuje się ważną cechą – szybkością działania. Bardzo szybko reaguje na potrzebę zmiany parametrów, a początkowe szумы można zredukować, poprzez zastosowanie metod filtracji estymowanej wartości w czasie.

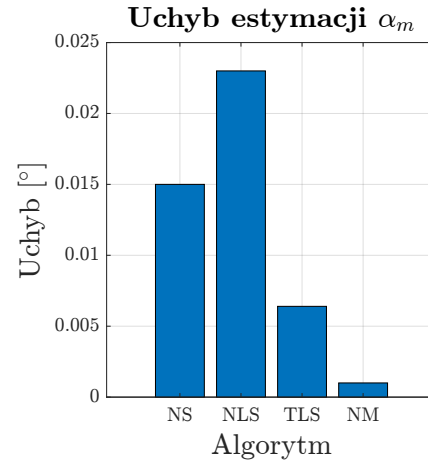
Fakt, że metoda sympleksu jest najkorzystniejszym rozwiązaniem, przedstawia również analiza porównawcza przedstawiona na rysunku 10. Można na nim zauważyć:

- czas potrzebny do pokonania 95% dystansu do optimum, gdzie najlepsze wyniki osiągają algorytmy sympleksu i nieliniowych całkowitych kwadratów, jednak należy pamiętać, że metoda sympleksu jest znacznie wydajniejsza obliczeniowo;
- uchyb estymacji  $\alpha_m$  jest najmniejszy dla metody sympleksu, a metoda nieliniowych całkowitych kwadratów zajmuje drugie miejsce;
- w przypadku uchybu  $\beta_m$  różnice pomiędzy algorytmami się zmniejszają, lecz algorytm sympleksu ma nadal przewagę;
- dla kąta skręcenia radaru  $\gamma_m$  widać znaczące pogorszenie estymacji w przypadku metod najmniejszych kwadratów, a algorytm sympleksu nadal daje najlepsze rezultaty.

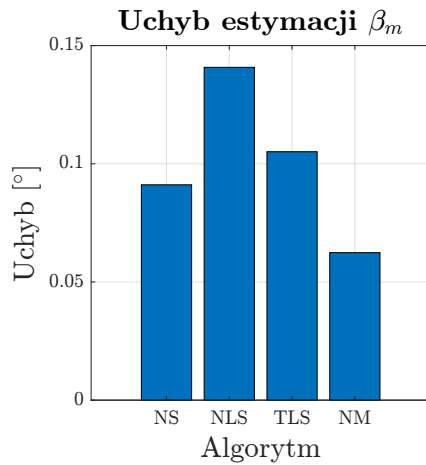




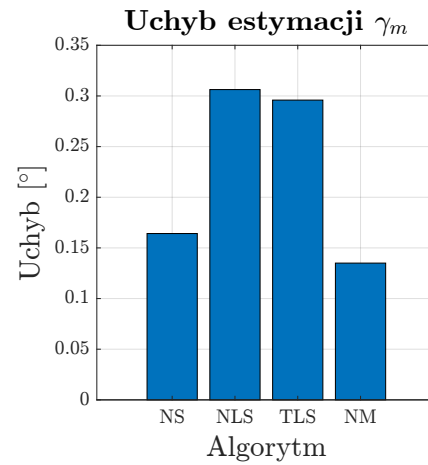
(a) Liczba iteracji potrzebna do pokonania 95% dystansu do optimum.



(b) Odchylenie wartości  $\alpha_m$  z końcowej iteracji od wartości oczekiwanej.



(c) Odchylenie wartości  $\beta_m$  z końcowej iteracji od wartości oczekiwanej.



(d) Odchylenie wartości  $\gamma_m$  z końcowej iteracji od wartości oczekiwanej.

Rysunek 10: Algorytmy: 1D - Referencyjny, NS - największego spadku, NLS - nielinyowy najmniejszych kwadratów, TLS - nielinyowy całkowitych najmniejszych kwadratów, NM - sympleks Nelder-Mead.

## 12 Wnioski

Zaimplementowany algorytm statycznej kalibracji radaru umożliwił wykrycie wertykalnego i horyzontalnego kąta wychylenia radaru oraz dostarczenie danych o amplitudzie fali radarowej przechodzącej przez zderzak. Ze względu na wymagania producenta samochodów, wyniki pomiarów nie mogły zostać załączone do rozprawy, jednak sukces implementacji rozwiązania został potwierdzony zgłoszeniem patentowym. Nawet innowacje osiągnięte w procesie kalibracji na linii produkcyjnej nie są w stanie zastąpić algorytmów dynamicznej kalibracji radaru.

Zaproponowaną trójosiową dynamiczną kalibrację radaru z kompensacją prędkości przetestowano przy użyciu różnych optymalizatorów. Na podstawie analizy danych syntetycznych wybrano algorytm sympleksu Nelder-Meada, który nie tylko uzyskał najlepsze rezultaty, ale także charakteryzuje się niską złożonością obliczeniową i możliwością optymalizacji, co umożliwia jego implementację nawet w budżetowych procesorach sygnałowych.

Zapewnienie, że pozytywne wyniki nie biorą się z odpowiednio zaprojektowanej symulacji, a z faktycznego zjawiska, któremu może podlegać każdy radar, wymagało zaimplementowania algorytmu, który może działać na detekcjach nieposiadających pomiaru elewacji. Implementacja takiego algorytmu umożliwiła wykorzystanie otwartego zbioru danych RadarScenes, a uzyskane wyniki jasno pokazują, że detekcje mają mniejszą średnią kwadratową wartość błędu prędkości radialnej po trójosiowej korekcie niż przed nią. To jednoznacznie dowodzi, że trójosiowa adiustacja detekcji poprawia jakość pomiarów.

Założona na początku pracy teza badawcza stwierdzała, że możliwa jest implementacja algorytmu automatycznej kalibracji radaru, który, opierając się na punktowych detekcjach radarowych, spodziewanym kącie montażu sensora oraz informacjach o kinematyce pojazdu, będzie w stanie:

- wyznaczyć trójosiowy błąd kątowy montażu i wykorzystać go do korekty pomiarów;
- utrzymać złożoność obliczeniową umożliwiającą wykonanie algorytmu na wbudowanym procesorze radarowym.

Pierwsza część tezy, dotycząca możliwości wyznaczenia trójosiowego błędu orientacji, została udowodniona:

- zarówno na danych rzeczywistych, jak i syntetycznych, poprzez wyliczenie KPI, które wskazują, że zaimplementowane metody poprawiają jakość detekcji, zmniejszając średni błąd kwadratowy prędkości radialnej;
- na danych syntetycznych, gdzie parametry zbiegały się do wartości optymalnych w oczekiwanych punktach, wyznaczonych na etapie tworzenia detekcji.

Druga część tezy, dotycząca złożoności obliczeniowej trójosiowej adiustacji, została udowodniona poprzez:

- wykazanie, że jeden z najmniej wymagających algorytmów optymalizacji bezgradientowej osiągnął najlepsze rezultaty KPI;
- implementację algorytmu w początkowym etapie projektu komercyjnego.

Teza badawcza przedstawiona w niniejszym doktoracie została jednoznacznie potwierdzona przez wyniki analiz, zgłoszenie patentowe oraz implementację wynalazku w projekcie komercyjnym.

## 13 Potencjalne kierunki rozwoju

Tematyka kalibracji sensorów radarowych jest szerokim zagadnieniem, które nie zostało w pełni wyczerpane w ramach tej rozprawy doktorskiej. Kierunki, w których można rozwinąć obecny stan wiedzy to:

### 1. Prace nad statyczną kalibracją

(a) **Opracowanie metody kalibracji, która zapewniałaby lepszą separację celu od szumu otoczenia**

Linia produkcyjna często otoczona jest metalowymi obiektami, których odbicia zaburzają jakość estymacji. Modyfikacja celu kalibracyjnego, umożliwiająca lepsze oddzielenie celu od otoczenia, mogłaby znacznie poprawić jakość estymacji horyzontalnego i wertykalnego kąta przekrzywienia radaru.

(b) **Opracowanie metody pozwalającej na trójosiową adiustację na linii produkcyjnej**

Przedstawiona metoda statycznej kalibracji umożliwia jedynie adiustację radaru w kącie wertykalnym i horyzontalnym. Opracowanie metodologii, która pozwoliłaby na trójosiową kalibrację pomogłoby w wykrywaniu radarów zamontowanych ze skreśleniem poza dopuszczalnym zakresem.

(c) **Badania nad aktywnymi celami kalibracyjnymi**

Aktywne cele kalibracyjne, które pozwalają na generowanie fali o ściśle określonych parametrach i symulujących odbicie radarowe mogą okazać się konieczne podczas bardziej zaawansowanych metod kalibracji sensorów radarowych. Badania mające na celu obniżenie ich kosztów lub zastosowanie ich w bardziej zaawansowanych metodach kalibracji statycznej mogą okazać się korzystne.

### 2. Prace nad dynamiczną kalibracją

(a) **Badania nad lepszym modelem matematycznym**

Zaproponowany model matematyczny, oparty na prędkości radialnej, mógłby zostać zastąpiony modelem pozwalającym na wyeliminowanie części funkcji trygonometrycznych. Zmiana modelu w celu zredukowania liczby operacji wprowadzających nieliniowe przekształcenia mogłaby zarówno zredukować złożoność obliczeniową, a także przyspieszyć zbieżność do optimum.

(b) **Badania nad metodami optymalizacji**

Metoda sympleksu Nelder-Meada daje bardzo dobre rezultaty, jednak wraz z rosnącymi możliwościami procesorów wbudowanych możliwe będzie wdrożenie bardziej zaawansowanych metod optymalizacji, takich jak algorytmy genetyczne.

(c) **Badania nad zastosowaniem sieci neuronowych do kalibracji radaru**

Rozwój układów wspierających sprzętową akcelerację obliczeń macierzowych na procesorach

---

wbudowanych sprawia, że badania nad kalibracją radaru za pomocą głębokiej sieci neuronowej stają się uzasadnione.

(d) **Działanie na mapie range-Doppler i angle-Doppler**

Opracowane algorytmy działają na punktowych detekcjach, co jest uzasadnione przede wszystkim możliwościami sprzętowymi. Detekcje punktowe nie są najbardziej korzystną formą informacji radarowej, ponieważ podczas ich kreowania odrzucona zostaje znaczna ilość danych, które znajdują się na range-Doppler i angle-Doppler mapach. Implementacja zarówno konwencjonalnych algorytmów, jak i sieci neuronowych mogłaby przynieść znaczne korzyści.

3. **Inne**

(a) **Prace nad metodami monitorowania stanu radaru**

Algorytmy kalibracji są jedynie częścią metod działających w obrębie radaru, które monitorują jego stan. Znane są również między innymi algorytmy wykrywania przysłonięcia radaru. Rozwój rozwiązań umożliwiających dokładną weryfikację działania radaru oraz wiarygodności detekcji, np. w celu sprawdzenia, czy nie są one spowodowane zjawiskiem wielokrotnego odbicia fali radarowej, zanim zostaną przekazane innym komponentom systemu, mógłby poprawić jakość działania algorytmów.

(b) **Prace nad metodami automatycznej walidacji radaru**

Automatyczna walidacja danych za pomocą sieci neuronowych może usprawnić proces weryfikacji danych zebranych podczas jazd testowych. Wykorzystanie akceleratorów sieci neuronowych może umożliwić implementację metod działających podczas jazdy samochodu. Weryfikacja danych w czasie rzeczywistym mogłaby zapewnić ochronę systemu przed atakami, które mają na celu zakłócenie pracy czujników i wprowadzenie do nich nieistniejących obiektów.

## Bibliografia autora

- [1] A. Talai, R. M. **Burza** i S. P. Kalli, *Radar System Calibration with Bistatic Sidelobe Compensation*, US Patent 17,407,071, lip. 2023.
- [2] R. M. **Burza** i D. Borkowski, *Methods and Systems for Determining Alignment Parameters of a Radar Sensor*, EP3907521A1, lip. 2021.
- [3] R. M. **Burza**, „Overview of Radar Alignment Methods and Analysis of Radar Misalignment’s Impact on Active Safety and Autonomous Systems,” *Sensors*, tom 24, numer 15, 2024. DOI: 10 . 3390 / s24154913. adres: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/15/4913>.
- [4] R. M. **Burza**, „Application of Neural Networks for Validation of Data Integrity in Large Automotive Radar Datasets,” w *2023 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, 2023, strony 71–76. DOI: 10 . 23919/SPA59660 . 2023 . 10274466.