

Łukasz **SOBCZAK**Łukasz **BIJOK**

METODY LOKALIZACJI MAŁYCH POJAZDÓW AUTONOMICZNYCH W POMIESZCZENIACH ZAMKNIĘTYCH

Streszczenie. Estymacja swojej pozycji przez pojazdy bezzałogowe jest kluczowa dla pomyślnego przeprowadzania misji rozpoznawczych, zaopatrzeniowych czy ratunkowych w trybie autonomicznym. Wyznaczanie celów i punktów kontrolnych misji pozwala operatorowi platformy, ale również algorytmom decyzyjnym, na podejmowanie odpowiednich działań. W artykule przedstawiono popularne metody lokalizacji wewnątrz pomieszczeń zamkniętych z niedostępnym sygnałem nawigacji GNSS. Potencjał wykorzystania takich technologii, jak UWB, US, INS czy algorytmów SLAM opartych o odczyty z LiDAR-ów lub kamer został omówiony w kontekście małych platform lądowych, które potrafią wykonywać określone zadania w sposób zautomatyzowany. Artykuł omawia również rozwiązania opisywane szczegółowo w cytowanej literaturze związane z tematem fuzji danych z sensorów różnego typu, która zapewnia większą dokładność i niezawodność uzyskiwanych odczytów.

Słowa kluczowe: lokalizacja pojazdów, Indoor Position System (IPS), Ultra-Wideband (UWB), Ultrasound (US), Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Inertial Navigation System (INS), Unmanned Ground Vehicle (UGV).

1. WPROWADZENIE

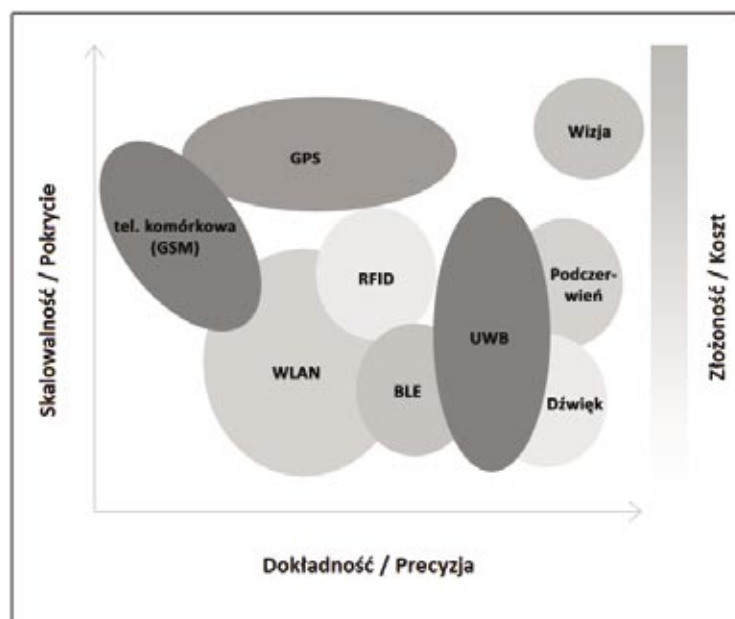
Powszechny dostęp do satelitarnych systemów nawigacji i pozycjonowania GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) z pewnością sprawił, iż wiele procesów chociażby z dziedziny logistyki lub transportu: lądowego, morskiego czy powietrznego stało się o wiele prostsze. GNSS opiera swe działanie o fale radiowe pochodzące ze sztucznych satelitów umieszczonych na orbitach okołoziemskich, które są wykorzystywane do określenia położenia obiektów (odbiorników). W procesie określania pozycji odbiornika używa się różnych technik, takich jak np. mierzenie czasu propagacji sygnału czy też przesunięcia fazowego. Metody te dają satysfakcjonujące rezultaty w wielu przypadkach użycia w przestrzeniach otwartych, jednakże pomimo tego żadna z nich nie jest w stanie wyeliminować lub nawet zredukować błędów estymacji pozycji obiektu spowodowanego zjawiskami pochłaniania fal, nadmiernego poziomu szumu, wielodrogowości fal – występujących w warunkach pomieszczeń zamkniętych. Stąd też uzyskanie dokładnej lokalizacji w środowisku ograniczonym i/lub zamkniętym nie jest możliwe. Ponadto nawet w warunkach zewnętrznych, przy dobrym sygnale satelitarnym, precyzja GNSS może być niezadowalająca z punktu widzenia specyficznych małych UGV (*Unmanned Ground Vehicle*), wymagających realizacji zadań na stosunkowo niewielkiej przestrzeni.

W celu zredukowania luki, jaką pozostawia po sobie brak ciągłości sygnału satelitarnego spowodowany przez nadmierne pochłanianie fal elektromagnetycznych przez przeszkody, lub jego wielodrogowa propagacja czy też inne zakłócenia wewnątrz pomieszczeń przeprowadzonych zostało wiele badań oraz eksperymentów. Prace te doprowadziły tym samym do powstania obszaru zainteresowań, w ramach którego opracowywane są komputerowe metody pozycjonowania wewnątrz pomieszczeń, głównie bez udziału bezpośredniego sygnału satelitarnego. Dziedzinę tę określa się mianem IPS (*Indoor Positioning*

System) lub też czasem RTLS (*Real Time Location System*), zwracając tym samym uwagę na istotę działania systemów w czasie bliskim rzeczywistości. Z rozwiązań powstających w ramach tego tematu często korzystają specjaliści robotyki, wdrażając rozwiązania komercyjne lub prowadząc badania nad małymi, bezzałogowymi pojazdami autonomicznymi lub zautomatyzowanymi. Metody lokalizacji wewnątrz pomieszczeń opisywane w literaturze można pokrótce podzielić na zwracające pozycję absolutną na mapie budynku lub względną, będącą tak naprawdę przesunięciem od punktu początkowego działania algorytmu. To z kolei sprawia, że w zależności od sposobu określania swojej pozycji, robot posiadający funkcje autonomiczne jest zdolny do wykonywania zadań o różnej charakterystyce.

Warto odnotować, iż część systemów opisywanych w ramach słowa kluczowego IPS operuje również w środowisku zewnętrznym jako komplementariusz lub w niektórych przypadkach nawet jako substytut systemu GNSS. Z kolei fuzja tychże systemów doprowadza tym samym do poprawy precyzji i dokładności w procesie lokalizacji. Połączenie systemu GNSS wraz z radiową ultraszerokopasmową technologią lokalizacji UWB (*Ultra Wideband*) opisana została w [1], z kolei fuzja z systemem opartym o fale ultradźwiękowe (*Ultrasonic, US*) w [2], otwierając tym samym możliwość skonstruowania systemu ciągłej lokalizacji w warunkach mieszanych.

Równoległe z próbami połączenia technologii pozycjonowania opartej o sygnały satelitarne z technologiami z obszaru IPS prowadzone są liczne prace i badania skupiające się na poszczególnych komponentach wchodzących w skład IPS mających potencjalne zastosowanie w lokalizacji mobilnych robotów. Spośród nich można wyróżnić między innymi wspomniany wcześniej ultraszerokopasmowy system RF (*Radio Frequency*) – UWB [3] oraz inne należące do grupy RF – np. Wifi, RFID, BLE [4,5], jak i również systemy oparte o: wizję [6], podczerwień [7], czy też czujniki inercyjne [8]. Na rysunku 1 zaprezentowano przedstawione systemy w kontekście funkcji kluczowych kryteriów. Każda z wyżej wymienionych technologii cechuje się innymi parametrami (w tym dokładnością czy skalowalnością systemu – rys. 1), dając tym samym różne możliwości zastosowania w odmiennych warunkach. Powstały w związku z tym również koncepcje wykorzystujące równoległe potencjał dwóch lub więcej technologii (fuzje danych sensorycznych).



Rys. 1. Porównanie niektórych technik lokalizacji jako funkcja kryteriów: dokładności/precyzji, obszaru pokrycia/skalowalności oraz złożoności i kosztu [9]

Artykuł ma na celu omówienie dostępnych rozwiązań z zakresu pozycjonowania w pomieszczeniach zamkniętych małych pojazdów autonomicznych i jest uporządkowany w sposób następujący: w rozdziale 2 omówione zostaną wybrane metody pozycjonowania małych pojazdów autonomicznych względem kluczowych parametrów, którymi między innymi są: dokładność/precyzja, skalowalność, energooszczędność, koszt oraz ich potencjał i związane z nimi wyzwania. Kolejno omówiono systemy opierające się o wizję (rozdział 2.1), systemy korzystające z czujników inercyjnych w procesie wyznaczania pozycji (rozdział 2.2) oraz radiowe i dźwiękowe systemy pozycjonowania wewnątrz przestrzeni ograniczonych (rozdział 2.3). W rozdziale 3 podjęto dyskusję na temat potencjału połączenia wcześniej omówionych technologii w kontekście zwiększenia dokładności i precyzji IPS, jak również zniwelowania ograniczeń wynikających z zastosowania tylko jednej z wymienionych technologii, mając jednocześnie na uwadze złożoność rozwiązania, szybkość działania, skalowalność oraz koszt. Rozdział 4 zawiera podsumowanie pracy. Natomiast w rozdziale 5 zamieszczono bibliografię, z której korzystano podczas opracowywania niniejszego artykułu.

2. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

W literaturze można znaleźć wiele różnego rodzaju metod lokalizacji wewnątrz pomieszczeń. Głównym obszarem zastosowań dla tego typu technik jest robotyka. Dzięki wyposażeniu mobilnych platform w szereg czujników można wyróżnić kilka grup algorytmów opartych m.in. o systemy wizyjne, czujniki inercyjne, systemy radiowe, a także złożone układy wykorzystujące fuzję danych różnych sensorów. Dodatkowo rozwiązania problemu lokalizacji różnią się w zależności od obszaru działania, tzn. inne algorytmy stosowane są w nieznanym środowisku, a inne w takim, w którym dostępna jest wiedza *a priori* na temat otoczenia.

2.1. Systemy wizyjne

W kontekście zagadnienia lokalizacji niewielkich pojazdów, dysponujących pewną autonomią działania, jedną z najpopularniejszych technik jest wykorzystanie systemów wizyjnych. Do takich można zaliczyć standardowe kamery jednoobiektywowe, kamery stereowizyjne, a nawet całe zestawy urządzeń obrazujących.



**Rys. 2. Stereowizyjna kamera ZED firmy Stereolabs
(fot. OBRUM sp. z o.o.)**

Oprócz kamer, często wykorzystywanymi w robotyce sensorami optycznymi są aktywne czujniki typu LiDAR (*Light Detection and Ranging*), za pomocą których uzyskiwana jest tzw. chmura punktów (*point cloud*) otoczenia. Oprócz możliwości pomiaru natężenia odbitego światła LiDAR pozwala również na pomiar odległości. Zasada działania opiera się na emitowaniu precyzyjnie odmierzonych wiązek laserowych (laser klasy 1 – bezpieczny dla ludzi i ich wzroku; długości fali LiDAR-ów stosowanych w robotyce wynosi zazwyczaj ok. 905 nm). Dzięki pomiarowi czasu pomiędzy wysłaniem, a odebraniem impulsu laserowego możliwe jest wyznaczenie odległości do punktu odbicia promienia świetlnego [10]. Można wyróżnić dwa główne typy takich urządzeń: LiDAR-y 2D oraz 3D. Pierwsze z nich zbudowane zazwyczaj z pojedynczego emitera i detektora, obracającego się wokół własnej osi, dokonują pomiarów w jednej płaszczyźnie. Te drugie natomiast wyróżniają się przede wszystkim bardziej złożoną konstrukcją, która umożliwia wykonywanie pomiarów nie tylko horyzontalnie, ale również wertykalnie, co wiąże się także ze zwiększoną ilością otrzymywanych danych.



Rys. 3. LiDAR 3D firmy Velodyne (fot. OBRUM sp. z o.o.)

Podstawową techniką lokalizacji w otoczeniu przy użyciu systemów wizyjnych są algorytmy jednoczesnej lokalizacji i mapowania SLAM (*simultaneous localization and mapping*). Rozwiązanie problemu SLAM zakłada budowę mapy otoczenia wraz z jednoczesnym wykorzystaniem jej do lokalizacji. W tym przypadku platforma operuje w nieznanym otoczeniu, w którym obliczane są zarówno przybliżone położenia orientacyjnych punktów charakterystycznych, jak i trajektoria ruchu robota [11]. Niejako wadą takiego rozwiązania jest brak możliwości uzyskania pozycji absolutnej w otoczeniu, a jedynie pozycji względnej. Pierwsze wzmianki o problemie SLAM pochodzą już z 1986 roku [12]. Od tamtego czasu nastąpił znaczny rozwój w tej dziedzinie, zaimplementowano wiele metod rozwiązania tego problemu, co ukazuje strona internetowa openslam.org segregująca metody publikowane na zasadach wolnego oprogramowania. Głównym motorem napędowym badań jest chęć zbudowania w pełni autonomicznych pojazdów, dla których niezbędne jest określanie swojej pozycji z dużą, nawet centymetrową dokładnością. Dlatego też do tej pory powstało wiele implementacji algorytmu SLAM, które wykorzystują różne konfiguracje systemów wizyjnych [13].

Obecnie popularnym rozwiązaniem, szczególnie w systemach mobilnych pojazdów działających na obszarach zamkniętych, jest wykorzystanie pojedynczej kamery. Pierwszym krokiem do wyznaczenia pozycji jest znalezienie punktów charakterystycznych na danej klatce obrazu. W tym celu stosowane są różne algorytmy, m.in. Fast Corner Detection [14], SURF [15] czy SIFT [16]. Następnie punkty te muszą być wyznaczone powtarzalnie i korelowane ze sobą. Dzięki takiemu śledzeniu cech można jednoznacznie określić położenie danego punktu na dwóch klatkach obrazu, co sprawia, że dzięki triangulacji i wiedzy o parametrach kamery jest możliwość wyznaczenia przesunięcia, a zatem i pozycji kamery względem początku pomiaru [17]. Przykładami rozwiązania problemu SLAM są prace [18, 19], w których wykorzystano filtrowanie oparte o rozszerzony filtr Kalmana czy filtrowanie cząsteczkowe. Jednym z bardziej zaawansowanych metod jest ORB-SLAM wykorzystujący w obliczeniach tzw. Bundle Adjustment [20].

Kamera stereowizyjna niejako rozbudowuje możliwości lokalizacji i mapowania, dostarczając informacji o głębi. Stały dystans pomiędzy dwoma obrazami pozwala na wyznaczenie odległości do poszczególnych punktów charakterystycznych, pod warunkiem ich widoczności jednocześnie dla obu sensorów. Przykłady takich rozwiązań przedstawione są w literaturze [21, 22].

Zasada działania SLAM-u na skanerze laserowym 2D lub 3D jest zbliżona do zasady działania wykorzystującej kamerę. W tym przypadku jednak wejściem takiego algorytmu jest chmura punktów, a nie sygnał z urządzeń obrazujących. Natomiast również tutaj można wyekstrahować cechy, które następnie posłużą do lokalizacji i mapowania. Jednakże w przypadku zastosowania LiDAR-u istnieją również rozwiązania oparte o dopasowywanie poszczególnych skanów laserowych, co realizuje np. algorytm ICP (*Iterative Closest Point*) [23] bądź różne jego warianty. Działanie symultanicznego lokalizowania i mapowania na danych lidarowych 2D z użyciem implementacji SLAM zaprezentowano np. w artykule [24], w którym omówione jest działanie algorytmu o nazwie Google Cartographer.

Nieco odrębnym przykładem zastosowania systemu wizyjnego i algorytmu SLAM jest lokalizowanie we wcześniej przygotowanej mapie 3D. Takie podejście jest ostatnim trendem rozwijanym przez producentów w opracowywanych systemach autonomii dla samochodów poruszających się po drogach publicznych. Polega to na precyzyjnym zeskanowaniu sieci dróg przez specjalistyczne pojazdy wyposażone w LiDAR-y. Następnie taki skan zostaje przetworzony do postaci bardzo szczegółowej mapy 3D zawierającej informacje o profilu drogi, krawężnikach, chodnikach, znakach, sygnalizacji i innych charakterystycznych punktach [25]. Dzięki tak przygotowanym danym możliwe jest zlokalizowanie samochodu, wykorzystując tańszy i prostszy skaner laserowy [26], a nawet jedynie standardową kamerę jednoobiektywową [27]. Takie podejście można zastosować również dla mniejszych pojazdów bezzałogowych [28], choć ze względu na zazwyczaj łagodniejsze wymagania jeśli chodzi o dokładność, a zarazem większą oczekiwaną uniwersalność, jest to rozwiązanie rzadziej stosowane. Jednak niewątpliwą zaletą może być w tym przypadku zdolność do obliczania pozycji absolutnej względem świata.

2.2. Czujniki inercyjne

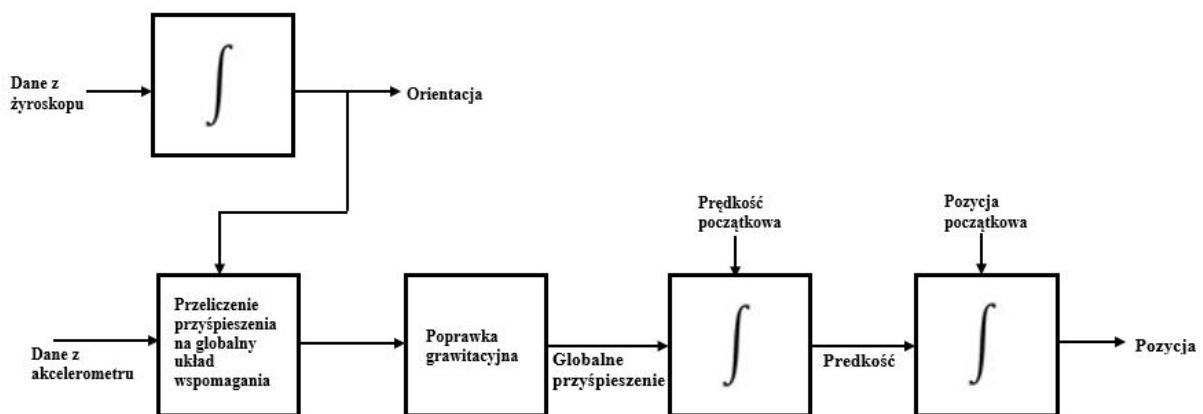
Zupełnie innym podejściem do tematu pozycjonowania i tym samym lokalizacji w przestrzeni jest wykorzystanie czujników inercyjnych i nawigacji inercyjnej INS (*Inertial Navigation System*). Pozwala ona, podobnie jak SLAM, na określanie pozycji względem punktu startu działania algorytmu.

Czujnik inercyjny, zwany również układem IMU (*Inertial Measurement Unit*) jest systemem elektromechanicznym typu MEMS (*Microelectromechanical System*) o 6 stopniach swobody. Wyposażony jest w dwa komponenty: 3-osiowy akcelerometr oraz 3-osiowy

żyroskop. Pozwalają one na dokładne śledzenie orientacji obiektu, jednak jedynie w dwóch osiach, gdyż pomiar azymutu odbywa się metodą zliczeniową, przez co podatny jest na zjawisko dryftu wskutek narastających błędów obu czujników. Jednak pewnym uzupełnieniem IMU jest system AHRS (*Attitude and Heading Reference System*) umożliwiający pomiar pola magnetycznego Ziemi za pomocą 3-osiowego magnetometru, co pozwala na uzyskiwanie orientacji w przestrzeni we wszystkich trzech osiach na znacznie wyższym poziomie dokładności, biorąc pod uwagę działanie w środowisku jednorodnym magnetycznie. Okazuje się bowiem, że odczyty pola magnetycznego mogą być podatne na spore zakłócenia.

Nawigacja zliczeniowa (*deadreckoning*) wywodzi się z transportu morskiego i polega na obliczaniu aktualnej pozycji na podstawie ostatniej znanej, zaobserwowanej pozycji, korzystając z danych o aktualnym kursie i utrzymywanej prędkości. Obecnie w motoryzacji na szeroką skalę wykorzystywana jest nawigacja inercyjna INS, w szczególności w kontekście opracowywanych samochodów autonomicznych. Będąc rozwinięciem nawigacji zliczeniowej, dzięki wykorzystaniu nowoczesnych czujników IMU wspomaga system nawigacji GNSS (*Global Navigation Satellite System*), co gwarantuje wysoką precyzję pomiarów i nieprzerwane dane o lokalizacji na obszarach z niedostępnym sygnałem satelitarnym, takich jak tunele czy parkingi podziemne. Ponadto podobne rozwiązania stosuje się np. w nawigacji pieszej wewnątrz budynków, w której również wykorzystywane są czujniki IMU i wiedza o specyfice ruchu człowieka [29]. Warto jednak pamiętać, że podobnie jak w metodach wykorzystujących algorytm SLAM uzyskujemy tutaj pozycję względną, której początkiem jest miejsce rozpoczęcia nawigacji.

Wyznaczenie pozycji z użyciem żyroskopu, który zwraca prędkości kątowe i akcelerometru dostarczającego informacje o przyspieszeniu obiektu wymaga kilku obliczeń matematycznych. Zakładając idealne wskazania z żyroskopu, możliwe jest wyznaczenie orientacji, całkując wartości po czasie (rys. 4). Z kolei uzyskanie pozycji, wykorzystując wskazania idealnego akcelerometru można uzyskać całkując podwójnie poszczególne składowe odczytanej wartości przyspieszenia (rys. 4) [30].



Rys. 4. Schemat ideowy pozycjonowania w oparciu o dane z akcelerometru i żyroskopu [30]

Jednakże ze względu na fakt, że czujniki nie są idealne, okazuje się, że obliczenia są podatne na błędy, które są trudne do korekcji w czasie działania algorytmu. Z jednej strony żyroskop ze względu na jego niedoskonałości jest podatny na zjawisko tzw. dryftu, głównie w osi pionowej, w związku z czym błąd może postępować z biegiem czasu. Z drugiej zaś

strony dane z akcelerometru są zaszumione i wprowadzają błędy do obliczeń. Niezbędne okazuje się stosowanie odpowiednich filtrów, szeroko stosowanego rozszerzonego filtra Kalmana EKF (*Extended Kalman Filter*) [31, 32,33] czy innych algorytmów filtrujących [34]. Warta uwagi jest również kwestia wykorzystania magnetometru do eliminacji dryftu żyroskopu. Pozwala to bowiem na korekcję odchylenia dzięki dodatkowym punktom referencyjnym. Niestety czujnik pola magnetycznego również podlega sporym zakłóceniom, np. w okolicach metalowych przedmiotów czy źródeł fal radiowych, co także może wpływać negatywnie na dokładność pomiaru.

2.3. Systemy radiowe i akustyczne

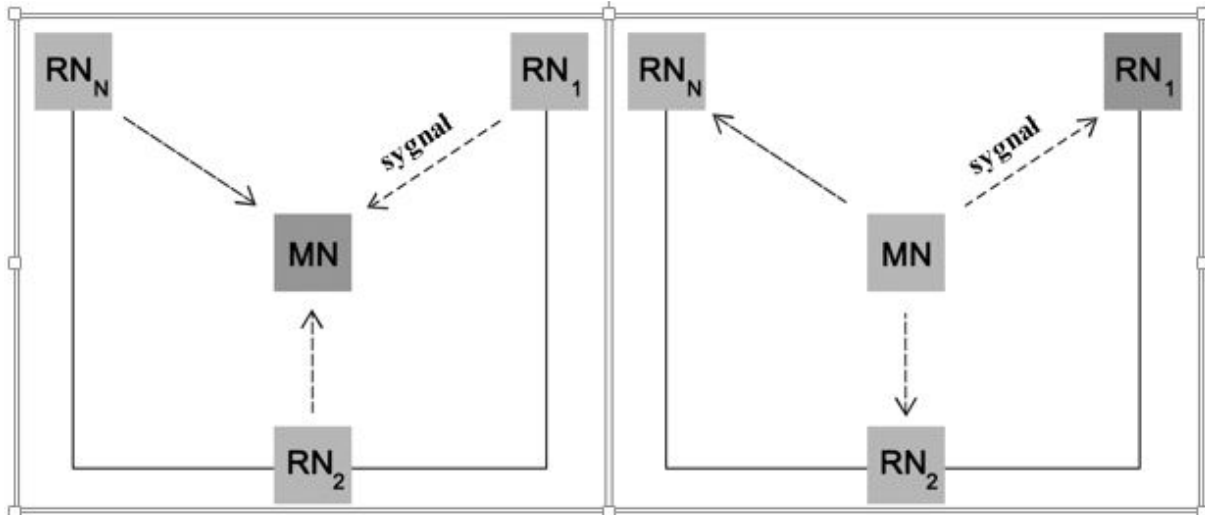
Zainteresowanie radiowymi oraz akustycznymi systemami pozycjonowania wzrosło ostatnimi laty w środowisku badawczym, jak i komercyjnym. Na szczególną uwagę zasługuje sektor przemysłowy, gdzie podejmowane są liczne próby implementacji systemów lokalizacji radiowej czy też akustycznej w ramach nowej rewolucji przemysłowej (Industry 4.0), w celu między innymi optymalizacji WIP (*Work in Progress*) czy zwiększenia bezpieczeństwa w docelowym obszarze. Z rozwiązania korzystają już takie marki jak Volkswagen [35], IBM [36] czy też centrum medyczne Fargo w Stanford[37]. Od 2014 roku firma Microsoft w cyklu corocznym organizuje konkurs pod nazwą Microsoft Indoor Localization Competition (IPSN), w którym to uczestnicy rywalizują w dyscyplinie pozycjonowania wewnątrz zamkniętych pomieszczeń z wykorzystaniem różnych technologii. Od początku konkursu prym w kontekście ilości zgłoszeń jak i najlepszych rezultatów dotyczących dokładności estymacji pozycji wiodą technologie UWB oraz US [38], co również potwierdza, iż zainteresowanie ww. technologiami jest duże względem innych technologii pozycjonowania. Dodatkowo wyniki UWB oraz US w konkursie skonstrastowane z resztą technologii wskazują na większe możliwości i osiągi w minimalizacji błędu pomiaru, których rząd wynosi kilka - kilkanaście centymetrów podczas gdy np. technologia wykorzystująca dźwięki słyszalne z przedziału od 16Hz do 20 kHz cechuje się błędem rzędu kilkudziesięciu centymetrów [38].

Analizując dostępne radiowe i akustyczne systemy pozycjonowania pod kątem precyzji, dokładności, niskiego kosztu aplikacji, skalowalności energooszczędności czy stosunkowo małej złożoności, w dalszej części artykułu zostaną omówione rozwiązania o największym potencjale:

1. Ultra szerokopasmowa technologia radiowa (*Ultra Wideband, UWB*).
2. Ultradźwiękowa (*Ultrasonic, US*) w kontekście technologii dostarczającej informacji o absolutnej pozycji UGV we wcześniej zdefiniowanym środowisku.

Realizacja ww. systemów pozycjonowania opiera się o ogólną architekturę bazującą głównie na dwóch trybach pracy - scentralizowanym lub zdecentralizowanym (rys. 5) lub też zamiennie nazywanymi - unilateralnym (*unilateral*) oraz multilateralnym (*multilateral*). W architekturze zdecentralizowanej (multilateralnej) pomiary sygnałów pochodzących z poszukiwanego mobilnego obiektu dokonywane są poprzez odbiorniki o stałych koordynatach przestrzennych, z kolei metoda scentralizowana (unilateralna) przenosi ciężar obliczeń na odbiornik mobilny, którego pozycja jest poszukiwana. Obydwa schematy prezentują pewne ograniczenia lub powodują wzrost złożoności systemu. W obydwu przypadkach konieczna jest co najmniej synchronizacja urządzeń infrastrukturalnych, jednakże w przypadku rozwiązania zdecentralizowanego, w którym lokalizowana jest większa ilość obiektów, konieczne jest zastosowanie dodatkowo schematów dostępu sygnałów (*accessscheme*) do odbiornika, co podnosi kompleksowość całego systemu. W przypadku scentralizowanym, konieczność wykonania obliczeń pozycji ma realny wpływ na większe zapotrzebowanie na energię elektryczną, chociaż z drugiej strony nie powoduje

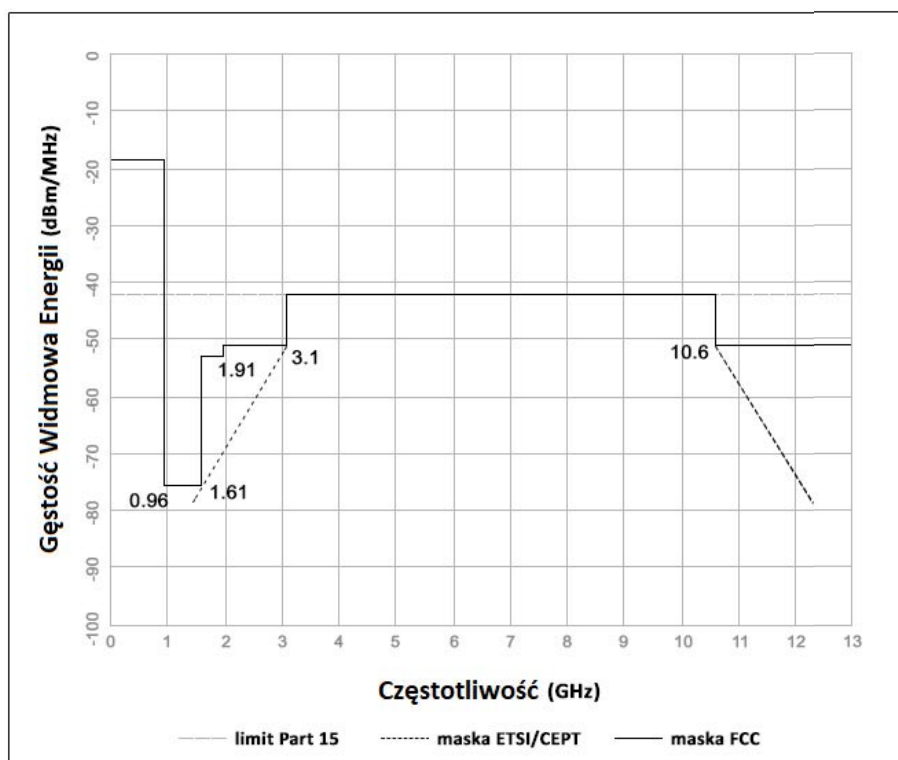
żadnych ograniczeń w ilości równoległe lokalizowanych obiektów czy też nie ma znacznego wpływu na kompatybilność elektromagnetyczną lokalizowanego obiektu, gdyż składa się tylko z odbiornika. Obydwie metody pozwalają w dalszym ciągu na implementację technik wyliczania pozycji takich jak: ToA (*Time of Arrival*), ToF (*Time of Flight*), czy też TDoA (*Time Difference of Arrival*) [39].



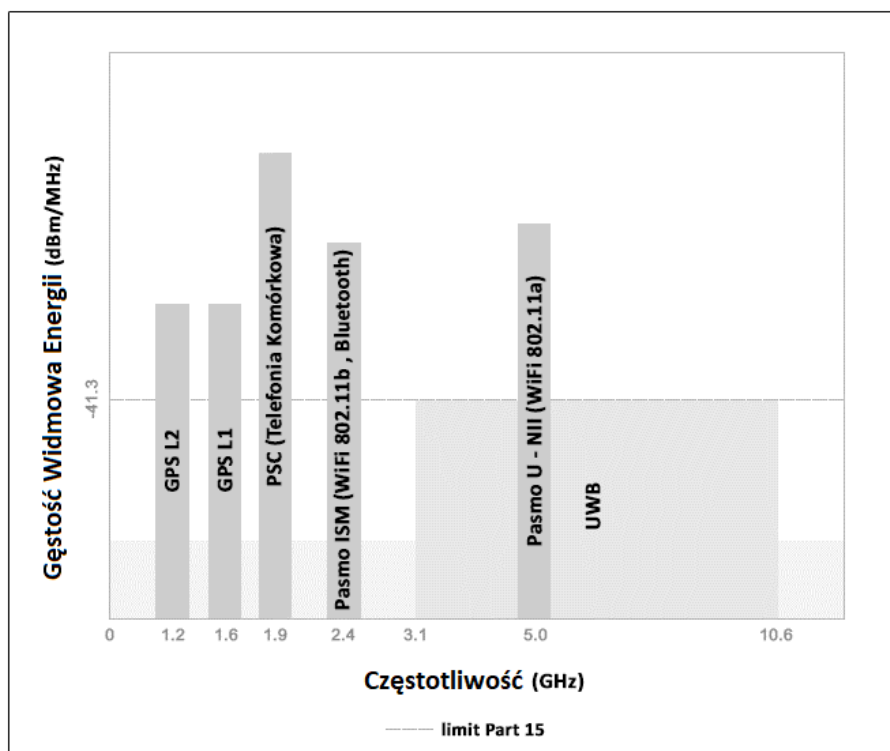
Rys. 5. Scentralizowana (po lewej) oraz zdecentralizowana architektura IPS w scentralizowanej (po prawej) architekturze pozycja estymowana jest w węzle mobilnym (MN), z kolei w zdecentralizowanej może być estymowana w jednym z węzłów referencyjnych (RN)

2.3.1. Ultra Wideband

Od momentu gdy w USA (luty 2002 r.) FCC (*Federal Communications Commission*), a w Europie - ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) wraz z CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) określiły kategorie dopuszczalnych komercyjnych zastosowań technologii UWB: komunikację, radary mobilne, obrazowanie oraz dopuściły do użytku urządzenie w ramach nielicencjonowanego pasma (rys. 6) dzięki czemu technologia UWB przyciągnęła znaczną uwagę społeczności badaczy czy też inżynierów. Duże zainteresowanie ww. grupy spowodowała dodatkowo unikalna charakterystyka UWB. Radiotechnologia UWB w odróżnieniu od innych technologii RF (*Radio Frequency*), takich jak np. technologia wąskopasmowa (*Narrowband*), cechuje się zajętością dużego spektrum częstotliwości (3.1 GHz-10.6 GHz) poprzez widmo fal elektromagnetycznych (rys. 7). Aspekt ten umożliwia szybką emisję bardzo krótkotrwałych postaci fal (rzędu nanosekund), znanych również jako impulsy [39]. Stąd też w literaturze często pisze się o UWB jako systemie IR (*Impulse Radio*). Impulsy UWB dzięki małej gęstości spektralnej postrzegane są dla innych systemów jako szum, co umożliwia jednoczesne działanie wraz z urządzeniami wąskopasmowymi, jak np. Wifi czy BLE bez wzajemnego zakłócania, a dodatkowo jest trudne do przypadkowego wykrycia. Dobra rozdzielczość czasowa pulsów UWB mierzonych w domenie czasu pozwala z kolei na wykorzystanie technologii do potencjalnie precyzyjnego mierzenia odległości pomiędzy nadajnikiem, a odbiornikiem, jednocześnie mając realny wpływ na mitygację efektu wielodrogowości (*multipath*). UWB charakteryzuje się również wysokim potencjałem w penetracji materiałów, którego nie posiadają wcześniej wymieniane radia wąskopasmowe, co powoduje, iż znajduje również zastosowanie w rozwiązaniach radarowych [40].



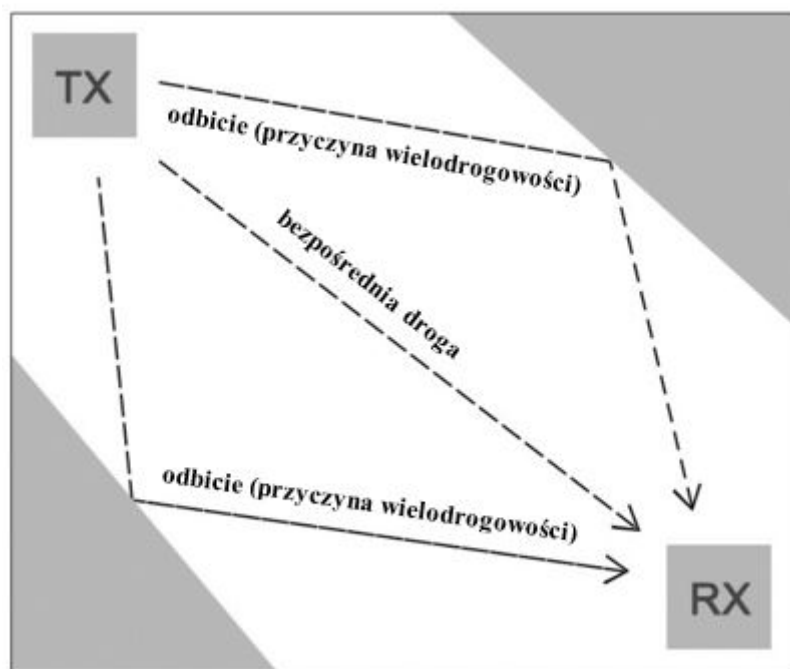
Rys. 6. Limity radiacji UWB (FCC - USA oraz ETSI/CEPT - Europa)



Rys. 7. Spektrum częstotliwości UWB na tle wąskopasmowych radiotechnologii

Pomimo wielu swych zalet, UWB stawia również kilka wyzwań, które stosunkowo często opisywane są w literaturze[41]. Z pewnością jednym z nich, a prawdopodobnie jednym

z najważniejszych, jest problem wielodrogowości sygnałów narastający wraz ze zmianą środowiska z LoS (*Line of Sight*), w którym UWB dobrze sobie z tym efektem radzi na NLoS (*Non Line of Sight*). W przypadku kompletnego braku widoczności pomiędzy mobilnym urządzeniem zamontowanym w UGV, a referencyjnymi węzłami, wielce prawdopodobnym jest, iż do odbiornika w odmiennym czasie dotrą kopie tego samego sygnału charakteryzujące się dodatkowo różną mocą. Takie sygnały wymagają będą dalszego przetwarzania w celu określenia, który sygnał jest oryginalnym – co ma duży wpływ na poprawne określenie czasu przelotu sygnału (ToA, ToF), będącego podstawą do estymacji pozycji. W środowisku badawczym wymienia się kilka metod stosowanych do zminimalizowania negatywnego skutku przedstawionego przez problem wielodrogowości. Wśród nich wymienia się zastosowanie algorytmu MUSIC czy też wykorzystanie Impulse Response-UWB lub Multi Band-OFDM UWB [42]. Pomimo tego, że wymienione metody w pewnym stopniu radzą sobie z przedmiotowym problemem, pozostaje on kategoryzowany nadal jako trudny i stanowi wyzwanie. Problem ten w warunkach NLoS zaprezentowano na rys. 8.



Rys. 8. Wielodrogowa propagacja fal pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem

Oprócz problemu wielodrogowości, wspomina się również o konieczności synchronizacji czasowej urządzeń wchodzących w skład topologii IPS, z kolei w [43] mowa o wysokim koszcie urządzeń oraz większej złożoności w przypadku chęci uzyskania wysoce precyzyjnego systemu (np. w technice AoA konieczność instalacji macierzy anten).

2.3.2. Ultradźwięki

Porównując US do dźwięków słyszalnych, w których częstotliwość fali akustycznej oscyluje w granicach ~ 16 Hz do ~ 20 kHz – ultradźwięki charakteryzują się wyższą częstotliwością rozchodzenia się fali, która wynosi 40 kHz i nie jest słyszalna przez człowieka. W odróżnieniu od fal elektromagnetycznych rozchodzących się z prędkością światła, na których bazują systemy RF – prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej jest znacznie niższa, gdyż wynosi w przybliżeniu 343 m/s, a do tego jest zmienna w zależności od temperatury oraz wilgotności ośrodka. W [44] prędkość fali dźwiękowej wyrażona jest wzorem:

$$V_{us} = 20.05\sqrt{T}$$

gdzie temperatura (T) wyrażona jest w Kelwinach i powoduje w przybliżeniu zmianę prędkości dźwięku o 0,18% dla zmiany temperatury o jeden stopień. Zmiana prędkości fali dźwiękowej jest na tyle istotna podczas estymacji pozycji, iż stosuje się sensory temperatury, aby skompensować negatywny wpływ zmiany temperatury na dokładność obliczeń. [44]

Do problemów dochodzi wysoki poziom szumów środowiskowych, który o charakterze ciągłym ma równie negatywny wpływ na obliczenia. Sygnał w odróżnieniu do RF nie przechodzi nawet przez cienkie ściany [45], co dla jednej grupy jest zaletą w kontekście możliwości zastosowania w ramach tylko jednego pomieszczenia, a dla innych wadą z dokładnie tego samego powodu.

Większość badanych ultradźwiękowych metod pozycjonowania wymaga dodatkowego kanału RF w celu zsynchronizowania nadajników oraz odbiorników fal ultradźwiękowych, co dyskwalifikuje implementację systemu w niektórych lokalizacjach, jak np. w szpitalach. Model taki jest często opisywany w literaturze [45] i implementowany. Niemniej jednak istnieją również próby uproszczenia systemu poprzez wyeliminowanie modułu RF i użycie tylko czasów odbioru impulsów ultradźwiękowych [46] dzięki zastosowaniu periodycznych przerw w transmisji. Jednakże rozwiązanie ogranicza możliwość użycia technik pozycjonowania do TDoA [47].

Sam proces lokalizacji opiera się głównie o wcześniej przytoczone schematy i techniki pozycjonowania, a w szczególności ToF czy też RSS i pomimo pewnych ograniczeń IPS oparty o US jest potencjalnie w stanie zaoferować dokładność rzędu kilkunastu [45] lub nawet kilku centymetrów [47] przy niskim poborze energii oraz małym koszcie. Dla porównania w ramach niniejszego artykułu nie znaleziono raportów – materiałów mówiących o błędzie obliczeniowym poniżej decymetra w przypadku IPS opartego tylko o UWB.

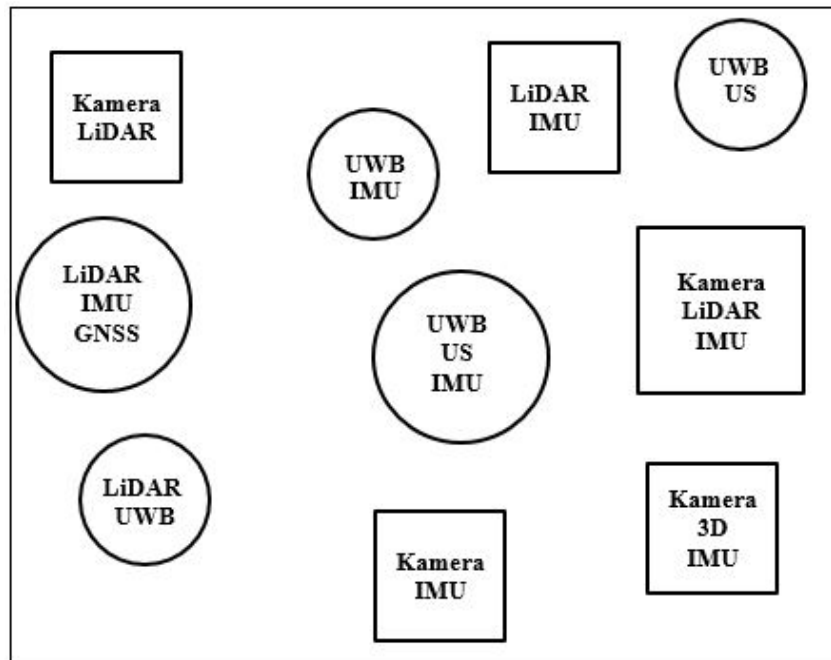
3. FUZJA SENSORÓW

Lokalizacja wewnątrz pomieszczeń może odbywać się z pomocą wielu różnych czujników. Każdy z nich oferuje różne parametry pracy, a także ma swoje wady i zalety. Dlatego też popularnym rozwiązaniem jest tzw. fuzja danych sensorycznych (*sensor fusion*), czyli równoległe wykorzystanie kilku źródeł danych. Takie podejście pozwala na zwiększenie dokładności i precyzji pomiarów i uzyskiwanych rezultatów, w tym przypadku informacji o położeniu pojazdu. Obecnie w literaturze można znaleźć wiele rozwiązań opartych na fuzji różnych sensorów łączonych w wielu konfiguracjach. Na rysunku 9 zostały przedstawione przykłady zastosowania różnych źródeł danych do zwiększenia dokładności lokalizacji. W dalszej części artykułu zostaną omówione poszczególne przypadki użycia najczęściej stosowanych fuzji danych występujących w literaturze, które dotyczą wcześniej poruszanych zagadnień.

Jednym z takich przykładów jest artykuł [48], w którym opisano fuzję danych inercyjnych z obrazem z kamery. Taka kombinacja wraz wykorzystaniem filtra UKF (*Unscented Kalman Filter*) zapewnia według badań autorów dokładną estymację ruchu. Tym samym metoda ta potencjalnie pozwala na wyznaczenie pozycji względem punktu początkowego, a więc może posłużyć do lokalizacji zarówno w terenie otwartym, jak i wewnątrz pomieszczeń. Ponadto warto wspomnieć o samokalibracji, której zasadę działania opisaną w tym artykule usprawnia działanie algorytmu i gwarantuje pewną uniwersalność zastosowania.

Inna praca [49] przedstawia z kolei integrację LiDAR-u z czujnikiem IMU na potrzeby lokalizacji UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) w środowisku zamkniętym.

Wykorzystując dopasowanie laserowych skanów 3D wraz z fuzją danych inercyjnych, wyznaczana jest pozycja w dwóch wymiarach, podczas gdy trzeci wymiar jest wyliczany dzięki LiDAR-owi 2D i ekstrakcji linii. Ostatecznie w celu wygładzenia danych stosowany jest filtr Kalmana.



Rys. 9. Przykłady kombinacji sensorów wykorzystywanych do fuzji danych, która pozwala na zwiększenie dokładności lokalizacji wewnątrz pomieszczeń
 a) ○ pozycjonowanie absolutne, b) □ pozycjonowanie względne

Kolejny artykuł [50] traktuje o połączeniu danych ze skanera laserowego wraz z obrazem z kamery. Takie połączenie zapewnia według autorów [50] wysoką dokładność estymowanego ruchu oraz niski błąd dryftu, który wyniósł poniżej 1%. Niewątpliwą zaletą jest fakt, że rozwiązanie to sprawdza się zarówno w warunkach zewnętrznych, jak i wewnątrz pomieszczeń.

W przypadku zastosowania UWB czy US najbardziej powszechną integracją wielu źródeł danych umożliwiających precyzyjną lokalizację obiektów wewnątrz pomieszczeń jest bez wątpienia kombinacja tych systemów z sensorami IMU/AHRS [52, 53]. W związku z faktem, iż sensory IMU nie są wrażliwe na wielodrogową propagację w warunkach LoS czy też NLoS stanowią potencjalnie dobre uzupełnienie do ww. technologii. Z kolei UWB może dostarczyć informację o pozycji początkowej, która posłuży do wstępnej kalibracji sensora IMU a kolejno może korygować dryft błędu dzięki cyklicznemu estymowaniu pozycji w warunkach LoS, gdzie dokładność jest największa. W ten sposób obydwa podsystemy mogą się wzajemnie uzupełniać dając jednocześnie pozycję absolutną, czego w samych systemach INS brakuje. Mechanizm fuzji IMU i UWB został np. zaimplementowany w [52]. Raportuje on o stuprocentowo lepszą dokładność i wydajność przy użyciu 9-osioowego IMU oraz rozszerzonego stochastycznego filtra Kalmana (*Extended Kalman Filter, EKF*) użytego do ciągłej estymacji i poprawy systematycznego błędu IMU w warunkach symulacyjnych i laboratoryjnych. Dalszy krok został podjęty w [51], gdzie autor proponuje wykorzystanie najnowszych wersji algorytmu EKF – Sigma Point Kalman Filters (SPKF), jak i również Cubature Kalman Filter (CKF) jako alternatywę do algorytmów standardowych lub też w [53], gdzie fuzja danych z IMU oraz UWB jest przeprowadzona testowo w różnych etapach

algorytmu EKF, wykazując najlepsze rezultaty w fazie aktualizacji i ogólną poprawę dokładności estymowanej pozycji dzięki wykorzystaniu wielu źródeł danych.

Przedstawione techniki i algorytmy są technologicznie niezależne, co oznacza, iż mogą być wykorzystane równie dobrze w przypadku zamiany źródła danych z UWB na US. Oczywiście w kontekście lokalizacji robotów stosowanych jest również wiele innych, choć mniej popularnych, modeli fuzji sensorów opartych o różne kombinacje niemal wszelkich możliwych dostępnych czujników. Co więcej, do fuzji danych w ramach np. algorytmów Kalmana mogą zostać dodatkowo dołączone dane pochodzące z GNSS, umożliwiając tym samym ciągłą lokalizację UGV w warunkach wewnątrz pomieszczeń, jak i na zewnątrz pomieszczeń.

4. PODSUMOWANIE

W zależności od środowiska w jakim pojazd autonomiczny realizuje swoje zadania, wymagane jest różne podejście do tematu lokalizacji. W artykule omówiono popularne metody, które mogą wspierać realizację dwóch głównych przypadków użycia robotów mobilnych w pomieszczeniach zamkniętych: operacje powtarzalne w znanym otoczeniu oraz działania spontaniczne w środowisku nieokreślonym. Omawiając poszczególne algorytmy i koncepcje, można zauważyć popularność stosowania fuzji danych sensorycznych i ogrom publikacji naukowych z ostatnich kilku lat traktujących o tym temacie. Zgodnie z logiką okazuje się, że pomimo większej złożoności i stopnia skomplikowania algorytmów łączących różne źródła danych, korzyści, takie jak zwiększona dokładność czy precyzja wyników, warte są podejmowania wysiłków ciągłego ulepszania dostępnych i poszukiwania nowych technologii.

5. LITERATURA

- [1] Fernandez-Madrigal J. A. et al.: "Application of UWB and GPS technologies for vehicle localization in combined indoor-outdoor environments", *2007 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, 2007.
- [2] Henderson H. P., Bevly D. M.: "Relative position of UGVs in constrained environments using low cost IMU and GPS augmented with ultrasonic sensors", *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, pp. 1269-1277, 2008.
- [3] Kołakowski J., Cichocki J., Makal P., Michnowski R.: "An Ultra-Wideband System for Vehicle Positioning", *Intl Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. 56, no. 3, pp. 247-256, 2010.
- [4] Memon S., Memon M. M., Shaikh Faisal K., Laghari S.: "Smart indoor positioning using BLE technology", *4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, 2017.
- [5] S. Lu, C. Xu, R. Y. Zhong, L. Wang: "A RFID-enabled positioning system in automated guided vehicle for smart factories", *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 179-190, July 2017.
- [6] Cadena C.: "Past, Present, and Future of Simultaneous Localization And Mapping: Towards the Robust-Perception Age", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 1309-1332, 2016.
- [7] Gorostiza E. M. et al.: "Infrared Sensor System for Mobile-Robot Positioning in Intelligent Spaces", *Sensors*, vol. 11 no. 5, pp. 5416-5438, May 2011.

- [8] Nawrat A., Jędrasiak K., Daniec K., Koterak R.: "Inertial Navigation Systems and Its Practical Applications", *New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems*, pp. 213-240, 2011.
- [9] Markowska-Prorok A. S.: "Models and Algorithms for Ultra-Wideband Localization in Single - and Multi-Robot Systems", THESE NO 5746 (2013), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland, 2013.
- [10] Carter J. et al.: "Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications", National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, November 2012.
- [11] Durrant-Whyte H., Bailey T.: "Simultaneous localization and mapping: part I", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 99-110, June 2006.
- [12] Smith R. C., Cheeseman P.: "On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 4, no. 4, pp. 56-68, 1986.
- [13] Y. Wu, F. Tang, H. Li: "Image Based Camera Localization: an Overview", *Visual Computing for Industry, Biomedicine and Art*, 2018.
- [14] Trajkovic M., Hedley M.: "Fast Corner Detection", *Image and Vision Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 75-87, February 1998.
- [15] H. Bay T. Tuytelaars, L. V. Gool: "SURF: Speeded Up Robust Features", *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3, pp. 346-359, June 2008.
- [16] Lowe D. G.: "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, November 2004.
- [17] Riisgaard S., Blas M. R.: "SLAM for Dummies A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping", MIT, USA, 2004.
- [18] Thrun S., Burgard W., Fox D.: "Probabilistic robotics", MIT, USA, August 2005.
- [19] Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbreit B.: "Fast SLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem", *AAAI National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 593-598, 2002.
- [20] Mur-Artal R., Montiel J. M. M., Tardos J. D.: "ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1147-1163, October 2015.
- [21] Kriegman D. J., Triendl E., Binford T. O.: "Stereo vision and navigation in buildings for mobile robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 6, December 1989.
- [22] Engel J., Stuckler J., Cremers D.: "Large-scale direct SLAM with stereo cameras", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Germany 2015.
- [23] Besl P. J., McKay N. D.: "Method for registration of 3-D shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, no. 2, February 1992.
- [24] Hess W., Kohler D., Rapp H. and Andor D.: "Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1271-1278, Stockholm 2016.
- [25] Waymo Safety Report, "On the Road to Fully Self-Driving", Waymo, USA, 2018 [online] [dostęp: 10.01.2018], Dostępny w Internecie: <https://waymo.com/safety/>.
- [26] Barsan I. A., Wang S., Pokrovsky A., Urtasun R.: "Learning to Localize Using a LiDAR Intensity Map", *Conference on Robot Learning*, Switzerland, 2018.
- [27] Caselitz T., Steder B., Ruhnke M., Burgard W.: "Monocular Camera Localization in 3D LiDAR Maps", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016.

- [28] Gutman J. S., Shlegel C.: "AMOS: comparison of scan matching approaches for self-localization in indoor environments", *Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots*, Germany, 1996.
- [29] Harle R.: "A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1281-1293, 2013.
- [30] Woodman O. J.: "An introduction to inertial navigation", University of Cambridge, Computer Laboratory, Technical Report, no. 696, August 2007.
- [31] Halvorsen K., Soderstrom T., Stokes V., Lanshammar H.: "Using an Extended Kalman Filter for Rigid Body Pose Estimation", *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 127, pp. 475-483, June 2005.
- [32] Marton L., Gyorgy K.: "Two-Stage Kalman Filtering for Indoor Localization of Omnidirectional Robots", *Electrical and Mechanical Engineering*, vol. 5, pp. 44-60, 2013.
- [33] Sabatini A. M.: "Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing", *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 7, pp. 1346-1356, July 2006.
- [34] Madgwick S. O. H.: "An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays", April 2010.
- [35] Sewio, "See the value of using indoor tracking in Volkswagen", 2017 [online], [dostęp: 7.01.2019], Dostępny w Internecie: <https://www.sewio.net/customer-projects/volkswagen/>.
- [36] Sewio, "Indoor Tracking of Event Visitors at IBM Summit", 2017 [online], [dostęp: 7.01.2019], Dostępny w Internecie: <https://www.sewio.net/customer-projects/ibm>.
- [37] Sonitor, "Sanford Medical Center Fargo deploys Sonitor's Sense ultrasound-based RTLS platform", 2017 [online], [dostęp: 7.01.2019], Dostępny w Internecie: <https://www.sonitor.com/articles/2018/5/6/sanford-medical-center-fargo-deploys-sonitors-sense-ultrasound-based-rtls-platform>.
- [38] Microsoft, "Microsoft Indoor Localization Competition – IPSN 2018", 2018 [online], [dostęp: 7.01.2019], Dostępny w Internecie: <https://www.microsoft.com/en-us/research/event/microsoft-indoor-localization-competition-ipsn-2018/>.
- [39] Oppermann I., Hamalainen M., Iinatti J.: "UWB: Theory and Applications", John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, 2004.
- [40] Chang S., Wolf M., Burdick Joel W.: "Human detection and tracking via Ultra-Wideband (UWB) radar", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2010.
- [41] Chen Z., Liu Y., Li S., Wang G.: "Study on the multipath propagation characteristics of UWB signal for indoor lab environments", *IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, December 2016.
- [42] Gentile C. et al.: "Multipath and NLOS Mitigation Algorithms", *Geolocation Techniques*, Springer, New York, 2013.
- [43] Song Z., Jiang G., Huang C.: "A Survey on Indoor Positioning Technologies", *Theoretical and Mathematical Foundations of Computer Science*, Springer, pp. 198-206, Heidelberg, Germany, 2011.
- [44] Ijaz F., Yang H. K., Ahmad A. W., Lee Ch.: "Indoor Positioning: A Review of Indoor Ultrasonic Positioning systems", *15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*, March 2013.
- [45] Carter D. J., Silva B. J., Qureshi U. M., Hancke G. P.: "An Ultrasonic Indoor Positioning System for Harsh Environments", *44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 5215-5220, 2018.

- [46] McCarthy M. R., Muller H. L.: “RF Free Ultrasonic Positioning”, *Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pp. 79-85, 2003.
- [47] Holm S.: “Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength”, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, November 2012.
- [48] Kelly J., Sukhatme G. S.: “Visual-Inertial Sensor Fusion: Localization, Mapping and Sensor-to-Sensor Self-calibration”, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 30, no. 1, pp. 56-70, January 2011.
- [49] Kumar G. A. et al.: “A LiDAR and IMU Integrated Indoor Navigation System for UAVs and Its Application in Real-Time Pipeline Classification”, *Sensors*, vol. 17, no. 6, June 2017.
- [50] Shin Y. S., Park Y. S., Kim A.: “Direct Visual SLAM using Sparse Depth for Camera-LiDAR System”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2018.
- [51] Benzerrouk H., Nebylov A. V.: “Robust IMU/UWB integration for indoor pedestrian navigation”, *25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, 2018.
- [52] Yao L., Wu Y. W. A., Yao L., Liao Z. Z.: “An integrated IMU and UWB sensor based indoor positioning system”, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2017.
- [53] Miraglia G., Maleki K. N., Hook L. R.: “Comparison of two sensor data fusion methods in a tightly coupled UWB/IMU 3-D localization system”, *International Conference on Engineering, Technology and Innovation*, pp. 611-618, 2017.

INDOOR POSITIONING METHODS FOR SMALL AUTONOMOUS VEHICLES

Abstract. The estimation of their position by unmanned vehicles is crucial for successful reconnaissance, procurement and rescue missions in autonomous mode. Determining goals and mission checkpoints allows the platform operator, and also the decision-making algorithms, to take appropriate actions. The paper presents popular positioning methods in spaces where GNSS navigation signal is not available. The potential of using such technologies as UWB, US, INS or SLAM algorithms based on readings from LiDARs or cameras is discussed in the context of small land platforms that can perform specific tasks in an automated manner. The paper also discusses the solutions described in detail in the cited literature related to the subject of data fusion from various types of sensors, which ensures greater accuracy and reliability of the readings obtained.

Keywords: vehicle positioning, Indoor Position System (IPS), Ultra-Wideband (UWB), Ultrasound (US), Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), Inertial Navigation System (INS), Unmanned Ground Vehicle (UGV).