

Politechnika Śląska

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS

Streszczenie Rozprawy Doktorskiej

Autor:

mgr inż. Krzysztof Hanzel

Promotor:

dr hab. inż. Damian Grzechca, prof. Pol. Śl.

Promotor pomocniczy:

dr inż. Krzysztof Tokarz

Gliwice 2022

Spis treści

1.	Wstęp	3
1.1.	Tematyka rozprawy	4
1.2.	Tezy rozprawy i cel pracy.....	5
1.3.	Przebieg pracy i układ rozprawy.....	6
2.	Wprowadzenie do pozycjonowania	6
2.1.	Technologie wykorzystywane w pozycjonowaniu	7
2.2.	Technologia UWB – cechy i podstawowe informacje	7
2.3.	Techniki i pojęcia wykorzystywane w pozycjonowaniu	7
2.4.	Systemy wspomagania kierowców ADAS a możliwość wykorzystania UWB	9
2.5.	Analiza SWOT wykorzystania UWB	9
2.6.	Miary dokładności pozycji obiektu	10
3.	System lokalizacji i identyfikacji obiektów	10
3.1.	Etap akwizycji danych z systemu pozycjonującego UWB.....	13
3.2.	Filtracja wstępna	13
3.3.	Filtracja adaptacyjna odległości bazująca na prędkości.....	13
3.4.	Korekta odległości z wykorzystaniem logiki rozmytej.....	14
3.4.1.	Model Mamdaniego	14
3.4.2.	Model Sugeno.....	15
3.5.	Algorytm trilateracji i określenie relacji kąt - odległość	16
4.	Implementacja i analiza systemu lokalizacji i identyfikacji	16
4.1.	Analiza wartości parametru RSSI w różnych ośrodkach.....	16
4.2.	Wykorzystanie filtrów z ruchomym oknem dla obiektu w ruchu	17
4.3.	Analiza skuteczności filtracji adaptacyjnej	18
4.4.	Analiza skuteczności zaproponowanych modeli logiki rozmytej	19
4.4.1.	Weryfikacja modelu Mamdaniego	19
4.4.2.	Weryfikacja modelu Sugeno.....	20
4.4.1.	Weryfikacja zmodyfikowanego modelu Sugeno	21
4.5.	Analiza wyznaczania kąta	21
4.6.	Podsumowanie.....	23
5.	Struktura danych do identyfikacji obiektów	23
5.1.	Wpływ długości identyfikatora obiektu na pozycjonowanie	24
5.2.	Elementy infrastruktury drogowej	24
5.3.	Etykietowanie obiektów infrastruktury - ramka danych.....	25
5.4.	Analiza czasów transmisji danych	25
5.5.	Wpływ rodzaju transmisji, prędkości i liczby węzłów na opóźnienie.....	26
6.	Podsumowanie i wnioski końcowe	27
7.	Bibliografia.....	30

1. Wstęp

W dobie gwałtownej transformacji cyfrowej istnieje coraz większa potrzeba automatycznej identyfikacji i lokalizacji obiektów. Problem ten jest złożony i wielopłaszczyznowy, ponieważ potrzeba pozycjonowania oraz lokalizacji występuje w różnych gałęziach przemysłu i jest również integralną częścią rewolucji 4.0. Papierkiem lakmusowym tych zmian jest branża motoryzacyjna, w której wraz z rozwojem technologicznym każdy z nowo produkowanych pojazdów jest naszpikowany dziesiątkami systemów elektronicznych mających poprawić bezpieczeństwo i komfort podróżowania. Zagłębiając się w poszczególne wymagania i specyfikę określonej gałęzi przemysłu, okazuje się często, że wymaganie samej tylko lokalizacji obiektów wokół pojazdu jest ważne, ale niewystarczające, ponieważ wskazywana jest wprost potrzeba ich identyfikacji. Jest to szczególnie widocznie, kiedy bierze się pod uwagę branżę motoryzacyjną i aktualny trend realizacji poszczególnych faz autonomicznej jazdy, które mają również za zadanie poprawę bezpieczeństwa i komfortu jazdy. Coraz częściej podstawą tych zachowań nie są już tylko wybory klientów, decydujących się na nowoczesne pojazdy, ale regulacje prawne, które zmuszają producentów samochodów do ciągłej poprawy bezpieczeństwa i monitorowania jakości podróży swoich klientów. Żyjemy więc w czasach, w których branża samochodowa i szeroko rozumiana informatyka współpracują z sobą jak nigdy wcześniej. Jednym z efektów tej współpracy jest wypracowanie pojęcia ADAS (ang. Advanced Driver-Assistance Systems) – zespołu zaawansowanych systemów wspomagających kierowcę. Systemy te, powszechnie montowane w seryjnie produkowanych samochodach, mają wiele różnorodnych funkcji: od tych mających na względzie bezpieczeństwo kierowców i gwarancję dotarcia ich do celu, poprzez systemy ułatwiające prowadzenie samochodu, aż po takie podnoszące komfort i wygodę użytkownika samochodu.

Na uzyskanie informacji umożliwiających identyfikację i wskazanie pozycji innych użytkowników ruchu drogowego oraz obiektów infrastruktury drogowej składa się szereg operacji na poziomie pozyskania danych z sensorów i processingu, czyli przetworzenia tej informacji na dane użyteczne dla innych systemów. Nowoczesny system komputerowy asystujący kierowcy musi rozpoznać (dokonać jego akwizycji poprzez szereg czujników, sensorów) i przetworzyć zebrane dane (stworzyć swoistą mapę zajętości otoczenia pojazdu) oraz wypracować odpowiedź dotyczącą sytuacji. Taką sytuację wieloletni kierowca jest w stanie ocenić w ułamku sekundy, natomiast system musi ocenić w oparciu o dane z sensorów. Co więcej oczekujemy, aby system przeprowadził ten cały proces szybciej i z większą niezawodnością niż kierowca. Jest to proces skomplikowany i chociaż nierzadko przewyższa już możliwości ludzkiej percepcji i szybkości reakcji, to nadal trwają starania w implementacji coraz to nowszych rozwiązań, które cechowałaby większa niezawodność i pewności predykcji możliwych zdarzeń.

Z perspektywy nowoczesnych systemów autonomicznej jazdy pojawia się problem automatycznej identyfikacji i lokalizacji obiektów infrastruktury drogowej i jej użytkowników.

W tym celu zbierane są ogromne ilości danych z sensorów percepcji otoczenia. Brakuje natomiast systemu automatycznej identyfikacji oraz walidacji tych obiektów. W tym celu odbywa się proces etykietowania obiektów widocznych na zgromadzonych materiałach i tworzenie map otoczenia pozwalających ocenić dokładność zaimplementowanych rozwiązań. Jest to proces czasochłonny, angażujący zasoby ludzkie i obciążony możliwością wprowadzenia błędu przez człowieka. Dlatego opracowanie systemu, który umożliwi jednoczesną lokalizację i identyfikację, pozwoli na walidowanie nowo wprowadzanych algorytmów i systemów ADAS w sposób bardziej efektywny i oszczędny.

1.1. Tematyka rozprawy

Obiekt (samochód) poruszający się, szczególnie w ośrodku miejskim o dużym zagęszczeniu różnego rodzaju obiektów, powinien posiadać zestaw zwalidowanych algorytmów i metod bazujących na zastosowanych sensorach otoczenia takich jak LIDAR, radar czy zestaw kamer. Można także powiedzieć, że jednym z podstawowych wyzwań stojących przed stosowanymi algorytmami implementowanymi w systemach ADAS jest weryfikacja niezawodności działania zaimplementowanych metod detekcji, identyfikacji i lokalizacji przeszkód oraz infrastruktury będącej w najbliższym otoczeniu pojazdu. Synchronizowanie tych informacji z faktycznie występującymi obiektami jest procesem żmudnym oraz długotrwałym i najczęściej wymaga zatrudnienia osobnej grupy ludzi, która etykietuje poszczególne obiekty.

Propozycją rozwiązania tego problemu jest zastosowanie technologii umożliwiającej zarówno identyfikację, jak i lokalizację. Niestety dotychczas dostępne rozwiązania nie ułatwiają prowadzenia takich badań, ponieważ nawet w przypadku spełnienia kryterium identyfikacji (np. przez systemy bezprzewodowe takie jak: RFID, WiFi, czy Bluetooth) ich zdolności związane z określaniem odległości czy pozycji są niezadowalające. Dodatkowym i częstym wymogiem stanowiącym o niemożliwości wykorzystania tych rozwiązań jest konieczność działania zarówno w warunkach LOS (ang. line-of-sight) jak i NLOS (ang. non-line-of-sight – w sytuacji, kiedy jeden obiekt jest przysłonięty przez inny, np. samochód, poruszającego się rowerzystę czy pieszego), co dodatkowo utrudnia wyznaczenie odległości. Problem związany z potrzebą identyfikacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS wymaga zatem zarówno wyznaczenia odległości od obiektu, jak i jednoczesnej identyfikacji, niezależnie od warunków widoczności.

W ramach rozprawy doktorskiej przedstawiona została propozycja systemu, który ma pozwolić na etykietowanie obiektów przy jednoczesnym określaniu jego pozycji, co pozwoli przyspieszyć proces walidacji nowych algorytmów ADAS. To z kolei przełoży się na możliwość walidowania wypracowanych na poziomie symulatora algorytmów wspomaganego kierowcy. W ramach pracy opracowano zatem wielowątkowy, złożony proces zastosowania technologii UWB (ang. Ultra-wideband) do automatycznej identyfikacji i pozycjonowania obiektów w otoczeniu pojazdu. W tym celu konieczne było zaprojektowanie i przetestowanie komunikacji umożliwiającej pozyskiwanie informacji o odległości, następnie rozważenie

pozycji, a także opracowanie i walidacja dedykowanych struktur pozwalających na transmisję metadanych zapewniających identyfikację obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS. W trakcie analizy konieczne było również przedstawienie zależności i wpływu kilku wzajemnie oddziaływujących parametrów projektowanego systemu takich jak: dokładność; częstotliwość; identyfikacja obiektu w akceptowalnym czasie, przy założeniu, że obiekty znajdują się w ruchu.

1.2. Tezy rozprawy i cel pracy

Jednym z podstawowych problemów powstających obecnie systemów wspomagania kierowcy ADAS jest złożoność i czasochłonność procesu walidacji algorytmów, na który w dużej mierze wpływ mają lokalizacja i identyfikacja obiektów, które znajdują się w otoczeniu pojazdu. Równocześnie prężny rozwój technologii UWB oraz predyspozycje tej technologii do wymiarowania przy jednoczesnej możliwej do przeprowadzenia transmisji danych, zdają się być potencjalnym wsparciem w walidacji algorytmów ADAS. Biorąc pod uwagę powyższe spostrzeżenie zaproponowano następującą tezę pracy mówiącą, że możliwe jest:

Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS

Celem pracy jest opracowanie systemu lokalizacji i identyfikacji obiektów infrastruktury drogowej z wykorzystaniem technologii UWB oraz filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej, na potrzeby walidacji algorytmów implementowanych w podsystemach ADAS. Tworzony system lokalizacji i identyfikacji obiektów będzie umieszczony na obiekcie głównym, a pozostałe elementy zewnętrzne wyposażone w znaczniki, będą umieszczone na elementach znajdujących się w otoczeniu pojazdu. Zakres pracy obejmuje więc opracowanie skutecznej metody wsparcia dla walidujących nowe algorytmy ADAS, która umożliwi wyznaczenie pozycji i identyfikację obiektów otaczających pojazd.

Słuszność celu pracy zostanie wykazana w oparciu na poniższych tezach częściowych:

Teza 1: Zastosowanie technologii UWB w postaci lokalnego układu odniesienia, który umiejscowiony jest na obiekcie głównym, umożliwia poprawną identyfikację i lokalizację obiektów trzecich znajdujących się w otoczeniu obiektu głównego w akceptowalnym czasie i z zachowaniem ograniczonej prędkości.

Teza 2: Wprowadzenie filtracji adaptacyjnej wraz z logiką rozmytą pozwala polepszyć dokładności lokalizacji oznaczonych obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu.

Teza 3: Opracowanie odpowiedniej struktury danych opisujących obiekty zewnętrzne ułatwia prawidłową identyfikację przy zachowaniu akceptowalnego czasu wyznaczania pozycji obiektu zewnętrznego.

1.3. Przebieg pracy i układ rozprawy

Praca składa się z pięciu etapów prowadzących do realizacji celu. Pierwszym z nich jest przedstawienie obecnego stanu wiedzy związanego zarówno z pozycjonowaniem obiektów, jak i podstawowymi pojęciami związanymi z jego realizacją. Omówione zostały podstawy technologii UWB, zasady jej działania. Wskazano również na jej możliwość wykorzystania w kontekście wspomnianych wcześniej funkcjonalności i technologii oraz przeprowadzono analizę SWOT tego rozwiązania. Głównym elementem pracy było zaproponowanie schematu procedury przetwarzania danych wymiarujących, które pochodzą z systemu bazującego na technologii UWB. Składają się na to etapy akwizycji, wykorzystanie adaptacyjnej filtracji wstępnej (np. z uwzględnieniem filtrów odpornych czy odrzuceniu błędów grubych). Dalej następuje faza obróbki z wykorzystaniem logiki rozmytej na podstawie przeanalizowanych podejść Mamdaniego oraz Takagi-Sugeno. Prowadzi to do zwiększenia dokładności lokalizacji oznaczonych obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu. Finalnie system w zależności od dostępnych danych z wykorzystaniem trilateracji wskazuje na położenie, lub też odległość i kąt pod jakim znajduje się obiekt względem osi pojazdu. Zaproponowana w pracy transmisja metadanych związanych z infrastrukturą drogową, stanowi dopełnienie potrzebne do realizacji walidacji algorytmów w podsystemach ADAS. Jest ona oryginalną propozycją etykietowania obiektów.

Postawione w rozprawie tezy są także wynikiem współpracy z branżą realizującą technologie ADAS, a także konsultacjami z osobami z przemysłu motoryzacyjnego, a otrzymane rezultaty badań i proponowane rozwiązania są odpowiedzią na wskazane przez nich problemy.

2. Wprowadzenie do pozycjonowania

Określanie pozycji obiektów w celach nawigacyjnych towarzyszy ludzkości od zarania dziejów. Pierwotnie wykorzystywane były do tego jedynie zdolności poznawcze ludzkich zmysłów, z obserwacją otaczającego świata na czele. W dzisiejszych czasach odległość obiektu (a przez to i często jego pozycję) jesteśmy w stanie określić z wykorzystaniem wielu technologii. Popularnym podziałem, który ma odzwierciedlenie w literaturze, jest ten na technologie do zastosowań typowo wewnątrz budynków (IPS ang. Indoor Positioning System) oraz takie, które można swobodnie stosować na otwartej przestrzeni (OPS ang. Outdoor Positioning System). Mówiąc o środowisku pracy nie sposób nie wspomnieć o dodatkowych czynnikach, w kontekście których należy rozpatrywać możliwość korzystania z danej technologii, a są to m.in. dokładność i precyzja, zasięg działania, miejsce stosowania systemu, wymagana infrastruktura i możliwość rozbudowy, cena, możliwość identyfikacji, zapotrzebowanie na energię, widoczność nadajnika i odbiornika systemu (warunki pracy – w zasięgu wzroku ang. LOS oraz poza zasięgiem wzroku ang. NLOS), otrzymywane dane.

2.1. Technologie wykorzystywane w pozycjonowaniu

Obecnie na rynku wykorzystuje się różne techniki radiokomunikacji, część z nich wykorzystywana jest również do pozycjonowania obiektów [1]. Ponadto wiele rodzajów technologii jest lub było wykorzystywanych do określania pozycji obiektów w globalnym lub lokalnym systemie odniesienia. Analiza dostępnych metod wskazuje, że metody oparte na analizie wiązki LIDAR-owej [2]–[6] czy chmury punktów z radaru [4], [7], nie umożliwiają jednoznacznej identyfikacji obiektu, a z kolei takie, jak WiFi [8]–[10] czy Bluetooth [11], [12] posiadają zbyt małą dokładność pozycjonowania i niewielki zasięg, dlatego też nie mają zastosowania w technologiach ADAS, szczególnie w kontekście ruchu. Biorąc pod uwagę koszt implementacji, metody wizyjne [13]–[15] mogą być brane pod uwagę w celu identyfikacji i wymiarowania, ponieważ oferują wystarczającą dokładność, ale uwzględniając konieczność implementacji wielu kamer i wymagane zasoby obliczeniowe, oraz znaczący spadek jakości działania w warunkach ograniczonej widoczności, utrudnia to realizację założonych wytycznych. Konieczne jest zatem opracowanie nowych algorytmów i procedur, które umożliwią jednoczesne wymiarowanie i etykietowanie. Ich projektowanie wiąże się jednak z koniecznością wykorzystania systemu pośredniego, który mógłby posłużyć za system łączący obie wskazane funkcjonalności na potrzeby rozwoju tych algorytmów. W niniejszej pracy proponuje się system oparty na technologii szerokopasmowej UWB [16]–[20], ponieważ oferuje odpowiednią dokładność wymiarowania przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości transmisji danych, a co za tym idzie potencjalnej identyfikacji obiektu. Nie wymaga ona dużej energii zasilania ani wielkich zasobów obliczeniowych nawet w przypadku konieczności implementacji wielu znaczników, a w przypadku odpowiedniego doboru algorytmu wymiarowania nie jest też wymagana synchronizacja zegarów urządzeń, jak ma to miejsce na przykład dla systemu GPS [21], [22].

2.2. Technologia UWB – cechy i podstawowe informacje

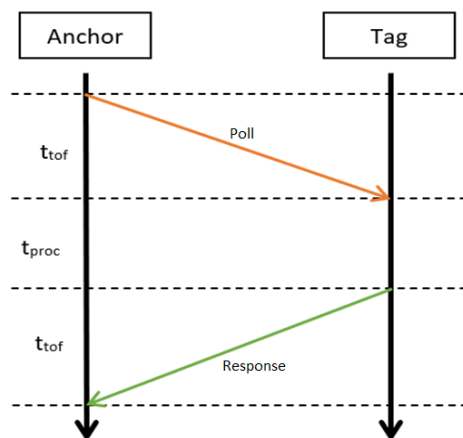
W celu wyznaczania odległości i jednoczesnej identyfikacji proponuje się wykorzystanie technologii UWB. Jest ona techniką radiokomunikacji charakteryzującą się wysyłaniem krótkich impulsów (rzędu pikosekund) z zachowaniem bardzo wysokiej częstotliwości transmisji. Dzięki takiemu działaniu komunikacja ta pozwala na wykorzystanie dużego fragmentu widma częstotliwościowego. Zaletą jest również wykorzystanie niewielkiej energii do transmisji danych na niewielkie odległości. W odróżnieniu od widma o wąskim paśmie transmisja z wykorzystaniem UWB nie zakłóca konwencjonalnej transmisji wąskopasmowej na tej samej częstotliwości [23], i w niewielkim stopniu interferuje z innymi sygnałami, co jest to szczególnie istotne np. w zastosowaniach medycznych [24].

2.3. Techniki i pojęcia wykorzystywane w pozycjonowaniu

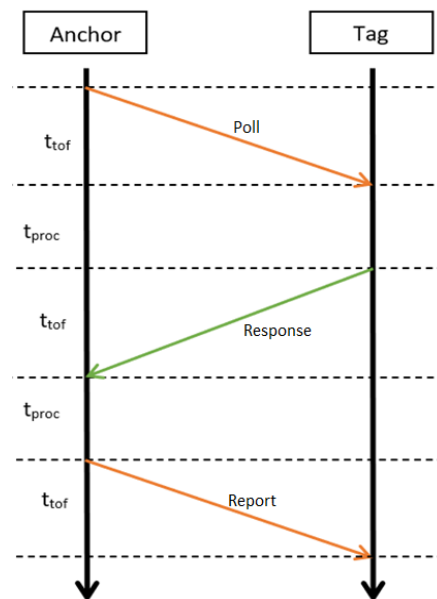
Metody wykorzystywane w pozycjonowaniu skupiają się na transmisji sygnału pomiędzy punktem referencyjnym a znacznikiem (jak np. w GPS, UWB) lub akwizycji sygnału odbitego (jak radar czy LIDAR). Sposób wyznaczania odległości może być jedno- (np. SS-TWR – Single-Sided Two-Way Ranging) lub dwu-kierunkowy (np. DP-TWR – Double-Sided Two-Way Ranging), może też nieść dodatkową informację potwierdzającą. Należy zauważyć, że niektóre

technologie umożliwiają równoczesną transmisję danych, jednak większość tych obecnie wykorzystywanych w wymiarowaniu nie dysponuje takimi możliwościami. Ustandaryzowane i od lat wykorzystywane technologie są ze sobą powiązane np.: GPS wykorzystuje TOF; LIDAR bazuje na chmurze punktów i odległościach bazujących na różnicy w czasie propagacji wiązki laserowej; kamera natomiast przetwarza promieniowanie widzialne, a następnie dokonywana jest identyfikacja obiektów (np. z wykorzystaniem metod inteligencji maszynowej). Niektóre systemy natomiast umożliwiają wykorzystywanie kilku z metod w zależności implementacji (dla UWB np. TOF, TWR, AOA).

Wyróżnić można następujące najważniejsze pojęcia i techniki wykorzystywane w pozycjonowaniu obiektów: TOA – (Time Of Arrival) często stosowany zamiennie z TOF (Time Of Flight) – jest to czas, w jakim sygnał pokonuje drogę od nadajnika do odbiornika. TDoA – (Time Difference of Arrival) – inaczej zwana również multilateracją – to metoda lokalizacji bazująca na TOA. TDoA polega na wyznaczeniu pozycji w oparciu o różnice w czasie odbioru sygnału nadanego ze znanych punktów referencyjnych. AOA – (Angle Of Arrival) – jest to metoda umożliwiająca wyznaczenie kierunku propagacji fali radiowej na podstawie kąta nadejścia sygnału. Proces wymiarowania bazującego na metodzie TOA oraz metodach SS-TWR i DS-TWR. Schematycznie proces wymiarowania został przedstawiony na rysunkach 1 oraz 2.



Rys. 1. Przykład komunikacji SS-TWR ranging



Rys. 2. Przykład komunikacji DS-TWR ranging

Pierwsza z metod (SS-TWR) polega na wymianie dwóch komunikatów, natomiast w DS-TWR gdzie na podstawie uśrednionego czasu przelotu dwóch komunikatów wymiarujących wyznaczana jest odległość między nadajnikiem a odbiornikiem. Zastosować można również kolejną, czwartą ramkę, która służy do przekazania informacji o odległości do urządzenia inicjującego transmisję.

2.4. Systemy wspomaganie kierowców ADAS a możliwość wykorzystania UWB

Branża samochodowa jest drugą po branży medycznej, priorytetową gałęzią przemysłu i różnego rodzaju nowinki technologiczne są wprowadzane w tym właśnie obszarze. Wiele z technologii rozwijanych jest głównie na potrzeby branży automotive, na którą rynek samochodowy wywiera coraz większą presję dotyczącą konstrukcji systemów zapewniających komfort i bezpieczeństwo kierowcy i pasażerów. Systemy ADAS można podzielić ze względu na pełnione funkcje w pojeździe podczas jazdy czy też postoju. Dwa główne aspekty to podnoszenie bezpieczeństwa kierowcy i pasażera oraz podnoszenie komfortu jazdy i obsługi pojazdu. Rozdział ten w pracy przedstawia technologie wykorzystywane w branży samochodowej wraz z ich charakterystyką i wskazaniem punktów, w których możliwe staje się wykorzystanie technologii UWB na potrzeby walidacji stale rozwijanych podsystemów ADAS. Przykładem mogą być takie rozwiązania jak aktywny tempomat (adaptacyjny) (ACC), system ograniczający skutki kolizji (CMBS – Collision Mitigation Braking System) czy układ wspomaganie nagłego hamowania gdzie dzięki wykorzystaniu transmisji danych, przy jednoczesnym określaniu odległości z wykorzystaniem np. specjalnie w tym celu przygotowanej ramki UWB umożliwiłoby poprawę działania tych systemów, zwiększyło ich niezawodność i szybkość reakcji.

2.5. Analiza SWOT wykorzystania UWB

System pozycjonowania oparty o technologię UWB posiada swoje mocne, ale i słabe strony, a wykorzystanie go do walidacji systemów wspomaganie kierowcy niesie za sobą szanse oraz ryzyka. Dlatego też na podstawie przeglądu artykułów [19], [23]–[29] dokonano zbiorczej analizy SWOT (ang. strengths, weaknesses, opportunities, threats), aby jak najbardziej obiektywnie przedstawić możliwości oraz zagrożenia wiążące się z użyciem proponowanych rozwiązań.

Silne strony	Słabe strony
<ul style="list-style-type: none">• Dokładność lokalizacji – pozwala zarówno na precyzyjne manewry, jak i wysoką ufność dla systemu poruszającego się z wysoką prędkością.• Możliwość transmisji danych – dostępna przepustowość pozwala na wykorzystanie systemu zarówno do pozycjonowania, jak i przekazywania informacji.• Ze względu na charakterystykę transmisji generowane są niskie zakłócenia dla innych kanałów komunikacji, przy jednoczesnej wysokiej odporności na zakłócenia z zewnątrz.• Niskie zapotrzebowanie na moc.• Szybka instalacja i konfiguracja.	<ul style="list-style-type: none">• Brak istniejącej infrastruktury w środowisku miejskim tworzy konieczność implementacji wszystkich składowych systemu.• Wysoki koszt implementacji w stosunku do już rozpowszechnionych systemów pozycjonowania.• Mała liczba dostawców technologii i niska konkurencyjność na rynku.• Obecnie nie w pełni rozwiązany aspekt skalowalności sieci dla dużej liczby punktów referencyjnych i znaczników.• Istnieje zależność dokładności od częstości pozyskiwania danych.
Szanse	Zagrożenia
<ul style="list-style-type: none">• Implementacja modułów UWB przez producentów smartfonów oraz firmy z branży samochodowej zwiększa dostępność technologii oraz jej upowszechnienie.	<ul style="list-style-type: none">• Obecnie brak wielkoskalowych rozwiązań „out of the box”.• Obecny rozwój alternatywnych technologii komunikacji takich jak ZigBee, czy 5G

<ul style="list-style-type: none"> • Możliwość skorzystania z lokalizacji jako efektu ubocznego stosowania technologii UWB do transmisji danych. • Poziom dokładności stanowi konkurencję dla hybrydowych systemów pozycjonowania (opartych o kilka technologii, działających zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz budynków). • Zastosowania militarne. 	<p>umożliwiających także pozycjonowanie może zagrozić pozycji UWB na rynku.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niska konkurencyjność, której efektem są stosunkowo wysokie ceny modułów może powodować zaniechanie technologii na rzecz technologii bardziej przystępnych i tańszych w wdrożeniu. • Część zastosowań komercyjnych nie wymaga aż tak wysokiej dokładności i może być z powodzeniem zastąpiona rozwiązaniami bazującymi na technologiach takich jak WiFi czy Bluetooth.
--	---

2.6. Miary dokładności pozycji obiektu

Zastosowanie technologii wymiarowania bazującej na UWB niesie za sobą konieczność określenia dokładności pozycjonowania jaką rozważany system może osiągnąć. W tym celu zaproponowano kilka miar, które mają to umożliwić. Pierwszym z wykorzystanych jest błąd średniokwadratowy (RMSE – root-mean-square error) wyrażony przykładowym wzorem dla pozycji dwuwymiarowej (1).

$$RMSE_P = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

Inną braną pod uwagę wartością było maksymalne odchylenie wartości odległości dla każdej z serii pomiarowych wyrażone przykładowym wzorem dla pozycji dwuwymiarowej. Ze względu na fakt, iż niemożliwym jest wyznaczenie wspomnianych parametrów dla wszystkich możliwych konfiguracji zmiennych środowiskowych, jako jedną z metryk proponuje się także błąd standardowy (2).

$$SE_P = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Średnia arytmetyczna wykorzystywana w pracy pozwala określić tendencję centralną danej próby a wyrażona jest wzorem Odchylenie standardowe ma zastosowanie w pracy do danych, których akwizycja została dokonana w sposób statyczny.

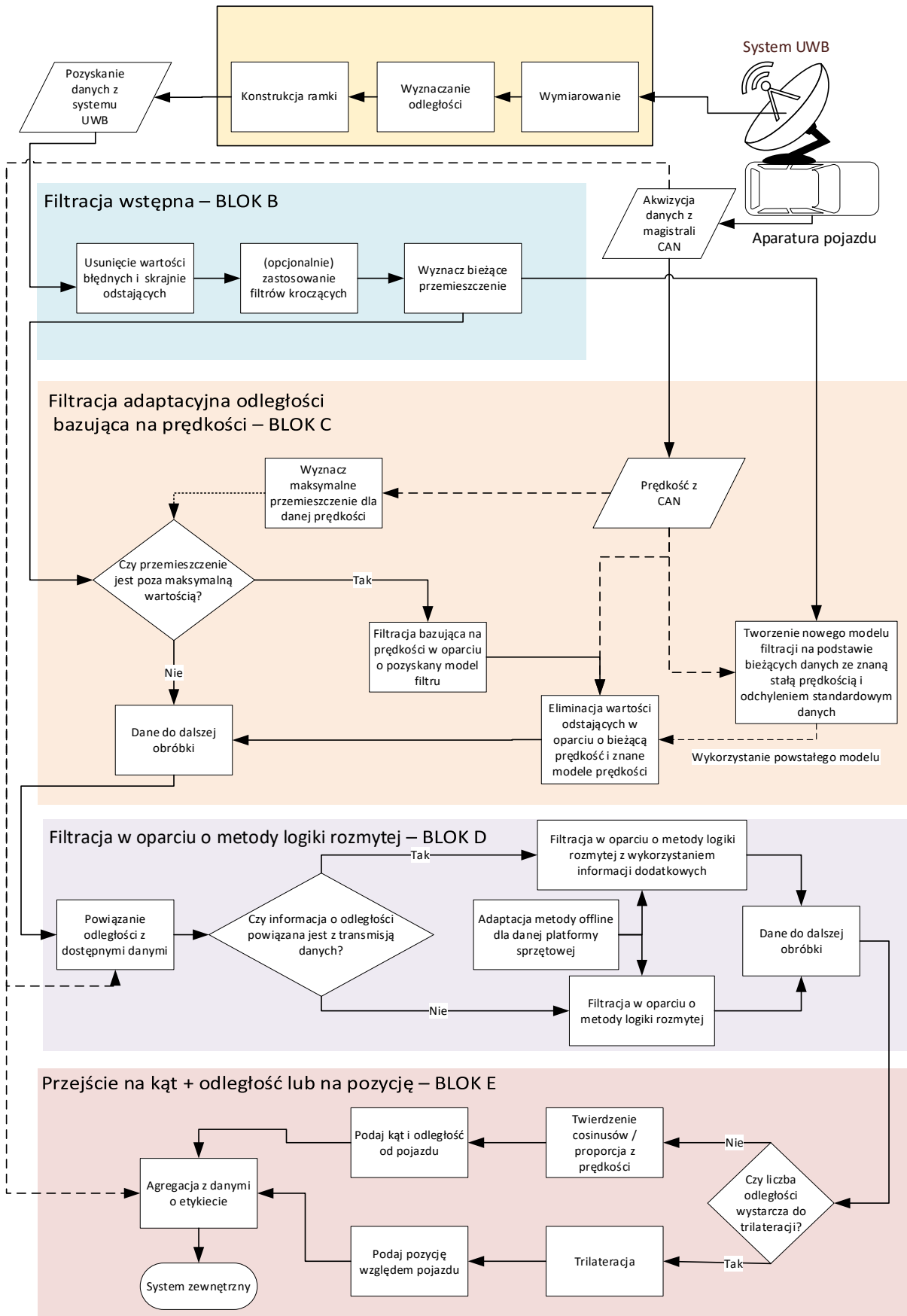
3. System lokalizacji i identyfikacji obiektów

Walidacja oraz rozwój systemów wspomaganie kierowcy, bazujących na ogólnie rozumianej analizie sygnałów wizyjnych, boryka się z takimi problemami jak np. brak zautomatyzowanej identyfikacji obiektów (etykietowania) w otoczeniu pojazdu [30], [31].

Automatyzacja procesu etykietowania przyspieszy zarówno proces wstępnej obróbki danych, jak i rozwój algorytmów np. sztucznej inteligencji, które mają na celu właściwą interpretację sygnałów lub obrazów pochodzących z pozostałych podsystemów analizujących otoczenie pojazdu. Posiadanie referencji pozwoli także na walidację powstających algorytmów – wtedy znacznie łatwiej będzie można tworzyć rzeczywiste przejazdy testowe, na których pojawią się identyfikatory obiektów razem ze względną odległością oraz kątem względem osi wzdłużnej pojazdu. Problem ten jest na tyle poważny, że większość algorytmów jest aktualnie testowana w symulatorach jazdy np. Carla lub Gazebo. Celem nie jest zastąpienie symulatorów, ale zaprojektowanie takiego podejścia (procedury), które umożliwi wykorzystanie technologii UWB do wstępnego etykietowania, co z kolei przełoży się na możliwość walidowania wypracowanych na poziomie symulatora algorytmów wspomagania kierowcy.

Przed proponowanym systemem powstają wymagania związane z dokładnością wyznaczania odległości oraz czasem opóźnienia, który będzie mógł być uwzględniony na etapie projektowania systemu ADAS. Tworzy to konieczność zaaranżowania procedury pozwalającej wykorzystać system UWB do wymagań stawianych systemowi etykietowania, ale także – w perspektywie przyszłego zastosowania systemu – pracy w wariancie online tj. określenia opóźnienia pozyskanej pozycji względem aktualnej prędkości pojazdu dla różnej długości ramki; wpływu tego opóźnienia na dokładność wyznaczonej odległości; sposobu identyfikacji (etykietowania) obiektów. Jeśli wziąć pod uwagę również pozycję, czy też odległość i kąt względem osi pojazdu, pod którym znajduje się obiekt, to pozwoli to na przejście od systemu UWB do danych (np. identyfikatora obiektu i jego położenia względem wybranego punktu na pojeździe), które mogą zostać wykorzystane na rzecz walidacji ADAS przy zachowaniu wymagań i ze świadomością ograniczeń (np. czasowych), które funkcjonują w obszarze technologii samochodowych.

Opracowana w ramach doktoratu (wielowątkowa) procedura do pozycjonowania i etykietowania elementów infrastruktury miejskiej przedstawiony został szczegółowo na rysunku 3. Proces został podzielony na pięć etapów, które umieszczono w blokach od A do E. Blok A wiąże się z akwizycją i obróbką danych po stronie modułów UWB. Blok B związany jest z obróbką danych surowych w postaci usunięcia wartości skrajnie odstających, uzupełnieniu brakujących danych czy opcjonalnej filtracji z wykorzystaniem filtrów z kroczącym oknem. Kolejny blok (C) związany jest z filtracją adaptacyjną bazującą np. na prędkości pojazdu co pozwoli na dostosowanie filtra do bieżących warunków ruchu. W bloku D dokonywana jest korekta odległości w oparciu o metody logiki rozmytej, której istotnym aspektem jest także wcześniejsze przygotowanie odpowiednich reguł. Krok ten bazuje zarówno na odległości jaka jest pozyskiwana z systemu, ale także na dodatkowych informacjach zarówno z UWB (takich jak np. liczba transmitowanych bajtów danych), jak i z innych podsystemów ADAS np. środowisko czy potencjalne występowanie przeszkód. W ostatnim z proponowanych bloków (E) realizowana jest transformacja pozyskanych danych, w którym wejście bloku stanowią informacje o identyfikatorze oraz przetworzonej odległości, natomiast na wyjściu otrzymujemy informację o obiekcie i jego położeniu względem naszego pojazdu.



Rys. 3. Schemat blokowy procedury przetwarzania danych z systemu UWB.

3.1. Etap akwizycji danych z systemu pozycjonującego UWB

System bazujący na technologii UWB umożliwia transmisję danych oraz pomiar czasu – proces ten został zobrazowany na schemacie (rysunek 3) w bloku A. Są to jednak dane, które w swojej surowej postaci nie umożliwiają walidacji. Ponadto na tym etapie należy pamiętać, że inne systemy dokonują również akwizycji danych, które mogą być niezbędne na dalszych etapach filtracji i pracy (jak na przykład danych o prędkości z magistrali CAN).

Proces wymiarowania systemu pozycjonującego UWB oparto na podejściu TOA. W trakcie prowadzonych badań zawsze bazowano na metodzie TWR (opisanej w rozdziale 2.3), jednak w dwóch wariantach – SS-TWR oraz DS-TWR, niezależnie jednak od wariantu efektem jest pozyskanie odległości od punktu referencyjnego. Równocześnie w czasie transmisji dochodzi do przesłania ramki danych (jedna z ramek rozbudowana zostaje o dodatkowe dane), która odpowiada za identyfikację.

Jeżeli w systemie znajduje się jedna kotwica oraz jeden znacznik, to proces ogranicza się do bezpośredniej komunikacji między tymi węzłami. Jeżeli w sieci znajdzie się więcej znaczników proces zawarty w punktach 1 – 4 odbywa się w sposób sekwencyjny dla każdego z nich. Jeżeli natomiast w sieci znajdą się dodatkowe kotwice oraz znaczniki, proces będzie odbywał się asynchronicznie. W zależności od liczby punktów referencyjnych od których otrzymamy informacje o odległości, możliwe jest określenie kąta względem osi pojazdu lub też przeprowadzenie trilateracji, czyli procesu pozwalającego na określenie pozycji na podstawie odległości od punktów o znanych współrzędnych.

3.2. Filtracja wstępna

Pierwszym z etapów przetwarzania danych wskazanym na schemacie (rysunek 3) w bloku B jest wykorzystanie filtrów z krocącym oknem. W ramach zastosowanych metod filtracji z krocącym oknem można wyróżnić: filtracją medianową, filtr średniej ruchomej, filtr Savitzky'ego-Golay'a czy filtr Wienera. Zastosowanie filtrów z krocącym oknem wiąże się jednak wpływem okna filtru na przesunięcie czasowe otrzymywanych danych co należy uwzględnić w dalszych rozważaniach.

3.3. Filtracja adaptacyjna odległości bazująca na prędkości

Jednym z problemów mających wpływ na dokładność pozyskiwania danych z systemów wsparcia kierowcy jest prędkość poruszającego się pojazdu. Mimo że częstość pozyskiwania danych z systemu UWB może być kilkukrotnie wyższa niż klasycznych systemów wizyjnych [29], to jednak jego właściwa adaptacja do prędkości jest bardzo istotnym aspektem. Dlatego też system UWB podlega stałej kalibracji z wykorzystaniem informacji związanych z dynamiką pojazdu. Jest to etap przetwarzania danych na schemacie blokowym (rysunek 3) w bloku C. Na podstawie analizy działania systemu w różnych warunkach zaproponowano bazę reguł przedstawioną w tabeli 1.

Tab. 1. Proponowane współczynniki korekty filtra.

Wartość parametru odchylenia standardowego	Przedział	Okno filtra (k)	Wartość współczynnika korekty odległości (p)
Niska	$\Delta \leq 5$	7	1,0
Poniżej średniej	$5 < \Delta \leq 7$	9	1,1
Średnia	$7 < \Delta \leq 10$	11	1,2
Powyżej średniej	$10 < \Delta \leq 15$	15	1,5
Wysoka	$15 < \Delta \leq 20$	19	1,7
Bardzo wysoka	$20 < \Delta$	21	2,0

Jeżeli system nadrzędny wskazuje na rozpoczęcie ruchu, następuje faza korekcji poszerzonej o filtrację bazującą na dokonanej adaptacji filtra. Należy odczytać dane z magistrali CAN o aktualnej prędkości pojazdu. Na ich podstawie wyznaczone jest maksymalne przesunięcie jakie jest dopuszczalne w systemie. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie przemieszczenia dla danej odległości w systemie UWB oraz sprawdzenie czy przemieszczenie bieżące jest większe niż maksymalne dopuszczalne przemieszczenie. Jeżeli warunek ten jest spełniony, bieżąca odległość d_i jest korygowana w oparciu o filtrację uśredniającą z oknem bazującym na wcześniej zaproponowanej (tabela 1) bazie reguł.

3.4. Korekta odległości z wykorzystaniem logiki rozmytej

Kolejnym etapem pracy nad zwiększeniem dokładności otrzymywanej informacji o odległości między węzłami systemu (przedstawionym na schemacie (rysunek 3) w bloku D) było zastosowanie elementów logiki rozmytej. Zauważono, że zmienność jakości wymiarowania z wykorzystaniem technologii UWB zależy od kilku dynamicznie zmieniających się podczas jazdy czynników, dlatego też zdecydowano się na zastosowanie metod logiki rozmytej która pozwala na dobre odzwierciedlenie tych zmian. W pracy zastosowano dwa modele: model Mamdaniego, który został oparty o analizę statystyczną zestawu pomiarów referencyjnych, dla których utworzono reguły na podstawie otrzymanych błędów oraz model Sugeno, który został utworzony z wykorzystaniem tych samych danych, jednak część wnioskującą zastąpiono adaptacyjnym neuronowo-rozmytym systemem wnioskowania (ANFIS Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Finalnie zaproponowane rozwiązanie bazuje na podejściu Sugeno, jednak funkcje przynależności zostały zmodyfikowane w oparciu o wiedzę uzyskaną z modelu Mamdaniego.

3.4.1. Model Mamdaniego

Punktem startowym do stworzenia tego modelu są przeprowadzone badania i analiza statystyczna otrzymanych rezultatów. W tym celu należy wykonać pomiary w przyjętych punktach referencyjnych P_{ref} których statyczną akwizycję proponuje się przeprowadzić dla scenariuszy przedstawionych w tabeli 2. Każda z serii danych zawierała po 10 000 informacji o odległości, które po uśrednieniu stanowią wartość danej serii.

Tab. 2. Zestawienie scenariuszy testowych na potrzeby opracowania metod logiki rozmytej

Mierzona wielkość	Zakres pomiarów (proponowane P_{ref})
Odległość	0,25m, 0,5m, 0,75m, 1m, 1,5m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 8m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m
Wysokość anten	1m, 1,5m
Środowisko	Wewnątrz budynku, na zewnątrz budynku
Widoczność anten	Anteny na linii wzroku, anteny przysłonięte (występowanie przeszkód uniemożliwiających bezpośrednią propagację)
Transmitowane dane	Brak dodatkowych danych, 10B, 25B, 50B 80B

Finalnym rezultatem przeprowadzonej analizy jest propozycja uwzględnienia parametrów wejściowych i wartości przedstawionych w tabeli 3 [32].

Tab. 3. Propozycje zmiennych lingwistycznych na potrzeby filtracji.

Nazwa funkcji	Środowisko	Przeszkody	Dane	Odległość
Zakres	[0 1]	[0 1]	[0 8]	[0 50]
Liczba funkcji przynależności	2	2	5	8
Sposób tworzenia funkcji przynależności	Binarny – 0 dla środowiska wewnętrznego, 1 dla zewnętrznego.	Binarny – 0 dla braku przeszkód, 1 dla występujących przeszkód	$f(P)$ opisana wzorem $P = \frac{p}{10}$ P – liczba danych	$f(D)$ Opisana wzorem $D = \frac{d}{1000}$ D – odległość w [m]
Typ funkcji przynależności	Singletony	Singletony	Funkcja Gaussowska	2 – 5 – funkcja Gaussowska, 1, 6 – 8 złożenie dwóch funkcji Gaussowskich

Kolejnym krokiem było przygotowanie bazy reguł opartej na przygotowanych zmiennych lingwistycznych. W procesie tworzenia modelu Mamdaniego wykorzystano zgromadzone dane z pomiarów stycznych, które stanowiły bazę wiedzy eksperckiej. Następnie na ich podstawie przyjęto progi R_k rozmieszczone w zakresie korekty (p_k) co 20cm, oraz założono, że korekta będzie realizowana przy spełnieniu warunku, że wartość otrzymana wynosi ± 10 cm wartość progu.

3.4.2. Model Sugeno

Drugi z proponowanych modeli – Sugeno - został skonstruowany w oparciu o dostępny w środowisku Matlab mechanizm „neuro-fuzzy designer”. Za jego pomocą została stworzona oraz przetestowana metoda, pozwalająca uwzględnić dokładnie te same zależności co model

Mamdaniego. Jednak zarówno liczba zmiennych lingwistycznych, jak i funkcja przynależności, zostały zoptymalizowane w procesie uczenia, który realizowany był z wykorzystaniem hybrydowej metody zaimplementowanej w środowisku Matlab. Metoda ta korzysta z propagacji wstecznej (backpropagation) parametrów związanych z wejściowymi funkcjami przynależności i estymacji metodą najmniejszych kwadratów dla parametrów związanych z wyjściowymi funkcjami przynależności. W procesie uczenia algorytm wskazał, że rozwiązaniem pozwalającym na największą korektę, będzie utworzenie pięciu wartości zmiennej lingwistycznej dla odległości, czterech dla liczby transmitowanych danych, dwóch dla środowiska i dwóch dla występowania przeszkód. W przypadku funkcji przynależności w zautomatyzowanym procesie zweryfikowano wszystkie dostępne w środowisku Matlab. Dla trzech dających najlepsze rezultaty na etapie uczenia przeprowadzono weryfikację dla pełnego zestawu danych co zostało omówione w rozdziale 4.4.2 oraz 4.4.1.

3.5. Algorytm trilateracji i określenie relacji kąt - odległość

Ostatnim etapem przygotowania danych na potrzeby ADAS jest konwersja pozyskanych odległości na pozycję względem pojazdu. W aspekcie etykietowania elementów infrastruktury na rzecz technologii ADAS możliwe są dwa podejścia – wskazanie pozycji (2D, 3D) lub wskazanie odległości i kąta od osi pojazdu, w której znajduje się etykietowany obiekt. Proces ten został przedstawiony na schemacie blokowym (rysunek 3) w bloku E. Podstawowym procesem dokonującym konwersji odległości pomiędzy znacznikiem a punktami referencyjnymi jest algorytm trilateracji. Pozwala on na wyznaczenie lokalizacji opartej na odległości od punktów referencyjnych. W przypadku mniejszej (1 lub 2) liczby punktów referencyjnych również możliwe jest określenie odległości i kąta pojazdu względem obiektu przy znanej prędkości luz z zastosowaniem twierdzenia cosinusów.

4. Implementacja i analiza systemu lokalizacji i identyfikacji

W celu weryfikacji proponowanego rozwiązania przygotowano zostały scenariusze testowe odpowiadające poszczególnym fazom zaproponowanego przetwarzania danych. Omawiany proces akwizycji danych został przedstawiony na przykładzie platformy Decawave DWM1000. Projekt ramki danych i weryfikacja prędkości transmisji odbywały się na systemie DWM1001. Badania związane z dodatkowymi parametrami systemu były natomiast prowadzone na najnowszych, w czasie powstawania pracy, układach DWM3000EVB bazujących na radioaparacie DW3010 [33]. Wszystkie te moduły są produktami firmy DecaWave (obecnie Qorvo), natomiast zarządzane są przez zestawy ewaluacyjne Discovery oraz Nucleo oparte na procesorach STM32. Dla pomiarów związanych z odległościami jako referencję wykorzystywano dalmierz laserowy UNI-T LM80.

4.1. Analiza wartości parametru RSSI w różnych ośrodkach

W ramach proponowanego algorytmu system rozmyty pozyskuje informacje o środowisku oraz występowaniu przeszkód z ADAS. Jednak gdyby taka informacja była niedostępna, istnieje możliwość oszacowania tych informacji na podstawie zmian wartości parametru RSSI. Eksperymentalne badania wartości RSSI poddano uśrednieniu, a rezultaty da

odległości 1-20 m dla ośrodków karton, szkło, drewno, beton i stanowiły podstawę do modyfikację współczynnika korekty odległości zaproponowanego w rozdziale 3.3, która może mieć zastosowanie w warunkach, w których system nie jest w stanie na bieżąco aktualizować wartości odchylenia standardowego i istniałoby ryzyko potraktowania prawidłowych odległości jako wartości odstających. Proponowana zmiana bazuje na wartości parametru RSSI z systemu UWB i została przedstawiona w tabeli 4.

Tab. 4. Proponowana modyfikacja współczynnika korekty odległości.

Wartość RSSI	Modyfikacja współczynnika korekty odległości (p)
$RSSI < -60dBm$	$p * 1,0$
$-60dBm \leq RSSI < -70dBm$	$p * 1,1$
$-70dBm \leq RSSI < -80dBm$	$p * 1,2$
$-80dBm \leq RSSI$	$p * 1,5$

4.2. Wykorzystanie filtrów z ruchomym oknem dla obiektu w ruchu

Weryfikacja mechanizmu korekty opisanego w rozdziale 3.2 została przeprowadzona poprzez dokonanie akwizycji danych z wykorzystaniem systemu bazującego na modułach DWM1000, w scenariuszu, który uwzględniał przejazd pojazdem wyposażonym w tempomat, z zadaną prędkością scenariuszy miejskich – od 10 do 50 km/h po linii prostej odzwierciedlającej referencyjną trajektorię pojazdu. W ramach prowadzonej analizy skupiono się na obszarze wewnątrz kwadratu pomiarowego (ścieżka długości 5m. Na podstawie częstotliwości próbkowania systemu i założonej trajektorii przejazdu, dla tak zebranych serii czasowych wyznaczone zostały punkty referencyjne, względem których sprawdzany był błąd odległości poddanych wcześniej trilateracji (wyznaczenia ścieżki przejazdu na podstawie etykietowanych obiektów). Dla serii tych wyznaczono wartość parametru odchylenia standardowego oraz RMSE, który dla danych surowych został zebrany w tabeli 5.

Tab. 5. Wartość odchylenia standardowego względem pozycji referencyjnej przy prędkościach od 10 do 50 km/h

Odchylenie standardowe [cm]	Prędkość [km/h]				
	10	20	30	40	50
	26,3	19,4	18,4	17,0	13,3

Kolejno przystąpiono do filtracji z wykorzystaniem proponowanych metod (filtr medianowy, średnia krocząca, filtr Savitzky'ego-Golay'a), a następnie zweryfikowano je metrykami (błąd średniokwadratowy, wartość maksymalną, błąd standardowy, odchylenie standardowe czy RMSE).

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku stosowania filtrów prostych najlepsze rezultaty otrzymuje się dla filtra średniej kroczącej, gdzie przy

zastosowaniu filtracji z oknem 15 można było zminimalizować błąd średniokwadratowy o niespełna 50% dla wyższych prędkości przejazdu (np. z 13 do 7 cm przy 50km/h). Kolejnym pod względem redukcji wartości był filtr Savitzky'ego-Golay'a, najgorzej natomiast z prezentowanych filtrów sprawdził się filtr medianowy, dla którego poprawa względem odległości referencyjnej wyniosła od 3 do 23 procent w zależności od prędkości poruszania się obiektu. Sumaryczne zestawienie błędu standardowego dla wszystkich trzech zastosowanych sposobów filtracji przy największym oknie (15) przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Zestawienie odchylenia standardowego dla okna 15 wyrażony w cm

Filtr	Prędkość pojazdu [km/h]				
	10	20	30	40	50
Dane surowe	29,2	22,2	20,4	19,3	16,4
Medianowy [15]	27,9	20,4	17,6	16,8	12,7
Średnia krocząca [15]	26,2	17,4	13,4	11,8	9,0
Sgolay [15]	27,6	20,4	17,3	16,7	11,8

4.3. Analiza skuteczności filtracji adaptacyjnej

Na potrzeby analizy skuteczności działania filtracji adaptacyjnej zaproponowanej w rozdziale 3.3, dokonana została akwizycja danych z wykorzystaniem systemu bazującego na modułach DWM1000. Scenariusz badania był bliźniaczo podobny do tego z rozdziału 4.2, jednak w tym przypadku anteny systemu zostały pierwotnie umieszczone w warunkach LOS (bezpośrednio przed przednią szybą pojazdu). W ramach akwizycji zebrano serie przy prędkościach z zakresu 10 – 60 km/h.

Dla tak przeprowadzonego scenariusza przeprowadzono trilaterację, a następnie wyznaczono oczekiwane punkty, w których powinny pojawić się odczyty z systemu UWB. Dalej stosowany jest proponowany algorytm filtracji adaptacyjnej (rysunek 3 blok C). Bazuje on na parametrach odpowiadających – w konkretnej serii – deklarowanej prędkości z magistrali CAN, parametr adaptacji był natomiast dobrany dla całej serii (zważywszy na stałą prędkość przejazdu i warunki w ramach monitorowanego obszaru w każdej serii pomiarowej). Dla takich założeń przeprowadzono ponownie filtrację, a następnie przeprowadzono trilaterację i wyznaczono RMSE, który przedstawiono w tabeli 7.

Tab. 7. Wartości RMSE [cm] dla danych przefiltrowanych adaptacyjnie dla przejazdów zrealizowanych samochodem.

Seria	1	2	3	4	5	6
RMSE dla danych surowych	4,24	4,56	4,61	3,89	3,62	4,16
RMSE po filtracji	3,65	4,14	3,93	3,09	2,41	3,22
Różnica wartości	0,59	0,42	0,67	0,80	1,22	0,95

Dzięki zastosowaniu zaproponowanej filtracji adaptacyjnej zmniejszono odchylenie standardowe o dodatkowe 3,5–7,5cm, co w efekcie np. kompensuje w pewnym stopniu

przesunięcie wynikające z prędkości przemieszczenia. Tym niemniej wykazano, że zaproponowana metoda adaptacji pozwala na zmniejszenie błędu jaki wiąże się z wymiarowaniem obiektu będącego w ruchu, a co za tym idzie zwiększyć precyzję określania pozycji etykietowanych obiektów.

4.4. Analiza skuteczności zaproponowanych modeli logiki rozmytej

W pracy zaproponowano dwa modele logiki rozmytej. Jej zadaniem jest korekta odległości, która jest pozyskiwana z systemu dla różnych scenariuszy takich jak: zmienne otoczenie, odległość, widoczność anten, występowanie transmisji danych. W celu walidacji metody, dla zebranych statycznie danych przeprowadzono weryfikację uzyskanych modeli Mamdaniego oraz Sugeno.

4.4.1. Weryfikacja modelu Mamdaniego

W celu weryfikacji modelu mającego na celu poprawę dokładności wymiarowania, przeprowadzono analizę skuteczności korekty informacji o odległości. Dla środowiska wewnętrznego (test wyłącznie dla odległości, 10000 próbek w serii) wynika, że różnica odległości pozyskanej z systemu UWB do referencji zmniejsza się, bądź utrzymuje się na stałym poziomie. Największą redukcję można zaobserwować dla niskich wartości odległości (poniżej 1m), dla których pierwotnie błąd względny był największy – jego wartość dochodziła do 15 cm, co stanowiło ponad 50% mierzonej odległości, jednak korekta pozwoliła na redukcję tej wartości do 4-6cm (co stanowiło 93 – 53% wartości początkowej). W środkowym zakresie, w którym korekta nie była wymagana ze względu na niewielką rozbieżność wartości, zgodnie z zaimplementowanymi regułami nie wprowadzono zmian, tak więc błąd bezwzględny utrzymał się na stałym poziomie. W przypadku odległości większych (powyżej 20 metrów) ponownie można zaobserwować zauważalną minimalizację błędu w zakresie 3 – 7 cm. Średni błąd po przeprowadzeniu korekty wynosi 4,7 cm i jest o 2,1 cm mniejszy niż analogiczny średni błąd dla wartości surowych.

W przypadku korekty przy transmisji danych i występowania przeszkód należy uwzględnić większe możliwe błędy. Dlatego też przyjęto wyższy współczynnik korekty $CORR_{param} = 200$ aby w lepszy sposób móc odpowiedzieć na zakres błędu. Dla środowiska wewnętrznego otrzymano poprawę wskazań dystansu z systemu UWB o średnio 25cm. Dzięki zastosowanej korekcie zredukowano różnicę w odległościach do wartości poniżej 20 cm dla badań bez przeszkód oraz do wartości poniżej 10 cm dla scenariuszy z występującymi przeszkodami. Średnio poprawa bez przeszkód wyniosła 19,1 cm, natomiast w przypadku występowania przeszkód różnica między błędem odległości dla danych surowych a tych po zastosowaniu korekty za pomocą metody logiki rozmytej wyniosła 31,3cm. Analogiczną weryfikację przeprowadzono dla środowiska zewnętrznego, we wszystkich zweryfikowanych przypadkach udało się uzyskać poprawę. Średni błąd odległości dla wariantów bez przeszkód wynosił dla danych surowych 57,1 cm, natomiast po korekcie wyniósł 11 cm, co stanowi różnicę 45 cm. Dla scenariuszy z występującymi przeszkodami było to pierwotnie 36,7 cm, a wartość tą zredukowano do 15,6 cm.

4.4.2. Weryfikacja modelu Sugeno

Dla modelu Sugeno wykorzystano mechanizm neuro-fuzzy designera oraz wiedzę z pierwszego podejścia (modelu Mamdaniego). W trakcie tworzenia modelu przyjęto, że liczba zmiennych tworzonego modelu będzie odpowiadała wcześniej wytypowanym parametrom (odległość, liczba danych, środowisko, występowanie przeszkód), natomiast liczba funkcji przynależności, jak i ich rodzaj dla każdego z parametrów została zweryfikowana empirycznie. W rezultacie podczas uczenia zauważono, że w przypadku danych związanych z środowiskiem i odległością, najlepszy stosunek liczby funkcji przynależności dla poszczególnych funkcji wejściowych to 5 dla odległości oraz 2 dla środowiska. Takie też założenia przyjęto do dalszej analizy. W pierwszej kolejności funkcje generowane były automatycznie w sposób liniowy dla wszystkich typów funkcji przynależności. Trzy najlepsze to gbellmf – uogólniona funkcja dzwonowa, gaussmf – funkcja gausowska oraz dsigmf, która oblicza rozmyte wartości przynależności przy użyciu różnicy między dwiema sigmoidalnymi funkcjami przynależności.

Z otrzymanych rezultatów wynika, że średni błąd we wskazanych miejscach referencyjnych dla zaproponowanych metod wynosi 2,9 cm i jest o niespełna 2 cm mniejszy niż błąd dla modelu Mamdaniego oraz o 4,4 cm mniejszy niż w przypadku wartości surowych. Największa poprawa zauważalna jest dla odległości poniżej 1 m – błąd względny w przypadku wykorzystania funkcji przynależności Gaussa wyniósł dla wybranych wartości poniżej 1%. Taką samą analizę porównawczą wykonano dla danych ze środowiska zewnętrznego, których wyniki przedstawiono w tabeli 8.

Tab. 8. Rezultaty dla korekty bazującej na modelu Sugeno w środowisku zewnętrznym.

Funkcja przynależności	Środowisko		Zewnętrzne			
	gbellmf		gaussmf		dsigmf	
Odległość referencyjna [cm]	Odległość po filtracji [cm]	Błąd [cm]	Odległość po filtracji [cm]	Błąd [cm]	Odległość po filtracji [cm]	Błąd [cm]
25	24,7	0,3	25,1	0,1	24,2	0,8
50	50,8	0,8	50,8	0,8	50,5	0,5
75	74,1	0,9	73,9	1,1	74,1	0,9
100	102,0	2,0	101,7	1,7	102,3	2,3
150	148,0	2,0	147,8	2,2	148,6	1,4
200	200,0	0	200,1	0,1	200,6	0,6
300	300,0	0	300,7	0,7	299,6	0,4
400	401,2	1,2	401,0	1,0	400,3	0,3
500	499,0	1,0	498,8	1,2	499,2	0,8
600	599,9	0,1	600,1	0,1	601,0	1,0
800	800,3	0,3	800,3	0,3	799,7	0,3
1000	999,8	0,2	999,9	0,1	1000,0	0
1500	1499,4	0,6	1500,0	0	1500,0	0
2000	1999,2	0,8	1999,5	0,5	2002,1	2,1
2500	2498,6	1,4	2510,1	10,1	2500,5	0,5
3000	2999,6	0,4	3000,3	0,3	3000,0	0

Średnia różnica względem odległości referencyjnej dla trzech wskazanych funkcji przynależności w środowisku zewnętrznym wynosi 0,9 cm, co w kontekście 9,4 cm dla wartości surowych jest znaczącą poprawą. Otrzymany rezultat co do wartości jest już niższy niż dokładność urządzenia pomiarowego stanowiącego referencję do badań i pierwotnie oczekiwanych rezultatów. Największy błąd – na poziomie 10 cm – odnotowano dla funkcji przynależności Gaussa dla odległości 25 m. Dwie pozostałe funkcje największą różnicę odnotowały w zakresie 2 – 2,3 cm dla odległości 1 m. Wynika stąd, że nawet w przypadku największej niedokładności systemu UWB, po zastosowaniu proponowanej metody filtracji, powstała rozbieżność nie stanowi przeszkody do wykorzystania go do wymiarowania obiektów znajdujących się w środowisku miejskim. Ponadto rezultaty obróbki dla danych statycznych wskazują na dokładność wyższą niż deklarowana dokładność systemów walidowanych, co pozwala uznać za stosowne wykorzystanie systemu UWB do walidacji algorytmów w podsystemach ADAS.

4.4.1. Weryfikacja zmodyfikowanego modelu Sugeno

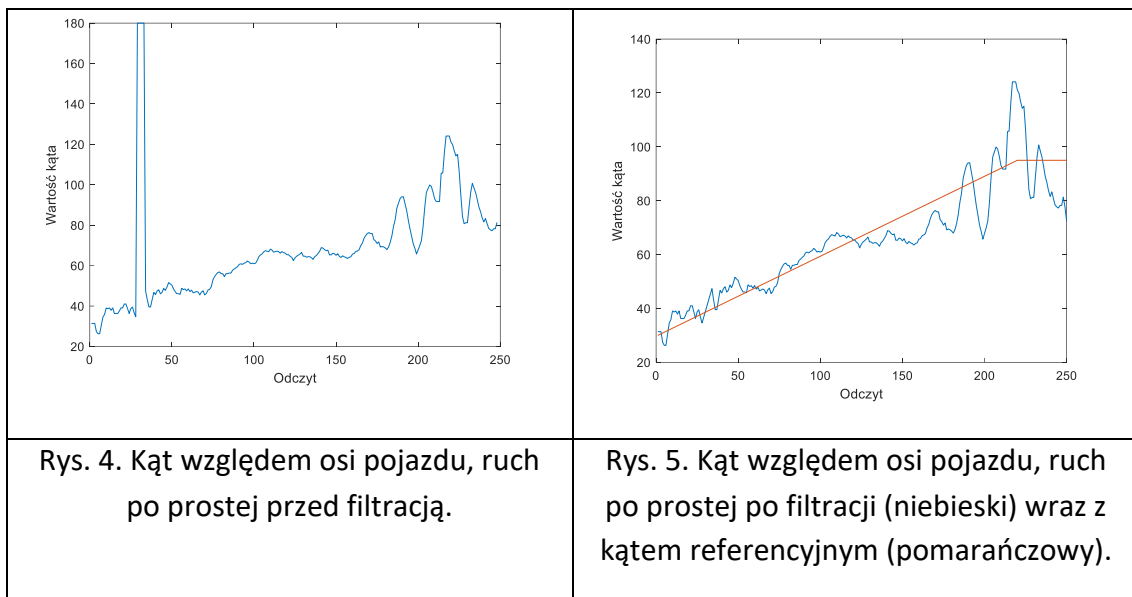
Dla modelu Sugeno, którego propozycję zweryfikowano w poprzednim rozdziale, dokonano korekty na podstawie danych eksperckich (związanych z wartościami zmierzonymi dla odległości referencyjnych, które zebrano na początku badań) oraz znajomości ich charakterystyki. W rezultacie otrzymano wartości, z których wynika, że w stosunku do funkcji wygenerowanych automatycznie zanotowano nieznaczną poprawę (w zależności od funkcji było to od 0,2 cm do niespełna 2 cm). Analogicznie jak w poprzednim przypadku, największy błąd (w zakresie do 15-17 cm) można zauważyć dla odległości 15 metrów. Kolejnym krokiem była weryfikacja zmodyfikowanej wersji Sugeno dla wariantów ze zmienną liczbą transmitowanych danych oraz z możliwością występowania przeszkód.

Na bazie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że dla wszystkich przeprowadzonych scenariuszy testowych uzyskano poprawę po zastosowaniu filtracji opartej na zaproponowanych systemach logiki rozmytej, szczególnie dla zmodyfikowanego podejścia Sugeno. Najlepsze rezultaty osiągnięto dla pomiarów wewnątrz budynku. W tych warunkach największy zanotowany średni błąd dla serii po korekcie wyniósł 10,8 cm, natomiast dla wszystkich serii było to 1,6 cm z przeszkodami i poniżej 1 cm dla pomiarów w warunkach LOS. W przypadku środowiska zewnętrznego otrzymane rezultaty również wykazały zmniejszenie błędów w stosunku do wcześniej proponowanego modelu na bazie Mamdaniego. Dla pomiarów bez przeszkód jest to zmniejszenie błędów z 12 cm na niecałe 11 cm, natomiast w przypadku występowania przeszkód, średnia dla wszystkich serii wyniosła 10,3 cm, co stanowi poprawę o ponad 9 cm w stosunku do poprzedniego rozwiązania bazującego na modelu Mamdaniego.

4.5. Analiza wyznaczania kąta

Po przeprowadzonej filtracji w celu określenia pozycji identyfikowanego obiektu względem pojazdu, należy skorzystać z jednej z dwóch możliwości. W przypadku kiedy obiekt wymiarowany jest przez pojazd z wykorzystaniem jednego lub dwóch modułów UWB, możliwy do wyznaczenia jest kąt względem osi pojazdu wraz z odległością. Jeżeli liczba punktów

referencyjnych jest większa, możliwe jest wówczas przeprowadzenie trilateracji. W celu oceny możliwości wyznaczenia orientacji za pomocą systemu UWB, przygotowane zostały dwa scenariusze. W pierwszym z nich pojazd wyposażony w moduł UWB poruszał się po prostej ścieżce, a przy jej końcu umieszczony zostały znaczniki UWB. W drugim przypadku scenariusz zakładał ruch po kształcie zbliżonym do łuku, którego osią był monitorowany znacznik. Rezultatem przeprowadzenia obróbki danych było otrzymanie wykresów prezentujących zmianę wartości kąta między osią wzdłużną pojazdu a znacznikiem. Dla przejazdu po prostej przed usunięciem wartości odstających zaprezentowano ją na rysunku 4 a po usunięciu wartości odstających na rysunku 5.



Na rysunku można zauważyć, że wraz z zbliżaniem się do etykietowanego obiektu wartość kąta rośnie, a kiedy pojazd znalazł się w jego bezpośrednim sąsiedztwie następuje przekroczenie wartości 90 stopni. Ze względu na niskie odległości i prędkość wahania, wartości kąta oscylują w granicach kilkunastu stopni odczyt do odczytu, jednak przy założeniach wynikających ze skali eksperymentu oraz wartości odchylenia standardowego danych pochodzących z systemu UWB, uznano tę wartość za akceptowalną, a trajektorię za jasno wskazującą tendencję ruchu. Drugim z omawianych przykładów był ruch po ścieżce przypominającej swoim kształtem okrąg. Dla drugiego z omawianych scenariuszy, rezultat działania proponowanej metody wykazuje eliminację wszystkich wartości skrajnie odstających oraz część z wartości tworzących charakterystyczne skoki. Mimo że metoda pozwala na przybliżone określenie kąta, to odchylenia od wartości oczekiwanej wskazują na preferencyjne wykorzystanie tej metody, kiedy odległości pomiędzy pojazdem a obiektem, względem którego wyznaczany jest kąt, są znacząco większe niż odchylenie standardowe odczytów z systemu UWB. Błąd taki można zaobserwować pod koniec pierwszego z przejazdów, kiedy to odległości między antenami były niewielkie (poniżej 1m) co powodowało zauważalne zmiany wyznaczonej wartości kąta. Należy jednak zwrócić uwagę, że proponowana metoda będzie dawała lepsze wyniki wraz ze wzrostem odległości między wymiarowanymi obiektami.

4.6. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań dokonano analizy kroków zaproponowanych w ramach schematu postępowania z danymi przedstawionego na rysunku 3 w blokach B, C oraz D. W pierwszym z bloków wprowadzona została filtracja wartości odstających, pozwalająca na eliminację błędów wynikających z chwilowych nieprawidłowości w działaniu systemu, prowadzących do zaburzeń w obliczeniu czasu przelotu sygnału (np. przystąpienia anten, odbicia sygnału). Wyeliminowanie – szczególnie dużych błędów – pozwala na wyznaczenie prędkości z systemu UWB z wyższą precyzją, a co za tym idzie na możliwość większej precyzji przy określaniu kąta, jaki znajduje się między osią pojazdu a etykietowanym obiektem. Należy jednak uwzględnić ograniczenia tej metody, jak np. wprowadzane opóźnienie.

Blok C związany z filtracją adaptacyjną wykazał, że uzależnienie filtracji od dodatkowego parametru pozwala na zdefiniowanie wartości, które należy poddać filtracji. Rozwiązanie to wpływa na poprawę dokładności wymiarowania, ale także na zapotrzebowanie na moc obliczeniową poprzez redukcję konieczności filtracji wszystkich przychodzących danych oraz redukcję opóźnienia wynikającego z stosowania w sposób ciągły długiego okna filtru. Stosowanie tej metody jest jednak uzależnione od danych pochodzących z innych systemów a pozwalających na przeprowadzenie adaptacji takich jak chociażby prędkość z magistrali CAN.

Ostatnim etapem przetwarzania odległości przedstawionym w bloku D było zastosowanie metod logiki rozmytej. Zaproponowane dwa podejścia pozwoliły na stworzenie reguł korygujących wskazania systemu UWB szczególnie w obszarach, gdzie dokładność systemu pozycjonującego UWB była niższa (do 1 m). Poprawa dokładności wymiarowania do wartości kilku cm pozytywnie wpływa na dalsze etapy obróbki danych, takie jak określenie kąta i odległości czy też trilateracja. Należy jednak pamiętać, że metoda ta została oparta o konkretne parametry wyznaczone w procesie kalibracji pod konkretne rozwiązanie sprzętowe i w przypadku chęci zastosowania jej na innej platformie, np. na docelowym pojeździe testowym służącym do rozwoju algorytmów ADAS, będzie ona wymagała dostosowania w oparciu o charakterystykę działania konkretnego systemu.

5. Struktura danych do identyfikacji obiektów

Siłą systemu pozycjonującego UWB jest możliwość równoczesnej identyfikacji i wyznaczania odległości. Umożliwiła ona wykorzystanie UWB jako systemu walidującego lub wspierającego automatyczną identyfikację obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu. Ponadto system pozwala na przesyłanie dodatkowych parametrów między punktami referencyjnymi. Daje to możliwość realizacji dwóch podejść. Pierwszym jest implementacja jedynie niezbędnych informacji służących do identyfikacji obiektów w procesie analizy offline np. z wykorzystaniem EUI-64. Drugie z podejść zakłada konieczność przetwarzania danych

w trybie online. W tym przypadku dodatkowe opóźnienie wynikające z odpytania zewnętrznej bazy danych może w sposób znaczący wydłużyć proces identyfikacji, dlatego też zdecydowano się wykorzystać dwie większe ramki – 32B i 80B, w ramach których przesyłane są dodatkowe informacje o obiekcie i infrastrukturze. Aby to zrobić przeprowadzono analizę elementów infrastruktury drogowej oraz struktury ramki UWB, określono w ten sposób jakie informacje i w jakiej ilości mogą być transmitowane.

5.1. Wpływ długości identyfikatora obiektu na pozycjonowanie

Działanie technologii UWB zostało zawarte w standardzie IEEE 802.15.4, opisującym sieci wykorzystywane w niedrogich urządzeniach niskiej mocy tworzących tzw. WPAN (Wireless Personal Area Network) czyli bezprzewodowe sieci o zasięgu osobistym. W ramach pracy dokonano analizy komunikacji oraz wskazano miejsca możliwej transmisji danych w procesie wymiarowania wraz z istniejącymi obecnie ograniczeniami. Na potrzeby transmisji danych pozostaje różnica będąca wynikiem odejmowania od maksymalnej wielkości PSDU wielkości nagłówka (MHR + MFR) oraz wielkości komunikatu wymiarującego. Dla ramek używanego systemu wartości te zostały przedstawione w tabeli 9.

Tab. 9. Liczba dostępnych bajtów na rzecz dodatkowej transmisji przez użytkownika.

Wiadomość	Wielkość nagłówka (MHR + MFR) [B]	Wielkość wiadomości wymiarującej [B]	Maksymalna wielkość PSDU [B]	Opcjonalne dane użytkownika [B]
Poll	11	1	127	115
Response		4		112
Final		16		100
Report		6		110

Na podstawie powyższej analizy można stwierdzić, że ramka UWB pozwala na transmisję danych, której liczba uzależniona jest od rodzaju przyjętych parametrów oraz procesu wymiarowania. W przypadku wymiarowania liczba danych, którą można transmitować jest uzależniona od typu ramki. Najwięcej danych można transmitować w ramce Poll, jest to też pierwsza transmitowana ramka, w związku z czym proponuje się, aby właśnie tą ramkę wykorzystać do transmisji dodatkowych danych. Główna teza pracy zakłada możliwość poprawnej identyfikacji i w tym właśnie celu proponuje się wykorzystać zajmujący 8 bajtów identyfikator zgodny z standardem EUI-64 [34] pozwalający na zaadresowanie do 2^{64} urządzeń (co daje ponad 18 trylionów urządzeń)..

5.2. Elementy infrastruktury drogowej

Ze względu na świadomość odmiennej specyfiki światowej infrastruktury drogowej, system – zarówno w swojej podstawowej formie dla ramki jedynie identyfikującej, jak i dla ramek rozszerzonych – starano się zaprojektować tak, aby był jak najbardziej uniwersalny, jednak w specyficznych przypadkach koncentruje się on wokół rozwiązań prawnych obejmujących teren Rzeczypospolitej, wykorzystano też powszechnie używane oznaczenia oraz ich polskie tłumaczenia z OpenStreetMap (OSM). Istnieje mnogość kategorii, które

występują w tworzonych mapach. Z perspektywy systemu etykietowania ważne pozostają elementy występujące na drodze lub w jej bezpośrednim otoczeniu. Informacje te mimo że są liczne mają jedynie wpływ na ramkę którą proponuje się wykorzystywać w systemie pracującym w trybie online.

5.3. Etykietowanie obiektów infrastruktury - ramka danych

Na podstawie informacji o dostępnej przestrzeni na dane w ramce UWB oraz zgromadzonych informacjach o elementach infrastruktury drogowej, zaproponowano trzy warianty ramek dla systemu UWB oraz ich strukturę umożliwiającą transmisję etykiet obiektów znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu pojazdu i/lub dodatkowych danych [35]. Przyjęto, że dla systemu działającego offline (etykietowanie na rzecz walidacji ADAS będące głównym przedmiotem pracy) najlepszym rozwiązaniem jest ramka poszerzona jedynie o unikalny identyfikator. Informacja o odległości, jest traktowana priorytetowo i występuje w każdym typie transmisji. Na tym etapie dokonano również założeń związanych z tym jakie informacje niezbędne są na rzecz etykietowania i bezpieczeństwa (podstawowa ramka do trybu online), a jakie można traktować z niższym priorytetem (ramka rozszerzona). W związku z powyższym proponuje się transmisję ramek jak na rysunku 6.

Ramki danych z danymi wymiarującymi				
Poll	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Dane opcjonalne [115B]	
Response	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [4B]	Dane opcjonalne [112B]	
Final	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [16B]	Dane opcjonalne [100B]	
Report	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [6B]	Dane opcjonalne [110B]	
Proponowane ramki na rzecz etykietowania				
Minimalna	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Etykieta 8B	Dane opcjonalne [107B]
Podstawowa	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Etykieta 32B	Dane opcjonalne [83B]
Rozszerzona	Nagłówek [11B]	Wymiarowanie [1B]	Etykieta 80B	Dane opcjonalne [35B]

Rys. 6. Proponowane ramki z dodatkowymi danymi oznaczonymi kolorem zielonym.

5.4. Analiza czasów transmisji danych

Długość ramki wpływa zarówno na czas wymagany do umieszczenia jej w buforze nadawczym jak i do jej przesłania. W związku z czym dokonano analizy czasu transmisji danych dla ramek bazowych oraz dla ramki Poll poszerzonej o dodatkowe dane, zgodnie z propozycją w podrozdziale 5.3. Do badań wykorzystane zostały moduły DWM1001, a poszczególne serie realizowane były przy zachowaniu odległości 1 metra między modułami. Jako całkowity czas transmisji ramki przyjęto czas, przez jaki ramka jest umieszczana w buforze nadawczym oraz czas wymagany do pomyślnego wysłania pełnej ramki.

W trakcie pomiarów dla ramek domyślnych (Poll, Response, Report i Final) dokonano transmisji jedynie minimalnej ilości danych wymaganych do wymiarowania, co stanowi wartość referencyjną wpływu transmisji dodatkowych danych. W ramach prowadzonego badania pominięto przetwarzanie danych, które nie jest bezpośrednio zależne od modułu UWB (np. obliczanie odległości, komunikacja przez różne interfejsy). Efektem są czasy przedstawione w tabeli 10.

Tab. 10. Czas potrzebny na przeprowadzenie transmisji pomiędzy węzłami w sieci UWB.

Wielkość ramki [B]	$t_{fdt_{min}}$ [ms]	$t_{fdt_{avg}}$ [ms]	$t_{fdt_{max}}$ [ms]	Opis
12	3,025	3,027	3,030	Ramka Poll
15	3,027	3,029	3,032	Ramka Response
27	4,035	4,037	4,040	Ramka Final
17	3,029	3,031	3,033	Ramka Report

Następnie wyznaczono czas, jaki jest potrzebny na transmisję ramki zawierającej dodatkowe dane odpowiadające proponowanym w rozprawie ramkom danych. Wyznaczone czasy wskazują, że dla ramki Poll powiększonej o 8B czas transmisji wynosi nieco ponad 3.8ms. Dla Poll powiększonej o 32 B jest to nieco ponad 6 ms. Wartość ta zwiększa się do 9,086 ms w przypadku transmisji drugiej z proponowanych ramek do celów identyfikacji online. Dla długiej ramki czas ten wynosi 12,112 ms i jest dwukrotnie dłuższy niż w przypadku najkrótszej z ramek w wersji online.

5.5. Wpływ rodzaju transmisji, prędkości i liczby węzłów na opóźnienie

Na podstawie wcześniejszych wyników zdecydowano się na przeprowadzenie symulacji wpływu rozmiaru pakietu danych na odległość, jaką pokona uczestnik ruchu drogowego przy zadanej prędkości. W tym celu uwzględniono czasy wymiarowania dla pełnej komunikacji (Poll, Response, Final i Report) przy ramce podstawowej oraz dla zaproponowanych wariantów identyfikacyjno-informacyjnych. Na ich podstawie zostały wyznaczone odległości jakie pokona obiekt poruszający się z zadaną prędkością. W celu przedstawienia referencyjnych wartości odległości pokonanej przy zadanych parametrach transmisji zebrano także informacje o prędkościach poruszania się poszczególnych uczestników ruchu drogowego. Na podstawie prędkości oraz czasu trwania transmisji wyznaczono, przemieszczenie obiektu. Wynika z niego, że w przypadku transmisji wyłącznie identyfikatora na potrzeby walidacji algorytmów w trybie offline (ramka 8B), przesunięcie wynikające z dodatkowych danych nieznacznie tylko wpływa na otrzymywaną informację. Podobnie ma się sytuacja w przypadku transmisji ramki danych dla systemu pracującego w trybie online przy małych prędkości odpowiadających np. truchtowi, ruchowi pojazdu na parkingu czy wolnej jeździe na rowerze. Przemieszczenie wynikające z założonej prędkości wynosi wówczas poniżej 10 cm. Sugeruje to preferencyjne korzystanie z transmisji dodatkowych danych w tej fazie ruchu. Inaczej należy patrzeć na transmisję danych kiedy pojazd porusza się z prędkością 90 czy 120 km/h. W tym przypadku różnica pomiędzy odległością jaką pokona pojazd podczas transmisji wyłącznie informacji o pozycji, a informacji o pozycji wzbogaconej o dodatkowe dane wzrasta do ponad 30 cm.

Na podstawie przedstawionej analizy można wskazać, że za pomocą systemu UWB, możliwe jest przesyłanie identyfikatora obiektu, jednak należy mieć na względzie okoliczności w jakich ten proces ma miejsce. Podsumowując proponuje się następujące zastosowanie wymiarowania wraz z etykietowaniem (tabela 11) dla 3 alternatywnych struktur ramki danych. Równocześnie można stwierdzić, że nawet w najdłuższym z proponowanych

scenariuszy łączny czas wymiany wszystkich pakietów danych trwa 22 ms, co przy założeniu dwukrotnego narzutu na ten czas związanego z obróbką danych i przesłaniem do systemu nadrzędnego daje czas poniżej 50 ms. Jest to czas kluczowy z punktu widzenia systemów czasu rzeczywistego, przyjętych praktyk inżynierskich i obecnie dostępnych na rynku systemów, co może prowadzić np. do rozwoju inteligentnych miast przyszłości [36].

Tab. 11. Proponowane zasady stosowania równoczesnego wymiarowania wraz z transmisją danych

Wariant	Proponowane scenariusze
Transmisja wyłączenie danych wymiarujących	Zaleca się wykorzystywać jedynie w przypadkach, kiedy częstość pozyskiwania danych ma kluczowe znaczenie lub zmienność otoczenia nie następuje (np. ruch z bardzo wysoką prędkością lub manewr parkowania, gdzie znane jest otoczenie, a niezbędne jest częste wymiarowanie).
Transmisja danych wymiarujących i etykiety [8B]	Zaleca się wykorzystywać podczas prac rozwojowych nad systemami ADAS (w trybie offline kiedy dane o obiektach można powiązać a posteriori, lub jeżeli pojazd porusza się po stałej trasie i posiada łączność z siecią, gdzie informacje powiązane z identyfikatorami obiektów są na stałe przechowywane i na bieżąco aktualizowane z zewnętrznej bazy danych z wykorzystaniem szerokopasmowego łącza (np. 5G).
Transmisja danych wymiarujących i małej ramki [32B]	Zaleca się wykorzystywać podczas standardowego ruchu pojazdu w trybie online, gdzie nie mamy możliwości pobrania danych w akceptowalnym czasie z zewnętrznej bazy danych, a chcemy korzystać z możliwości identyfikacji obiektów i potencjalnego zagrożenia. Możliwość wykorzystania zarówno w ruchu miejskim, jak i przy większych prędkościach.
Transmisja danych wymiarujących i dużej ramki [80B]	Zaleca się wykorzystywać podczas ruchu o niższej prędkości, kiedy czas transmisji nie wprowadza opóźnień przekładającego się na konieczność korekty odległości. Przykładem zastosowania może być np. postój samochodu na światłach, przejściu dla pieszych czy podczas jazdy w korku.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

Rozwój systemów samochodowych wymusza stałe poszukiwanie narzędzi i technologii umożliwiających szybkie i stabilne wdrażanie nowych, dokładniejszych systemów, w tym systemów wykorzystujących informacje o rozmieszczeniu infrastruktury i lokalizacji innych uczestników ruchu drogowego. Przykładem systemu, który posiada potencjał wdrożeniowy jest system oparty na technologii UWB, jednak jego implementacja wymaga odpowiedzi na wiele pytań związanych z jego dokładnością pozycjonowania, możliwościami transmisji danych oraz wpływem tychże na opóźnienia wynikające z zastosowanych algorytmów. Zaproponowanie adekwatnych rozwiązań i algorytmów w postaci filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS stało się przedmiotem badań związanych z niniejszą dysertacją doktorską.

W zaproponowanym podejściu opracowano etap wstępnego przetwarzania danych, gdzie zastosowano szybkie w działaniu algorytmy filtracji z kroczącym oknem, co jest szczególnie istotne dla implementacji przemysłowej i samochodowej, gdzie redukcja kosztu (w sensie finansowym i energetycznym) będzie priorytetem. W jej przypadku przedstawione zostały zalety oraz zagrożenia związane z czasem odpowiedzi filtracji przy określonym oknie. Ponadto zaproponowano połączenie tych metod wraz z filtracją umożliwiającą adaptację do bieżących warunków oraz informacji z systemów nadrzędnych, takich jak na przykład prędkość. Dalej opracowano metodę korekty odległości na podstawie dwóch modeli logiki rozmytej – Mamdaniego oraz Takagi-Sugeno. Zastosowanie wielostopniowej filtracji pozwoliło na poprawę dokładności otrzymywanej informacji o pozycji. W zależności od warunków system pozwala na wyznaczenie odległości pomiędzy węzłami z dokładnością do 6 cm. Możliwość precyzyjnego określenia informacji o odległości obiektu przekłada się bezpośrednio – np. w procesie trilateracji – na dokładność uzyskiwanej pozycji lub też kąta i odległości od etykietowanego obiektu. W pracy zaproponowano także sposób etykietowania, która po szczegółowej analizie standardu oraz wymagań związanych z otoczeniem pojazdu i drogą, pozwoli na identyfikację zarówno uczestników ruchu drogowego, jak i infrastruktury tak w trybie offline na potrzeby walidacji ADAS jak i online (przyszłościowe zastosowanie technologii UWB w smartcities).

Wykazana możliwość identyfikacji i lokalizacji, przy jednoczesnym wykorzystaniu filtracji adaptacyjnej wraz z logiką rozmytą, pozwala na zastosowanie systemu UWB na rzecz walidacji systemów ADAS. Dokładność zaproponowanego rozwiązania w odniesieniu do dokładności innych systemów omawianych w literaturze (rozdział 1) jest lepsza lub też porównywalna, przy jednoczesnej korzyści wynikającej z możliwości identyfikacji czy pracy w warunkach nieosiągalnych dla innych systemów (np. NLOS). Na innowacyjny charakter prowadzonych badań najlepiej wskazuje dotychczasowy brak pozycji literaturowych, które poruszałyby tematykę systemów pozycjonowania wykorzystujących technologię UWB, szczególnie w kontekście zastosowań na zewnątrz budynków, w obszarze technologii samochodowych.

W związku z powyższym za oryginalne elementy pracy Autor uważa:

- stworzenie uniwersalnej procedury do równoczesnej identyfikacji i pozycjonowania obiektów na potrzeby ich etykietowania,
- opracowanie adaptacyjnego sposobu filtracji danych opartego na aktualnej prędkości pojazdu,
- wykorzystanie logiki rozmytej do filtracji odległości pozyskiwanych z systemu wymiarowania opartego na technologii UWB,
- stworzenie ramki danych mającej na celu efektywną identyfikację obiektów infrastruktury drogowej,
- analiza wpływu różnych wariantów ramki danych i prędkości pojazdu na dokładność wymiarowania obiektów,
- określenie wpływu różnej liczby urządzeń UWB na pojeździe na dokładność pozycjonowania obiektu,

- wskazanie sposobu określania pozycji etykietowanego obiektu w zależności od liczby dostępnych urządzeń UWB,
- opracowanie zasad stosowalności równoczesnej lokalizacji i identyfikacji na potrzeby etykietowania, tj. walidacji nowych algorytmów stosowanych w podsystemach ADAS.

W związku z powyższym, można stwierdzić, że cel pracy **„Wykorzystanie filtracji adaptacyjnej i logiki rozmytej oraz technologii UWB do identyfikacji i lokalizacji obiektów na potrzeby walidacji algorytmów w podsystemach ADAS”** został zrealizowany, a tezy pracy

- Zastosowanie technologii UWB w postaci lokalnego układu odniesienia, który umiejscowiony jest na obiekcie głównym, umożliwia poprawną identyfikację i lokalizację obiektów trzecich znajdujących się w otoczeniu obiektu głównego w akceptowalnym czasie i z zachowaniem ograniczonej prędkości.
- Wprowadzenie filtracji adaptacyjnej wraz z logiką rozmytą pozwala polepszyć dokładności lokalizacji oznaczonych obiektów znajdujących się w otoczeniu pojazdu.
- Opracowanie odpowiedniej struktury danych opisujących obiekty zewnętrzne ułatwia prawidłową identyfikację przy zachowaniu akceptowalnego czasu wyznaczania pozycji obiektu zewnętrznego.

Zostały udowodnione.

Przedstawione rozwiązanie może znaleźć zastosowanie w szybko rozwijającej się gałęzi technologii samochodowych, pozwalając tym samym na minimalizację kosztów związanych z opracowaniem i prototypowaniem nowych systemów. Szczególnym obszarem, w którym technologia UWB mogłaby znaleźć zastosowanie, są systemy związane z przygotowaniem map zajętości przestrzeni wokół pojazdu, ale także z bezpieczeństwem, w tym bezpieczeństwem innych niż samochody uczestników ruchu drogowego, którzy z reguły są narażeni na dużo większe konsekwencje kolizji czy wypadków. System taki pozwoliłby zarówno na walidację określenia odległości, jak i na identyfikację obiektu, przez co można by wdrożyć protokół bezpieczeństwa właściwy dla danego zdarzenia.

Część elementów niniejszej rozprawy jest wynikiem współpracy z firmami zajmującymi się rozwiązaniami ADAS oraz wynikiem konsultacjami z osobami zaangażowanymi w projekty z sektora motoryzacyjnego. Otrzymane rezultaty badań są odpowiedzią na wskazane przez nie problemy. Pewne elementy niniejszej pracy zostały już zaimplementowane i zweryfikowane w ramach projektu pt. "Innowacyjna technologia tworzenia wydarzeń multimedialnych opartych o walki dronów z synergią między poziomami: wirtualnym, rozszerzonym i fizycznym". Część opracowanych metod została również wdrożona w projekcie pt. "CoBoAGV: Automated Guided Vehicles integrated with Collaborative Robots for Smart Industry Perspective". Planuje się wykorzystać je również podczas realizacji projektów pt. "WrightBroS: Working in a Collaborative Factory of the Flight Simulators Branch of RISE" oraz "ReACTIVE Too: Reliable Electronics for Tomorrow's Active Systems".

7. Bibliografia

- [1] K. Hanzel, K. Paszek, i D. Grzechca, „Possibilities of using data from the UWB system for the validation of ADAS subsystems”, w *Networking issues in innovative applications based on cyber-physical systems paradigm*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, s. 108–124.
- [2] T. Ogawa, H. Sakai, Y. Suzuki, K. Takagi, i K. Morikawa, „Pedestrian detection and tracking using in-vehicle lidar for automotive application”, w *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, cze. 2011, s. 734–739. doi: 10.1109/IVS.2011.5940555.
- [3] M. Kutila, P. Pyykönen, W. Ritter, O. Sawade, i B. Schäufole, „Automotive LIDAR sensor development scenarios for harsh weather conditions”, w *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, lis. 2016, s. 265–270. doi: 10.1109/ITSC.2016.7795565.
- [4] R. H. Rasshofer i K. Gresser, „Automotive Radar and Lidar Systems for Next Generation Driver Assistance Functions”, *ResearchGate*, t. 3, s. 205–209, 2005, doi: <https://doi.org/10.5194/ars-3-205-2005>.
- [5] D. Grzechca, K. Hanzel i in., „How Accurate Can UWB and Dead Reckoning Positioning Systems Be? Comparison to SLAM Using the RPLidar System”, *Sensors*, t. 20, nr 13, Art. nr 13, sty. 2020, doi: 10.3390/s20133761.
- [6] M. E. Warren, „Automotive LIDAR Technology”, w *2019 Symposium on VLSI Circuits*, cze. 2019, s. C254–C255. doi: 10.23919/VLSIC.2019.8777993.
- [7] S. Sun, A. P. Petropulu, i H. V. Poor, „MIMO Radar for Advanced Driver-Assistance Systems and Autonomous Driving: Advantages and Challenges”, *IEEE Signal Processing Magazine*, t. 37, nr 4, s. 98–117, lip. 2020, doi: 10.1109/MSP.2020.2978507.
- [8] C. Yang i H. Shao, „WiFi-based indoor positioning”, *IEEE Communications Magazine*, t. 53, nr 3, s. 150–157, mar. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7060497.
- [9] E. Mok i G. Retscher, „Location determination using WiFi fingerprinting versus WiFi trilateration”, *Journal of Location Based Services*, t. 1, nr 2, s. 145–159, cze. 2007, doi: 10.1080/17489720701781905.
- [10] L. Koski, T. Perälä, i R. Piché, „Indoor positioning using WLAN coverage area estimates”, w *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, wrz. 2010, s. 1–7. doi: 10.1109/IPIN.2010.5648284.
- [11] Y. Wang, Xu Yang, Yutian Zhao, Yue Liu, i L. Cuthbert, „Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods”, w *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, sty. 2013, s. 837–842. doi: 10.1109/CCNC.2013.6488558.
- [12] R. Faragher i R. Harle, „An analysis of the accuracy of bluetooth low energy for indoor positioning applications”, wrz. 2014. Dostęp: 28 styczeń 2020. [Online]. Dostępne na: https://www.researchgate.net/publication/290781636_An_analysis_of_the_accuracy_of_bluetooth_low_energy_for_indoor_positioning_applications
- [13] A. Lilienthal i T. Duckett, „An absolute positioning system for 100 euros”, w *1st International Workshop on Robotic Sensing, 2003. ROSE' 03.*, cze. 2003, s. 6 pp.-. doi: 10.1109/ROSE.2003.1218705.
- [14] M. Pongratz i K. Mironov, „Accuracy of positioning spherical objects with a stereo camera system”, w *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, mar. 2015, s. 1608–1612. doi: 10.1109/ICIT.2015.7125326.
- [15] H. K. Kim, Y. Chung, i M. Kim, „Effect of Enhanced ADAS Camera Capability on Traffic State Estimation”, *Sensors*, t. 21, nr 6, Art. nr 6, sty. 2021, doi: 10.3390/s21061996.
- [16] D. Pan i Y. Yu, „Design of Indoor Position System Based on DWM1000 Modules”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, t. 585, s. 012067, sie. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/585/1/012067.
- [17] Z. Song, G. Jiang, i C. Huang, „A Survey on Indoor Positioning Technologies”, w *Theoretical and Mathematical Foundations of Computer Science*, Berlin, Heidelberg, 2011, s. 198–206. doi: 10.1007/978-3-642-24999-0_28.

- [18] D. Grzechca, **K. Hanzel**, i K. Paszek, „Accuracy analysis for object positioning on a circular trajectory based on the UWB location system”, luty 2018, s. 69–74. doi: 10.1109/TCSET.2018.8336158.
- [19] D. Grzechca i K. Hanzel, „The positioning accuracy based on the UWB technology for an object on circular trajectory”, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, t. 64, nr 4, s. 487–494, paź. 2018.
- [20] D. Grzechca, K. Tokarz, K. Hanzel, i S. Pokucinski, „On fundamental issues on creating autonomous platform for UWB navigation system”, *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, t. 22, nr 1, Art. nr 1, mar. 2020.
- [21] M. G. Wing, A. Eklund, i L. D. Kellogg, „Consumer-Grade Global Positioning System (GPS) Accuracy and Reliability”, *Jfor*, t. 103, nr 4, s. 169–173, cze. 2005, doi: 10.1093/jof/103.4.169.
- [22] „GPS.gov: GPS Accuracy”. <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/> (dostęp 28 styczeń 2020).
- [23] O. Haraz, „Why do we need Ultra-wideband? (1)”, *VLSI-Egypt*, 19 listopad 2012. <http://www.vlsiegypt.com/home/?p=518> (dostęp 8 lipiec 2017).
- [24] D. Grzechca i in., „Monitoring the Gait Process During the Rehabilitation of Patients Using Computer Vision Techniques and UWB Technology”, w *Information Systems*, t. 381, M. Themistocleous i M. Papadaki, Red. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 419–437. doi: 10.1007/978-3-030-44322-1_31.
- [25] O. Kovalenko, „UWB Indoor Positioning: SWOT Analysis”, *Medium*, 10 wrzesień 2019. <https://blog.indoorway.com/recently-indoor-positioning-has-emerged-as-a-useful-approach-to-improving-the-productivity-and-a595d7388e52> (dostęp 14 kwiecień 2021).
- [26] A. Alarifi i in., „Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances”, *Sensors*, t. 16, nr 5, s. 707, maj 2016, doi: 10.3390/s16050707.
- [27] N. Decarli, D. Dardari, S. Gezici, i A. A. D’Amico, „LOS/NLOS detection for UWB signals: A comparative study using experimental data”, w *IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2010*, maj 2010, s. 169–173. doi: 10.1109/ISWPC.2010.5483704.
- [28] J. Lee, Y. Su, i C. Shen, „A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi”, w *IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, lis. 2007, s. 46–51. doi: 10.1109/IECON.2007.4460126.
- [29] **K. Hanzel**, „Follow me droney! Will UWB technology do it right?”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, t. 2235, nr 1, s. 012108, maj 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2235/1/012108.
- [30] J. Wei, J. He, Y. Zhou, K. Chen, Z. Tang, i Z. Xiong, „Enhanced Object Detection With Deep Convolutional Neural Networks for Advanced Driving Assistance”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, t. 21, nr 4, s. 1572–1583, kwi. 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2910643.
- [31] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, i A. Farhadi, „You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”, w *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, cze. 2016, s. 779–788. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [32] **K. Hanzel**, D. Grzechca, M. Tomczyk, i A. Marciniak, „Multifactorial Fuzzy Logic Distance Correction for UWB Positioning System”, *JCM*, t. 15, nr 5, s. 447–454, maj 2020, doi: 10.12720/jcm.15.5.447-454.
- [33] „DW1000 Radio IC”, *Decawave*. <https://www.decawave.com/product/dw1000-radio-ic/> (dostęp 13 kwiecień 2021).
- [34] „Guidelines for Use of Extended Unique Identifier (EUI), Organizationally Unique Identifier (OUI), and Company ID (CID)”, 2017.
- [35] **K. Hanzel**, K. Paszek, i D. Grzechca, „The influence of the data packet size on positioning parameters of UWB system for the purpose of tagging smart city infrastructure”, 2020, doi: 10.24425/BPASTS.2020.134173.
- [36] **K. Hanzel** i D. Grzechca, „Increasing the Security of Smart Cities of the Future Thanks to UWB Technology”, w *Information Systems*, Cham, 2022, s. 585–596. doi: 10.1007/978-3-030-95947-0_41.

