POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

Imię i nazwisko autora rozprawy: Piotr Rajchowski
Dyscyplina naukowa: Telekomunikacja

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Badanie i analiza dokładności estymacji położenia obiektów ruchomych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Research and Analysis Precision of Position Estimation of Moving Object in Hybrid Localization System

Promotor *podpis*	Drugi promotor *podpis*
dr hab. inż. Jacek Stefański, prof. nadzw. PG	
Promotor pomocniczy *podpis*	Kopromotor *podpis*
dr inż. Jarosław Sadowski	

Gdańsk, rok 2017

POLITECHNIKA GDAŃSKA

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Piotr Rajchowski

Ja, niżej podpisany, wyrażam zgodę/nie wyrażam zgody* na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Badanie i analiza dokładności estymacji położenia obiektów ruchomych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym

do celów naukowych lub dydaktycznych.[1]

Gdańsk, dnia ....

podpis doktoranta

Świadomy odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),[2] a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem dr hab. inż. Jackiem Stefańskim, prof. nadzw. PG, promotorem pomocniczym dr inż. Jarosławem Sadowskim.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.
Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia ....

podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany, wyrażam zgodę/nie wyrażam zgody* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczaniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia ....

podpis doktoranta

[1] Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

[2] Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Piotr Rajchowski

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Badanie i analiza dokładności estymacji położenia obiektów ruchomych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Research and Analysis Precision of Position Estimation of Moving Object in Hybrid Localization System

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Jacek Stefański, prof. nadzw. PG

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej: dr inż. Jarosław Sadowski

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polskim: radiolokalizacja, hybrydowy system lokalizacyjny, nawigacja inercyjna, technika ultraszerokopasmowa, lokalizacja wewnątrzbudynkowa

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: radio localization, hybrid localization system, inertial navigation, ultra-wideband, indoor localization

Streszczenie rozprawy w języku polskim: W niniejszej rozprawie dyskusji poddano dokładność lokalizacji poruszających się osób w środowiskach wewnątrzbudynkowych. Przedstawiono propozycję budowy hybrydowego systemu lokalizacyjnego, przeznaczonego do pracy w środowisku wewnątrzbudynkowym, w którym możliwe jest zwiększenie dokładności estymacji położenia poruszającej się osoby, integrując dane pozycyjne w postaci estymat położenia wyznaczonych z zastosowaniem algorytmu nawigacji inercyjnej z wynikami radiowych pomiarów odległości, również w przypadku dostępności mniej niż trzech węzłów referencyjnych. Efektywność zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych sprawdzono w trakcie badań symulacyjnych oraz pomiarowych, które przeprowadzono z użyciem urządzeń, wytworzonych podczas realizacji projektu badawczo-rozwojowego. Zebrano oryginalny materiał pomiarowy, jednocześnie sprawdzając efektywność funkcjonowania zaproponowanej metody w warunkach rzeczywistych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W uzupełnieniu do badań symulacyjnych i pomiarowych przeprowadzono także teoretyczną analizę możliwej dokładności zaproponowanej metody, w odniesieniu do jednego ze znanych w literaturze algorytmów radiolokalizacji, wyznaczając dolną granicę Cramera-Rao.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim: In this PhD thesis precision of position estimation of moving person in indoor environment was discussed. Author presented concept of hybrid localization system for indoor operation, that is able to increase the precision of position estimation of moving person by integrating data from an inertial navigation algorithm with radio distance measurements, also when less than three reference nodes are available. The effectiveness of proposed method of data integration was investigated during simulation and measurement studies carried out by using the devices made in the R&D project. It allowed to collect original measuring material, simultaneously checking the effectiveness of proposed method in real conditions. In addition, theoretical analysis of possible accuracy of proposed data integration method in hybrid localization system with respect to one of the radiolocation algorithm known in the literature, has been performed by determining the Cramer-Rao lower bound.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Pragnę podziękować wszystkim pracownikom
Katedry Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych
Politechniki Gdańskiej, a przede wszystkim promotorowi
dr hab. inż. Jackowi Stefańskiemu, prof. nadzw. PG
oraz promotorowi pomocniczemu
dr inż. Jarosławowi Sadowskiemu,
którzy okazali mi nieocenione
wsparcie podczas pracy nad niniejszą rozprawą.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Spis treści

Streszczenie 9
Abstract 10
Wykaz ważniejszych oznaczeń 11
Wykaz ważniejszych skrótów angielskich 15

Rozdział 1
Wprowadzenie 17
1.1. Uzasadnienie przeprowadzonych prac badawczych 18
1.2. Cel i teza rozprawy 21
1.3. Zawartość rozprawy 22

Rozdział 2
Charakterystyka hybrydowego systemu lokalizacyjnego 25
2.1. Opis nawigacji inercyjnej 25
2.1.1. Pozyskiwanie danych o parametrach ruchu osoby 27
2.1.2. Filtracja Kalmana 29
2.2. Radiolokalizacja w środowisku wewnątrzbudynkowym 30
2.2.1. Radiowe pomiary odległości według standardu IEEE 802.15.4-2011 30
2.2.2. Wyznaczanie położenia na podstawie radiowych pomiarów odległości 33
2.3. Hybrydowy system lokalizacyjny 33

Rozdział 3
Nowa metoda integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym 37
3.1. Cel i założenia zaproponowanego rozwiązania 37
3.2. System nawigacji inercyjnej 38
3.2.1. Algorytm detekcji spoczynku ZUPT 38
3.2.2. Algorytm nawigacji inercyjnej 39
3.2.3. Zwiększenie dokładności estymacji położenia osoby w osi OZ 47
3.2.4. Wyznaczanie początkowego kąta azymutu 50
3.3. Realizacja radiowych pomiarów odległości oraz wyznaczanie estymat położenia poruszającej się osoby 50

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3.3.1. Metoda realizacji radiowych pomiarów odległości w sieci z wieloma węzłami pomiarowymi ... 50
3.3.2. Opis algorytmu Foya do wyznaczania estymat położenia osoby ... 52
3.3.3. Wyznaczanie położenia węzłów referencyjnych ... 54
3.4. Integracja danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym ... 56
3.4.1. Przypadek nadokreśloności przy dostępnych co najmniej czterech węzłach referencyjnych ... 57
3.4.2. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych ... 58
3.4.3. Przypadek zredukowany przy dostępności mniej niż trzech węzłów referencyjnych ... 58

Rozdział 4

Badania symulacyjne efektywności pracy hybrydowego systemu lokalizacyjnego ... 67
4.1. Założenia projektowe modelu hybrydowego systemu lokalizacyjnego ... 67
4.2. Model systemu nawigacji inercyjnej ... 68
4.2.1. Badania eksperymentalne algorytmu nawigacji inercyjnej ... 68
4.2.2. Symulacja działania systemu nawigacji inercyjnej ... 71
4.3. Model symulujący realizację radiowych pomiarów odległości ... 73
4.3.1. Badania pomiarowe dokładności radiowych pomiarów odległości z zastosowaniem metody SDS-TWR ... 73
4.3.2. Symulacja wyników radiowych pomiarów odległości ... 78
4.4. Badania symulacyjne efektywności integracji danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym ... 79
4.4.1. Scenariusze badań symulacyjnych ... 79
4.4.2. Przypadek nadokreśloności przy dostępności czterech węzłów referencyjnych ... 81
4.4.3. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych ... 84
4.4.4. Przypadek zredukowany przy dostępności dwóch węzłów referencyjnych ... 87
4.4.5. Przypadek minimalny przy dostępności jednego węzła referencyjnego ... 89
4.5. Podsumowanie badań symulacyjnych ... 90

Rozdział 5

Prototyp hybrydowego systemu lokalizacyjnego ... 93
5.1. Konstrukcja prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego ... 93
5.1.1. Sposób wymiany danych w prototypie hybrydowego systemu lokalizacyjnego ... 95
5.1.2. Opis budowy modułu identyfikacji osobistej MIO ... 96
5.1.3. Opis budowy węzła referencyjnego WR ... 98

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

5.1.4. Stanowisko do rejestracji i prezentacji danych SRP 99
5.2. Oprogramowanie prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego 99
5.2.1 Oprogramowanie modułu identyfikacji osobistej MIO oraz węzłów referencyjnych WR 100
5.2.2. Oprogramowanie stanowiska SRP 100

Rozdział 6

Badania pomiarowe hybrydowego systemu lokalizacyjnego 103
6.1. Scenariusz badań pomiarowych 103
6.1.1. Środowisko badań pomiarowych hybrydowego systemu lokalizacyjnego 104
6.1.2. Stanowisko badawcze 104
6.1.3. Ocena dokładności uzyskiwanych wyników 107
6.2. Wyniki badań pomiarowych 108
6.2.1. Przypadek nadokreśloności przy dostępności czterech węzłów referencyjnych 109
6.2.2. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych 112
6.2.3. Przypadek zredukowany przy dostępności dwóch węzłów referencyjnych 114
6.2.4. Przypadek minimalny przy dostępności jednego węzła referencyjnego 118
6.2.5. Analiza przemieszczenia osoby w osi OZ 120
6.3. Podsumowanie badań pomiarowych 121

Rozdział 7

Analiza granicznej dokładności zaproponowanego rozwiązania 125
7.1. Dolna granica Cramera – Rao 125
7.2. Wyznaczenie dolnej granicy Cramera – Rao 127
7.2.1. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych 127
7.2.2. Przypadek zredukowanej liczby węzłów referencyjnych 127
7.2.3. Wyniki obliczeń 128
7.2.4. Nakład przetwarzania zaproponowanej metody 129

Podsumowanie 131
Spis literatury 135
Spis rysunków 143
Spis tabel 151

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Streszczenie

W niniejszej rozprawie dyskusji poddano dokładność lokalizacji poruszających się osób w środowiskach wewnątrzbudynkowych. W świetle bieżących oczekiwań służb państwowych, czy też podmiotów gospodarczych znajomość położenia osób wewnątrz budynków jest niezwykle ważna, lecz jego określenie jest problematyczne np. z racji utrudnionej propagacji sygnałów radiowych. W rozprawie przedstawiono propozycję budowy hybrydowego systemu lokalizacyjnego, przeznaczonego do pracy w środowisku wewnątrzbudynkowym, w którym możliwe jest zwiększenie dokładności estymacji położenia poruszającej się osoby, integrując dane pozycyjne w postaci estymat położenia wyznaczonych z zastosowaniem algorytmu nawigacji inercyjnej z wynikami radiowych pomiarów odległości, również w przypadku dostępności mniej niż trzech węzłów referencyjnych.

Efektywność zaproponowanej metody sprawdzono w trakcie badań symulacyjnych oraz pomiarowych. Opracowanie modeli symulacyjnych źródeł danych pomiarowych poprzedzono przeprowadzeniem analizy działania algorytmu nawigacji inercyjnej oraz radiowych pomiarów odległości realizowanych w szerokopasmowym interfejsie radiowym UWB (*Ultra-Wide Band*), w celu określenia charakteru i rodzaju występujących błędów w obu źródłach danych pozycyjnych. Analiza uzyskanych wyników posłużyła do opracowania dwóch modeli symulacyjnych stosowanych w trakcie sprawdzania efektywności zaproponowanej metody. Przeprowadzone w kolejnym etapie badania pomiarowe z użyciem urządzeń, wytworzonych podczas realizacji projektu badawczo-rozwojowego, umożliwiły zebranie oryginalnego materiału pomiarowego, jednocześnie sprawdzając efektywność funkcjonowania zaproponowanej metody w warunkach rzeczywistych.

W uzupełnieniu do badań symulacyjnych i pomiarowych przeprowadzono także teoretyczną analizę możliwej dokładności zaproponowanej metody, w odniesieniu do jednego ze znanych w literaturze algorytmów radiolokalizacji, wyznaczając dolną granicę Cramera-Rao.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Abstract

In PhD thesis precision of position estimation of moving person in indoor environment was discussed. In view of the current expectations of state services or business entities, knowledge about people location inside the buildings is extremely important, but its designation is problematic e.g. due to the propagation difficulties of a radio signals. In this thesis a concept of hybrid localization system for indoor operation was presented. The main advantage of the system is an ability to increase the precision of position estimation of moving person by integrating data from an inertial navigation algorithm with radio distance measurements, also when less than three reference nodes are available.

The effectiveness of proposed method was investigated during simulation and measurement studies. Development of simulation models was preceded by an analysis of operation of the inertial navigation algorithm and radio distance measurements realized in the UWB (*Ultra Wideband Broadband*) radio interface, to determine the character and distribution of errors occurring in both position data sources. Obtained results were used to develop two simulation models for checking effectiveness of proposed method. Research carried out in the next step, using the devices made during the R&D project, allowed to collect original measuring material, simultaneously checking the effectiveness of proposed method in real conditions.

In addition to simulation and measurement studies, theoretical analysis of possible accuracy of proposed data integration method in hybrid localization system, with respect to one of the radiolocation algorithm known in the literature, has been performed by determining the Cramer-Rao lower bound.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$\mathbf{A}$	macierz przejść filtru Kalmana
a_x, a_y, a_z	przyspieszenia liniowe w osiach OX, OY, OZ
d_i	odległość punktu od prostej
$\mathbf{d_{kor}}$	wektor korekcyjny w algorytmie Foya
d_{start_stop}	odległość punktu startu od punktu końca trasy zamkniętej
d_{WRn}	odległość wyznaczonej estymaty położenia do węzła referencyjnego
$\mathbf{d_x}$	wektor niepewności pomiarowych filtru Kalmana
$d_{x\ sym}$	symulowany radiowy pomiar odległości
g_t	przyspieszenie ziemskie
g_x, g_y, g_z	prędkości kątowe w osiach OX, OY, OZ
$\mathbf{H}$	macierz spajająca filtru Kalmana
$\mathbf{h_{Foy}}$	wektor różnic odległości w algorytmie Foya
h_{ins}	przemieszczenie w osi OZ wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej
h_{wys}	względna wysokość wyznaczona na podstawie pomiaru różnicy ciśnienia atmosferycznego
$\mathbf{I_F}$	macierz informacyjna Fishera
$\mathbf{K}$	macierz wzmocnienia filtru Kalmana
m_x, m_y, m_z	składowe ziemskiego pola magnetycznego w osiach OX, OY, OZ
$\mathbf{P^+}$	macierz kowariancji błędów predykcji filtru Kalmana
$\mathbf{P^-}$	macierz kowariancji błędów filtracji filtru Kalmana
P_{ref}	referencyjne ciśnienie atmosferyczne
P_n	ciśnienie atmosferyczne w punkcie pomiarowym
P_x, P_y, P_z	estymaty współrzędnych x, y, z poruszającej się osoby wyznaczane w procesie filtracji Kalmana
$\mathbf{Q}$	macierz kowariancji procesu filtracji Kalmana
$\mathbf{q}$	wektor kwaternionów
$\mathbf{R_b}$	macierz rotacji

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

R_i	odległość pomiędzy bieżącą estymatą położenia, a danym węzłem referencyjnym w algorytmie Foya
r_l	pomiarowa odległość do danego węzła referencyjnego w algorytmie Foya
$RMSE_{CRLB}$	teoretyczny błąd RMSE algorytmu lokalizacyjnego odpowiadający dolnej granicy Cramera–Rao
$RMSE_{ini}$	błąd RMSE pomiędzy estymatami położenia wyznaczonymi z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, a estymatami położenia wstępnie skorygowanymi z użyciem zaproponowanej metody
$RMSE_{iter}$	błąd RMSE pomiędzy estymatami położenia wyznaczonymi z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, a estymatami położenia wstępnie skorygowanymi z użyciem zaproponowanej metody
$RMSE_{rad}$	błąd RMSE pomiędzy estymatami położenia wyznaczonymi z użyciem algorytmu Foya, a trasą referencyjną
$RMSE_{kor}$	błąd RMSE pomiędzy estymatami położenia wyznaczonymi w procesie integracji danych pozycyjnych, a trasą referencyjną
$RMSE_{st}$	błąd RMSE pomiędzy estymatami położenia wyznaczonymi z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, a trasą referencyjną
$\mathbf{R_q}$	macierz cosinusów
T_{prop}	czas propagacji sygnału radiowego podczas radiowego pomiaru odległości
T_s	okres próbkowania przyspieszeń liniowych, prędkości kątowych, składowych ziemskiego pola magnetycznego
T_{sp}, T_{sr}, T_{sf},	czasy nadania pakietów podczas radiowego pomiaru odległości
T_{rp}, T_{rr}, T_{rf}	czasy odebrania pakietów podczas radiowego pomiaru odległości
V_x, V_y, V_z	składowe x, y, z prędkości poruszającej się osoby estymowane w procesie filtracji Kalmana
$\mathbf{x}^+$	wektor stanu filtru Kalmana wyznaczony w etapie predykcji
$\mathbf{x}^-$	wektor stanu filtru Kalmana wyznaczony w etapie korekcji
$\hat{x}_i, \hat{y}_i$	współrzędne estymat położenia osoby wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej
$\hat{x}_{Foy\,i}, \hat{y}_{Foy\,i}$	współrzędne estymat położenia osoby wyznaczone z użyciem algorytmu Foya

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$x_{okr\ i}$, $y_{okr\ i}$	współrzędne estymat położenia osoby wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej umieszczone na okręgach stałej odległości do węzła referencyjnego
$x_{WR\ i}$, $y_{WR\ i}$	współrzędne położenia węzłów referencyjnych
$\mathbf{z}$	wektor pomiarowy filtru Kalmana
α	błąd kursu poruszającej się osoby względem trasy referencyjnej
γ	średni przyrostowy błąd kąta orientacji kolejno wyznaczanych estymat położenia
σ_{INS}	odchylenie standardowe średnich błędów orientacji kolejno wyznaczanych estymat położenia
σ_{dyst}	odchylenie standardowe symulowanego błędu przebytej odległości
σ_{RPO}	odchylenie standardowe radiowego pomiaru odległości
$\frac{1}{\sigma^2}$	informacja Fischera

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wykaz ważniejszych skrótów angielskich

ABC	Assumption Based Coordinates
AES	Advanced Encryption Standard
BPM	Burst Position Modulation
BPSK	Binary Phase Shift Keying
DOP	Dilution Of Precision
GNSS	Global Navigation Satellite System
GLRT	Generalized Likelihood Ratio Test
GPIO	General Purpose Input-Output
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
LOS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
MEMS	Micro Electro Mechanical System
NLOS	Non-Line of Sight
PCB	Printed Circuit Board
PHR	Physical Header
RMSE	Root Mean Square Error
RTLS	Real Time Location Systems
SDS-TWR	Symmetric Double-Sided Two Way Ranging
SFD	Start of Frame Delimiter
SPI	Serial Peripheral Interface
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference of Arrival
TWR	Two Way Ranging
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
UHF	Ultra-High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra-Wide Band
ZUPT	Zero Velocity Update

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rozdział 1
Wprowadzenie

Znajomość położenia lub parametrów ruchu osób wewnątrz budynków może znaleźć różnorodne zastosowania w rozwiązaniach komercyjnych. Dane o rozmieszczeniu osób w obrębie sklepu wielkopowierzchniowego czy muzeum pozwalają na dostosowanie treści lub formy informacji reklamowych o oferowanych produktach, celem zwiększenia zainteresowania klientów ofertą sklepu, czy dostarczenie multimedialnych informacji o oglądanych właśnie eksponatach. Zupełnie odmienny może być cel określania położenia funkcjonariuszy służb państwowych takich jak policja, staż pożarna oraz straż graniczna: detekcja ruchu i rejestracja tras ruchu poszczególnych funkcjonariuszy może służyć dokumentowaniu wykonywanych czynności służbowych, ale podstawowe zastosowanie urządzeń i systemów do określania położenia funkcjonariuszy w środowiskach wewnątrzbudynkowych należy upatrywać w poprawie bezpieczeństwa. W przypadku wystąpienia jakichkolwiek sytuacji nietypowych bądź niebezpiecznych, w których funkcjonariusze mogą wymagać pomocy, szybkie określenie położenia osób będących zagrożonych i osób, które tą pomoc mogą zaoferować, może skutkować znacznym skróceniem czasu reakcji i poprawą efektywności wsparcia. Poza bezpośrednią poprawą bezpieczeństwa, stosowanie technik lokalizacyjnych w realiach pracy funkcjonariuszy służb specjalnych zwiększa komfort realizacji działań operacyjnych poprzez samą świadomość nadzoru i możliwości szybkiego uzyskania pomocy w sytuacjach zagrożenia bezpieczeństwa.

Obecnie powszechnie stosowaną metodą określania położenia w terenie otwartym jest wykorzystanie odbiorników satelitarnych systemów lokalizacyjnych GNSS (*Global Navigation Satellite System*), takich jak GPS (*Global Positionin System*), GLONASS (*Globalnaja Nawigacionnaja Sputnikowaja Sistiema*) czy Galileo. Ponadto, określenie położenia terminali ruchomych zostało przewidziane w specyfikacji wielu systemów telefonii komórkowej, takich jak np. LTE (*Long Term Evolution*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) lub CDMA2000. Niestety oba te rozwiązania mają zasadniczą

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wadę, jaką jest ograniczenie zakresu stosowania praktycznie wyłącznie do terenów otwartych. W przypadku satelitarnych systemów lokalizacyjnych ograniczenie to wynika z dwóch czynników. Po pierwsze, poziomy mocy sygnałów z satelitów, odbieranych na powierzchni Ziemi, są na tyle niskie, że dodatkowe tłumienie propagacyjne wynikające z wnikania sygnałów do wnętrz budynków w znacznym stopniu uniemożliwia ich detekcję. Z drugiej strony dokładność określania położenia z użyciem systemów satelitarnych, zwłaszcza w odniesieniu do wysokości, jest niewystarczająca w zastosowaniach wewnątrzbudynkowych, gdyż nie pozwala nawet na określenie kondygnacji, na której znajduje się odbiornik lokalizacyjny. Określenie położenia terminala ruchomego przy użyciu sygnałów stacji bazowych telefonii komórkowej jest możliwe tylko w wariancie dwuwymiarowym, bez estymacji wysokości, a dokładność estymowanego położenia nie przekracza kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, co w zastosowaniach wewnątrzbudynkowych jest wynikiem zdecydowanie niezadowalającym. Stąd do określania położenia osób we wnętrzach budynków oraz innych środowiskach zamkniętych, w których globalne systemy określania położenia metodami radiowymi nie mogą być stosowane, należy budować systemy dedykowane, dostosowane do specyfiki środowiska pacy i uwzględniające ograniczenia metod pomiaru położenia w takich warunkach [42, 45, 70, 87, 96, 106].

1.1. Uzasadnienie przeprowadzonych prac badawczych

Systemy i urządzenia do określania położenia osób w środowiskach zamkniętych są od wielu lat przedmiotem zainteresowania zarówno instytucji badawczych jak i przemysłu. Analizując konstrukcję i zasadę działania urządzeń eksperymentalnych, budowanych przez uczelnie i instytuty badawcze [15, 18, 29, 45], jak też systemów dostępnych w formie komercyjnych produktów [34, 39, 66] można wytypować dwie, najczęściej stosowane techniki pozyskiwania informacji o położeniu lub przemieszczeniu monitorowanych osób w warunkach wewnątrzbudynkowych:

- nawigację zliczeniową bazującą na czujnikach inercyjnych do pomiaru przemieszczenia i zmiany orientacji;
- radiolokalizację.

Nawigacja zliczeniowa [62] to ogólna nazwa metody wyznaczania położenia obiektu, na odstawie rejestracji drogi (przemieszczenia) przebytej od punktu o wcześniej znanych współrzędnych. Wśród różnych metod określania przemieszczenia, dużym zainteresowaniem

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

cieszą się systemy oparte na czujnikach inercyjnych (bezwładnościowych), w których systemy trójosiowych czujników przyspieszeń liniowych (akcelerometrów) oraz zmiany orientacji (żyroskopów) pozwalają na obliczenie przebytej drogi w sposób niezależny, wyłącznie na bazie własnych pomiarów realizowanych przez wspomniany zestaw czujników umieszczony w terminalu ruchomym. Moduły nawigacji inercyjnej są od lat stosowane w lotnictwie i marynarce do autonomicznego określania położenia samolotów oraz okrętów podwodnych. Przy zastosowaniu wysokiej klasy podzespołów, jak np. żyroskopy laserowe, możliwe jest uzyskanie wysokiej dokładności i stabilności pracy systemu nawigacji inercyjnej. Niestety możliwości miniaturyzacji zaawansowanych czujników inercyjnych są bardzo ograniczone, skutkiem czego w systemach do lokalizacji wewnątrzbudynkowej najczęściej używane są miniaturowe czujniki typu MEMS (*Micro Electro Mechanical System*), o znacznie gorszych parametrach jakościowych. Określenie położenia i przemieszczenia osób z wykorzystaniem czujników MEMS mimo wysokiej dokładności krótkookresowej powoduje konieczność estymacji i kompensacji błędów występujących w danych pomiarowych, które bez tejże kompensacji powodują w dłuższym okresie czasu generowanie narastających i nieograniczonych błędów estymowanego położenia.

Z kolei określenie położenia w warunkach wewnątrzbudynkowych przy użyciu fal radiowych wymaga rozmieszczenia w danym obiekcie zestawu węzłów odniesienia (zwanych również węzłami referencyjnymi) o znanych współrzędnych oraz realizacji serii pomiarów wybranych parametrów fal radiowych (poziom mocy odbieranego sygnału, czas propagacji, faza sygnału, kąt nadejścia sygnału) podczas transmisji sygnałów z terminala ruchomego do nieruchomych węzłów odniesienia lub w relacji przeciwnej. Konieczność stosowania węzłów odniesienia powoduje, że określenie położenia lub przemieszczenia nadzorowanej osoby nie może być realizowane w sposób autonomiczny przez pojedynczy terminal pomiarowy, lecz wymaga zastosowania pewnej infrastruktury zainstalowanej na stałe w budynku lub rozmieszczanej tymczasowo. Do jednoznacznego obliczenia położenia węzła pomiarowego w dwóch wymiarach konieczne jest zrealizowanie pomiarów z użyciem trzech węzłów odniesienia, a przy lokalizacji trójwymiarowej minimalna liczba węzłów odniesienia biorących udział w określaniu położenia wzrasta do czterech. Ponadto, określenie położenia w warunkach wewnątrzbudynkowych na podstawie pomiarów wybranych parametrów sygnałów radiowych jest obarczone błędami wynikającymi z wielu czynników, spośród których wymienić można:

- błędy metody pomiaru parametrów sygnałów radiowych, np. rozdzielczość pomiaru poziomu mocy lub kąta nadejścia sygnału;

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

- błędy związane z niejednoznacznym lub niedokładnym powiązaniem parametrów sygnałów radiowych z zależnościami geometrycznymi w systemie, np. niedokładna predykcja poziomu mocy sygnału jako funkcji odległości pomiędzy węzłem pomiarowym, a węzłami odniesienia;
- błędy wprowadzane przez środowisko propagacji fal radowych, w tym przede wszystkim błędy pomiarów czasu nadejścia sygnału wskutek efektu propagacji wielodrogowej oraz blokowania transmisji sygnałów bezpośrednich przez ściany czy stropy;
- błędy wynikające z zależności geometrycznych w systemie lokalizacyjnym, spowodowane niekorzystnym rozmieszczeniem węzłów odniesienia, które w efekcie nawet dla małych błędów pomiaru parametrów odbieranych sygnałów powoduje duże błędy określanego położenia, tzw. wysoka wartość parametru DOP (*Dilution of Precission*).

Błędy te mają częściowo charakter systematyczny, a częściowo losowy, natomiast w przeciwieństwie do systemów inercyjnych, można przyjąć, że własności statystyczne źródeł błędów określania położenia metodami radiowymi nie ulegają zmianie w czasie. Pomimo, że w krótkim przedziale obserwacji określenie położenia z użyciem algorytmów radiolokalizacyjnych charakteryzuje się ograniczoną dokładnością (w rzeczywistych systemach w warunkach wewnątrzbudynkowych może to być dokładność rzędu dziesiątek centymetrów do nawet kilku metrów), to nie ulega ona pogorszeniu z upływem czasu. Można zatem stwierdzić, że pod względem charakteru błędów określania położenia, wewnątrzbudynkowe systemy radiolokalizacyjne są rozwiązaniem komplementarnym do systemów nawigacji inercyjnej. Naturalna zatem jest tendencja do integracji obu źródeł danych pozycyjnych w hybrydowych systemach do lokalizacji wewnątrzbudynkowej, którą można zauważyć w pracach badawczych licznych ośrodków naukowych [15, 18, 29, 45, 69, 99]. W takim przypadku rozwiązaniem oczywistym jest obliczanie niezależnych estymat położenia terminala ruchomego na podstawie danych z czujników inercyjnych i na podstawie parametrów sygnałów radiowych, a następnie wyznaczenie wynikowych współrzędnych położenia terminala ruchomego stosując integrację danych z obu źródeł w procesie filtracji Kalmana [31, 102, 105]. Pomimo dobrych właściwości pod względem dokładności określania położenia, taki sposób integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym nie eliminuje istotnej wady radiolokalizacji, jaką jest konieczność realizacji pomiarów parametrów sygnałów radiowych w relacji do lub od przynajmniej trzech (w wariancie dwuwymiarowym) lub czterech

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

(w wariancie trójwymiarowym) węzłów odniesienia. W środowiskach wewnątrzbudynkowych, a w szczególności w obiektach o utrudnionej propagacji fal radiowych jak np. pomieszczenia o grubych ścianach czy pokłady statków o konstrukcji stalowej, zapewnienie możliwości realizacji pomiarów radiowych do przynajmniej trzech węzłów odniesienia wymaga instalacji ich dużej liczby, co jest niepraktyczne. Z kolei ograniczenie liczby węzłów odniesienia może skutkować częstym występowaniem przerw w określaniu położenia metodą radiową, a co za tym idzie: czasowym brakiem możliwości kompensacji narastających błędów danych pozycyjnych z czujników inercyjnych w systemie hybrydowym. Mając na uwadze to ograniczenie zakresu stosowalności integracji danych inercyjnych i danych o położeniu określanym z użyciem algorytmów radiolokalizacyjnych w hybrydowym systemie lokalizacji wewnątrzbudynkowej, w niniejszej pracy opisano propozycję metody integracji danych, która pozwoli na realizację ciągłej korekty błędów danych z czujników inercyjnych nawet wtedy, gdy terminal ruchomy będzie w stanie realizować pomiary parametrów sygnałów radiowych w relacji do/od tylko dwóch, a nawet jednego węzła odniesienia. Oznacza to, że zaproponowana metoda może zostać użyta w warunkach, gdy typowy sposób integracji danych pozycyjnych z zastosowaniem filtracji Kalmana nie może być implementowany. Taki scenariusz zastosowania hybrydowego systemu lokalizacyjnego będzie w dalszej części rozprawy zwany przypadkiem ze zredukowaną liczbą węzłów referencyjnych [42, 96, 45, 56, 72, 77, 87, 99, 107, 109, 117].

1.2. Cel i teza rozprawy

Za cel prowadzonych prac badawczych przyjęto opracowanie rozwiązania algorytmicznego, umożliwiającego integrację danych pozycyjnych w hybrydowym systemie do lokalizacji osób w środowisku wewnątrzbudynkowym, w przypadku niespełnienia warunku dostępności wyników radiowych pomiarów odległości do co najmniej trzech węzłów referencyjnych.

W świetle powyższego, sformułowano następującą tezę niniejszej rozprawy doktorskiej: **możliwe jest zwiększenie dokładności estymacji położenia poruszających się osób w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, integrującym rozwiązanie inercyjne z radiowymi pomiarami odległości ze zredukowaną liczbą węzłów referencyjnych.**

W tym miejscu warto jeszcze raz wspomnieć, że pod pojęciem zredukowanej liczby węzłów referencyjnych rozumieć należy przypadek, gdy terminal ruchomy w systemie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

lokalizacji hybrydowej jest w stanie w danej chwili czasu realizować radiowe pomiary odległości tylko do dwóch, bądź jednego węzła odniesienia.

Aby potwierdzić słuszność postawionej tezy konieczne było wykonanie prac badawczych mających na celu określenie parametrów statystycznych błędów określania położenia z użyciem algorytmów nawigacji inercyjnej oraz błędów realizowanych radiowych pomiarów odległości, na podstawie których zdefiniowano funkcjonowanie zaproponowanej metody.

Okolicznościami sprzyjającymi prowadzeniu prac symulacyjnych i eksperymentalnych była realizacja w Katedrze Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych Politechniki Gdańskiej projektu badawczo – rozwojowego pt. *System i urządzenia do zdalnego monitoringu położenia osób w środowiskach zamkniętych SALON*, nr DOBR-BIO4/058/13045/2013, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. W trakcie realizacji tego projektu analizie poddano różne algorytmy i metody monitorowania położenia osób w środowiskach zamkniętych i stwierdzono, że dostępne znane rozwiązania radiolokalizacyjne oraz hybrydowe zakładają korzystanie z danych radiowych w warunkach, w których możliwe jest określenie na płaszczyźnie położenia z użyciem radiowych pomiarów odległości przy dostępności przynajmniej trzech węzłów referencyjnych. Nie spotkano się z rozwiązaniem wykorzystującym mniejszą od trzech liczbę węzłów referencyjnych. Na podstawie zebranych wniosków zaproponowano nowe rozwiązanie niestosowane w systemach hybrydowych, łączące radiowe pomiary odległości z wynikami działania algorytmu nawigacji inercyjnej w sposób umożliwiający integrację danych z obu źródeł nawet, gdy terminal ruchomy realizuje radiowe pomiary odległości do dwóch lub zaledwie jednego węzła odniesienia. Działanie zaproponowanej metody zostało sprawdzone w trakcie badań pomiarowych z wykorzystaniem wykonanego w ramach projektu badawczo-rozwojowego prototypu elementów hybrydowego systemu lokalizacyjnego [81].

1.3. Zawartość rozprawy

Opis przeprowadzonych prac badawczych, dotyczących poprawy jakości pracy hybrydowego systemu lokalizacji wewnątrzbudynkowej, stosując integrację danych pozycyjnych w postaci estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej z wynikami radiowych pomiarów odległości zawarto w siedmiu rozdziałach niniejszej rozprawy.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W rozdziale drugim przedstawiono hybrydowy system lokalizacyjny, jako narzędzie do wyznaczania położenia poruszającej się osoby w środowisku wewnątrzbudynkowym. Opisano funkcjonowanie algorytmu nawigacji inercyjnej oraz zastosowaną metodę realizacji radiowych pomiarów odległości oraz scharakteryzowano problem dokładności wyznaczania estymat położenia. Przedstawiono metody zwiększenia dokładności estymat położenia, wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, wymagające wprowadzenia dodatkowych źródeł danych o położeniu.

Rozdział trzeci zawiera opis zaproponowanej, nowej metody integracji danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym łączącej rozwiązania nawigacji inercyjnej z radiowymi pomiarami odległości.

Rozdział czwarty zawiera opis badań dokładności radiowych pomiarów odległości oraz estymacji położenia z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej w środowisku wewnątrzbudynkowym. Analiza uzyskanych wyników posłużyła do opracowania dwóch modeli symulacyjnych pozwalających na generowanie danych odpowiadających, pod względem rozkładów statystycznych i charakteru błędów, zachowaniu się czujników inercyjnych i modułów UWB podczas symulowanego użycia tych elementów jako składowych hybrydowego systemu lokalizacyjnego.

Rozdział piąty zawiera opis prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego. Przedstawiono zrealizowane stanowisko badawcze, w kontekście urządzeń i oprogramowania, umożliwiające prowadzenie badań hybrydowego systemu lokalizacyjnego w warunkach rzeczywistych jak i laboratoryjnych.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki badań pomiarowych przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych. Przyjęty scenariusz testów był zbliżony do wcześniej wykonanych badań symulacyjnych, aby możliwe było porównanie stopnia zwiększenia dokładności estymat położenia osób wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej przy zastosowaniu opracowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym.

W rozdziale siódmym rozprawy analizie poddano zaproponowaną metodę w aspekcie minimalnego, teoretycznego błędu wyznaczanych estymat położenia poruszającej się osoby wyznaczając dolną granicę Cramera – Rao. Uzyskane wyniki porównano z powszechnie znaną w literaturze metodą obliczania pozycji w systemie radiolokalizacyjnym z użyciem algorytmu Foya. Przedstawiono również analizę nakładu przetwarzania poszczególnych etapów działania algorytmu opracowanej metody.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W zakończeniu niniejszej rozprawy podsumowano wyniki wykonanych badań symulacyjnych i pomiarowych, przeprowadzonych w warunkach wewnątrzbudynkowych, wraz z wykazaniem głównych osiągnięć autora niniejszej rozprawy, wskazując 10 publikacji dokumentujących jego dorobek naukowy.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rozdział 2

Charakterystyka hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Mianem hybrydowego systemu lokalizacyjnego określa się rozwiązania integrujące dwie lub więcej metod wyznaczania położenia monitorowej osoby. Realizacja niezależnych pomiarów różnych wielkości fizycznych, o odmiennym charakterze i rozkładach statystycznych błędów pomiarowych, ma na celu ich częściową kompensację, a w efekcie minimalizację błędów określania końcowych estymat położenia terminala ruchomego.

W niniejszej rozprawie analizie poddano hybrydowy system lokalizacyjny do monitorowania osób poruszających się w środowisku wewnątrzbudynkowym, w którym terminal użytkownika zwany modułem identyfikacji osobistej MIO określa swoje położenie na podstawie danych o przemieszczeniu z czujników inercyjnych oraz odległościach do węzłów referencyjnych WR pomierzonych metodą radiową. Opisano sposób działania każdej z użytych metod wyznaczania położenia, jednocześnie analizując ich ograniczenia.

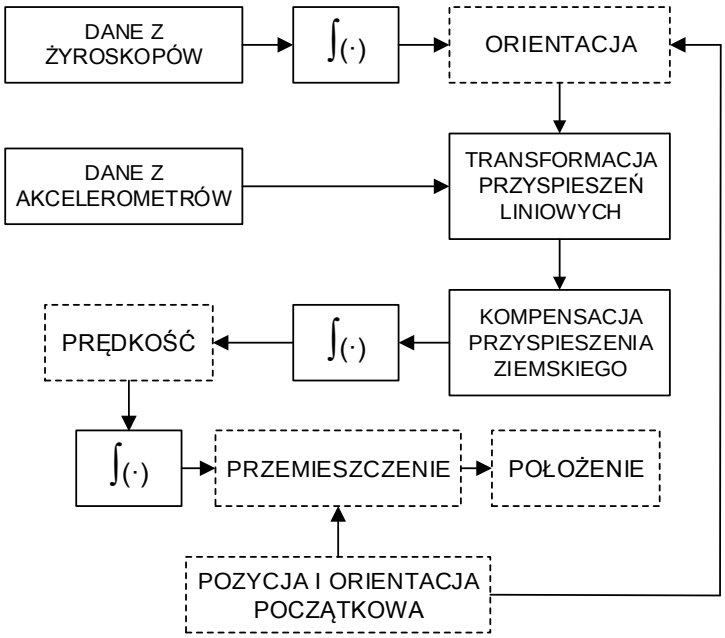
2.1. Opis nawigacji inercyjnej

Nawigacja inercyjna, będąca jednym z rodzajów nawigacji zliczeniowej, umożliwia wyznaczenie przemieszczenia obiektu, w tym np. osoby, w zadanej przestrzeni, na podstawie przebytej drogi obliczonej w oparciu o pomiary przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych, których doznawał element pomiarowy podczas ruchu pomiędzy dwoma punktami obserwacji. W celu rejestracji parametrów ruchu obligatoryjne jest umieszczenie na monitorowanym obiekcie jednostki pomiarowej, posiadającej trójosiowe akcelerometry oraz żyroskopy [24, 29]. Dodatkowo, celem zorientowania wyznaczonego przemieszczenia względem płaszczyzny Ziemi stosowane są magnetometry, dokonujące pomiaru składowych ziemskiego pola magnetycznego [32, 39, 68]. Konstrukcja jednostki pomiarowej zwykle oparta jest na tzw. modułach inercyjnych, zawierających w swojej strukturze wspomniane wcześniej czujniki inercyjne. [5, 32, 46, 51, 63].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Moduł inercyjny jest urządzeniem realizującym jedynie pomiary parametrów ruchu. Celem wyznaczenia przemieszczenia poruszającej się osoby konieczne jest zaimplementowanie algorytmów nawigacji inercyjnej [65, 66,67].

W dalszej części rozprawy, rozważaniom poddano algorytm pracy bezkardanowej nawigacji inercyjnej. Charakteryzuje się ona brakiem konieczności specjalnego montażu żyroskopów w czujniku inercyjnym, aby uzyskać prawidłową informację o przyspieszeniach i prędkościach monitorowanego obiektu. Pomiary realizowane są z zastosowaniem zespołu czujników inercyjnych, w postaci akcelerometrów i żyroskopów, zamontowanych nieruchomo względem tego obiektu. Nieustannie przeprowadzana jest analiza jego bieżącej orientacji w celu prawidłowego przeliczania przyspieszeń i prędkości, pomierzonych z użyciem modułu inercyjnego, w danym układzie odniesienia powiązanym z danym obiektem na przyspieszenia i prędkości wyrażone w globalnym nieruchomym układzie współrzędnych [39, 51]. Na rys. 2.1 przedstawiono schemat blokowy operacji przetwarzania danych, które prowadzą do wyznaczenia przemieszczenia i położenia lokalizowanego obiektu w systemie bezkardanowej nawigacji inercyjnej.



Rys. 2.1. Proces przetwarzania danych w algorytmie bezkardanowej nawigacji inercyjnej.

Na rys. 2.1 widoczne jest, że podstawową operacją matematyczną wykonywaną w algorytmie nawigacji inercyjnej jest całkowanie w dziedzinie czasu przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych. Jednakże bazowanie jedynie na operacjach całkowania utrudnia

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zachowanie długookresowej dokładności systemu [4, 5, 46]. Występujące błędy zera, skali oraz szum czujników prowadzą do pojawienia się błędów wyznaczanego położenia, które przyrastają w czasie w sposób nieograniczony [39, 66, 67, 68]. Kolejnym z problemów jest wyznaczanie orientacji obiektu i transformacja danych pomiarowych do globalnego układu współrzędnych. Wykorzystanie do tego celu tzw. kątów Eulera, opisujących wzajemną orientację inercyjnego i ziemskiego układu współrzędnych, jest niewystarczające. Występujące niejednoznaczności i nieokreśloności funkcji trygonometrycznych dla pewnych charakterystycznych kątów obrotu, np. 90^o, prowadzą do błędnej estymacji położenia. Rozwiązaniem jest stosowanie opisu orientacji modułu inercyjnego w postaci kwaternionów, będących rozszerzeniem ciała liczb zespolonych, które to jednoznacznie opisują orientację obiektu w przestrzeni trójwymiarowej przez nadokreślony zestaw parametrów [39, 66, 68].

Dodatkową operacją, która musi być realizowana w systemie nawigacji inercyjnej jest kompensowanie wspomnianych narastających błędów estymacji położenia wynikających z wielokrotnego całkowania danych pomiarowych obarczonych błędami systematycznymi. Sposób realizacji tego zadania jest zależny przede wszystkim od jakości zastosowanych czujników inercyjnych, wymogów odnośnie dokładności lokalizowania, ale również od charakteru i dynamiki ruchu obiektu, którego położenie ma być estymowane. W przypadku systemu do określania położenia osób, możliwe jest estymowanie i kompensowanie błędów danych pomiarowych na podstawie detekcji chwil bezruchu. Stopy człowieka podczas chodu czy biegu są zatrzymywane na krótki okres czasu, który można wykorzystać do pomiaru korygującego wspomniane błędy [23, 29, 32, 39, 51, 63, 66].

2.1.1. Pozyskiwanie danych o parametrach ruchu osoby

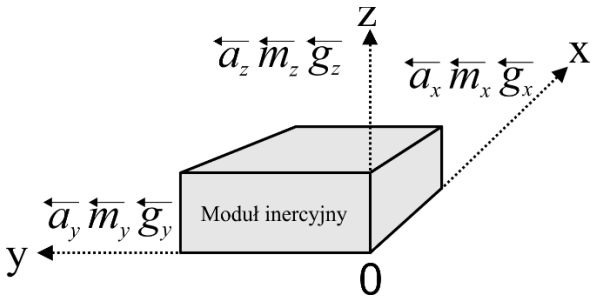
Z technicznego punktu widzenia rejestracja parametrów ruchu poruszającej się osoby przy użyciu autonomicznej jednostki pomiarowej jest procesem trudnym. Konieczne jest dokonanie pomiaru wielkości nieelektrycznych, z dokładnością wystarczającą do odtworzenia zarejestrowanego przemieszczenia. Podstawową grupą urządzeń przeznaczoną do tego typu zastosowań są czujniki inercyjne typu MEMS (*Microelectromechanical System*). Są to urządzenia o prostej konstrukcji oraz niskim koszcie wykonania. Dodatkowo charakteryzują się niewielkimi wymiarami fizycznymi, co w zastosowaniach do monitorowania położenia osób jest istotne.

Grupą czujników wymaganą do estymowania przemieszczenia osoby są trójosiowe akcelerometry oraz żyroskopy, dokonujące pomiarów przyspieszeń liniowych oraz prędkości

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

kątowych. Dodatkowo, w celu geograficznego zorientowania układu odniesienia często stosowane są magnetometry, rejestrujące składowe wektora ziemskiego pola magnetycznego. Parametrem określającym liczbę mierzonych wielkości są tzw. stopnie swobody. Każdy ze stopni swobody określa pomiar jednej niezależnej wielkości w danej osi układu odniesienia. Czujniki inercyjne są zazwyczaj umieszczane w tzw. module inercyjnym.

Na rys. 2.2 przedstawiono ułożenie osi układu odniesienia w stosunku do przykładowego modułu inercyjnego. Zaznaczono zwroty mierzonych wielkości przyspieszeń liniowych (a_x, a_y, a_z), prędkości kątowych (g_x, g_y, g_z) i składowych wektora ziemskiego pola magnetycznego (m_x, m_y, m_z). Moduł inercyjny często zbudowany jest jako układ cyfrowy, posiadający w swojej strukturze przetworniki analogowo-cyfrowe z wejściami napięciowymi oraz mikrokontroler. Dzięki takiej konstrukcji sprzętowej, producent układu w oprogramowaniu mikrokontrolera może zaimplementować cyfrowe filtry i algorytmy korekcyjne, których zadaniem jest minimalizacja błędów pomiarowych czujników inercyjnych. Układy te posiadają także możliwość programowej konfiguracji np. częstotliwości próbkowania, czy też zakresu pomiarowego czujników inercyjnych. Wykorzystanie tzw. cyfrowych modułów inercyjnych upraszcza implementowane algorytmy nawigacji inercyjnej oraz odciąża obliczeniowo główny mikrokontroler odpowiedzialny za wyznaczenie estymat położenia monitorowanej osoby [3, 4, 5, 24].



Rys. 2.2. Przykładowy moduł inercyjny z oznaczonymi mierzonymi wielkościami fizycznymi.

W opisywanych w literaturze rozwiązaniach często sosowane są dodatkowe źródła danych o położeniu monitorowanego obiektu. Jednym z nich jest czujnik ciśnienia atmosferycznego, dzięki któremu możliwe jest dokonanie pomiaru względnej zmiany ciśnienia w funkcji czasu, która, o ile nie jest efektem zmian pogodowych, pozwala na obliczenie przemieszczenia w osi OZ. W takim przypadku jest on kolejnym stopniem swobody układu pomiarowego [31, 32, 111].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2.1.2. Filtracja Kalmana

Filtrację Kalmana należy rozumieć jako adaptacyjne estymowanie wektora stanu analizowanego systemu dyskretnego w danej chwili czasu, na podstawie poprzednio dokonanych pomiarów. Celem stosowania filtracji Kalmana w systemie lokalizacyjnym jest minimalizacja uzyskiwanych błędów estymat położenia lokalizowanego obiektu na podstawie danych wejściowych o statystycznie niezależnym charakterze błędów. W uogólnieniu filtr Kalmana realizuje naprzemiennie operacje predykcji i korekcji wartości zmiennych losowych zawartych w wektorze stanu [27, 31, 40, 105].

Faza predykcji polega na oszacowaniu nowych wartości elementów wektora stanu $\mathbf{x}_n^+$, w kroku *n* oraz macierzy kowariancji błędów predykcji $\mathbf{P}_n^+$ na podstawie dostarczonych danych pomiarowych i estymat parametrów analizowanego systemu wyznaczonych w poprzednich krokach *n-1*:

$$\mathbf{x}_n^+ = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}_{n-1}^-, \tag{2.1}$$

$$\mathbf{P}_n^+ = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}_{n-1}^- \cdot \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \tag{2.2}$$

gdzie **A** jest tzw. macierzą przejścia, **Q** macierzą kowariancji procesu filtracji, $\mathbf{P}_{n-1}^-$ macierzą kowariancji błędów filtracji. W wektorze stanu może być zawarta np. estymata położenia poruszającej się osoby wyznaczona na podstawie wyników niezależnego działania różnych metod lokalizacyjnych.

Faza korekcji wektora stanu poprzedzona jest wyznaczeniem macierzy wzmocnienia filtru $\mathbf{K}_n$, zawierającej estymowane współczynniki wagowe wyznaczanej korekty dla bieżącego stanu filtru

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_n^+ \cdot \mathbf{H}^T \cdot \left(\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_n^+ \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}\right)^{-1}, \tag{2.3}$$

gdzie **R** jest macierzą kowariancji pomiarów, a **H** macierzą spajającą.

Podczas fazy korekcji wyznaczane są wartości elementów wektora stanu $\mathbf{x}_n^-$, na podstawie nowych pomiarów oraz wartości elementów macierzy $\mathbf{P}_n^-$ dla kolejnej iteracji obliczeń:

$$\mathbf{x}_n^- = \mathbf{x}_n^+ + \mathbf{K}_n \cdot \left(\mathbf{z}_n - \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_n^+\right), \tag{2.4}$$

$$\mathbf{P}_n^- = \left(\mathbf{I} - \mathbf{K}_n \cdot \mathbf{H}\right) \cdot \mathbf{P}_n^+, \tag{2.5}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

gdzie **I** jest macierzą jednostkową, a $\mathbf{z}_n$ wektorem pomiarowym, zawierającym dane wejściowe, w bieżącej chwili czasu *n*. Sposób filtracji może być dobierany w sposób adaptacyjny, zmieniając wartości elementów macierzy kowariancji pomiarów **R**, np. na podstawie analizy statystycznej elementów wektora pomiarowego [27, 31, 40, 105].

Jeżeli w danym rozwiązaniu jedynym źródłem danych pozycyjnych jest zestaw czujników inercyjnych, to nie realizuje on statystycznie niezależnych pomiarów tych samych parametrów ruchu. W takim przypadku, funkcjonowanie filtru Kalmana będzie ograniczone. Przy uzupełnieniu danych inercyjnych o dane z innych, niezależnych źródeł, możliwe jest zastosowanie filtru Kalmana do wzajemnego korygowania błędów danych pomiarowych, co przekłada się na zwiększenie dokładności estymacji położenia względem zastosowania wyłącznie rozwiązania inercyjnego.

2.2. Radiolokalizacja w środowisku wewnątrzbudynkowym

Znane rozwiązania radiolokalizacyjne umożliwiają wyznaczenie estymat położenia węzła ruchomego na podstawie informacji o parametrach sygnałów radiowych, odbieranych przez ten węzeł od węzłów odniesienia lub odbieranych przez węzły odniesienia z węzła ruchomego. W niniejszej rozprawie dyskusji poddano lokalizowanie z wykorzystaniem radiowych pomiarów odległości realizowanych pomiędzy węzłem ruchomym, a węzłami odniesienia rozmieszczonymi na obszarze działania systemu.

W rozdziale przedstawiono asynchroniczne metody radiowego pomiaru odległości RTT (*Round Trip Time*) zgodne ze standardem IEEE 802.15.4-2011, jako że jedną z nich zaimplementowano w prototypowym systemie lokalizacyjnym, omawianym w dalszej części rozprawy i użytym do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Użycie metody RTT nie wymaga synchronizacji czasowej węzłów biorących udział w radiowym pomiarze odległości, w przeciwieństwie do innych metod radiolokalizacyjnych opisywanych w literaturze, np. metody TDOA [21]. Przekłada się to na prostszą realizację hybrydowego systemu lokalizacyjnego [11, 13, 15, 79, 83, 96, 106, 111].

2.2.1. Radiowe pomiary odległości według standardu IEEE 802.15.4-2011

W standardzie IEEE 802.15.4-2011 zaproponowano dwie metody radiowego pomiaru odległości pomiędzy węzłem ruchomym, a węzłami odniesienia: TWR (*Two Way Ranging*) oraz SDS-TWR (*Symetric Double Sided Two Way Ranging*). Każda z metod pomiaru odległości nie wymaga synchronizacji zegarów węzłów biorących udział w procedurze

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pomiarowej i polega na wymianie pakietów danych (zwanych również pakietami procedury pomiarowej), z użyciem transmisji impulsowej w warstwie fizycznej UWB (*Ultra-Wide Band*). Czasy nadania (po wykryciu pola pakietu PHR – *Physical Header*) i odebrania pakietów danych (po wykryciu pola pakietu SFD – *Start of Frame Delimiter*) są rejestrowane. Wspomniana rejestracja czasów polega na zapamiętaniu bieżącego stanu licznika lokalnego w obu komunikujących się węzłach, co umożliwi późniejsze obliczenie estymat czasu propagacji sygnału radiowego, a w dalszym kroku odległości [19, 20, 58]. Asynchroniczność czasowa metody pomiarowej sprawia, że wynik radiowego pomiaru odległości jest zależny od stabilności oscylatorów lokalnych urządzeń realizujących pomiar odległości [96]. Na rys. 2.3 przedstawiono strukturę pakietu, zgodnego ze standardem 802.15.4-2011, przesyłanego pomiędzy urządzeniami w warstwie fizycznej UWB. Pole preambuły zawiera sekwencję impulsów warstwy fizycznej UWB o polepszonych właściwościach autokorelacyjnych pomagające odbiornikowi estymować odpowiedź impulsową kanału radiowego.

Rys. 2.3. Struktura pakietu warstwy fizycznej według standardu IEEE 802.15.4-2011.

Przynosi to korzyść w postaci zwiększonej zdolności do kompensowania efektu wielodrogowej propagacji sygnału radiowego, co przekłada się na poprawę dokładności wyznaczenia czasu odebrania pakietu na podstawie pierwszej składowej odebranego sygnału, przy występującej propagacji wielodrogowej. Nagłówek SFD również zawiera ciąg impulsów warstwy fizycznej UWB, wskazujący odbiornikowi moment czasu rozpoczęcia demodulacji symboli BPM/BPSK (*Burst Position Modulation / Binary Phase Shift Keying*) nagłówka warstwy fizycznej PHR. Z kolei nagłówek PHR zawiera podstawowe informacje opisujące parametry warstwy fizycznej interfejsu UWB, z jakimi nadawane jest pole danych pakietu. Należy zauważyć, że nagłówek warstwy fizycznej jest zawsze przesyłany z tą samą szybkością transmisji, równą 850 kb/s, niezależnie od zmiennej szybkości transmisji symboli pola danych.

Postać ciągów określających momenty emisji i polaryzację poszczególnych impulsów warstwy fizycznej w preambule i polu SFD może zostać wybrana spośród dostępnych, opisanych w standardzie, celem np. zwiększenia dokładności realizowanych pomiarów odległości w danym środowisku propagacyjnym lub redukcji wpływu kolizji sygnałów urządzeń innych sieci pracujących w danym obszarze [19, 88, 96, 114, 115].

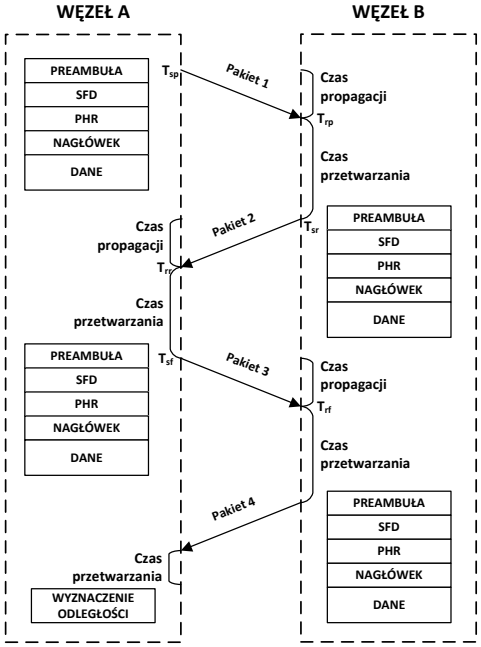
W standardzie 802.15.4-2011 założono, że radiowe pomiary odległości wykonywane są dodatkowo podczas realizacji usługi podstawowej, jaką jest transmisja danych. Na rys. 2.4

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

przedstawiono przepływ pakietów danych przy zastosowaniu metody SDS-TWR pomiędzy dwoma węzłami sieci, które jednocześnie służą do realizacji radiowego pomiaru odległości. Wykrycie nadania, bądź odebrania pól SFD, czy też PHR, prowadzi do rejestracji czasów (T_{sp}, T_{rr}, T_{sf}, T_{rp}, T_{sr}, T_{rf}), służących do estymowania czasów propagacji sygnałów radiowych, a docelowo odległości pomiędzy tymi węzłami. Końcowy czas propagacji obliczany jest na podstawie zależności [19, 59, 60, 61, 96]

$$T_{prop} = \frac{(T_{rr} - T_{sp}) + (T_{sr} - T_{rp}) + (T_{rf} - T_{sr}) + (T_{sf} - T_{rr})}{4}. \tag{2.6}$$

Warto zauważyć, że czasy wyznaczone w węźle oznaczonym literą B są przesyłane w pakiecie nr 4 do węzła inicjującego pomiar, aby mógł on dokonać wyznaczenia odległości pomiędzy węzłami. Schemat przepływu pakietów metody radiowego pomiaru odległości SDS-TWR (rys. 2.4), będącej rozszerzeniem metody TWR, przedstawia realizację dwóch pomiarów czasu propagacji sygnału radiowego inicjowanych kolejno przez węzeł A i B w celu kompensacji niestabilności oscylatorów lokalnych każdego z węzłów, poprzez uśrednianie wyznaczanych czasów. Wspomniana metoda TWR zakłada wyłącznie jeden pomiar czasu propagacji sygnału radiowego na podstawie przesłanego jednego pakietu zapytania z węzła A i jednego pakietu odpowiedzi z węzła B, przez co jej dokładność w większym stopniu zależy od różnic w taktowaniu zegarów węzłów biorących udział w radiowym pomiarze odległości [19, 88, 96].



Rys. 2.4. Schemat przepływu pakietów oraz procedury radiowego pomiaru odległości dla metody SDS-TWR.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2.2.2. Wyznaczanie położenia na podstawie radiowych pomiarów odległości

Określenie odległości pomiędzy węzłami referencyjnymi, a lokalizowanym obiektem nie jest równoznaczne z wyznaczeniem estymaty jego położenia. W tym celu konieczne jest użycie jednego z algorytmów obliczania współrzędnych węzła ruchomego na podstawie dostępnych danych pomiarowych.

Wiadomo, że do jednoznacznego wyznaczenia położenia lokalizowanego obiektu na płaszczyźnie wymagana jest znajomość odległości pomiędzy tymże obiektem, a co najmniej trzema stacjami referencyjnymi ($i = 3$), których położenie musi być znane, przy czym dodatkowo węzeł pomiarowy nie może się znajdować w jednej linii z żadną z par węzłów odniesienia. Aby wyznaczyć estymaty położenia konieczne jest rozwiązanie układu równań nieliniowych, stosujących podstawowe równanie odległości [88, 96]

$$R_i = \sqrt{(x_{WRi} - x_i)^2 + (y_{WRi} - y_i)^2}\,, \tag{2.6}$$

gdzie R_i jest odległością punktu pomiarowego (x_i, y_i) od i – tego węzła referencyjnego o współrzędnych (x_{WRi}, y_{WRi}), $i = 1, 2, \ldots, k$. Rozwiązanie układu równań, zdefiniowanych wyrażeniem (2.6) dla wyników radiowych pomiarów odległości do k węzłów referencyjnych, realizowane jest najczęściej z użyciem algorytmu Chana [96, 106], Foya [96, 106] lub Fanga [96, 106]. Dla przykładu, w algorytmie Foya znalezienie rozwiązania poprzedzone jest rozwinięciem równań (2.6) w szereg Taylora, a następnie w sposób iteracyjny poszukiwana jest estymata położenia [17, 28, 88, 96, 106, 110, 116]. Algorytm ten został zaimplementowany na potrzeby badań symulacyjnych i pomiarowych, a dokładny opis sposobu wyznaczania położenia z użyciem tego algorytmu zamieszczono w rozdziale 3.3.2.

Dokładność wyznaczonych estymat położenia obiektu jest zależna od wybranego algorytmu radiolokalizacji oraz od błędów radiowych pomiarów odległości. Zjawiska występujące w interfejsie radiowym UWB, miedzy innymi propagacja wielodrogowa utrudniają realizację radiowych pomiarów odległości i prowadzą do występowania błędów pomiarowych o rozkładzie logarytmicznie normalnym i dodatniej wartości średniej [88].

2.3. Hybrydowy system lokalizacyjny

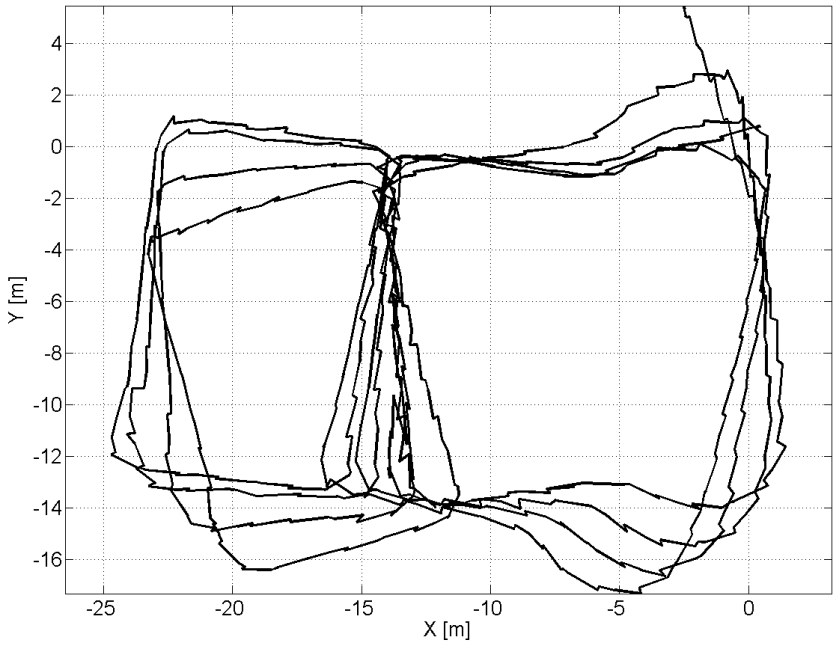
Ideą hybrydowego systemu lokalizacyjnego jest minimalizacja błędu wyznaczanych estymat położenia poruszającej się osoby, wykorzystując w trakcie ich obliczeń dane pozycyjne z co najmniej dwóch niezależnych źródeł o różnych charakterach błędów. W niniejszej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

rozprawie przedstawiono rozwiązanie, wykorzystujące algorytm nawigacji inercyjnej, jako główne źródło danych o położeniu oraz algorytm radiolokalizacji.

Zastosowanie algorytmu nawigacji inercyjnej umożliwia określenie położenia osoby w środowisku wewnątrzbudynkowym, jednak brak długoterminowej stabilności prowadzi do pojawienia się błędów wyznaczanej estymaty, a w konsekwencji wyznaczenia błędnej trasy. Wprowadzenie rozwiązania radiolokalizacyjnego w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, pomimo często mniejszej dokładności krótkookresowej względem algorytmu nawigacji inercyjnej w środowisku wewnątrzbudynkowym, umożliwia wyeliminowanie problemu długookresowej niestabilności, ograniczenie wpływu błędów pomiarowych w danych wynikowych, a w konsekwencji uzyskania znacznie wyższej, z punktu widzenia użytkownika, jakości określania położenia.

Przykładowe przyrostowe pogorszenie dokładności estymacji położenia poruszającej się osoby z użyciem wyłącznie algorytmu nawigacji inercyjnej przedstawiono na rys. 2.5. Widoczne są występujące przyrostowe błędy kąta orientacji, objawiające się nieustającą rotacją kolejno wyznaczanych estymat położenia, pomimo poruszania się osoby po tej samej trasie zamkniętej w kształcie cyfry 8.



Rys. 2.5. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej z widocznymi przyrostowymi błędami orientacji.

Niezwykle trudne jest zapewnienie długoterminowej stabilności systemu nawigacji inercyjnej, m.in. z racji występowania błędów systematycznych danych pomiarowych, np.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

w postaci niezerowej wartości średniej. Jedną z najprostszych metod próby estymacji tego rodzaju błędów systematycznych (jeśli błąd ten nie jest błędem skali zastosowanego modułu inercyjnego) jest uśrednienie pomiarów w długim okresie czasu w sytuacji, kiedy na urządzenie pomiarowe nie działają siły zewnętrzne. Konieczne w przypadku modułów inercyjnych staje się uwzględnienie wpływu przyspieszenia ziemskiego na cykl uśredniający. Dodatkowo, przed rozpoczęciem procesu uśredniania obligatoryjne jest ustalenie pozycji wyjściowej modułu względem płaszczyzny Ziemi. Jeśli jednak na błąd danych pomiarowych z czujników inercyjnych wpływa dodatkowo błąd skali lub efekt histerezy, to opisany sposób uśredniania nie pozwala na skuteczne korygowanie błędów systematycznych [46, 51, 62, 65, 66].

Dodatkowo wartości mierzonych parametrów na wyjściu czujników inercyjnych są nieustannie zaburzane przez obecność szumu, a więc składowych losowych. Szum addytywny ma tendencję do zmieniania błędów pomiarowych w funkcji czasu, co w wielu przypadkach utrudnia wykonywanie dokładnych pomiarów. W przypadku analizy krótkookresowej proces zmian błędów pomiarowych jest często modelowany jako proces random walk [29, 32]. Zmiany temperatury otoczenia, jak to się ma w przypadku większości układów elektronicznych, niekorzystnie wpływają na zmianę fluktuacji odczytywanych wartości wielkości mierzonych. Zmiany te określone są tak zwanym współczynnikiem temperaturowym i często są one nieliniowe. Większość producentów zamieszcza w dokumentacji charakterystyki szumowe swoich produktów, a w niektórych modułach inercyjnych umieszczane są czujniki temperatury, dzięki którym możliwe jest określenie stosowanej korekty w czasie rzeczywistym.

Kolejną grupą błędów są niedokładności procesu produkcji modułów inercyjnych. Najczęstszą przyczyną jest przesunięcie modułu pomiarowego względem obudowy zewnętrznej lub brak prostopadłego ułożenia poszczególnych czujników [5, 24, 29, 32, 39, 86, 100].

Wyznaczenie estymat położenia stosując jeden z algorytmów radiolokalizacji umożliwia przeprowadzenie procesu korekcji estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, np. w procesie filtracji Kalmana. Takie podejście daje możliwość zachowania długoterminowej dokładności hybrydowego systemu lokalizacyjnego, w którym głównym źródłem danych o położeniu jest algorytm nawigacji inercyjnej, a wyniki radiowych pomiarów odległości są dodatkowymi danymi o położeniu [85, 88].

Dokładność estymat położenia wyznaczanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym zależna jest bezpośrednio od wyników działania algorytmu nawigacji inercyjnej i algorytmu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

radiolokalizacji. Jedną z najczęściej spotykanych w literaturze metod zwiększenia dokładności takiego systemu lokalizacyjnego jest próba użycia większej od minimalnej wymaganej liczby węzłów referencyjnych, aby zapewnić możliwie największą ilość danych o położeniu poruszającej się osoby. Zwiększanie liczby węzłów odniesienia w obszarze funkcjonowania systemu jest jednak nieoptymalne i w wielu przypadkach może być niemożliwe, a dodatkowo nie eliminuje problemu braku możliwości przeprowadzenia korekt błędów estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, jeśli węzeł pomiarowy może realizować radiowe pomiary odległości wyłącznie do dwóch lub jednego węzła odniesienia [33, 35, 36, 89, 90].

W kolejnym rozdziale zaprezentowano rozwiązanie tego problemu, pozwalające na integrację danych inercyjnych i wyników radiowych pomiarów odległości realizowanych do dowolnej liczby węzłów odniesienia.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rozdział 3

Nowa metoda integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym

W niniejszym rozdziale przedstawiono koncepcję budowy i zasadę działania hybrydowego systemu lokalizacyjnego, łączącego rozwiązania nawigacji inercyjnej oraz wyniki radiowych pomiarów odległości.

W pierwszej części rozdziału przedstawiono algorytm nawigacji inercyjnej, którego użycie umożliwia estymowanie położenia poruszającej się osoby na podstawie analizy zarejestrowanych parametrów ruchu. Rozwiązanie to jest oparte na filtracji Kalmana.

Druga część rozdziału zawiera opis algorytmu Foya stosowanego do wyznaczania estymat położenia oraz zaproponowanej autorskiej metody, umożliwiającej zwiększenie zakresu stosowania integracji danych inercyjnych i radiowych w systemie hybrydowym, w którym węzeł ruchomy nie może realizować pomiarów radiowych do wystarczającej liczby węzłów odniesienia, aby możliwe było wyznaczenie niezależnych estymat położenia z użyciem znanych algorytmów radiolokalizacji.

3.1. Cel i założenia zaproponowanego rozwiązania

Estymaty położenia poruszającej się osoby, wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, obarczone są przyrastającymi w funkcji czasu błędami, widocznymi przede wszystkim w orientacji rejestrowanych tras. Celem prowadzonych prac badawczych było zaproponowanie rozwiązania, umożliwiającego zwiększenie dokładności określania położenia w systemie hybrydowym przy lokalizacji dwuwymiarowej, bazując na wynikach radiowych pomiarów odległości do dowolnej liczby węzłów referencyjnych. Prowadzone badania wykazały, że zasięg użyteczny modułów komunikacyjnych powszechnie stosowanych w aplikacjach typu RTLS (*Real Time Location Systems*), wykorzystujących szerokopasmowy interfejs radiowy UWB zgodny ze standardem 802.15.4-2011, w środowisku wewnątrzbudynkowym nie przekracza 50 metrów w warunkach LOS (*Line of Sight*), zaś przy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

braku bezpośredniej widoczności 10 metrów [72,74, 76]. Niewielki zasięg oraz duża podatność łącza UWB na zaburzenie trasy propagacji przez przeszkody, np. w postaci ścian, utrudnia skuteczną realizację pomiarów odległości do przynajmniej trzech węzłów odniesienia (w układzie dwuwymiarowym). W związku z powyższym, zaproponowano rozwiązanie, które do integracji danych w systemie hybrydowym nie wymaga ciągłego przebywania modułu identyfikacji osobistej w zasięgu komunikacyjnym z przynajmniej trzema węzłami referencyjnymi.

Zaproponowana metoda integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym umożliwia lokalizowanie poruszającej się osoby w środowisku trudnym, o zaburzonej propagacji sygnałów radiowych, bez dostępu do zewnętrznych systemów radiolokalizacyjnych, np. satelitarnych bądź komórkowych. Na obszarze, na którym ma być przeprowadzone lokalizowanie poruszającej się osoby konieczne jest rozmieszczenie węzłów referencyjnych WR, a lokalizowana osoba musi zostać wyposażona w dedykowane urządzenie, moduł identyfikacji osobistej MIO, odpowiedzialny za estymowanie swojego położenia z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, na podstawie zarejestrowanych parametrów ruchu oraz radiowych pomiarów odległości [82, 102, 103, 106, 111, 113].

3.2. System nawigacji inercyjnej

Moduły inercyjne charakteryzują się błędami pomiarów parametrów ruchu, rejestrowanych z użyciem czujników inercyjnych. Nawet niewielkie błędy pomiarowe, poddane procesowi kilkukrotnego całkowania w algorytmie nawigacji inercyjnej, prowadzą do występowania przyrostowych w czasie błędów estymowanego położenia i orientacji. Jedną z metod kompensacji występujących błędów jest próba estymacji bieżącego dryftu czujników inercyjnych w krótkich chwilach spoczynku, kiedy nie są one poddawane działaniu sił zewnętrznych. W przypadku systemu, który ma służyć do monitorowania położenia osób, możliwe jest wykorzystanie czasowego bezruchu modułu inercyjnego zamontowanego na stopie, przy zastosowaniu dodatkowego algorytmu ZUPT (*Zero Velocity Update*) [64, 73]. Montaż modułu inercyjnego na stopie uzasadniony jest możliwością dokładnego zarejestrowanie parametrów ruchu monitorowanej osoby.

3.2.1. Algorytm detekcji spoczynku ZUPT

W systemach nawigacji inercyjnej spotykanych jest kilka algorytmów detekcji spoczynku poruszającej się osoby. W przedstawianym rozwiązaniu zastosowano algorytm,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

którego zastosowanie umożliwia przeprowadzenie analizy dynamiki rejestrowanych przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych w wybranym oknie czasowym o długości *W*. Wynikiem działania algorytmu jest wektor aktywności $\mathbf{z_a}$, którego elementy są porównywane z przyjętym progiem klasyfikacyjnym, co przekłada się na uzyskanie binarnej informacji, czy ruch został wykryty w danej chwili czasu. Przed przystąpieniem do analizy zarejestrowanych przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych wymagane jest zebranie liczby próbek mierzonych wielkości w liczbie równej lub większej, od długości okna *W*.

$$\mathbf{z}_{\mathbf{a}\,n} = \frac{1}{W} \cdot \sum_{k=1}^{W} \left[\frac{\begin{bmatrix} a_{x\,n+k} & a_{y\,n+k} & a_{z\,n+k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{x_{n+k}} \\ a_{y_{n+k}} \\ a_{z_{n+k}} \end{bmatrix}}{\sigma_a^2} + \frac{\begin{bmatrix} g_{x\,n+k} & g_{y\,n+k} & g_{z\,n+k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{x\,n+k} \\ g_{y\,n+k} \\ g_{z\,n+k} \end{bmatrix}}{\sigma_g^2} \right], \qquad (3.1)$$

gdzie:

$a_{x\,n}$, $a_{y\,n}$, $a_{z\,n}$ przyspieszenia liniowe w osiach OX, OY, OZ,

$g_{x\,n}$, $g_{y\,n}$, $g_{z\,n}$ prędkości kątowe w osiach OX, OY, OZ,

W długość okna czasowego (przyjęto, że $W = 3$, przy okresie próbkowania 5 ms),

σ_a^2 wariancja pomiarów przyspieszeń liniowych,

σ_g^2 wariancja pomiarów prędkości kątowych,

n numer próbki przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych.

Informacja o wykrytych chwilach spoczynku jest daną wejściową algorytmu nawigacji inercyjnej, wyznaczającego estymaty położenia poruszającej się osoby [39].

3.2.2. Algorytm nawigacji inercyjnej

Wyznaczanie położenia poruszającej się osoby bazuje na filtracji Kalmana rejestrowanych przez moduł inercyjny parametrów ruchu osoby, w postaci przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych. Stanowi to rozwinięcie algorytmu nawigacji inercyjnej przedstawionego w rozdziale 2.1.2.

Danymi wejściowymi filtru Kalmana jest wektor pomiarowy $\mathbf{z_{ins}}_{\,n}$, zawierający trójosiowe przyspieszenia liniowe i prędkości kątowe oraz wektor stanu aktywności wyznaczony z użyciem algorytmu ZUPT

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\mathbf{z}_{\mathbf{ins}\,n} = \begin{bmatrix} a_{x\,n} \\ a_{y\,n} \\ a_{z\,n} \\ g_{x\,n} \\ g_{y\,n} \\ g_{z\,n} \end{bmatrix}. \tag{3.2}$$

W kroku $n = 1$ elementy wektora stanu $\mathbf{x}^{+}_{\mathbf{h}\,n}$ inicjowane są wartościami zerowymi

$$\mathbf{x}^{+}_{\mathbf{h}\,n} = \begin{bmatrix} x_{h\,1} \\ x_{h\,2} \\ x_{h\,3} \\ x_{h\,4} \\ x_{h\,5} \\ x_{h\,6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{3.3}$$

gdzie:

x_{h1}, x_{h2}, x_{h3} współrzędne estymowanego położenia, kolejno $x_{h1} = P_x$, $x_{h2} = P_y$, $x_{h3} = P_z$,

x_{h4}, x_{h5}, x_{h6} estymowana prędkość, kolejno $x_{h4} = V_x$, $x_{h5} = V_y$, $x_{h6} = V_z$.

Pierwszym krokiem algorytmu nawigacji inercyjnej jest inicjalizacja elementów macierzy kowariancji błędów filtracji $\mathbf{P}_n^-$ (inicjalizacja wartościami zerowymi), macierzy kowariancji procesu filtracji $\mathbf{Q}$ (inicjalizacja wartościami zerowymi), macierzy spajającej $\mathbf{H}$ (inicjalizacja wartościami zerowymi) filtru Kalmana oraz wyznaczenie orientacji początkowej roll ϕ_n (przechylenie) i pitch θ_n (pochylenie) modułu inercyjnego:

$$\phi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{\dfrac{\sum_{i=1}^{w} -a_{y\,i}}{w}}{\dfrac{\sum_{i=1}^{w} -a_{z\,i}}{w}} \right), \tag{3.4}$$

$$\theta_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{\dfrac{\sum_{i=1}^{w} -a_{x\,i}}{w}}{\sqrt{\left(\dfrac{\sum_{i=1}^{w} a_{y\,i}}{w} \right)^2 + \left(\dfrac{\sum_{i=1}^{w} a_{z\,i}}{w} \right)^2}} \right). \tag{3.5}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Kąt yaw ψ_n (odchylenie względem kursu poruszania się) przyjmuje wartość wyznaczoną z użyciem algorytmu elektronicznego kompasu, opisanego w dalszej części rozprawy [18, 27, 31, 37, 66, 67, 100]. Przyjęto, że w momencie rozpoczynania obliczeń osoba pozostaje w spoczynku w okresie w = 10 próbek, czyli czasie 50 ms.

Wyznaczone kąty wykorzystywane są do wyznaczenia elementów macierzy rotacji $\mathbf{R}_{\mathbf{b}\,n}$ oraz elementów wektora kwaternionów $\mathbf{q}_n$.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{b}\,n} = \begin{bmatrix} rb_{1,1} & rb_{1,2} & rb_{1,3} \\ rb_{2,1} & rb_{2,2} & rb_{2,3} \\ rb_{3,1} & rb_{3,2} & rb_{3,3} \end{bmatrix} = \tag{3.6}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\psi_n)\cdot\cos(\theta_n) & \sin(\psi_n)\cdot\cos(\theta_n) & -\sin(\theta_n) \\ -\sin(\psi_n)\cdot\cos(\phi_n)+\cos(\psi_n)\sin(\theta_n)\sin(\phi_n) & \cos(\psi_n)\cdot\cos(\phi_n)+\sin(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)\cdot\sin(\phi_n) & \cos(\theta_n)\cdot\sin(\phi_n) \\ \sin(\psi_n)\cdot\sin(\phi_n)+\cos(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)\cdot\cos(\phi_n) & -\cos(\psi_n)\cdot\sin(\phi_n)+\sin(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)\cdot\cos(\phi_n) & \cos(\theta_n)\cdot\cos(\phi_n) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q}_n = [q_{x\,n},\, q_{y\,n},\, q_{z\,n},\, q_{w\,n}]^T. \tag{3.7}$$

Sposób obliczenia elementów wektora kwaternionów jest uzależniony od wyznaczonej wartości pomocniczej T_n

$$T_n = 1+\cos(\psi_n)\cdot\cos(\theta_n)+\left(\cos(\psi_n)\cdot\cos(\phi_n)+\sin(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)\cdot\sin(\phi_n)\right)+\cos(\theta_n)\cdot\cos(\phi_n). \tag{3.8}$$

Dla przypadku, kiedy zmienna pomocnicza T_n jest większa od empirycznie dobranego progu 10^{-8} kwaterniony obliczane są następująco:

$$q_{x\,n} = \frac{1}{2\sqrt{T_n}}\cdot\left(-\cos(\psi_n)\cdot\sin(\phi_n)+\sin(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)\cdot\cos(\phi_n)-\cos(\theta_n)\cdot\sin(\phi_n)\right), \tag{3.9}$$

$$q_{y\,n} = \frac{1}{2\sqrt{T_n}}\cdot\left(-\sin(\theta_n)-\sin(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)-\cos(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)\cdot\cos(\phi_n)\right), \tag{3.10}$$

$$q_{z\,n} = \frac{1}{2\sqrt{T_n}}\cdot\left(-\sin(\psi_n)\cdot\cos(\phi_n)+\cos(\psi_n)\cdot\sin(\theta_n)\cdot\sin(\phi_n)-\sin(\psi_n)\cdot\cos(\theta_n)\right), \tag{3.11}$$

$$q_{w\,n} = \frac{1}{2\sqrt{T_n}}. \tag{3.12}$$

W przypadku, kiedy powyższa wartość T_n jest mniejsza od zakładanego progu, kwaterniony obliczane są na podstawie elementów macierzy rotacji $\mathbf{R}_{\mathbf{b}\,n}$ (3.6), korzystając z zależności, przy czym jeżeli $rb_{1,1} > rb_{2,2}$ i $rb_{1,1} > rb_{3,3}$ to:

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\begin{cases} S = \dfrac{1}{2 \cdot \sqrt{1 + rb_{1,1} - rb_{2,2} - rb_{3,3}}} \\ q_{x\,n} = \dfrac{1}{4} \cdot S \\ q_{y\,n} = \dfrac{rb_{1,2} + rb_{2,1}}{S} \\ q_{z\,n} = \dfrac{rb_{1,3} + rb_{3,1}}{S} \\ q_{w\,n} = \dfrac{rb_{3,2} - rb_{2,3}}{S} \end{cases}, \tag{3.13}$$

jeżeli $rb_{2,2} > rb_{3,3}$

$$\begin{cases} S = \dfrac{1}{2 \cdot \sqrt{1 + rb_{2,2} - rb_{1,1} - rb_{3,3}}} \\ q_{x\,n} = \dfrac{rb_{1,2} + rb_{2,1}}{S} \\ q_{y\,n} = \dfrac{1}{4} \cdot S \\ q_{z\,n} = \dfrac{rb_{2,3} + rb_{3,2}}{S} \\ q_{w\,n} = \dfrac{rb_{1,3} - rb_{3,1}}{S} \end{cases}, \tag{3.14}$$

a jeżeli warunki $rb_{1,1} > rb_{2,2}$ i $rb_{1,1} > rb_{3,3}$ albo $rb_{2,2} > rb_{3,3}$ nie zostały spełnione to

$$\begin{cases} S = \dfrac{1}{2 \cdot \sqrt{1 + rb_{3,3} - rb_{1,1} - rb_{2,2}}} \\ q_{x} = \dfrac{rb_{1,3} + rb_{3,1}}{S} \\ q_{y\,n} = \dfrac{rb_{2,3} + rb_{3,2}}{S} \\ q_{z\,n} = \dfrac{1}{4} \cdot S \\ q_{w\,n} = \dfrac{rb_{2,1} - rb_{1,2}}{S} \end{cases}, \tag{3.15}$$

gdzie S jest zmienną pomocniczą.

Zainicjowanie wartości początkowych zmiennych stanu filtru Kalmana umożliwia rozpoczęcie wyznaczania estymat położenia poruszającej się osoby. Na początku obliczeń określana jest orientacja modułu inercyjnego (uaktualnienie orientacji początkowej) na

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

podstawie zrealizowanych pomiarów prędkości kątowych. Aktualizacja elementów wektora kwaternionów $\mathbf{q}_n$ opisana jest zależnością

$$\mathbf{q}_n = \left(\begin{bmatrix} \cos\left(\frac{v}{2}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{v}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\left(\frac{v}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\left(\frac{v}{2}\right) \end{bmatrix} + \right. \left. \sin\left(\frac{v}{2}\right) \cdot \frac{1}{v} \cdot \begin{bmatrix} 0 & R_2 & -Q_2 & P_2 \\ -R_2 & 0 & P_2 & Q_2 \\ Q_2 & -P_2 & 0 & R_2 \\ -P_2 & -Q_2 & -R_2 & 0 \end{bmatrix} \right) \cdot \mathbf{q}_{n-1}, \quad (3.16)$$

gdzie:

$P_2 = g_{xn} \cdot T_s$,

$Q_2 = g_{yn} \cdot T_s$,

$R_2 = g_{zn} \cdot T_s$,

$v = \sqrt{g_{xn}^2 + g_{yn}^2 + g_{zn}^2} \cdot T_s$,

T_s okres próbkowania, przyjęto 5 ms,

g_{xn}, g_{yn}, g_{zn} pomierzone prędkości kątowe.

Elementy wektora kwaternionów $\mathbf{q}_n$ umożliwiają wyznaczenie elementów macierzy kosinusów $\mathbf{R}_{\mathbf{q}n}$, której elementy są wykorzystywane do wyznaczenia kątów ϕ_n, θ_n, ψ_n

$$\mathbf{R}_{\mathbf{q}n} = \begin{bmatrix} rq_{1,1} & rq_{1,2} & rq_{1,3} \\ rq_{2,1} & rq_{2,2} & rq_{2,3} \\ rq_{3,1} & rq_{3,2} & rq_{3,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - p_6 p_5 & p_6(q_1 \cdot q_2 - q_3 \cdot q_4) & p_6(q_1 \cdot q_3 + q_2 \cdot q_4) \\ p_6(q_1 \cdot q_2 + q_3 \cdot q_4) & 1 - p_6(p_1 + p_2) & p_6(q_2 \cdot q_3 + q_1 \cdot q_4) \\ p_6(q_1 \cdot q_3 - q_2 \cdot q_4) & p_6(q_1 \cdot q_4 + q_2 \cdot q_3) & 1 - p_6(p_1 + p_2) \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

gdzie:

$p_1 = q_{xn}^2$,

$p_2 = q_{yn}^2$,

$p_3 = q_{zn}^2$,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$p_4 = q_{w\,n}^2,$$

$$p_5 = q_{y\,n}^2 + q_{z\,n}^2,$$

$$p_6 = \frac{2}{q_{x\,n}^2 + q_{y\,n}^2 + q_{z\,n}^2 + q_{w\,n}^2}.$$

Kąty orientacji ϕ_n, θ_n, ψ_n wyznaczone na podstawie elementów macierzy $\mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n}$ przyjmują postać:

$$\phi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{rq_{3,2}}{rq_{3,3}}\right), \tag{3.18}$$

$$\theta_n = -\operatorname{arctg}\left(\frac{rq_{3,1}}{\sqrt{1-rq_{3,1}^2}}\right), \tag{3.19}$$

$$\psi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{rq_{2,1}}{rq_{1,1}}\right). \tag{3.20}$$

W celu prawidłowego estymowania położenia osoby konieczne jest dokonanie rzutowania mierzonych przyspieszeń liniowych na płaszczyznę, uwzględniając bieżącą orientację modułu inercyjnego. Operacja ta sprowadza się do uaktualnienia elementów macierzy $\mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n}$ o bieżące przyspieszenia liniowe zgromadzone w trzyelementowym wektorze $\mathbf{a}_{\mathbf{c}\,n}$. Dodatkowo uwzględniane jest bieżące przyspieszenie ziemskie g_t.

$$\mathbf{a}_{\mathbf{c}\,n} = \left[ac_{x\,n}, ac_{y\,n}, ac_{z\,n}\right] = \mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n} \cdot \begin{bmatrix} a_{x\,n} \\ a_{y\,n} \\ a_{z\,n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_t \end{bmatrix}. \tag{3.21}$$

Skorygowane przyspieszenia liniowe $ac_{x\,n}$, $ac_{y\,n}$, $ac_{z\,n}$ poddawane są procesowi całkowania, przez co uzyskiwane są bieżące prędkości $V_{x\,n}$, $V_{y\,n}$, $V_{z\,n}$ oraz współrzędne położenia obiektu $P_{x\,n}$, $P_{y\,n}$, $P_{z\,n}$. Następnie uaktualniane są elementy wektora stanu $\mathbf{x}_{\mathbf{h}\,n}^{+}$

$$\mathbf{x}_{\mathbf{h}\,n}^{+} = \begin{bmatrix} P_{x\,n} \\ P_{y\,n} \\ P_{z\,n} \\ V_{x\,n} \\ V_{y\,n} \\ V_{z\,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{x\,n-1} \\ P_{y\,n-1} \\ P_{z\,n-1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_{x\,n-1} \\ V_{y\,n-1} \\ V_{z\,n-1} \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_s^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T_s^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T_s^2}{2} \\ T_s & 0 & 0 \\ 0 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & T_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} ac_{x\,n} \\ ac_{y\,n} \\ ac_{z\,n} \end{bmatrix}, \tag{3.22}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

gdzie:

$P_{x\,n-1}, P_{y\,n-1}, P_{z\,n-1}$ estymaty współrzędnych położenia wyznaczone w poprzedniej iteracji,

$V_{x\,n-1}, V_{y\,n-1}, V_{z\,n-1}$ estymaty prędkości wyznaczone w poprzedniej iteracji.

Kolejnym krokiem filtracji Kalmana jest aktualizacja elementów macierzy przejść stanu oraz elementów macierzy wzmocnienia szumów procesu $\mathbf{G}_n$ (3.26). Operacja ta rozpoczyna się od uaktualnienia elementów macierzy rotacji $\mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n}$ na podstawie elementów wektora kwaternionów $\mathbf{q}_n$. Uaktualnienie elementów wykonywane jest zgodnie z wcześniej opisaną zależnością (3.17). Następnie kompensowany jest wpływ orientacji modułu inercyjnego na rejestrowane przyspieszenia liniowe $a_{x\,n}$, $a_{y\,n}$, $a_{z\,n}$ dokonując ich wymnożenia z macierzą rotacji $\mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n}$

$$\mathbf{f}_n = \left[f_{x\,n}, f_{y\,n}, f_{z\,n}\right] = \mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n} \cdot \begin{bmatrix} a_{x\,n} \\ a_{y\,n} \\ a_{z\,n} \end{bmatrix}, \tag{3.23}$$

gdzie $f_{x\,n}$, $f_{y\,n}$, $f_{z\,n}$ oznaczają skorygowane przyspieszenia liniowe $a_{x\,n}$, $a_{y\,n}$, $a_{z\,n}$.

Na podstawie złożenia macierzy cząstkowych – zerowej **O**, jednostkowej **I** oraz pomocniczej $\mathbf{S}_{\mathbf{t}\,n}$ wyznaczane są elementy pomocniczej macierzy przejść stanu $\mathbf{F}_{\mathbf{c}\,n}$ oraz elementy pomocniczej macierzy wzmocnienia szumów procesu $\mathbf{G}_{\mathbf{c}\,n}$:

$$\mathbf{S}_{\mathbf{t}\,n} = \begin{bmatrix} 0 & -f_{z\,n} & f_{y\,n} \\ f_{z\,n} & 0 & -f_{x\,n} \\ -f_{y\,n} & f_{x\,n} & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.24}$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{c}\,n} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{3x3} & \mathbf{I}_{3x3} & \mathbf{O}_{3x3} \\ \mathbf{O}_{3x3} & \mathbf{O}_{3x3} & \mathbf{S}_{\mathbf{t}\,3x3} \\ \mathbf{O}_{3x3} & \mathbf{O}_{3x3} & \mathbf{O}_{3x3} \end{bmatrix}, \tag{3.25}$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{c}\,n} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{3x3} & \mathbf{O}_{3x3} \\ \mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n\;3x3} & \mathbf{O}_{3x3} \\ \mathbf{O}_{3x3} & -\mathbf{R}_{\mathbf{q}\,n\;3x3} \end{bmatrix}. \tag{3.26}$$

Na podstawie zależności (3.24), (3.25), (3.26) macierz przejść stanu $\mathbf{F}_n$ i macierz szumów procesu $\mathbf{G}_n$ przyjmują postać:

$$\mathbf{F}_n = \mathbf{I} + \mathbf{F}_{\mathbf{c}\,n} \cdot T_s, \tag{3.27}$$

$$\mathbf{G}_n = \mathbf{G}_{\mathbf{c}\,n} \cdot T_s. \tag{3.28}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W trakcie kolejnego etapu obliczeń aktualizowane są elementy macierzy kowariancji błędów predykcji $\mathbf{P}_n^+$

$$\mathbf{P}_n^+ = \mathbf{F}_n \cdot \mathbf{P}_{n-1}^- \cdot \mathbf{F}_n^T + \mathbf{G}_n \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{G}_n^T, \tag{3.29}$$

przy czym obligatoryjne jest uczynienie macierzy $\mathbf{P}_n^+$ symetryczną. Zastosowanie zależności (3.23), (3.24), (3.25), (3.26), (3.27), (3.28), (3.29) umożliwia przeprowadzenie predykcji, a w dalszym etapie korekcji nie tylko estymowanego położenia i prędkości, lecz również i bieżącej orientacji. Umożliwia to osiągnięcie większej dokładności wyznaczanych estymat położenia poruszającej się osoby. Przedstawione w niniejszym rozdziale operacje wykonywane są w pętli, *n = 1, 2, ...,* gdzie liczba powtórzeń zależna jest od liczby pomiarów parametrów ruchu.

Faza korekcji estymowanego położenia poprzedzona jest wyznaczeniem macierzy wzmocnienia filtru Kalmana $\mathbf{K}_n$

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_n^+ \cdot \mathbf{H}^T \cdot \left(\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_n^+ \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}\right)^{-1}, \tag{3.30}$$

gdzie macierze **H** i **R** (o elementach dobranych empirycznie) można przedstawić w postaci:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.31}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0{,}0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0001 \end{bmatrix}. \tag{3.32}$$

Przed przystąpieniem do fazy korekcji następuje estymowanie błędów predykcji. Zakłada się, że w danej chwili czasu, gdy elementy wektora stanu aktywności $\mathbf{z}_{\mathbf{a}\,n}$ wyznaczone z użyciem algorytmu ZUPT wskazują stan spoczynku, elementy wektora stanu $\mathbf{x}_{\mathbf{h}\,n}^+$, zawierające informacje o estymowanej prędkości przekazywane są do pomocniczego wektora $\mathbf{z}_{\mathbf{p}\,n}$

$$\mathbf{z}_{\mathbf{p}\,n} = \begin{bmatrix} x_{h\,4} \\ x_{h\,5} \\ x_{h\,6} \end{bmatrix}. \tag{3.33}$$

Pobrane estymowane prędkości wymnażane są z macierzą wzmocnienia filtru $\mathbf{K}_n$ i tworzą wektor niepewności pomiarowych $\mathbf{d}_{\mathbf{x}\,n}$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\mathbf{d}_{\mathbf{x}n} = \mathbf{K}_n \cdot \mathbf{z}_{\mathbf{p}n}. \tag{3.34}$$

Faza korekcji bieżącej estymaty położenia rozpoczyna się od konwersji elementów wektora kwaternionów do elementów macierzy rotacji (3.17). Następnie wyznaczone elementy wektora niepewności pomiarowych $\mathbf{d}_{\mathbf{x}n}$ służą do uaktualnienia elementów wektora stanu $\mathbf{x}^{+}_{\mathbf{h}n}$ zawierających estymaty prędkości.

Korekcie poddawana jest również bieżąca orientacja z pomocą tymczasowej macierzy $\mathbf{D}_n$

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} 0 & -\psi_n & \theta_n \\ \psi_n & 0 & -\phi_n \\ -\theta_n & \phi_n & 0 \end{bmatrix}, \tag{3.35}$$

zaś skorygowana macierz rotacji $\mathbf{R}_{\mathbf{b}n}$ przyjmuje postać

$$\mathbf{R}_{\mathbf{b}n} = (\mathbf{I} - \mathbf{D}_n) \cdot \mathbf{R}_{\mathbf{b}n-1}, \tag{3.36}$$

gdzie $\mathbf{I}$ jest macierzą jednostkową. Elementy uaktualnionej macierzy rotacji $\mathbf{R}_{\mathbf{b}n}$ służą do wyznaczenia bieżących kątów orientacji, a docelowo elementów wektora kwaternionów, zgodnie z zależnościami (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12):

$$\phi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{rb_{3,2}}{rb_{3,3}}\right), \tag{3.37}$$

$$\theta_n = -\operatorname{arctg}\left(\frac{rb_{3,1}}{\sqrt{1-rb_{3,1}^2}}\right), \tag{3.38}$$

$$\psi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{rb_{2,1}}{rb_{1,1}}\right). \tag{3.39}$$

Po przeprowadzeniu fazy korekcji następuje aktualizacja elementów macierzy kowariancji błędów filtracji $\mathbf{P}_n^{-}$, zgodnie z zależnością (2.5).

3.2.3. Zwiększenie dokładności estymacji położenia osoby w osi OZ

Jedną z najprostszych metod redukcji błędów wyznaczania estymat położenia w osi OZ jest wprowadzenie kolejnego, niezależnego źródła danych o położeniu. W zaproponowanym rozwiązaniu jest to czujnik ciśnienia powietrza atmosferycznego. Pomiar ciśnienia realizowany jest równolegle z pomiarami parametrów ruchu. Wynikowe ciśnienie atmosferyczne

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

uzyskiwane jest po medianowej filtracji zebranych wyników pomiarowych z zastosowaniem okna czasowego o długości 100 próbek (co odpowiada 500 ms czasu ruchu).

Pomierzone ciśnienie atmosferyczne P_n przeliczane jest na względną różnicę wysokości, w odniesieniu do ciśnienia referencyjnego P_{ref} w chwili czasu, kiedy moduł identyfikacji osobistej MIO został włączony [27, 31, 37]

$$h_{wys\,n} = 44330 \cdot \left(1 - \frac{P_n}{P_{ref}}\right)^{0,19}, \tag{3.40}$$

gdzie:

$h_{wys\,n}$ względna wysokość w punkcie pomiarowym wyznaczona na podstawie pomiaru różnicy ciśnienia atmosferycznego [m],

P_n ciśnienie atmosferyczne w punkcie pomiarowym [hPa],

P_{ref} referencyjne ciśnienie atmosferyczne [hPa].

Na podstawie względnych estymat przemieszczenia w odniesieniu do punktu początkowego z zastosowanej dodatkowej filtracji Kalmana (w trakcie pierwszej filtracji Kalmana następuje estymowanie położenia osoby na podstawie zarejestrowanych parametrów ruchu) realizowana jest korekta w osi OZ estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej.

Przyjęto, że węzły referencyjne, pełniące rolę pomocniczego źródła danych pozycyjnych, również dokonują pomiaru ciśnienia atmosferycznego i estymują zmiany ciśnienia atmosferycznego wywołane czynnikami pogodowymi. Wyznaczona korekta jest wysyłana w pakietach rozgłoszeniowych interfejsu radiowego UWB, co zostało opisane w rozdziale 3.3.1 rozprawy.

W pierwszym kroku fazy predykcji elementy wektora pomiarowego $\mathbf{z}_{\mathbf{wys}\,n}$ i jednoelementowego wektora stanu $\mathbf{x}^{+}_{\mathbf{wys}\,n}$ wyznaczane są na podstawie zależności:

$$\mathbf{x}^{+}_{\mathbf{wys}\,n} = \mathbf{A}_{\mathbf{wys}} \cdot \mathbf{x}^{-}_{\mathbf{wys}\,n-1}, \tag{3.41}$$

$$\mathbf{z}_{\mathbf{wys}\,n} = \begin{bmatrix} h_{ins\,n} \\ h_{wys\,n} \end{bmatrix}, \tag{3.42}$$

gdzie:

$\mathbf{A}_{\mathbf{wys}}$ macierz przejścia,

$h_{ins\,n}$ przemieszczenie w osi OZ wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej,

$h_{wys\,n}$ względne przemieszczenie w osi OZ wyznaczone z zastosowaniem zależności (3.40).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Dla kroku $n = 1$, element wektora $\mathbf{x}^{-}_{\mathbf{wys}\,n-1}$ przyjmuje wartość zerową.

W dalszym etapie fazy predykcji obliczane są elementy macierzy kowariancji błędów predykcji $\mathbf{P}^{+}_{\mathbf{wys}\,n}$ filtru, na podstawie elementów macierzy przejścia $\mathbf{A}_{\mathbf{wys}}$, elementów macierzy kowariancji procesu filtracji $\mathbf{Q}_{\mathbf{wys}}$ oraz elementów macierzy kowariancji błędów filtracji $\mathbf{P}^{-}_{\mathbf{wys}\,n-1}$

$$\mathbf{P}^{+}_{\mathbf{wys}\,n} = \mathbf{A}_{\mathbf{wys}} \cdot \mathbf{P}^{-}_{\mathbf{wys}\,n-1} \cdot \mathbf{A}^{T}_{\mathbf{wys}} + \mathbf{Q}_{\mathbf{wys}}, \tag{3.43}$$

gdzie elementy macierzy $\mathbf{A}_{\mathbf{wys}}$, $\mathbf{Q}_{\mathbf{wys}}$ i $\mathbf{P}^{-}_{\mathbf{wys}\,n-1}$ zostały dobrane empirycznie:

$$\mathbf{A}_{\mathbf{wys}} = \mathbf{I}_{1x1}, \tag{3.44}$$

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{wys}} = \begin{bmatrix} 0{,}08 & 0 \\ 0 & 0{,}08 \end{bmatrix}, \tag{3.45}$$

$$\mathbf{P}^{-}_{\mathbf{wys}\;n-1} = \mathbf{I}_{1x1}. \tag{3.46}$$

Pierwszym krokiem fazy korekcji jest obliczenie elementów macierzy wzmocnienia filtru $\mathbf{K}_{\mathbf{wys}\,n}$

$$\mathbf{K}_{\mathbf{wys}\,n} = \mathbf{P}^{+}_{\mathbf{wys}\,n} \cdot \mathbf{H}^{T}_{\mathbf{wys}} \cdot \left(\mathbf{H}_{\mathbf{wys}} \cdot \mathbf{P}^{+}_{\mathbf{wys}\,n} \cdot \mathbf{H}^{T}_{\mathbf{wys}} + \mathbf{R}_{\mathbf{wys}}\right)^{-1}, \tag{3.47}$$

gdzie $\mathbf{H}_{\mathbf{wys}}$ jest macierzą spajającą, a $\mathbf{R}_{\mathbf{wys}}$ macierzą kowariancji pomiarowej o elementach dobranych empirycznie:

$$\mathbf{H}_{\mathbf{wys}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{3.48}$$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{wys}} = \begin{bmatrix} 0{,}09 & 0 \\ 0 & 0{,}8 \end{bmatrix}. \tag{3.49}$$

Obliczenie końcowych, skorygowanych estymat położenia w osi OZ $\mathbf{x}^{-}_{\mathbf{wys}\,n}$ dokonywane jest na podstawie równania filtru

$$\mathbf{x}^{-}_{\mathbf{wys}\,n} = \mathbf{x}^{+}_{\mathbf{wys}\;n} + \mathbf{K}_{\mathbf{wys}\,n} \cdot \left(\mathbf{z}_{\mathbf{wys}\,n} - \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}^{+}_{\mathbf{wys}\;n}\right). \tag{3.50}$$

Ostatnim etapem fazy korekcji jest uaktualnienie elementów macierzy $\mathbf{P}^{-}_{\mathbf{wys}\,n}$, gdzie $\mathbf{I}$ jest macierzą jednostkową

$$\mathbf{P}^{-}_{\mathbf{wys}\;n} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{\mathbf{wys}\,n} \cdot \mathbf{H}_{\mathbf{wys}}) \cdot \mathbf{P}^{+}_{\mathbf{wys}\;n}. \tag{3.51}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3.2.4. Wyznaczanie początkowego kąta azymutu

Wyznaczanie estymowanego położenia zorientowanego względem geograficznego układu odniesienia wymaga wyznaczenia początkowego azymutu na podstawie pomiarów składowych ziemskiego pola magnetycznego [39, 47, 68].

Przed wyznaczeniem orientacji geograficznej, konieczne jest ustalenie orientacji układu pomiarowego (kątów: ϕ_n i θ_n) względem płaszczyzny Ziemi, co jest wykonywane zgodnie z zależnościami (3.4), (3.5), zaś kąt azymutu ψ obliczany jest według zależności

$$\psi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{-m_{yn} \cdot \cos(\phi_n) + m_{zn} \cdot \sin(\phi_n)}{m_{yn} \cdot \cos(\theta_n) + (m_{yn} \cdot \sin(\phi_n) + m_{zn} \cdot \cos(\phi_n)) \cdot \sin(\theta_n)} \right), \tag{3.52}$$

gdzie m_{xn}, m_{yn}, m_{zn} są pomierzonymi składowymi ziemskiego pola magnetycznego.

Wyznaczony kąt azymutu jest daną wejściową orientacji początkowej w algorytmie nawigacji inercyjnej, przedstawionym w poprzednim podrozdziale rozprawy [22, 31, 37, 68].

Dokładność przedstawionej metody jest zależna od obecności w środowisku pomiarowym zewnętrznych pól magnetycznych, przekładających się na występowanie trudnych do skompensowania systematycznych błędów pomiarowych.

3.3. Realizacja radiowych pomiarów odległości oraz wyznaczanie estymat położenia poruszającej się osoby

W zaproponowanym hybrydowym systemie lokalizacyjnym zdecydowano się na wybranie asynchronicznej metody realizacji radiowych pomiarów odległości, często spotykanej w sieciach sensorowych. Zaletą tego podejścia jest zminimalizowanie złożoności sprzętowej i łatwość jej implementacji w rzeczywistych urządzeniach.

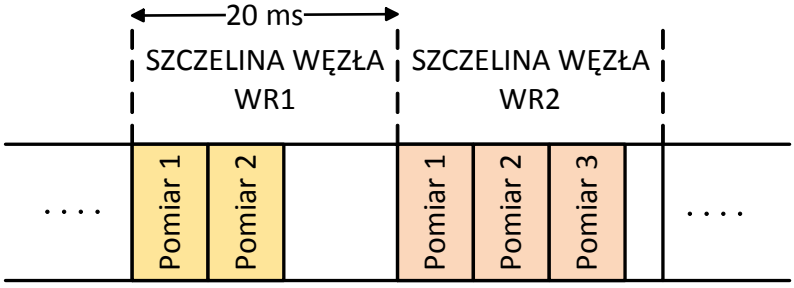
3.3.1. Metoda realizacji radiowych pomiarów odległości w sieci z wieloma węzłami pomiarowymi

W sieciach sensorowych wykorzystujących szerokopasmowy interfejs radiowy UWB zgodny ze standardem 802.15.4-2011 możliwe jest wykorzystanie asynchronicznej metody radiowego pomiaru odległości SDS-TWR [96]. W metodzie tej każdorazowe nadanie bądź odebranie pakietu danych wyzwala zapamiętanie bieżącego stanu licznika czasu, co jest określane mianem wyznaczenia tzw. znacznika czasu. Wyznaczenie odległości realizowane jest w węźle inicjującym pomiar, przy znajomości każdego z wyznaczonych znaczników czasu. Końcowy czas propagacji obliczany jest na podstawie zależności (2.6) [19, 59, 60, 61, 96].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przyjęto, że każdy z pakietów procedury pomiaru odległości zawiera w polu nagłówka adres nadawcy, adres docelowy oraz identyfikator pakietu. Możliwie największe ograniczenie długości pakietu ma skrócić czas wykonywania radiowego pomiaru odległości, co powoduje minimalizację wpływu dryftu oscylatora lokalnego na dokładność pomiaru czasu propagacji sygnału radiowego, a w konsekwencji przekłada się to na zwiększenie dokładności pomiaru.

Procedura radiowego pomiaru odległości wymaga przesłania w interfejsie radiowym czterech pakietów danych. Aby możliwe było współistnienie w sieci radiowej więcej niż dwóch węzłów konieczne jest wprowadzenie sposobu wielodostępu do kanału radiowego. Zaproponowano protokół radiowych pomiarów odległości z wielodostępem czasowym TDMA (*Time Division Multiple Access*). Założono, że każdemu z węzłów sieci, np. węzłom referencyjnym WR (rys. 3.1 – WR1, WR2) przyporządkowana jest szczelina czasowa, w której mogą dokonać radiowego pomiaru odległości do węzłów sąsiednich.



Rys. 3.1. Przykład realizacji radiowych pomiarów odległości w szczelinie TDMA.

Na rys. 3.1 przedstawiono przykład realizacji, przez węzły referencyjne (WR1, WR2), radiowych pomiarów odległości w przyporządkowanych im szczelinach o czasie trwania 20 ms. Jako źródła taktu szczelinowego użyto wąskopasmowego modułu komunikacyjnego, przedstawionego w dalszej części rozprawy, ze zmodyfikowanym oprogramowaniem wytworzonym podczas realizacji projektu SALON [14, 82]. Węzły nie posiadają a priori informacji o swoich sąsiadach, dlatego też oprócz przedstawionych na rys. 2.4 pakietów procedury pomiarowej występuje również pakiet rozgłoszeniowy INF, zawierający informację o jego nadawcy oraz parametry środowiskowe, np. zmianę ciśnienia atmosferycznego wynikającą ze zmiany warunków pogodowych, wyznaczoną w węźle referencyjnym i uwzględnianą w algorytmie nawigacji inercyjnej.

Na początku funkcjonowania sieci każdy z węzłów w przydzielonej a priori szczelinie czasowej przesyła pakiet rozgłoszeniowy INF informując inne węzły o swojej obecności. Każdy z pozostałych węzłów sieci w przypadku odbioru pakietu rozgłoszeniowego zapisuje

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

w tablicy adresów węzłów sąsiednich TWS (*Tablica Węzłów Sąsiednich*) adres węzła, od którego odebrał pakiet. W czasie trwania szczelin czasowych pozostałych węzłów możliwe jest odebranie, przez węzeł nieinicjujący transmisji, pakietów rozgłoszeniowych od więcej niż jednego nadawcy, bądź też odebranie pakietów procedury radiowych pomiarów odległości, jeśli węzeł został włączony do już istniejącej sieci. W przypadku odebrania pakietu procedury radiowego pomiaru odległości adresowanego do innego węzła, bądź pakietu rozgłoszeniowego, węzeł zapisuje adres jego nadawcy w tablicy TWS, tylko jeśli adres ten w niej nie występuje. W przypadku nieodebrania żadnego pakietu w kolejnej własnej szczelinie czasowej węzeł ponawia wysłanie pakietu rozgłoszeniowego INF.

Wraz z rozpoczęciem kolejnej szczeliny czasowej węzeł posiadający informację o występowaniu węzłów sąsiednich inicjuje radiowy pomiar odległości. Przyjęto, że czas trwania 20 ms szczeliny, z uwzględnieniem maksymalnego błędu synchronizacji węzłów rzędu 0,1 ms, czasu trwania pojedynczego pomiaru odległości równego 1,9 ms, umożliwia dokonanie pomiaru z maksymalnie ośmioma węzłami. Wyniki radiowych pomiarów odległości wykonanych prawidłowo w czasie trwania szczeliny przesyłane są do punktu akwizycji danych, z użyciem niezależnego interfejsu radiowego pracującego w pasmie UHF (*Ultra High Frequency*) opisanego w dalszej części rozprawy. Jak już wspomniano, w trakcie realizacji radiowych pomiarów odległości pozostałe węzły będące w zasięgu komunikacyjnym odbierają pakiety procedury pomiarowej, pomimo że nie są do nich adresowane i uaktualniają swoją tablicę adresów.

W przypadku 10 nieudanych prób radiowego pomiaru odległości z węzłem, którego adres występuje w tablicy TWS, jego adres jest z niej usuwany. W przypadku, kiedy nastąpiło usunięcie jedynego adresu znajdującego się w tablicy TWS, węzeł w kolejnej własnej szczelinie czasowej wyśle pakiet rozgłoszeniowy.

Warto zauważyć, że w zrealizowanej sieci prototypowej zawartość przesyłanych pakietów chroniona jest przed nieautoryzowanym odczytem dzięki zastosowaniu algorytmu szyfrującego AES (*Advanced Encryption Standard*), z kluczem niejawnym o długości 128 bitów [9, 10, 11, 55, 76, 81, 82].

3.3.2. Opis algorytmu Foya do wyznaczania estymat położenia osoby

Przed przystąpieniem do lokalizowania np. poruszającej się osoby, z wykorzystaniem radiowych pomiarów odległości, na obszarze działania systemu konieczne jest rozmieszczenie węzłów referencyjnych, których położenie musi być znane, bądź też zostać wyznaczone [1, 8,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

96, 106]. Otrzymanie estymaty położenia (x, y) w oparciu o radiowe pomiary odległości wymaga rozwiązania układu równań nieliniowych. Można tego dokonać stosując różne algorytmy. W zrealizowanym systemie lokalizacyjnym wybrano algorytm Foya, linearyzujący równania pozycyjne poprzez ich rozwinięcie w szereg Taylora, z uwagi na sposób minimalizacji błędów estymowanego położenia prowadzący do uzyskania rozwiązania optymalnego [91].

Podstawowe równanie pozycyjne przedstawia zależność (2.6). Jego rozwinięcie w szereg Taylora bazuje na zależności [106]

$$f(x) = \sum_{t=0}^{j} \frac{f^{(t)}(x_0)}{t!}(x - x_0)^t + R_{n+1}(x, x_0), \tag{3.53}$$

W analizowanym przypadku linearyzacja równań możliwa jest po wybraniu już pierwszego kroku rozwinięcia $j = 1$, będącego wystarczającym przybliżeniem (2.6) [96, 106]. Aby uzyskać końcową postać równania konieczne jest wyznaczenie pochodnych cząstkowych:

$$\frac{\partial}{\partial x} f_l(x, y) = -\frac{x_l - x}{\sqrt{(x_l - x)^2 + (y_l - y)^2}}, \tag{3.54}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} f_l(x, y) = -\frac{y_l - y}{\sqrt{(x_l - x)^2 + (y_l - y)^2}}. \tag{3.55}$$

Przyjmując, że bieżąca estymata położenia przedstawiana jest przez (x_c, y_c) zlinearyzowane przybliżenie przyjmuje postać

$$r_l \approx f_l(x_c, y_c) + \frac{\partial}{\partial x} f_l(x_c, y_c) \cdot (x - x_c) + \frac{\partial}{\partial y} f_l(x_c, y_c)(y - y_c), \tag{3.56}$$

gdzie r_l określa wynik radiowego pomiaru odległości do węzła odniesienia nr l.

Wyrażenie (3.56) może zostać zapisane w formie równania macierzowego, obejmującego wyniki radiowych pomiarów odległości wykonanych do trzech lub więcej węzłów referencyjnych. Obliczenie końcowych estymat położenia obiektu realizowane jest w sposób iteracyjny. Przyjmuje się pewne położenie początkowe (x_c, y_c), często będącą średnią arytmetyczną współrzędnych położenia węzłów referencyjnych, a następnie dokonuje się jego korekty w sposób iteracyjny, wyznaczając wektor korygujący $\mathbf{d}_{\mathbf{kor}\,n}$

$$\mathbf{d}_{\mathbf{kor}\,n} = \begin{bmatrix} \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{bmatrix}. \tag{3.57}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Jako kryterium zakończenia obliczeń empirycznie przyjmowana jest wartość progowa elementów wektora $\mathbf{d}_{\mathbf{kor}\,n}$ [106].

Równanie macierzowe umożliwiające iteracyjne wyznaczanie wektora korygującego przyjmuje postać [96, 106]

$$\mathbf{d}_{\mathbf{kor}\,n} = \left(\mathbf{G}_{\mathbf{Foy}\,n}^{T} \cdot \mathbf{G}_{\mathbf{Foy}\,n}\right)^{-1} \cdot \mathbf{G}_{\mathbf{Foy}\,n}^{T} \cdot \mathbf{h}_{\mathbf{Foy}\,n}, \tag{3.58}$$

gdzie macierz $\mathbf{G}_{\mathbf{Foy}\,n}$ i wektor $\mathbf{h}_{\mathbf{Foy}\,n}$ dla przypadku realizacji pomiarów odległości do trzech węzłów odniesienia przyjmują postać:

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Foy}\,n} = \begin{bmatrix} \dfrac{x_c - x_1}{R_1} & \dfrac{y_c - y_1}{R_1} \\ \dfrac{x_c - x_2}{R_2} & \dfrac{y_c - y_2}{R_2} \\ \dfrac{x_c - x_3}{R_3} & \dfrac{y_c - y_3}{R_3} \end{bmatrix}, \tag{3.59}$$

$$\mathbf{h}_{\mathbf{Foy}\,n} = \begin{bmatrix} r_1 - R_1 \\ r_2 - R_2 \\ r_3 - R_3 \end{bmatrix}, \tag{3.60}$$

gdzie:

R_1, R_2, R_3	odległość pomiędzy bieżącą estymatą położenia a węzłem referencyjnym *WR1*, *WR2*, *WR3*,
r_1, r_2, r_3	pomiarowa odległość do danego węzła referencyjnego,
$x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$	współrzędne położenia węzłów referencyjnych,
n	numer iteracji.

Przedstawiony algorytm może zostać użyty do obliczenia estymat położenia przy większej od trzech liczbie węzłów referencyjnych. W takim przypadku wymiar macierzy $\mathbf{G}_{\mathbf{Foy}\,n}$ i wektora $\mathbf{h}_{\mathbf{Foy}\,n}$ ulegają zwiększeniu.

3.3.3. Wyznaczanie położenia węzłów referencyjnych

Znajomość położenia węzłów referencyjnych jest konieczna do zlokalizowania poruszającej się osoby (terminala ruchomego) z wykorzystaniem radiowych pomiarów odległości. W wielu spotykanych rozwiązaniach współrzędne te są określane przez operatora czy dostawcę systemu i wpisywane w ich pamięci na stałe. Aby zbadać możliwość poszerzenia zakresu stosowania radiolokalizacji o przypadki, w których położenie węzłów referencyjnych

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

nie jest znane zdecydowano się zastosować algorytm ABC (*Assumption Based Coordinates*) [96], umożliwiający określenie współrzędnych sąsiednich węzłów referencyjnych bazując wyłącznie na wynikach pomiarów odległości pomiędzy nimi, przy założeniu umieszczenia wszystkich węzłów na jednej płaszczyźnie.

Podstawowym założeniem algorytmu ABC jest znajomość położenia jednego z węzłów *WR1*, bądź założenie jego położenia w punkcie początkowym układu współrzędnych

$$WR1(x_1, y_1). \tag{3.61}$$

Przy dalszych obliczeniach przyjmuje się, że oś OX układu odniesienia nakierowana jest na węzeł nr 2 (*WR2*). Jako że znana jest odległość pomiędzy węzłem *WR1*, a *WR2* współrzędne położenia węzła nr 2 obliczane są według zależności

$$WR2(x_1 + d_{12}, y_1), \tag{3.62}$$

gdzie d_{12} oznacza odległość między węzłem referencyjnym *WR1* a *WR2*.

Współrzędne położenia węzła *WR3* obliczane są według następującej zależności [82]

$$WR3\left(\frac{d_{12}^2+d_{13}^2-d_{23}^2}{2\cdot d_{23}}, \sqrt{d_{13}^2-\frac{d_{12}^2+d_{13}^2-d_{23}^2}{2\cdot d_{23}}}\right), \tag{3.63}$$

gdzie:

d_{13} odległość między węzłem referencyjnym *WR1* a *WR3*,

d_{23} odległość między węzłem referencyjnym *WR2* a *WR3*.

W trakcie wyznaczania położenia trzech węzłów referencyjnych możliwe jest wystąpienie przypadku niejednoznaczności estymowanych współrzędnych położenia węzła *WR3*. Eliminację rozwiązania błędnego można dokonać na podstawie analizy estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu radiolokalizacji na podstawie wyników radiowych pomiarów odległości modułu identyfikacji osobistej do węzłów referencyjnych w punkcie startowym estymowanej trasy. Założono, że w każdym analizowanym przypadku punkt startowy jest początkiem układu współrzędnych.

Powyższy algorytm może zostać zastosowany do wyznaczenia położenia większej liczby węzłów referencyjnych, bazując wyłącznie na pomiarach odległości pomiędzy nimi. Przyjęto, że jeśli do lokalizacji stosowane są wyniki radiowych pomiarów odległości czterech węzłów WR, estymata położenia czwartego z węzłów wyznaczana jest z użyciem algorytmu Foya, w oparciu o realizowane pomiędzy węzłami radiowe pomiary odległości.

Przy dostępnej liczbie węzłów referencyjnych mniejszej od trzech użycie algorytmu ABC będzie ograniczone, zatem zaproponowano metodę, która umożliwi wyznaczenie estymat

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

położenia węzłów referencyjnych również w takim przypadku. Jako pomocnicze źródło danych przy wyznaczaniu estymat położenia węzłów referencyjnych użyto algorytmu nawigacji inercyjnej. Zaobserwowano, na podstawie przeprowadzonych badań opisanych w rozdziale czwartym rozprawy, że błędy estymat położenia poruszającej się osoby w krótkim okresie czasie od momentu uruchomienia modułu identyfikacji osobistej MIO są względnie małe (analiza w środowisku wewnątrzbudynkowym). Przyjęto, że jeśli osoba wyposażona w moduł identyfikacji osobistej zbliży się do węzła referencyjnego na odległość mniejszą niż 0,75 m (odległość dobrana eksperymentalnie) jej bieżąca estymata położenia zostanie potraktowana jako estymata położenie węzła referencyjnego. Rozwiązanie to umożliwia wyznaczenie położenia węzła referencyjnego WR w lokalnym układzie współrzędnych, o punkcie początkowym (0, 0).

Zaproponowana metoda może zostać użyta w przypadku występowania trzech lub więcej węzłów referencyjnych, kiedy nie mogę one realizować radiowych pomiarów odległości między sobą [96, 84].

3.4. Integracja danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym

W niniejszej rozprawie założono, że integracja danych pozycyjnych otrzymanych po zastosowaniu algorytmu nawigacji inercyjnej z wynikami radiowych pomiarów odległości ma być realizowana na płaszczyźnie XY, również w przypadku zredukowanej, czyli mniejszej od trzech, liczby węzłów referencyjnych. Przeprowadzone badania pomiarowe, przedstawione w rozdziale szóstym rozprawy, wykazały, że zastosowanie czujnika ciśnienia jako dodatkowego źródła danych o położeniu jest wystarczające do niwelowania przyrastających błędów estymat położenia w osi OZ wyznaczanych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej.

Jeżeli estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, z uzupełniającymi pomiarami zmian ciśnienia atmosferycznego, będą wskazywały na występowanie przemieszczenia w osi OZ konieczne jest wprowadzenie korekty wyników radiowych pomiarów odległości, aby odpowiadały one pomiarom realizowanym na płaszczyźnie. Brak tejże korekty zmniejszy dokładność estymat położenia wyznaczanych z użyciem algorytmu Foya oraz zaproponowanej metody [30, 50, 53, 65].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

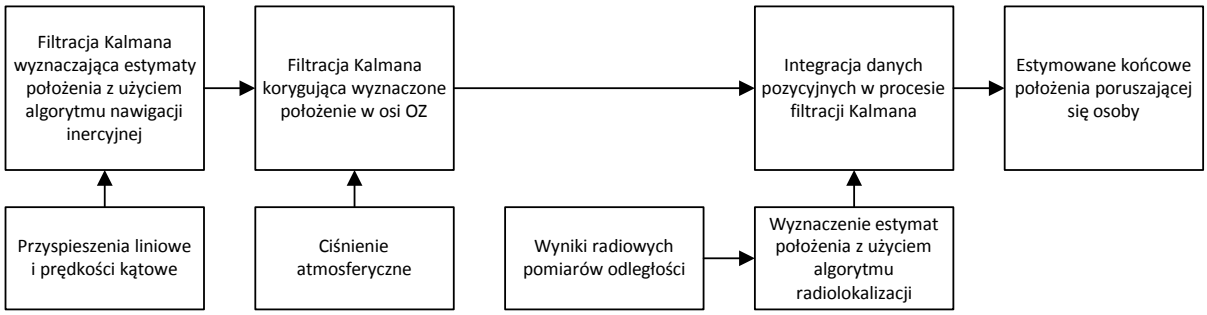
3.4.1. Przypadek nadokreśloności przy dostępnych co najmniej czterech węzłach referencyjnych

Miejscem potencjalnego zastosowania hybrydowego systemu lokalizacyjnego są przede wszystkim środowiska wewnątrzbudynkowe. Pomimo utrudnionej propagacji sygnałów radiowych w środowisku wewnątrzbudynkowym możliwe jest przebywanie węzła pomiarowego w zasięgu komunikacyjnym czterech (lub więcej) węzłów referencyjnych, dlatego zdecydowano się również sprawdzić dokładność estymacji położenia poruszającej się osoby na płaszczyźnie dla nadokreślonego zestawu danych wejściowych algorytmu radiolokalizacji.

Na rys. 3.2 przedstawiono schemat blokowy operacji wykonywanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym. Estymaty położenia poruszającej się osoby wyznaczane są z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, algorytmu radiolokalizacji, a na podstawie uzyskanych wyników w procesie filtracji Kalmana wyznaczane są końcowe estymaty położenia z przyjętą ufnością dla każdej z danych wejściowej. Zabieg ten, określany mianem integracji danych pozycyjnych, ma na celu kompensowanie statystycznie niezależnych błędów każdej z metod lokalizacyjnych i zwiększenie dokładności hybrydowego systemu lokalizacyjnego.

Przedstawiony algorytm Foya poddano modyfikacji w zakresie zwiększenia liczby elementów składowych macierzy (3.59) i wektora (3.60), w związku z dostępnością czterech wyników radiowych pomiarów odległości.

W przypadku nadokreślonego zestawu danych pozycyjnych autor zdecydował się przyjąć podejście szeroko opisywane w literaturze i zapewniające wysoką dokładność wyznaczanych końcowych estymat położenia poruszającej się osoby [31, 85]. Pełna niezależność dwóch metod lokalizacyjnych sprawia, że możliwe jest wyznaczenie tzw. alternatywnych estymat położenia wykorzystując radiowe pomiary odległości, np. przy pomocy algorytmu Foya [27, 29, 31, 39, 85, 96].



Rys. 3.2. Schemat blokowy operacji wykonywanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Funkcjonowanie zastosowanego filtru Kalmana podzielone jest na dwa podstawowe etapy przetwarzania, predykcji oraz korekcji, zgodnie z opisem zawartym w rozdziale 2.1.2. Elementy wektora stanu $\mathbf{x_{poz}}$ zawierają skorygowane, końcowe estymaty położenia, obliczone na podstawie estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej i algorytmu radiolokalizacji, które to zawarte są w wektorze pomiarowym $\mathbf{z_{pom}}$. Wektor ten zawiera kolejno współrzędne $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz współrzędne $(\hat{x}_{Foy\,i}, \hat{y}_{Foy\,i})$ estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu radiolokalizacji. Faza predykcji oraz korekcji procesu filtracji realizowana jest zgodnie z zależnościami (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), gdzie elementy macierzy **R** i **Q** dobrano w sposób eksperymentalny:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0{,}5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}1 \end{bmatrix}, \tag{3.64}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0{,}2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}1 \end{bmatrix}. \tag{3.65}$$

3.4.2. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych

Dostępność wyników radiowych pomiarów odległości do trzech węzłów referencyjnych jest tzw. sytuacją typową, gdyż jest to minimalna liczba węzłów referencyjnych, wymagana do jednoznacznego określenia położenia na płaszczyźnie stosując znane algorytmy radiolokalizacyjne. Działanie algorytmu Foya opisane jest zależnościami przedstawionymi w podrozdziale 3.4.1 i przebiega w analogiczny sposób jak dla przypadku nadokreśloności. Zwiększenie dokładności hybrydowego systemu lokalizacyjnego realizowane jest w procesie filtracji Kalmana, na podstawie estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz algorytmu Foya.

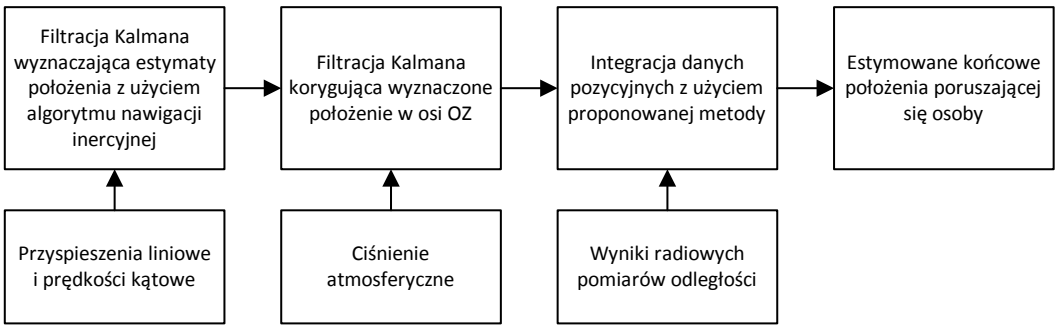
3.4.3. Przypadek zredukowany przy dostępności mniej niż trzech węzłów referencyjnych

Dostępność wyników radiowych pomiarów odległości zrealizowanych pomiędzy węzłem ruchomym, a mniej niż trzema węzłami referencyjnymi WR wyklucza zastosowanie znanych algorytmów radiolokalizacyjnych do wyznaczenia estymat położenia poruszającej się osoby, gdyż niemożliwe jest utworzenie i jednoznaczne rozwiązanie układu równań

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pozycyjnych z racji niewystarczającej liczby danych wejściowych. W związku z powyższym, zaproponowano metodę umożliwiającą przeprowadzenie korekty estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej również w tzw. przypadku zredukowanym.

Jedną z możliwości wyznaczenia estymat położenia na podstawie radiowych pomiarów odległości, które mogły by posłużyć do korekcji estymat położenia poruszającej się osoby wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, byłaby analiza pary rozwiązań wynikającej z przecięcia dwóch okręgów odległości do dwóch węzłów referencyjnych w danej chwili pomiaru odległości. Na podstawie przeprowadzonej analizy tego sposobu stwierdzono, że dla pewnych kształtów tras i błędów estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej wybierane było błędne rozwiązanie, przez co nie można było przeprowadzić korekty estymaty położenia w sposób prawidłowy. Zamiast tego, zaproponowano autorską metodę, o większej złożoności obliczeniowej, lecz umożliwiającą korekcję estymat położenia wyznaczonych wzdłuż tras o dowolnym kształcie, długości, sekwencji ruchów i z występującymi błędami skali, również w przypadku występowania wyłącznie jednego węzła referencyjnego. Na dokładność przeprowadzanej korekty bezpośredni wpływ mają błędy radiowych pomiarów odległości oraz błędy estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej. Na rys. 3.3 przedstawiono schemat blokowy operacji wykonywanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, w którym zastosowano zaproponowaną metodę integracji danych pozycyjnych przy zredukowanej liczbie węzłów referencyjnych. Należy zauważyć, że wyniki radiowych pomiarów odległości nie są używane do wyznaczenia niezależnych estymat położenia, a do korekty estymat wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej.



Rys. 3.3. Schemat blokowy operacji wykonywanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym przy użyciu zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Danymi pozycyjnymi podlegającymi procesowi integracji są: estymaty położenia $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz wyniki radiowych pomiarów odległości pomiędzy węzłem ruchomym, umieszczonym na poruszającej się osobie, a dwoma (lub jednym) węzłami referencyjnymi. Zakłada się, że położenie węzłów referencyjnych jest znane na podstawie przyjętych a priori współrzędnych położenia, bądź też zostało wyznaczone, np. z użyciem algorytmu przedstawionego w rozdziale 3.3.3.

Algorytm obliczeń, zaimplementowany w środowisku symulacyjnym MATLAB, został podzielony na fazę korekcji orientacji początkowej i korekcji orientacji ruchu estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej. Elementem fazy korekcji orientacji początkowej jest umieszczenie każdej z estymat położenia na tzw. okręgu stałej odległości, wynikającej z radiowego pomiaru odległości, do danego węzła referencyjnego WR (rys. 3.4). Realizowane jest to na podstawie wyznaczenia punktu przecięcia prostej, opisanej równaniem w postaci kierunkowej (3.66), z okręgiem (3.67), o promieniu równym wynikowi radiowego pomiaru odległości r_i w danej chwili czasu

$$y = \frac{\hat{y}_i - y_{WR1}}{\hat{x}_i - x_{WR1}} \cdot x + \left(\hat{y}_i - \frac{\hat{y}_i - y_{WR1}}{\hat{x}_i - x_{WR1}} \cdot \hat{x}_i \right), \tag{3.66}$$

gdzie:

$\hat{x}_i, \hat{y}_i$ — *i-ta* estymata położenia wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (tzw. położenia początkowe),

x_{WR1}, y_{WR1} — współrzędne położenia węzła referencyjnego (w tym przypadku *WR1*),

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_{WR1})^2 + (y_i - y_{WR1})^2} \,. \tag{3.67}$$

Zależność (3.66) (jak i 3.67) przybiera odrębną postać podczas korygowania każdej z estymat położenia, wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej. Wyznaczenie punktów przecięcia prostej (3.66) z okręgiem (3.67) wymaga rozwiązania układu równań z dwoma niewiadomymi. Wynikiem obliczeń są dwa punkty, pp_1, pp_2, o współrzędnych (x_{pp1}, y_{pp1}) oraz (x_{pp2}, y_{pp2}), wyznaczane na podstawie zależności:

$$x_{pp1i} = \frac{-\sqrt{-x_{WR1}^2 \cdot a_i^2 + 2 \cdot x_{WR1} \cdot y_{WR1} \cdot a_i - 2 \cdot x_{WR1} \cdot a_i \cdot b_i - y_{WR1}^2 + 2 \cdot y_{WR1} \cdot b_i + a_i^2 \cdot r_i^2 - b_i^2 + r_i^2} + x_{WR1} + y_{WR1} \cdot a_i - a_i \cdot b_i}{a^2 + 1},$$

(3.68)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$x_{pp2\,i} = \frac{\sqrt{-x_{WR1}^2 \cdot a_i^2 + 2 \cdot x_{WR1} \cdot y_{WR1} \cdot a_i - 2 \cdot x_{WR1} \cdot a_i \cdot b_i - y_{WR1}^2 + 2 \cdot y_{WR1} \cdot b_i + a_i^2 \cdot r_i^2 - b_i^2 + r_i^2} + x_{WR1} + y_{WR1} \cdot a_i - a_i \cdot b_i}{a^2 + 1},$$

(3.69)

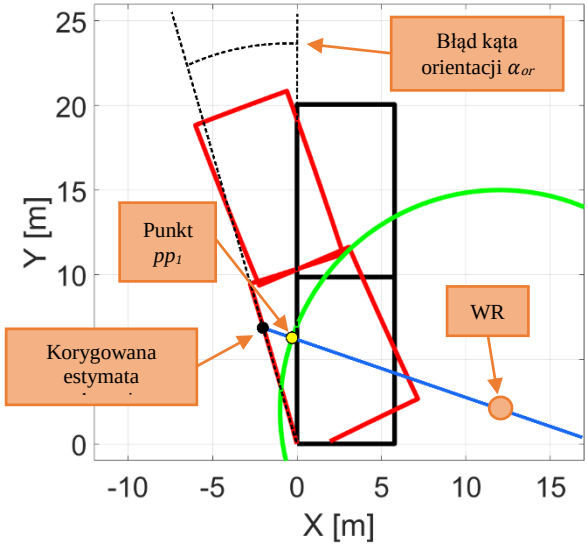
$$y_{pp1\,i} = a_i \cdot x_{pp1} + b_i, \tag{3.70}$$

$$y_{pp2\,i} = a_i \cdot x_{pp1} + b_i, \tag{3.71}$$

gdzie:

$$a_i = \frac{\hat{y}_i - y_{WR1}}{\hat{x}_i - x_{WR1}},$$

$$b_i = \hat{y}_i - \frac{\hat{y}_i - y_{WR1}}{\hat{x}_i - x_{WR1}} \cdot \hat{x}_i.$$



Rys. 3.4. Ilustracja sposobu umieszczania korygowanej estymaty położenia na okręgu stałej odległości do węzła referencyjnego WR.

Wybór rozwiązania, pomiędzy punktem $pp_{1\,i}$ a $pp_{2\,i}$, poprzedzony jest określeniem odległości $d_{pp1\,i}$ oraz $d_{pp2\,i}$ pomiędzy każdym z punktów $pp_{1\,i}$, $pp_{2\,i}$, a korygowaną estymatą położenia:

$$d_{pp1\,i} = \sqrt{(x_{pp1\,i} - \hat{x}_i)^2 + (y_{pp1\,i} - \hat{y}_i)^2}, \tag{3.72}$$

$$d_{pp2\,i} = \sqrt{(x_{pp2\,i} - \hat{x}_i)^2 + (y_{pp2\,i} - \hat{y}_i)^2}. \tag{3.73}$$

Prawidłowym rozwiązaniem jest punkt $pp_{1\,i}$ lub $pp_{2\,i}$, dla którego odległość do bieżąco korygowanej estymaty położenia jest najmniejsza. Jest on nazywany w dalszej części $POS_{okr_WR1\,i}(x_{ppWR1\,i}, y_{ppWR1\,i})$, gdzie $x_{ppWR1\,i} = x_{pp1\,i}$, $y_{ppWR1\,i} = y_{pp1\,i}$ jeśli $d_{pp1\,i} < d_{pp2\,i}$ lub

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$x_{ppWR1\,i} = x_{pp2\,i}$, $y_{ppWR1\,i} = y_{pp2\,i}$ jeśli $d_{pp1\,i} > d_{pp2\,i}$. Punkt $POS_{okr_WR1\,i}$ jest traktowany jako wstępnie skorygowana estymata położenia umieszczona na okręgu stałej odległości do danego węzła referencyjnego *WR1*.

Przedstawiony proces korekty estymat położenia wykonywany jest analogicznie dla wyników radiowych pomiarów odległości do drugiego dostępnego węzła referencyjnego *WR2*, czego wynikiem jest wyznaczenie punktu $POS_{okr_WR2\,i}(x_{ppWR2\,i}, y_{ppWR2\,i})$. Jako końcową estymatę położenia umieszczoną na okręgach stałej odległości $POS_{okr\,i}(x_{okr\,i}, y_{okr\,i})$ przyjmuje się średnią arytmetyczną poszczególnych współrzędnych $POS_{okr_WR1\,i}$ i $POS_{okr_WR2\,i}$

$$POS_{okr\,i}\left(\frac{x_{ppWR1\,i} + x_{ppWR2\,i}}{2}, \frac{y_{ppWR1\,i} + y_{ppWR2\,i}}{2}\right). \tag{3.74}$$

Na podstawie $m = 30$ (wartość dobrana empirycznie) skorygowanych estymat położenia $POS_{okr\,i}$ obliczany jest pierwiastek błędu średniokwadratowego $RMSE_{ini}$ względem estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej

$$RMSE_{ini} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(\hat{x}_i - x_{okr\,i})^2 + (\hat{y}_i - y_{okr\,i})^2}{m}}, \tag{3.75}$$

gdzie:

$\hat{x}_i, \hat{y}_i$ — estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (tzw. położenia początkowe),

$x_{okr\,i}, y_{okr\,i}$ — estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej umieszczone na okręgach stałej odległości.

Następnie $m = 30$ pierwszych położeń początkowych $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ jest iteracyjnie obracanych względem początku układu współrzędnych (pozycji początkowej) o empirycznie dobrany kąt obrotu $\alpha_i = 0{,}001$ rad

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \end{bmatrix}. \tag{3.76}$$

Po wykonaniu pierwszej iteracji, estymaty położenia (x_i', y_i') umieszczane są na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych, zgodnie z metodą przedstawioną na początku podrozdziału. Następnie wyznaczany jest błąd $RMSE_{iter}$, pomiędzy bieżąco skorygowanymi trzydziestoma położeniami umieszczonymi na okręgu stałej odległości, a wstępnie skorygowanymi położeniami początkowymi (x_i', y_i')

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$RMSE_{iter} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(x_i^{'} - x_{okr\,i}^{'})^2 + (y_i^{'} - y_{okr\,i}^{'})^2}{m}}, \tag{3.77}$$

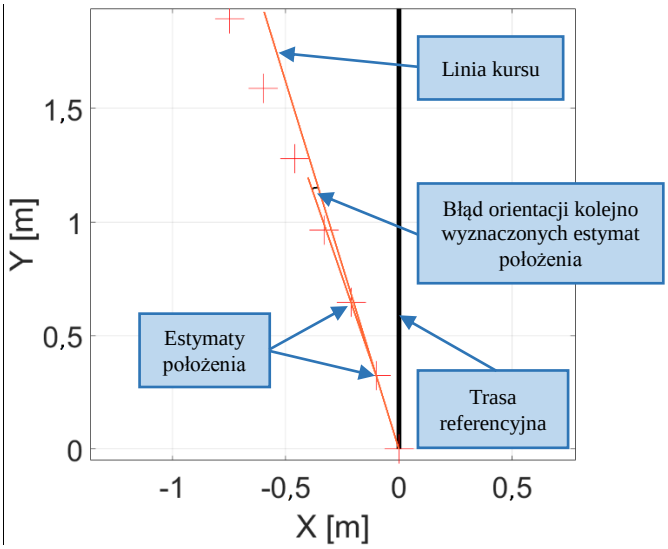
gdzie:

$x_{okr\,i}^{'}, y_{okr\,i}^{'}$ położenia początkowe, obrócone o kąt α_i i umieszczone na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych.

W celu weryfikacji, czy kierunek obrotu jest prawidłowy sprawdzany jest błąd $RMSE_{iter}$. W przypadku, kiedy jest on mniejszy od błędu $RMSE_{ini}$ kierunek obrotu jest prawidłowy, zaś w sytuacji odwrotnej, kąt obrotu α_i przyjmuje znak przeciwny. W kolejnych iteracjach kąt obrotu α_i jest zwiększany o 0,001 rad.

W każdej kolejnej iteracji obliczany jest błąd $RMSE_{iter}$, a warunkiem zakończenia iteracyjnego procesu obrotu jest wykrycie, kiedy obrót $m = 30$ pierwszych położeń początkowych powoduje zwiększenie błędu $RMSE_{iter}$ względem błędu wyznaczonego w poprzedniej iteracji (i-1). W przypadku wykrycia takiej sytuacji kąt obrotu α_i jest przybliżeniem błędu kąta orientacji początkowej α_{or}. Znając błąd orientacji, wszystkie pozostałe estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej obracane są względem początku układu współrzędnych o wyznaczony kąt obrotu α_{or}, a następnie umieszczane są na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych.

W drugiej fazie korekty położeń początkowych realizowana jest próba korekty błędów orientacji postępowej kolejno wyznaczanych estymat położenia. Błąd ten zilustrowano na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Ilustracja błędu orientacji kolejno wyznaczonych estymat położenia.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Początkowo obliczany jest pierwiastek błędu średniokwadratowego $RMSE_{ini}$ pomiędzy skorygowanymi o kąt α_{or} położeniami początkowymi, a estymatami położenia umieszczonymi na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych.

Druga faza korekcji polega na iteracyjnym obracaniu wszystkich korygowanych n estymat położenia $(x'_{okr\,i}, y'_{okr\,i})$, $i = 1 \ldots n$, wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, obróconych o kąt α_{or} i umieszczonych na okręgach stałej odległości

$$\begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_i) & -\sin(\beta_i) \\ \sin(\beta_i) & \cos(\beta_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'_{okr\,i} \\ y'_{okr\,i} \end{bmatrix}, \tag{3.78}$$

gdzie β_i jest empirycznie dobranym, przyrastającym w każdej iteracji, kątem obrotu $\beta_i = 0{,}005 \cdot i$, $i = 1 \ldots n$. Po dokonaniu rotacji estymaty położenia (x''_i, y''_i) są umieszczane na okręgach stałej odległości.

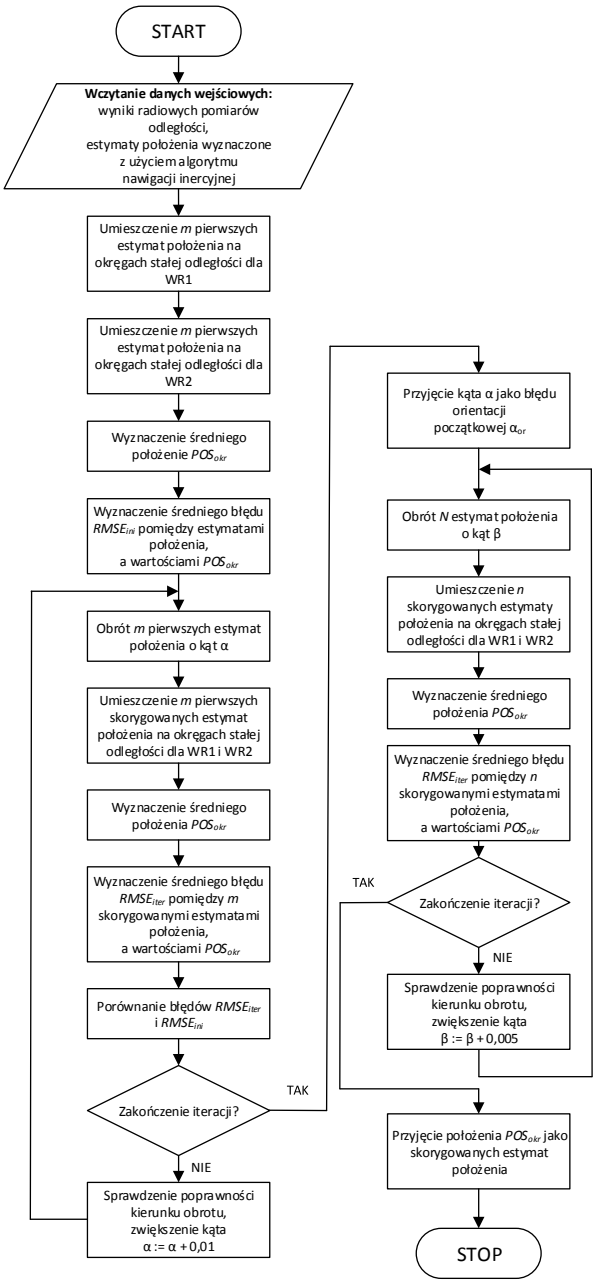
W celu weryfikacji, czy kierunek obrotu jest prawidłowy sprawdzany jest błąd $RMSE_{iter}$. Jeśli jest on mniejszy od błędu $RMSE_{ini}$, wyznaczonego po korekcie położeń początkowych o kąt α_{or}, kierunek obrotu jest prawidłowy, zaś w sytuacji odwrotnej, kąt obrotu β_i przyjmuje znak przeciwny. Warunkiem zakończenia drugiego etapu korekcji jest wykrycie przypadku, kiedy to kolejna iteracja powoduje wzrost błędu $RMSE_{iter}$ względem iteracji poprzedniej. W chwili zakończenia drugiej fazy korekcji, jako skorygowane estymaty położenia przyjmowane są estymaty położenia umieszczone na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych.

Innym sposobem korekcji błędów orientacji estymat położenia $(x'_{okr\,i}, y'_{okr\,i})$, w drugim etapie korekcji, jest ich obracanie nie względem początku układu współrzędnych, a względem poprzednio skorygowanej estymaty położenia (x''_{i-1}, y''_{i-1}). Podczas prowadzonych prac sprawdzono dokładność takiej metody korekcji błędów orientacji estymat położenia, gdzie kąt obrotu przyjmował empirycznie dobraną średnią pięciu ostatnich korekt. Zauważono, że w przypadku występowania gwałtownych błędów radiowych pomiarów odległości oraz błędów położenia estymowanego z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej proces korekcji nie przebiegał prawidłowo, co przekładało się na większy końcowy błąd estymat położenia względem podejścia przedstawionego na początku niniejszego rozdziału. W związku z powyższym w rozwiązaniu końcowym zastosowano metodę przedstawioną w niniejszym rozdziale. Przy dostępności wyników radiowych pomiarów odległości do jednego węzła referencyjnego, czyli w tzw. przypadku minimalnym, wykonywana korekcja estymat położenia

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, realizowana jest w sposób jak to przedstawiono w niniejszym rozdziale. Pominięto jedynie proces przenoszenia estymat położenia na okręgi stałej odległości do drugiego węzła referencyjnego oraz proces ich uśredniania opisanej zależnością (3.74).

Na rys. 3.6 przedstawiono schemat blokowy algorytmu, opisanego w niniejszym rozdziale, korygującego estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, przy zredukowanej do dwóch liczbie węzłów referencyjnych.



Rys. 3.6. Schemat blokowy operacji wykonywanych w opracowanym algorytmie zaproponowanej metody korygującej estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej przy zredukowanej do dwóch liczbie węzłów referencyjnych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rozdział 4

Badania symulacyjne efektywności pracy hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Przeprowadzenie badań symulacyjnych efektywności pracy zaproponowanej metody poprzedzono opracowaniem narzędzia, pozwalającego na generowanie danych symulujących wyniki radiowych pomiarów odległości oraz estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej.

W pierwszej części rozdziału przedstawiono założenia projektowe symulatora, określone na podstawie przeprowadzonych badań pomiarowych dokładności estymacji położenia osoby z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, jak i radiowych pomiarów odległości wykonywanych z zastosowaniem interfejsu radiowego UWB.

Opracowane narzędzie umożliwiło przeprowadzenie kompleksowych badań symulacyjnych zaproponowanego rozwiązania hybrydowego systemu lokalizacyjnego oraz weryfikację działania zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym przy dostępnej różnej liczbie węzłów referencyjnych.

4.1. Założenia projektowe modelu hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Podstawowym elementami składowymi symulatora hybrydowego systemu lokalizacyjnego są modele symulacyjne radiowych pomiarów odległości oraz systemu nawigacji inercyjnej.

Założono, że model systemu nawigacji inercyjnej ma uwzględniać czynniki o charakterze stochastycznym wpływające na wyznaczane estymaty położenia. Zdecydowano się, że symulacji zostaną poddane błędy orientacji początkowej (kursu) oraz błędy kolejno wyznaczanych estymat położenia. Wspomniane błędy dostrzegalne są w trasach poruszającej się osoby wyznaczanych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej i są konsekwencją błędów pomiarowych modułów inercyjnych oraz np. sposobu ich umieszczania na monitorowanej osobie.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przyjęto założenie, że model radiowych pomiarów odległości ma dostarczać symulowane odległości pomiędzy węzłami pomiarowymi, charakteryzujące się błędami o losowej wartości. Zgodnie z opisami błędów radiowych pomiarów odległości w środowisku wewnątrzbudynkowym, ich symulowane wartości powinny posiadać zbliżony do logarytmiczno-normalnego rozkładu [88]. Postanowiono przeprowadzić badania pomiarowe aby sprawdzić, czy błędy estymowanej odległości, z użyciem modułów radiowych UWB zastosowanych do budowy prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego, nie charakteryzują się rozkładem odmiennym od zakładanego w literaturze [24, 29, 31, 45, 51, 57].

4.2. Model systemu nawigacji inercyjnej

Zastosowanie opracowanego modelu systemu nawigacji inercyjnej ma umożliwić wygenerowanie estymat położenia symulujących ruch osoby wyposażonej w moduł identyfikacji osobistej, z błędami o rozkładach prawdopodobieństw określonymi eksperymentalnie.

4.2.1. Badania eksperymentalne algorytmu nawigacji inercyjnej

Opracowanie funkcji generującej symulowane przemieszczenie wymagało posiadania informacji o statystycznych parametrach błędów estymacji przemieszczenia wyznaczanego z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej. Zdecydowano się przeprowadzić kampanię pomiarową, której celem było zarejestrowanie przyspieszeń linowych i prędkości kątowych z czujników inercyjnych, a następnie przeanalizowanie estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, przedstawionego w rozdziale 3 rozprawy.

W tym celu zbudowano stanowisko pomiarowe składające się modułu inercyjnego, zamontowanego na płytce dokującej producenta oraz autorskiego oprogramowania. Moduł został umieszczony na podbiciu stopy poruszającej się osoby.

Na rys. 4.1 przedstawiono płytkę prototypową z modułem inercyjnym zamontowaną na podbiciu stopy poruszającej się osoby. Układ ten podłączono z użyciem interfejsu USB (*Universal Serial Bus*) do tabletu przemysłowego firmy GETAC, spełniającego wymogi komputera klasy PC (*Personal Computer*), na którym dokonywano zapisu rejestrowanych przez moduł inercyjny parametrów ruchu [3,4].

Na potrzeby testów opracowano aplikację do rejestracji danych, napisaną w języku C#. W graficznym interfejsie użytkownika udostępniono dwa programowe przyciski umożliwiające zmianę częstotliwości próbkowania danych z czujników inercyjnych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wynikiem działania aplikacji jest wygenerowany plik tekstowy zawierający próbki, zapisane w postaci liczb zmiennoprzecinkowych pojedynczej precyzji, przyspieszeń liniowych, prędkości kątowych oraz składowych ziemskiego pola magnetycznego.

Używając przedstawionego stanowiska zarejestrowano przykładowe trasy, o kształcie odcinka oraz trasy o kształcie litery T, ze wspólnym punktem początku i końca. Zdecydowano się na zarejestrowanie tras w środowisku wewnątrzbudynkowym, tj. w budynku Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej oraz na promie pasażerskim MF WAWEL, podczas rejsu po Morzu Bałtyckim.

Rys. 4.1. Widok modułu inercyjnego umieszczonego na podbiciu stopy.

Przeprowadzenie testów estymacji położenia z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej na jednostce pływającej miało na celu określenie wpływu zaburzenia pomiarów przyspieszeń liniowych i prędkości kątowych spowodowanych ruchem statku.

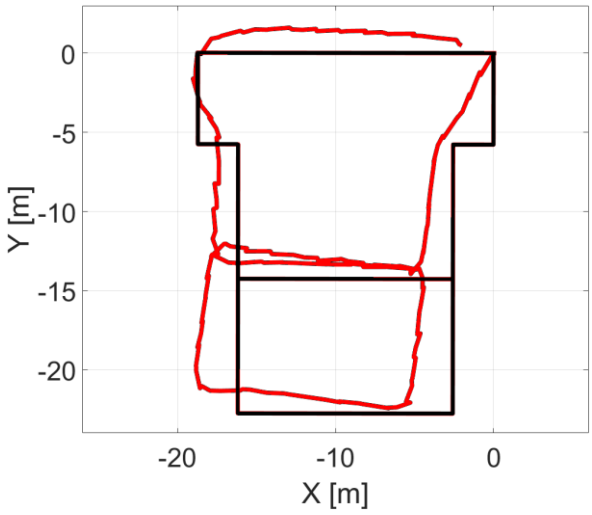
W każdym z przypadków wytyczoną trasę wzorcową, po której poruszała się osoba z zamontowanym na podbiciu stopy modułem inercyjnym, zmierzono dalmierzem laserowym i użyto jako wzorca podczas oceny dokładności wyznaczanych estymat położenia. Zarejestrowane przyspieszenia liniowe i prędkości kątowe poddano analizie w środowisku symulacyjnym MATLAB z użyciem opisanego algorytmu nawigacji inercyjnej.

Na rys. 4.2 oraz 4.3 przedstawiono dwie przykładowe trasy wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) na podstawie pomiarów dokonanych odpowiednio na promie pasażerskim MF WAWEL oraz w środowisku wewnątrzbudynkowym. Zdecydowano się zaprezentować trasy o kształcie zamkniętym i odcinka, aby uwidocznić występujące błędy orientacji początkowej (widoczna rotacja trasy względem punktu

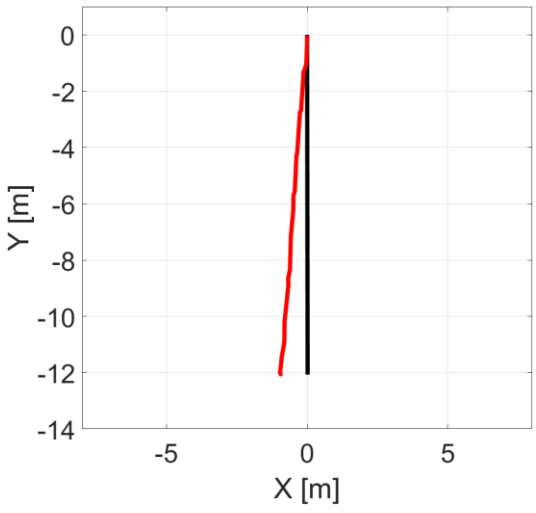
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

początkowego (0,0) oraz brak spójności punktu startu i końca dla trasy zamkniętej. Trasy referencyjne oznaczono kolorem czarnym.

Na podstawie zarejestrowanych tras wyznaczono średnią prędkość poruszania się osoby wynoszącą 0,85 $^{m}/_{s}$. Dodatkowo analizie poddano błędy kształtu wyznaczonych tras, spowodowane błędnym określaniem orientacji modułu inercyjnego, w zakresie wartości i rozkładu błędów. Na podstawie przeprowadzonych analiz zarejestrowanych tras o kształcie odcinka pomierzono odchyłkę rzeczywistego kursu poruszającej się osoby od wyznaczonej trasy wzorcowej, wynoszącą średnio $\psi = 0{,}215$ rad, dla całej trasy.



Rys. 4.2. Trasa wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) w środowisku symulacyjnym MATLAB na podstawie parametrów ruchu zarejestrowanych wewnątrz promu MF WAWEL.



Rys. 4.3. Trasa wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) w środowisku symulacyjnym MATLAB na podstawie parametrów ruchu zarejestrowanych wewnątrz budynku.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Dodatkowo zauważono, że w każdym przypadku błędy orientacji propagowały się przyrostowo, przez co wyznaczone estymaty położenia sugerowały ruch osoby po łuku. Na podstawie serii pomiarów oszacowano, że błędy kąta orientacji kolejno wyznaczanych estymat położenia wynoszą średnio γ = 0,007 $^{rad}/_{krok}$, przy odchyleniu standardowym wynoszącym σ_{INS} = 0,003 $^{rad}/_{krok}$, a każdy z wymienionych błędów ψ i γ może zostać przybliżony rozkładem normalnym.

Przeprowadzone badania wykazały, że występująca niedokładność wyznaczenia przemieszczenia nie przekracza 1 m na trasie o długości 110 m. Założono, zatem, że w symulatorze położenie zostanie zaburzone losowymi wartościami o rozkładzie normalnym i odchyleniu standardowym wynoszącym σ_{dyst} = 0,01 $^{m}/_{krok}$.

Podczas przeprowadzonych badań stwierdzono, że estymaty położenia wyznaczone, z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, na promie pasażerskim podczas rejsu charakteryzują się zbliżonymi błędami, a także rozkładem tychże błędów, w odniesieniu do estymat położenia wyznaczonych w środowisku wewnątrzbudynkowym.

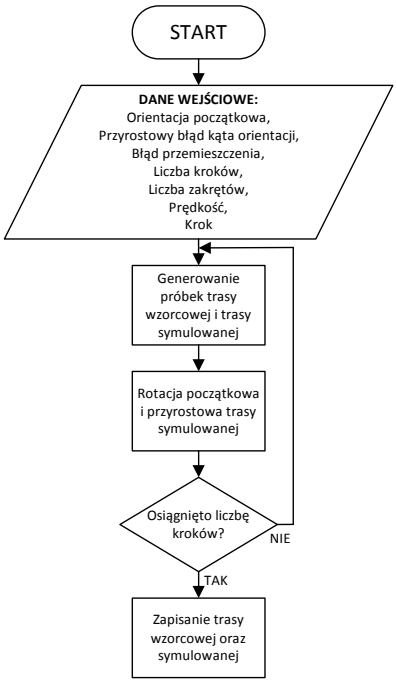
4.2.2. Symulacja działania systemu nawigacji inercyjnej

Zebranie informacji o parametrach statystycznych opisujących zachowanie systemu nawigacji inercyjnej pozwoliło opracować skrypt w środowisku symulacyjnym MATLAB, umożliwiający generowanie przykładowych tras symulujących działanie systemu nawigacji inercyjnej.

Na rys. 4.4 przedstawiono schemat blokowy operacji wykonywanych podczas symulacji działania systemu nawigacji inercyjnej. Parametrami wejściowymi dla symulatora są: prędkość ruchu osoby, krok wyznaczania symulowanych estymat położenia, liczba kroków, liczba i rodzaj zakrętów, orientacja początkowa ψ, przyrostowy błąd kąta orientacji γ oraz błąd przemieszczenia.

Użycie modelu symulacyjnego umożliwia wygenerowanie dowolnej trasy wzorcowej oraz estymat położenia z zaburzonymi parametrami orientacji i odległości bazując na zdefiniowanych w postaci stałych tzw. punktach charakterystycznych, czyli zakrętach. Domyślnie trasa jest zorientowana wzdłuż osi OY układu współrzędnych. Możliwe jest nadanie dowolnej orientacji początkowej, co symuluje np. jej geograficzne zorientowanie. Symulacja niedokładności czujników inercyjnych realizowana jest poprzez dodanie do orientacji początkowej błędów o rozkładzie normalnym i odchyleniu standardowym definiowanym przez użytkownika.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 4.4. Schemat blokowy algorytmu symulującego działanie systemu nawigacji inercyjnej.

Generowanie trasy realizowane jest w pętli. Wynikiem każdego powtórzenia są współrzędne położenia, będące symulacją ruchu modułu identyfikacji osobistej umieszczonego na osobie. Orientacja kolejno wyznaczanej (bieżącej) estymaty położenia ($x'_{sym\ n}$, $y'_{sym\ n}$) względem poprzedniej ($x_{sym\ n-1}$, $y_{sym\ n-1}$) jest modyfikowana zależnie od wyznaczonego parametru γ, mówiącego o losowej, przyrostowej zmianie orientacji. Operacja ta jest wykonywana zgodnie z równaniem macierzowym [31]

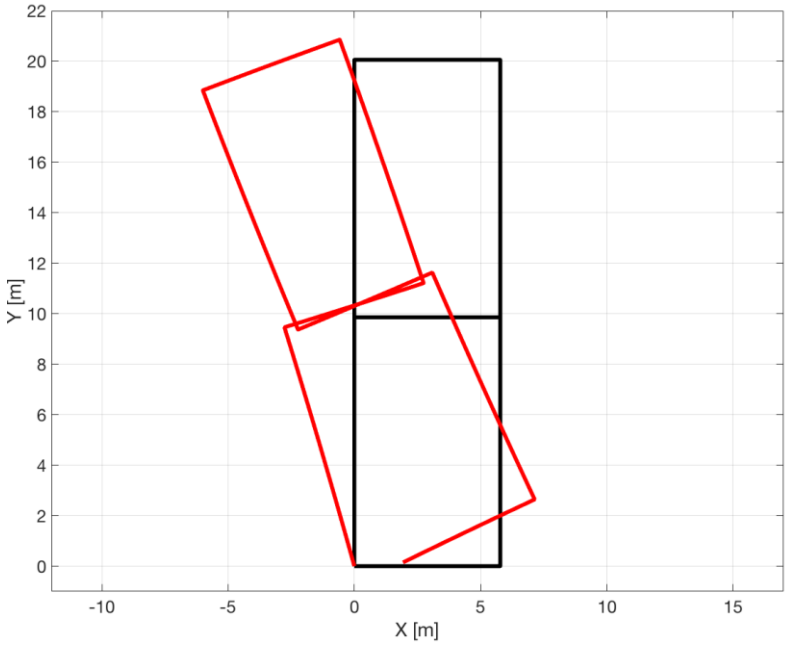
$$\begin{bmatrix} x'_{sym\ n} \\ y'_{sym\ n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_n) & -\sin(\varphi_n) \\ \sin(\varphi_n) & \cos(\varphi_n) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{sym\ n} - x_{sym\ n-1} \\ y_{sym\ n} - y_{sym\ n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{sym\ n-1} \\ y_{sym\ n-1} \end{bmatrix}, \tag{4.1}$$

gdzie kąt φ_n wyznaczany jest z użyciem funkcji *normrnd(M, sigma)* ze środowiska MATLAB, generującej wartości losowe o rozkładzie normalnym, wartości średniej M i odchyleniu standardowym równym *sigma*, a ($x_{sym\ n}$, $y_{sym\ n}$) jest estymatą położenia bez symulowanego błędu rotacji. Podczas symulacji parametr M i *sigma* przyjmują wartości: $M = \gamma$, $sigma = \sigma_{INS}$. Przyjęty sposób generowania losowego kąta orientacji wpisuje się w proces symulacyjny typu random walk [29, 32].

Na rys. 4.5 przedstawiono trasę będącą symulacją działania systemu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony). Trasę wzorcową przedstawiającą rzeczywisty ruch osoby z modułem inercyjnym oznaczono kolorem czarnym.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Opracowany skrypt środowiska symulacyjnego MATLAB przystosowano do generowania drugiego rodzaju trasy, w kształcie litery L, użytej podczas badań symulacyjnych przedstawionych w dalszej części rozdziału.



Rys. 4.5. Trasa poruszającej się osoby (kolor czerwony) wyznaczona z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej wraz z trasą wzorcową oznaczoną kolorem czarnym.

4.3. Model symulujący realizację radiowych pomiarów odległości

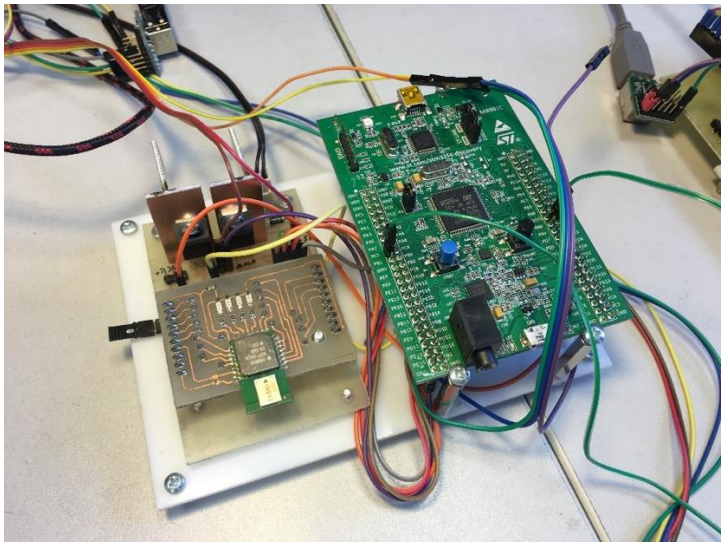
Podstawą do opracowania modelu symulacyjnego radiowych pomiarów odległości było przeprowadzenie kampanii pomiarowej z wykorzystaniem zaprojektowanych i wykonanych rzeczywistych urządzeń pracujących w ultraszerokopasmowym interfejsie radiowym UWB, realizujących radiowe pomiaru odległości z zastosowaniem metody SDS-TWR.

4.3.1. Badania pomiarowe dokładności radiowych pomiarów odległości z zastosowaniem metody SDS-TWR

Zasymulowanie wyników radiowych pomiarów odległości, o parametrach statystycznych zbliżonych do tych uzyskiwanych przy zastosowaniu rzeczywistych urządzeń radiowych, wymagało opracowanie i zbudowania stanowiska badawczego umożliwiającego implementację wspomnianej metody pomiarowej SDS-TWR oraz przeprowadzenie kampanii pomiarowej.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Zbudowane stanowisko badawcze składało się z urządzeń pomiarowych, w których skład wchodziły płytki ewaluacyjne z 32 – bitowym mikrokontrolerami STM32F407VGT firmy ST oraz moduły UWB DWM1000 firmy DecaWave, zamontowane na opracowanych i wykonanych płytkach prototypowych.



Rys. 4.6. Urządzenie pomiarowe podczas testów radiowych pomiarów odległości.

Na rys. 4.6 przedstawiono urządzenie pomiarowe, z płytką mikrokontrolera oraz płytką modułu UWB. Urządzenia (wykonane w dwóch egzemplarzach) realizowały radiowe pomiary odległości, zgodnie z przedstawioną w rozdziale trzecim asynchroniczną metodą pomiarową SDS-TWR [19, 20, 25, 92, 96].

Zarejestrowane wyniki radiowych pomiarów odległości przesyłane były do tabletu przemysłowego firmy GETAC (zgodnego z komputerem klasy PC) w celu ich rejestracji, z użyciem interfejsu szeregowego USB. Do komunikacji urządzeń konieczne było zastosowanie konwertera USB – UART typu FT232RL. Opracowana aplikacja, napisana w języku C#, zbierała i wyświetlała wyniki radiowych pomiarów odległości, a następnie zapisywała je w pliku tekstowym.

Analogicznie jak to miało miejsce w przypadku analizy błędów estymat położenia wyznaczanych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, kampania pomiarowa została przeprowadzona w środowisku wewnątrzbudynkowym (budynki Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej) oraz na promie pasażerskim MF WAWEL podczas rejsu po Morzu Bałtyckim [82]. Badania we wnętrzach promu pasażerskiego miały na celu zbadanie wpływu metalowej konstrukcji statku, z licznymi korytarzami, na

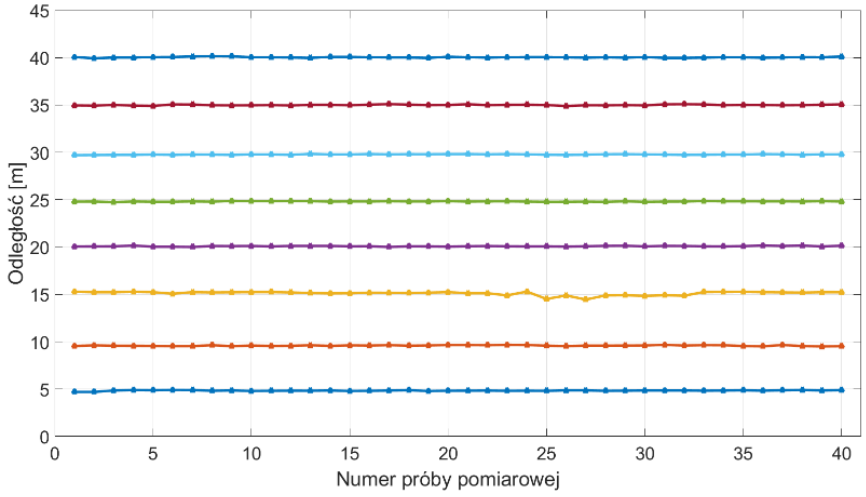
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

realizację radiowych pomiarów odległości z użyciem ultraszerokopasmowego interfejsu radiowego UWB.

Podczas pomiarów postanowiono sprawdzić dokładność wykonywanych radiowych pomiarów odległości, z użyciem zastosowanych modułów komunikacyjnych UWB, zarówno w stacjonarnych, jak i dynamicznych warunkach pomiarowych. Badania wykonywane były pomiędzy dwoma urządzeniami, gdzie jedno z nich nie zmieniało swojego położenia.

Pomiar stacjonarny polegał na realizacji radiowych pomiarów odległości w znanej odległości do urządzenia stacjonarnego, przy braku ruchu i przy bezpośredniej widoczności obu urządzeń. W każdej próbie pomiarowej zebrano 200 wyników radiowych pomiarów odległości, wykonywanych w odległościach do 40 metrów pomiędzy urządzeniami. Maksymalna odległość pomiaru podyktowana była uwarunkowaniami zasięgowymi w środowisku pomiarowym.

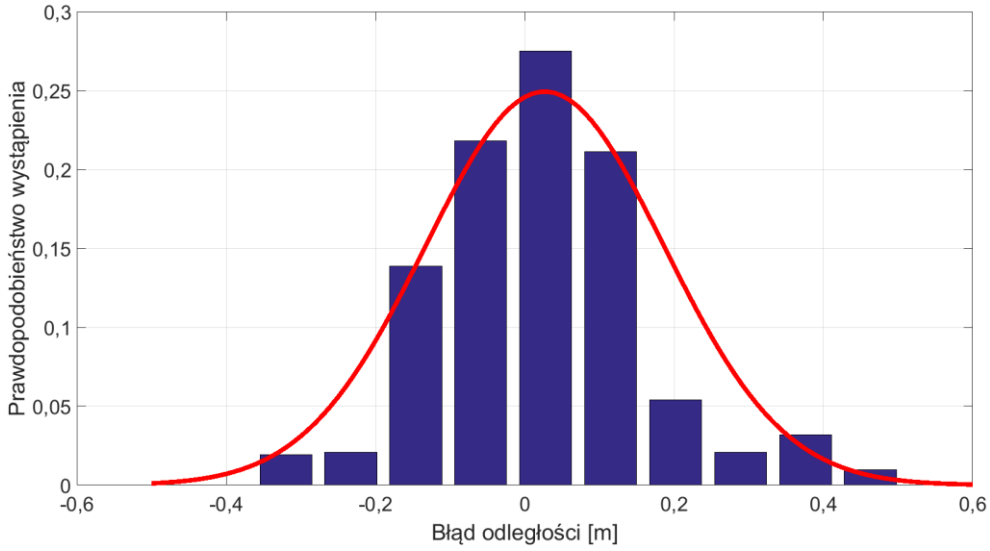
Na rys. 4.7 przedstawiono wyniki radiowych pomiarów odległości wykonane w warunkach stacjonarnych w środowisku wewnątrzbudynkowym w warunkach LOS. Analogiczną próbę wykonano na promie pasażerskim, która wykazała, że niezależnie od środowiska pomiarowego otrzymywane wyniki cechowały się powtarzalnym odchyleniem standardowym równym $\sigma_{RPO} = 0{,}14$ m, a błędy wyznaczanej odległości zawierały się w zakresie od - 29 cm do + 54 cm. Zauważono jednak, że w niektórych przypadkach jako odległość traktowana była wielodrogowa trasa propagacji sygnału radiowego, przy braku odbioru składowej pierwszej ścieżki. Zjawisko to było szczególnie widoczne w korytarzach promu pasażerskiego, gdzie w modułach odbiorczych niemożliwe było odebranie pierwszej ścieżki sygnału radiowego. Skutkowało to błędami pomiarowymi o dodatniej wartości średniej.



Rys. 4.7. Wyniki radiowych pomiarów odległości wykonanych w warunkach stacjonarnych w środowisku wewnątrzbudynkowym przy bezpośredniej widoczności urządzeń pomiarowych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Na rys. 4.8 przedstawiono histogram błędów radiowych pomiarów odległości, wykonanych w warunkach stacjonarnych przy bezpośredniej widoczności urządzeń pomiarowych, względem rzeczywistej odległości pomiędzy urządzeniami pomiarowymi. Podczas pomiarów na promie pasażerskim w warunkach NLOS (*Non-Line of Sight*) zauważono, że jako odległość pomiędzy urządzeniami pomiarowymi traktowana była składowa propagacji wielodrogowej sygnału radiowego. Nie przyczyniło się to występowania dodatkowych lokalnych maksimów błędów w wyznaczonym histogramie, a także nie stwierdzono występowania błędów pomiarowych np. rzędu pojedynczych metrów. Dodatkowo zauważono, że rozkład błędów pomiarowych może zostać przybliżony krzywą Gaussa, oznaczoną kolorem czerwonym na rys. 4.8, w przeciwieństwie do spodziewanego rozkładu logarytmiczno normalnego [88].



Rys. 4.8. Histogram błędów radiowych pomiarów odległości wykonywanych w warunkach stacjonarnych w środowisku promu pasażerskiego w warunkach LOS.

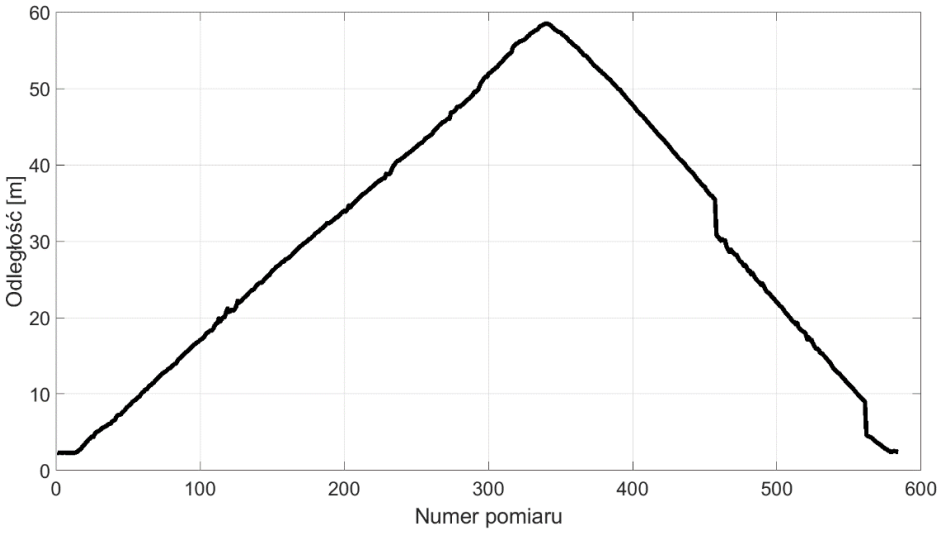
Histogram błędów radiowych pomiarów odległości wykonywanych w środowisku wewnątrzbudynkowym również można przybliżyć krzywą Gaussa, a jego kształt jest zbliżony do histogramu przedstawionego na rys. 4.8.

Na podstawie zebranych danych postanowiono symulować błędy radiowych pomiarów odległości, generując zmienne losowe o rozkładzie normalnym, z dodatnią wartością średnią wynoszącą 0,11 m.

Na rys. 4.9 przedstawiono wyniki radiowych pomiarów odległości podczas próby dynamicznej, kiedy osoba z urządzeniem pomiarowym w pierwszej fazie oddalała się od urządzenia stacjonarnego (ze stałą prędkością), a następnie przybliżała się do niego.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Z uzyskanych wyników wywnioskowano, że dynamiczne pomiary odległości cechują się zbliżoną dokładnością w odniesieniu do pomiarów wykonywanych w bezruchu. Widoczne są również nieciągłości realizacji radiowych pomiarów odległości spowodowane utratą pakietów danych w interfejsie radiowym na skutek uwarunkowań propagacyjnych.



Rys. 4.9. Wyniki radiowych pomiarów odległości zrealizowanych podczas poruszania się osoby ruchem jednostajnym w środowisku wewnątrzbudynkowym.

Należy zauważyć, że zastosowane moduły UWB typu DWM1000 firmy DecaWave posiadają możliwość pracy z trzema przepływnościami bitowymi interfejsu radiowego: 110 kb/s, 850 kb/s oraz 6800 kb/s oraz trzema częstotliwościami fali nośnej: 3,494 GHz, 4,492 GHz, 6,489 GHz. Badania dokładności radiowych pomiarów odległości przeprowadzono dla dwóch przepływności interfejsu radiowego 6800 kb/s oraz 850 kb/s i częstotliwości środkowej 6,489 GHz, a uzyskiwane wyniki dokładności estymacji odległości dla różnych parametrów interfejsu radiowego były zbliżone. W niniejszej rozprawie przedstawiono wyniki jedynie dla wyższej szybkości transmisji danych, gdyż przyjęto założenie, że radiowe pomiary odległości mają być wykonywane w jak najkrótszym czasie.

Badania pomiarowe przeprowadzono również dla różnych długości słowa preambuły i szybkości powtarzania impulsów w warstwie fizycznej. Uzyskiwane wyniki radiowych pomiarów odległości charakteryzowały się zbliżonym rozkładem błędów do przedstawionego w niniejszym rozdziale [97]. Pełna konfiguracja warstwy fizycznej interfejsu radiowego UWB została przedstawiona w rozdziale szóstym rozprawy.

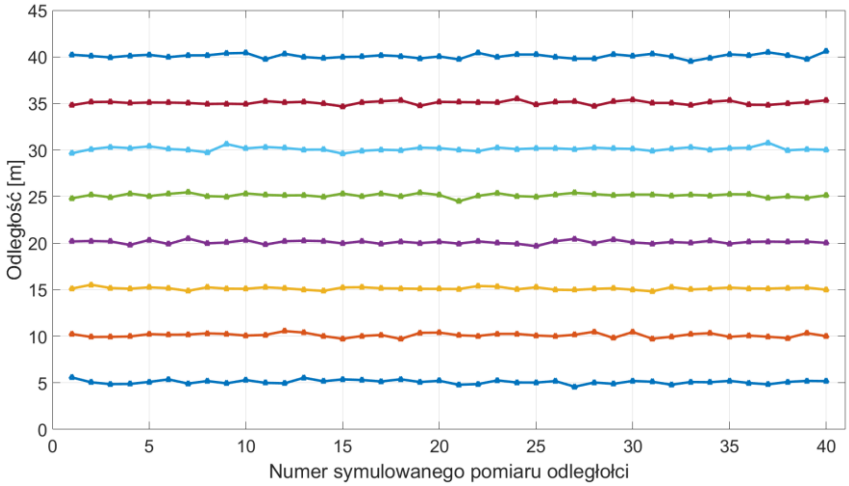
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.3.2. Symulacja wyników radiowych pomiarów odległości

Znajomość odchylenia standardowego wyników radiowych pomiarów odległości pozwoliła określić parametry wejściowe funkcji symulującej. W pierwszym kroku konieczne jest ustalenie symulowanych współrzędnych węzłów referencyjnych ($x_{WR_sym\ i}$, $y_{WR_sym\ i}$), gdzie i oznacza numer kolejnego węzła referencyjnego. Następnie obliczana jest symulowana odległość $d_{sym\ n}$ pomiędzy punktem trasy wzorcowej ($x_{ref\ n}$, $y_{ref\ n}$), wygenerowanej z użyciem symulatora systemu nawigacji inercyjnej, gdzie n oznacza numer symulowanej estymaty położenia, a danym węzłem referencyjnym ($x_{WR_sym\ i}$, $y_{WR_sym\ i}$)

$$d_{sym\,n} = \sqrt{(x_{ref\ n} - x_{WR_sym\ i})^2 + (y_{ref\ n} - y_{WR_sym\ i})^2}\ . \tag{4.2}$$

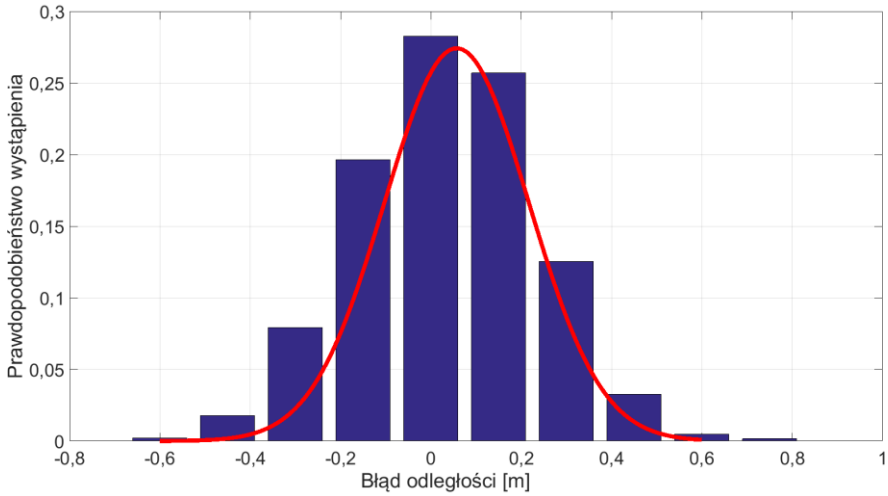
Następnie otrzymana wartość $d_{sym\ n}$ jest przekazywana jako argument funkcji *normrnd*($d_{sym\ n}$,σ_{RPO}) środowiska MATLAB, która symuluje błąd radiowego pomiaru odległości. Odchylenie standardowe σ_{RPO} radiowych pomiarów odległości wyznaczono podczas badań pomiarowych, omówionych na początku niniejszego rozdziału [24, 29, 31, 45, 51, 57].



Rys. 4.10. Symulowane wyniki radiowych pomiarów odległości w warunkach statycznych.

Na rys. 4.10 przedstawiono symulowane wyniki radiowych pomiarów odległości uzyskane z użyciem opisanego modelu symulacyjnego. Z kolei na rys. 4.11 przedstawiono histogram symulowanych błędów radiowych pomiarów odległości o rozkładzie normalnym i dodatniej wartości średniej 0,11 m. Otrzymane wyniki są zbliżone do rezultatów analizy pomiarów wykonanych w warunkach rzeczywistych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 4.11. Histogram symulowanych błędów radiowych pomiarów odległości dla środowiska wewnątrzbudynkowego i środowiska promu pasażerskiego.

4.4. Badania symulacyjne efektywności integracji danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym

Przeprowadzenie badań symulacyjnych miało na celu ocenę efektywności pracy zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, przy dostępnej różnej liczbie węzłów referencyjnych. Miarą efektywności zaproponowanej metody określono błąd $RMSE_{kor}$ wyznaczonych estymat położenia poruszającej się osoby, względem trasy referencyjnej, gdzie zmniejszenie błędu przekłada się na wzrost efektywności estymacji położenia.

4.4.1. Scenariusze badań symulacyjnych

Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch rodzajów tras, o kształcie litery L oraz cyfry 8. Stosując opracowane modele symulacyjne wygenerowano dane w postaci estymat położenia i wyników radiowych pomiarów odległości, o parametrach statystycznych zbliżonych do wartości uzyskiwanych przy pomocy rzeczywistych urządzeń hybrydowego systemu lokalizacyjnego.

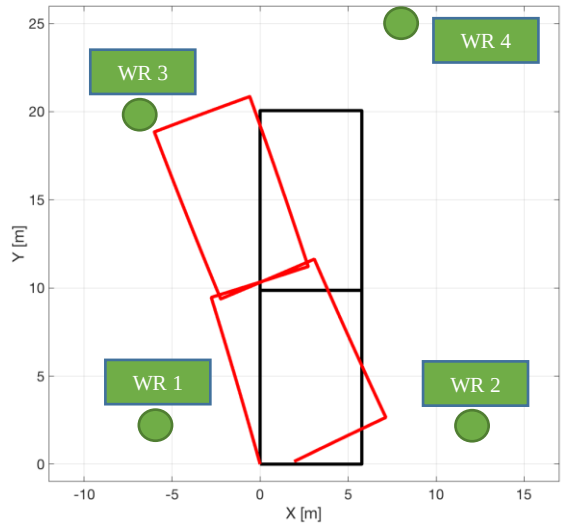
Na rys. 4.12 przedstawiono trasę referencyjną (kolor czarny) w kształcie cyfry 8 oraz trasę wyznaczoną z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony). Zielonymi znacznikami oznaczono przyjęte położenia węzłów referencyjnych WR, względem których symulowano radiowe pomiary odległości.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Podczas symulowania działania systemu nawigacji inercyjnej oraz radiowych pomiarów odległości przyjęto parametry statystyczne modeli błędów przedstawione w tabeli 4.1, które zostały dobrane na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Tab. 4.1. Przyjęte parametry statystyczne błędów w modelach symulacyjnych systemu nawigacji inercyjnej i radiowych pomiarów odległości.

Parametr	**Wartość**
Błąd orientacji początkowej	0,27 rad
Odchylenie standardowe kąta orientacji	0,003 rad/krok
Odchylenie standardowe długości wyznaczanej trasy	0,01 m/krok
Odchylenie standardowe radiowych pomiarów odległości	0,45 m



Rys. 4.12. Trasa wyznaczona z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) na tle trasy wzorcowej (kolor czarny).

Jako kryterium porównania dokładności estymat położenia, wyznaczonych w procesie integracji danych pozycyjnych, względem trasy wzorcowej przyjęto wartość pierwiastka błędu średniokwadratowego $RMSE_{kor}$ oraz odległość pomiędzy punktem startu i końca d_{start_stop} dla trasy zamkniętej (w kształcie cyfry 8)

$$RMSE_{kor} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{kor\,i} - x_{ref\,i})^2 + (y_{kor\,i} - y_{ref\,i})^2}{n}}, \tag{4.3}$$

gdzie n jest liczbą skorygowanych estymat położenia ($x_{kor\,i}$, $y_{kor\,i}$), a ($x_{ref\,i}$, $y_{ref\,i}$) punktami trasy wzorcowej.

Estymaty położenia wyznaczone z użyciem symulatora systemu nawigacji inercyjnej charakteryzowały się błędem położenia $RMSE_{st}$ wyznaczonym na podstawie zależności

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$RMSE_{st} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{sym\,i} - x_{ref\,i})^2 + (y_{sym\,i} - y_{ref\,i})^2}{n}}, \tag{4.4}$$

gdzie ($x_{sym\,i}$, $y_{sym\,i}$) są symulowanymi estymatami położenia osoby. Dla trasy w kształcie litery L błąd ten wynosił $RMSE_{st}$ = 2,08 m, zaś dla trasy o kształcie cyfry 8 $RMSE_{st}$ = 1,83 m. Dodatkowo obliczono błąd estymat położenia wyznaczanych wyłącznie z użyciem algorytmu radiolokalizacji

$$RMSE_{rad} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{x}_{Foy\,i} - x_{ref\,i})^2 + (\hat{y}_{Foy\,i} - y_{ref\,i})^2}{n}}, \tag{4.5}$$

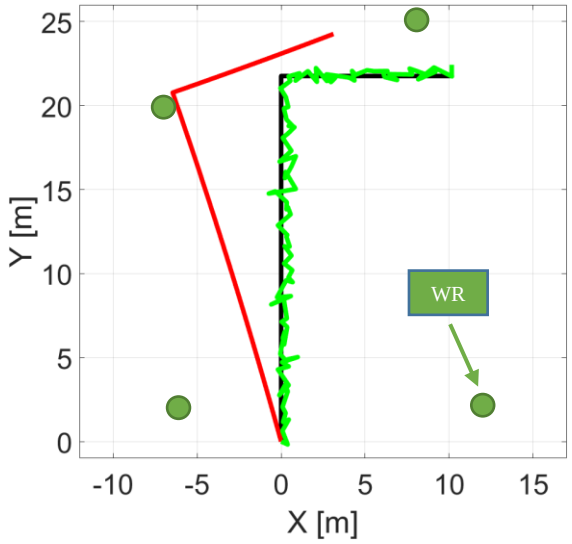
gdzie ($\hat{x}_{Foy\,i}, \hat{y}_{Foy\,i}$) są estymatami położenia wyznaczonymi z użyciem algorytmu Foya.

4.4.2. Przypadek nadokreśloności przy dostępności czterech węzłów referencyjnych

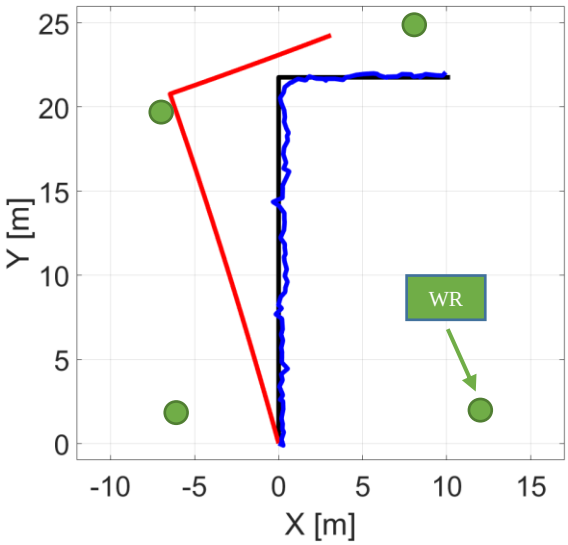
Badania symulacyjne metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym w pierwszej kolejności przeprowadzono dla przypadku znajomości a priori położenia węzłów referencyjnych. Wygenerowano wzorcową trasę o kształcie litery L oraz cyfry 8 z symulowanymi błędami orientacji początkowej i orientacji w trakcie ruchu osoby.

Na rys. 4.13 i rys. 4.15 przedstawiono trasę poruszającej się osoby wyznaczoną z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej oraz z użyciem algorytmu Foya, na podstawie radiowych pomiarów odległości obarczonych symulowanymi błędami o rozkładzie normalnym. Widoczne jest, że trasa wyznaczona na podstawie radiowych pomiarów odległości zapewnia dostateczną dokładność, aby estymować położenie osoby na obszarze testowym, a błąd RMSE wyznaczonych estymat położenia poruszającej się osoby względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{rad}$ = 0,78 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 4.13) oraz $RMSE_{rad}$ = 0,73 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 4.15). W dalszym kroku, przeprowadzono integrację danych pozycyjnych w procesie filtracji Kalmana i obliczono skorygowane estymaty położenia poruszającej się osoby (rys. 4.14 i rys. 4.16). Otrzymany końcowy błąd RMSE estymat położenia względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{kor}$ = 0,62 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 4.14) oraz $RMSE_{kor}$ = 0,63 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 4.16). W odniesieniu do początkowego błędu wynoszącego $RMSE_{st}$ = 2,08 m (trasa „L") i $RMSE_{st}$ = 1,83 m (trasa „8") stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 70 % i 65 %. Obliczona odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla skorygowanej trasy zamkniętej w kształcie cyfry 8 (rys. 4.16) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,3 m.

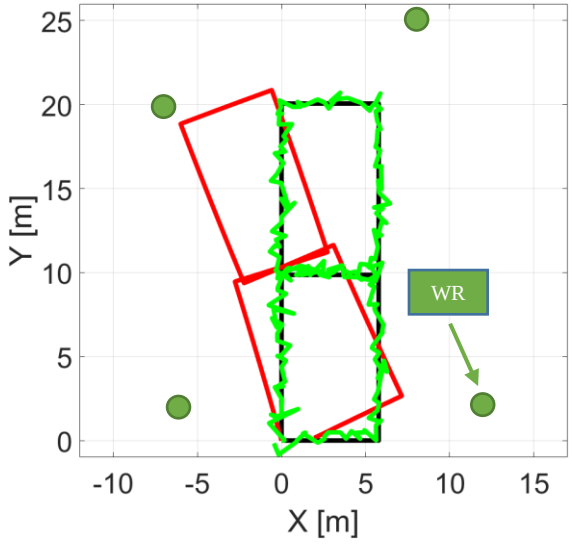
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



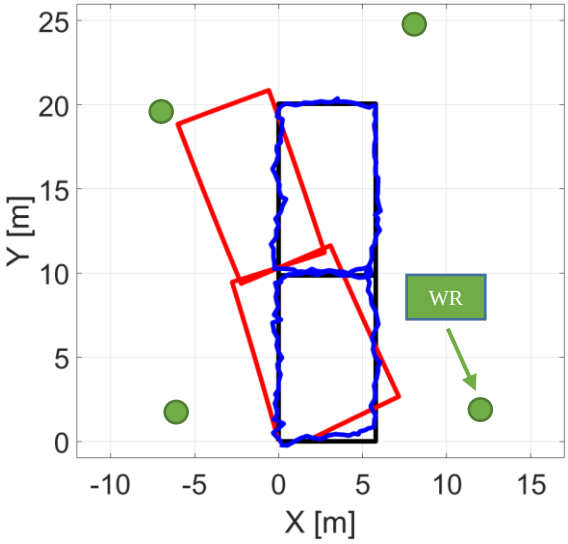
Rys. 4.13. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.14. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.15. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.16. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

Dalsze badania obejmowały przeprowadzenie testów dla nieznanego a priori położenia węzłów referencyjnych. Położenie trzech węzłów zostało wyznaczone z użyciem przedstawionego w rozdziale 3.3 rozprawy algorytmu ABC, a położenie czwartego węzła

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wyznaczono z użyciem algorytmu Foya, na podstawie radiowych pomiarów odległości pomiędzy węzłami z symulowanymi błędami pomiarowymi o rozkładzie normalnym. W tab. 4.3 przedstawiono wyznaczone współrzędne położenia węzłów referencyjnych z użyciem algorytmu ABC.

Tab. 4.2. Estymaty położenia węzłów referencyjnych WR wyznaczone z użyciem algorytmu ABC i z użyciem algorytmu Foya.

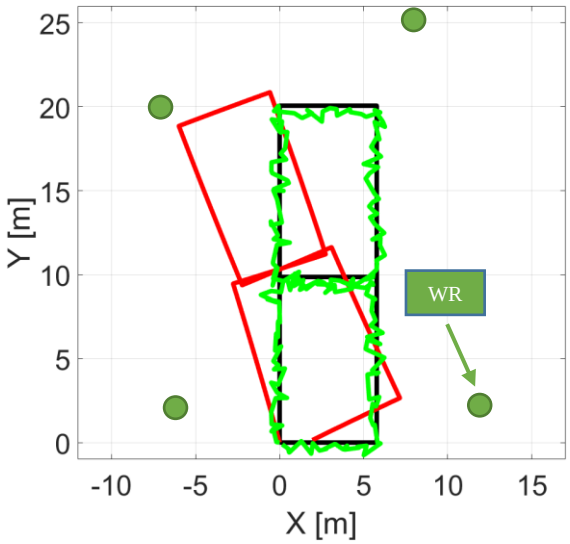
Nr węzła	X [m]	Y [m]	Błąd RMSE względem rzeczywistego położenia węzłów [m]
WR1	-6,42	2,44	0,43
WR2	11,57	2,44	0,43
WR3	-7,11	20,49	0,36
WR4	7,86	25,41	0,31

Na rys. 4.17 przedstawiono trasę wyznaczoną z użyciem algorytmu Foya, na podstawie radiowych pomiarów odległości z symulowanymi błędami o rozkładzie normalnym, kiedy położenie węzłów referencyjnych zostało uprzednio wyznaczone. Końcowy błąd RMSE wyznaczonej trasy wynosi $RMSE_{rad}$ = 0,85 m.

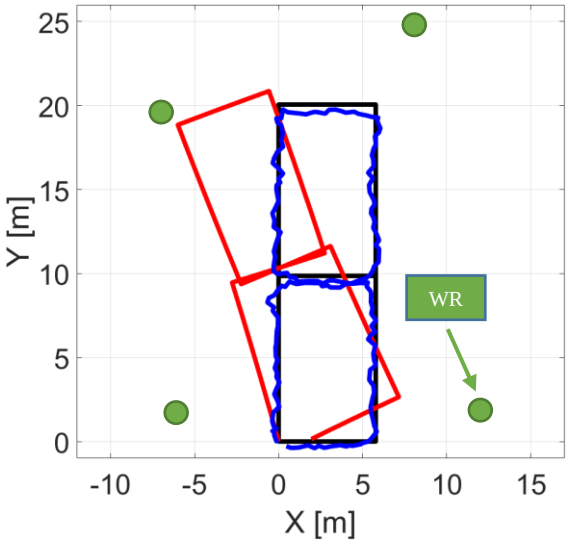
Z kolei na rys. 4.18 zilustrowano trasę poruszającej się osoby, oznaczoną kolorem niebieskim, obliczoną w procesie filtracji Kalmana, realizującej integrację danych pozycyjnych. Końcowy błąd wyznaczonych estymat położenia poruszającej się osoby względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{kor}$ = 0,79 m. W odniesieniu do błędu trasy wyznaczonej z użyciem modelu systemu nawigacji inercyjnej wynoszącego $RMSE_{st}$ = 1,82 m stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby o 56 %. Przesunięcie punktu końcowego trasy skorygowanej względem punktu początkowego wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,78 m. Warto zauważyć, że dla estymat położenia poruszającej się osoby wyznaczonej w procesie filtracji Kalmana przy znanym położeniu czterech węzłów referencyjnych różnica $d_{start\text{-}stop}$ wynosiła 0,3 m.

Konieczność wyznaczenia współrzędnych położenia węzłów referencyjnych prowadzi do zwiększenia błędów RMSE estymat położenia wyznaczanych przy użyciu algorytmu radiolokalizacji oraz w procesie filtracji Kalmana, jako że wprowadzane są dodatkowe błędy estymowanego położenia węzłów referencyjnych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 4.17. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.



Rys. 4.18. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.

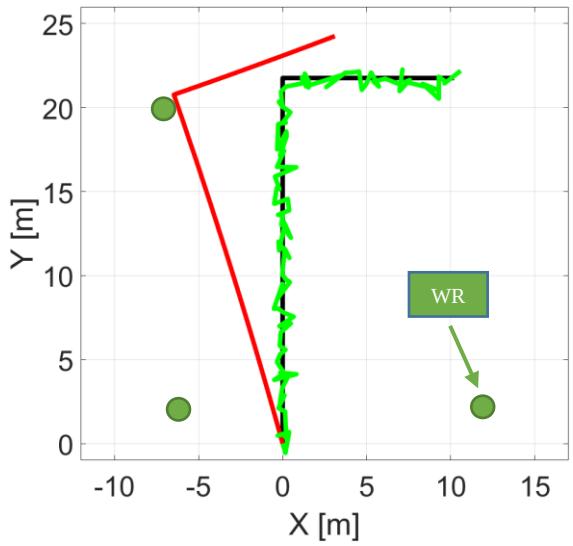
4.4.3. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych

W kolejnej próbie symulacyjnej przy dostępności wyników radiowych pomiarów odległości, z symulowanymi błędami pomiaru odległości o rozkładzie normalnym, do trzech węzłów referencyjnych o znanym położeniu (*WR1*, *WR2* oraz *WR3*), odtworzono ruch osoby po trasie o kształcie litery L i cyfry 8. Symulacje przeprowadzono z parametrami statystycznymi zawartymi w tabeli 4.1.

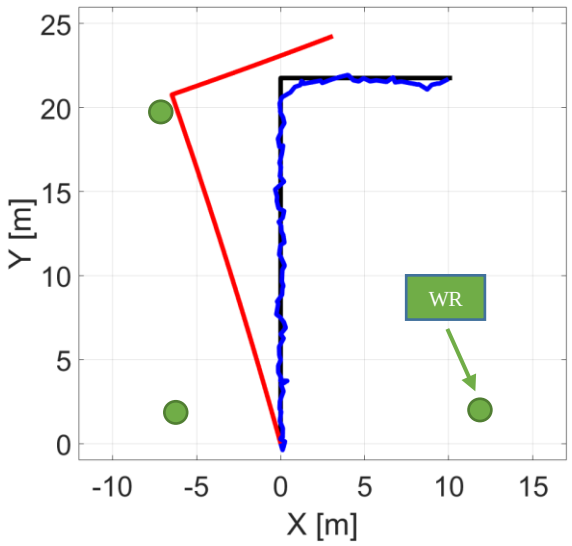
Na rys. 4.19 i rys. 4.21 przedstawiono trasę poruszającej się osoby wyznaczoną z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej oraz z użyciem algorytmu Foya. W analizowanym przypadku błąd wyznaczonych estymat położenia poruszającej się osoby względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{rad}$ = 0,9 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 4.19) oraz $RMSE_{rad}$ = 0,89 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 4.21). W kolejnym kroku na podstawie estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej oraz wyników algorytmu radiolokalizacji w procesie filtracji Kalmana obliczono skorygowane estymaty położenia poruszającej się osoby (rys. 4.20 i rys. 4.22). Końcowy błąd RMSE skorygowanych estymat położenia, wyznaczony względem trasy wzorcowej, wynosi $RMSE_{kor}$ = 0,79 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 4.20) oraz $RMSE_{kor}$ = 0,81 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 4.22). W odniesieniu do początkowego

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

błędu wynoszącego $RMSE_{st}$ = 2,08 m (trasa „L") i $RMSE_{st}$ = 1,83 m (trasa „8") stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 62 % i 55 %. Obliczona odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla skorygowanej trasy zamkniętej o kształcie cyfry 8 (rys. 4.22) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,46 m.



Rys. 4.19. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



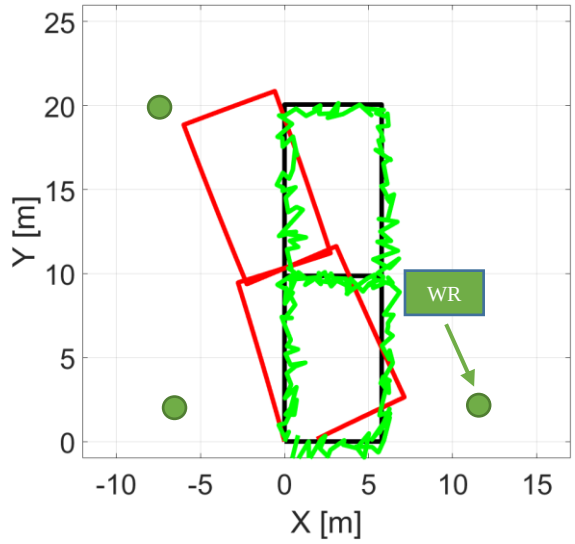
Rys. 4.20. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

W kolejnym etapie badań przeanalizowano dokładność wyznaczania estymat położenia przy konieczności uprzedniego wyznaczenia położenia węzłów referencyjnych. Wyznaczone współrzędne położenia węzłów są zgodne z zawartymi w tab. 4.2.

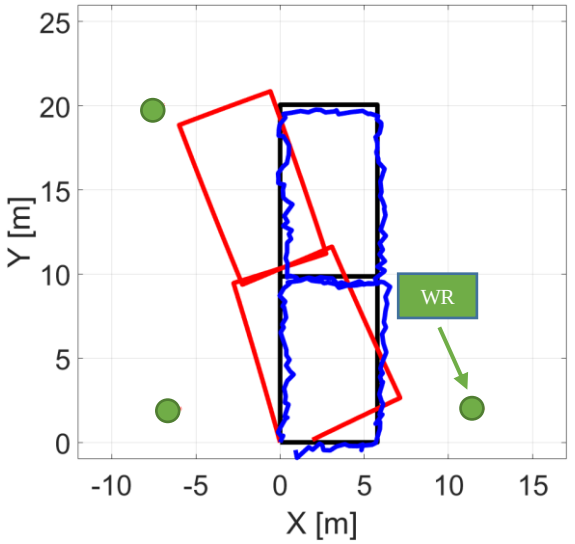
Na rys. 4.23 przedstawiono trasę poruszającej się osoby wyznaczoną z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej oraz z użyciem algorytmu Foya, na podstawie radiowych pomiarów odległości, z symulowanymi błędami pomiarowymi o rozkładzie normalnym, przy konieczności wyznaczenia położenia węzłów referencyjnych. Błąd estymat położenia poruszającej się osoby wyznaczonych z użyciem algorytmu Foya względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{rad}$ = 0,9 m. W procesie filtracji Kalmana obliczono skorygowane estymaty położenia poruszającej się osoby (rys. 4.24), których końcowy błąd RMSE względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{kor}$ = 0,81 m. W stosunku do początkowego błędu wynoszącego $RMSE_{st}$ = 1,83 m stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby o 56 %.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

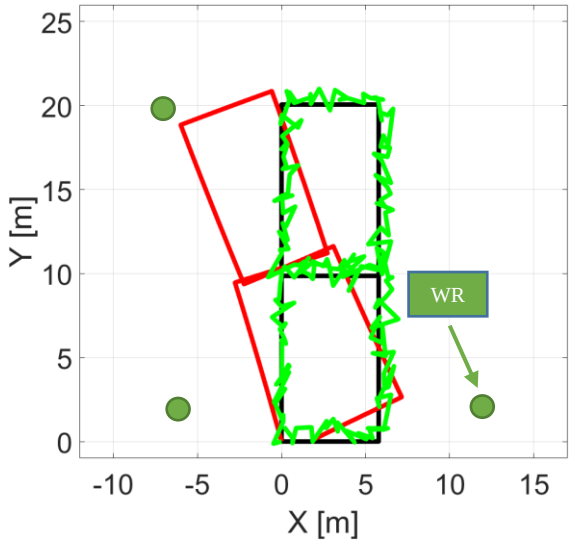
Obliczona odległość punktu końcowego trasy skorygowanej względem punktu początkowego (0,0) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,5 m.



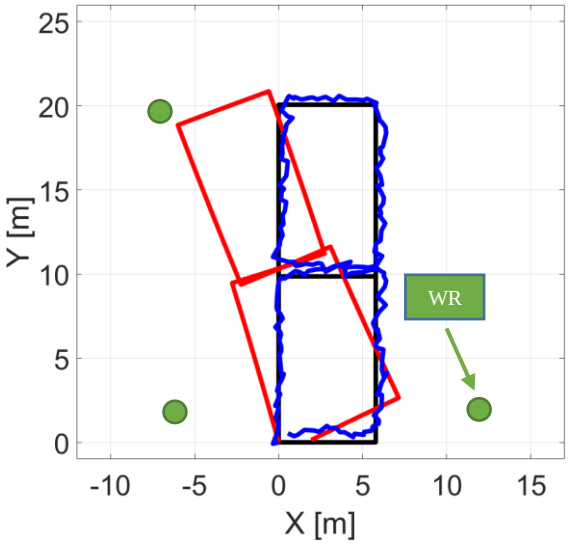
Rys. 4.21. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.22. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.23. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.



Rys. 4.24. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.4. Przypadek zredukowany przy dostępności dwóch węzłów referencyjnych

Scenariusz testów funkcjonalnych zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, przy zredukowanej do dwóch liczbie węzłów referencyjnych zakładał przeprowadzenie analizy wyznaczanych estymat położenia dla trasy o kształcie litery L i cyfry 8. Wykorzystano symulowane wyniki radiowych pomiarów odległości, z błędami pomiarowymi o rozkładzie normalnym, wykonywane do dwóch węzłów referencyjnych oznaczonych jako *WR1*, *WR2*.

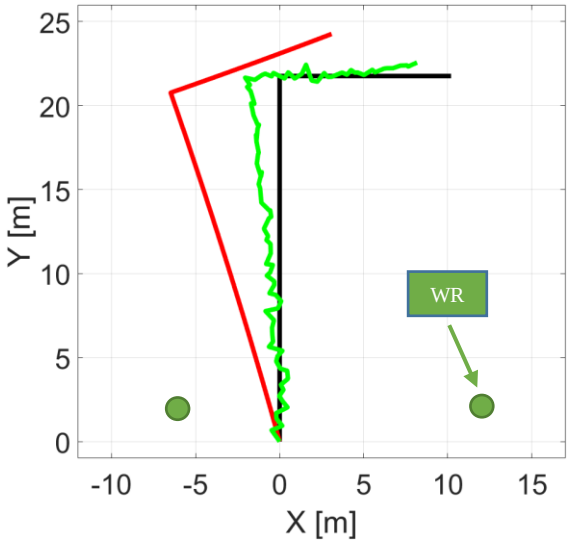
Zgodnie z algorytmem zaproponowanej metody przy występujących dwóch węzłach referencyjnych, początkowo wykonywaną operacją jest rotacja pierwszych $m = 30$ estymat symulowanego systemu nawigacji inercyjnej, aby skompensować błąd kąta odchylenia (*yaw*) orientacji początkowej. Estymowany błąd kąta orientacji *yaw* estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej wynosi $\alpha_{or} = -0{,}2$ rad (dla trasy o kształcie litery L) oraz $\alpha_{or} = -0{,}201$ rad (dla trasy o kształcie cyfry 8), co względem przyjętego w modelu symulacyjnym błędu orientacji $\alpha_{or_sym} = -0{,}27$ rad oznacza niedoszacowanie około -26 %.

Przed przystąpieniem do korekty błędów orientacji kolejno wyznaczanych estymat położenia dokonano ich rotacji o wyznaczony kąt α_{or} i umieszczono je na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych (rys. 4.25) i (rys. 4.27).

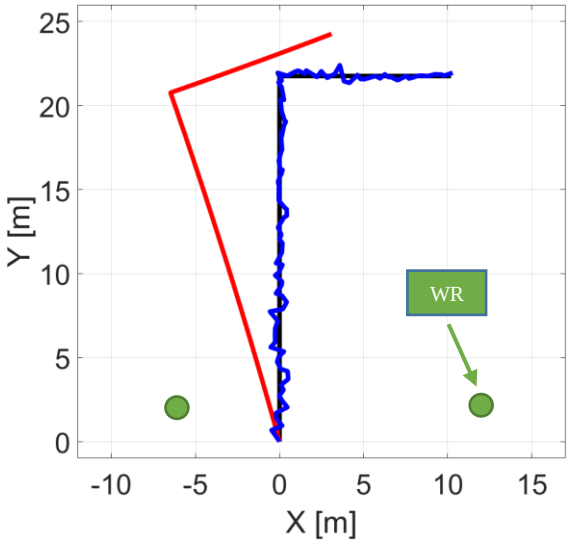
Na rys. 4.26 i rys. 4.28 przedstawiono wynik działania drugiego etapu korekcji zaproponowanej metody. Otrzymany błąd RMSE skorygowanych estymat położenia wynosi $RMSE_{kor} = 0{,}54$ m (dla trasy o kształcie litery L) oraz $RMSE_{kor} = 0{,}59$ m (dla trasy o kształcie cyfry 8).

W odniesieniu do błędu estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej wynoszącego $RMSE_{st} = 2{,}08$ m (dla trasy o kształcie litery L) i $RMSE_{st} = 1{,}83$ m (dla trasy o kształcie cyfry 8) stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 74 % i 67 %. Obliczona odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla skorygowanej trasy zamkniętej o kształcie cyfry 8 (rys. 4.28) wynosi $d_{start\text{-}stop} = 0{,}46$ m.

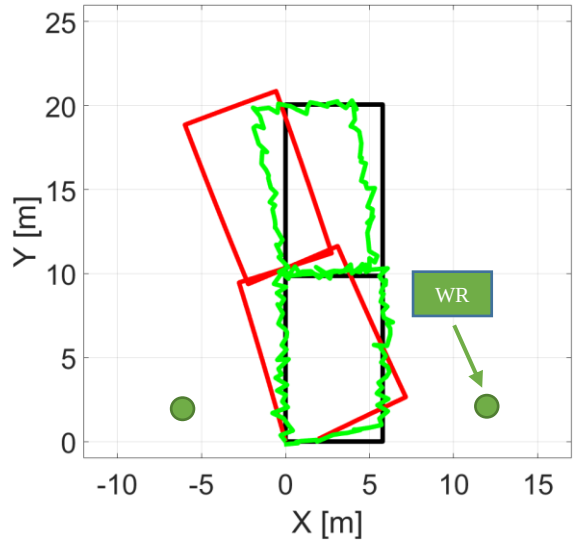
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



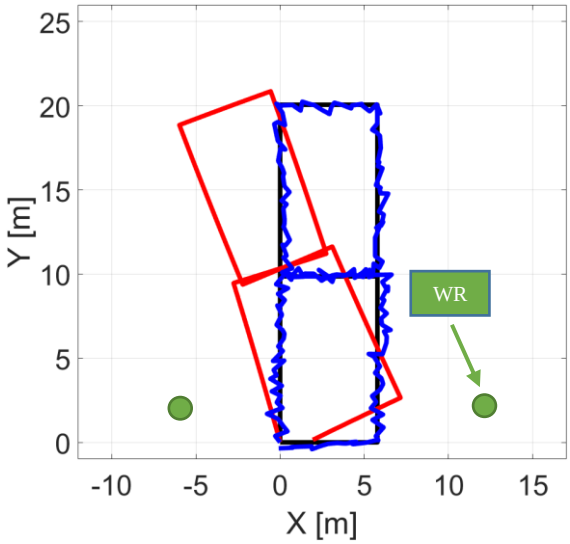
Rys. 4.25. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.26. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.27. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.28. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

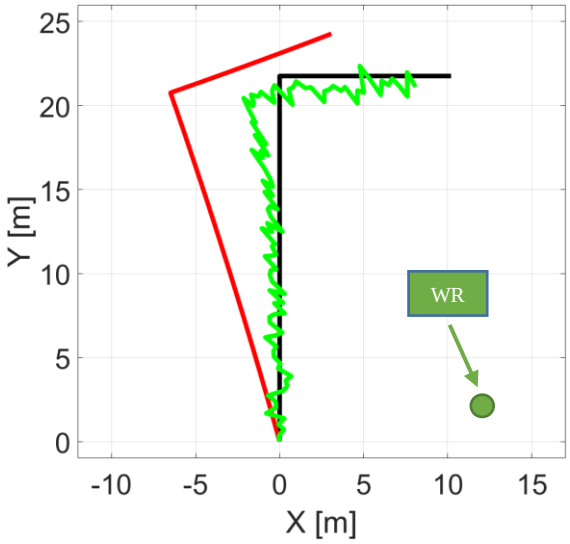
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.5. Przypadek minimalny przy dostępności jednego węzła referencyjnego

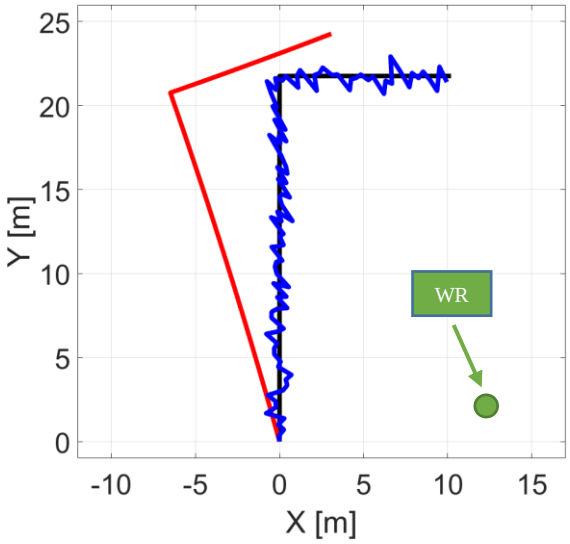
Scenariusz testów funkcjonalnych autorskiej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym przy zredukowanej do jedności liczbie węzłów referencyjnych przyjął postać analogiczną, jak przedstawiono w rozdziale 4.4.4. Przed wykonaniem korekty błędów orientacji kolejno wyznaczanych estymat położenia, z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej, dokonano rotacji każdej z nich o wyznaczony kąt α_{or} i umieszczono je na okręgach stałej odległości do węzła referencyjnego (rys. 4.29) i (rys. 4.31). Oszacowany błąd kąta odchylenia orientacji początkowej wynosi α_{or} = - 0,2 rad (dla trasy o kształcie litery L) oraz α_{or} = -0,22 rad (dla trasy o kształcie cyfry 8), co względem błędu orientacji przyjętego w modelu symulacyjnym α_{or_sym} = -0,27 rad stanowi niedoszacowanie około -26 % i -19 %.

Na rys. 4.30 i rys. 4.32 przedstawiono trasy wyznaczone z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej skorygowane o wyznaczony kąta α_{or} po drugim etapie korekcji. Końcowy błąd RMSE skorygowanych estymat położenia wynosi $RMSE_{kor}$ = 0,69 m (dla trasy o kształcie litery L) oraz $RMSE_{kor}$ = 0,72 m (dla trasy o kształcie cyfry 8), co w odniesieniu do błędów estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej stanowi zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 67 % i 61 %. Obliczona odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla skorygowanej trasy zamkniętej o kształcie cyfry 8 (rys. 4.32) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,9 m.

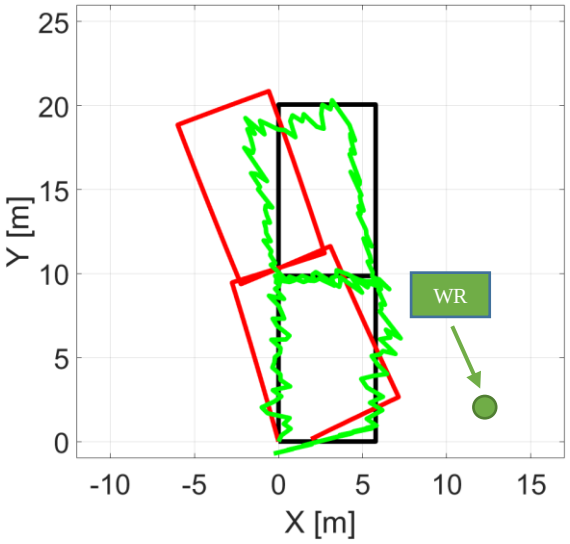
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



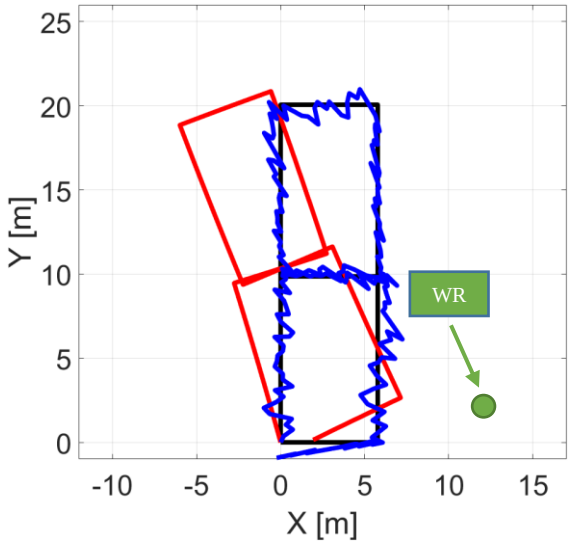
Rys. 4.29. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu.



Rys. 4.30. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanym błędem orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 4.31. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu.



Rys. 4.32. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanym błędem orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnych o znanym położeniu.

4.5. Podsumowanie badań symulacyjnych

W tab. 4.3 zestawiono wynikowe błędy RMSE skorygowanych estymat położenia otrzymane na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych metod integracji danych

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

w hybrydowym systemie lokalizacyjnym. Przedstawione wartości dotyczą metody korekcji opisywanej w literaturze (rys. 3.2), polegającej na zastosowaniu filtru Kalmana oraz zaproponowanej metody (rys. 3.3).

Analiza otrzymanych wyników badań symulacyjnych wykazuje, że zaproponowana metoda integracji danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym umożliwia zwiększenie dokładności estymacji położenia poruszającej się osoby, stosując integrację wyników działania algorytmu nawigacji inercyjnej oraz radiowych pomiarów odległości realizowanych przy zredukowanej liczbie węzłów referencyjnych. W każdym z analizowanych przypadków (komórki tab. 4.3 oznaczone kolorem niebieskim) błędy RMSE uległy zmniejszeniu, co przekłada się na wyznaczenie estymat położenia poruszającej się osoby z większą dokładnością względem trasy odniesienia. Oznacza to, że zwiększono dokładność położenia estymowanego z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, przy zastosowaniu radiowych pomiarów odległości do mniejszej od trzech liczby węzłów referencyjnych. Widoczne jest, że zmniejszenie liczby dostępnych węzłów referencyjnych przekłada się na zmniejszenie efektywności pracy metody integracji danych pozycyjnych.

Tab. 4.3. Zestawienie błędów RMSE estymat położenia wyznaczonych z użyciem omawianych metod lokalizacyjnych przy dostępnej różnej liczbie węzłów referencyjnych na podstawie symulowanych danych pozycyjnych.

Rodzaj trasy	Błąd RMSE estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej [m]	Liczba węzłów referencyjnych WR	Błąd RMSE estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu radiolokalizacji [m]	Błąd RMSE skorygowanych estymat położenia, wyznaczonych z użyciem modelu systemu nawigacji inercyjnej, w procesie filtracji Kalmana, znane położenie węzłów referencyjnych WR [m]	Zmniejszenie błędu RMSE skorygowanych estymat położenia względem estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej [%]	Błąd RMSE skorygowanych estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej, wyznaczone położenie węzłów WR [m]	Zmniejszenie błędu RMSE skorygowanych estymat położenia względem estymat położenia wyznaczonych z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej [%]
L	2,08	4	0,78	0,62	70,2	0,67	67,8
		3	0,9	0,79	61,9	0,69	67
		2	-	0,54	73,9	-	-
		1	-	0,69	67	-	-
8	1,83	4	0,73	0,63	65	0,79	56,1
		3	0,89	0,81	55	0,81	55,1
		2	-	0,59	67,2	-	-
		1	-	0,72	60,2	-	-

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W dalszym etapie prac badawczych efektywność pracy zaproponowanej metody sprawdzono w trakcie badań pomiarowych, z użyciem rzeczywistych urządzeń wchodzących w skład prototypowego hybrydowego systemu lokalizacyjnego.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rozdział 5

Prototyp hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Podczas realizacji projektu badawczo – rozwojowego pt. *System i urządzenia do zdalnego monitoringu położenia osób w środowiskach zamkniętych SALON*, nr DOBR-BIO4/058/13045/2013, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, zbudowano prototyp technologiczny umożliwiający monitorowanie położenia osób poruszających się w środowiskach zamkniętych. Wykonano urządzenia o zminiaturyzowanych wymiarach fizycznych, co pozwala w sposób dyskretny wyposażyć w nie monitorowane osoby.

W niniejszym rozdziale przedstawiono wykonane węzły referencyjne WR jak i moduł identyfikacji osobistej MIO, opisano zastosowane podzespoły oraz opracowane oprogramowanie. Autor rozprawy, jako główny wykonawca w projekcie SALON, brał czynny udział w procesie projektowania schematów i obwodów PCB opisywanych urządzeń oraz przy wytwarzaniu oprogramowania sterującego pracą interfejsów radiowych i jednostki obliczeniowej węzłów. Wyniki prac badawczych, przedstawione w niniejszej rozprawie, powstały już po zakończeniu w/w projektu i nie stanowiły jego rezultatów.

5.1. Konstrukcja prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Budowa hybrydowego systemu lokalizacyjnego, przedstawionego w rozdziale trzecim niniejszej rozprawy, wymagała opracowania następujących urządzeń: węzła MIO, węzłów referencyjnych WR oraz stanowiska do rejestracji i prezentacji danych SRP. Konieczne było zaproponowanie rozwiązania sprzętowego, które umożliwiałoby implementację algorytmu nawigacji inercyjnej oraz realizację radiowych pomiarów odległości. Przyjęto, że wymiana danych pomiarowych pomiędzy urządzeniami systemu odbywać się będzie drogą radiową [79].

Prototyp hybrydowego systemu lokalizacyjnego składa się z dwóch rodzajów urządzeń, nazywanych również węzłami. Pierwszym z urządzeń jest moduł identyfikacji osobistej MIO. Jest on przeznaczony do umieszczenia na poruszającej się osobie i ma za zadanie wyznaczać

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

estymaty jej położenia z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz realizować radiowe pomiary odległości. Drugim typem urządzeń są węzły referencyjne WR. Stanowią one punkt odniesienia przy realizacji radiowych pomiarów odległości jak i pośredniczą w wymianie danych pomiędzy modułem MIO, a punktem akwizycji danych. Jest nim stanowisko do rejestracji i prezentacji danych SRP, którego rolę pełni komputer PC z autorskim oprogramowaniem. Do SRP przesyłane są estymaty położenia poruszającej się osoby, wyznaczone w module identyfikacji osobistej MIO oraz wyniki radiowych pomiarów odległości, realizowanych pomiędzy każdym z węzłów (MIO i WR). Założono, że SRP będzie miał możliwości techniczne realizacji większej liczby obliczeń w czasie rzeczywistym, związanych z procesem łączenia radiowych pomiarów odległości z danymi uzyskanymi przy użyciu algorytmu nawigacji inercyjnej, niż urządzenie MIO. Dlatego to właśnie w oprogramowaniu stanowiska SRP zaimplementowano algorytmy integracji danych pozycyjnych. Komunikacja SRP z pozostałymi węzłami systemu lokalizacyjnego realizowane jest z użyciem jednego z węzłów referencyjnych WR, połączony przewodowo z zastosowaniem interfejsu RS-232.

Na rys. 5.1 przedstawiono widok wszystkich urządzeń wchodzących w skład omawianego prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego [2, 3, 4, 82, 92, 93, 94, 95].

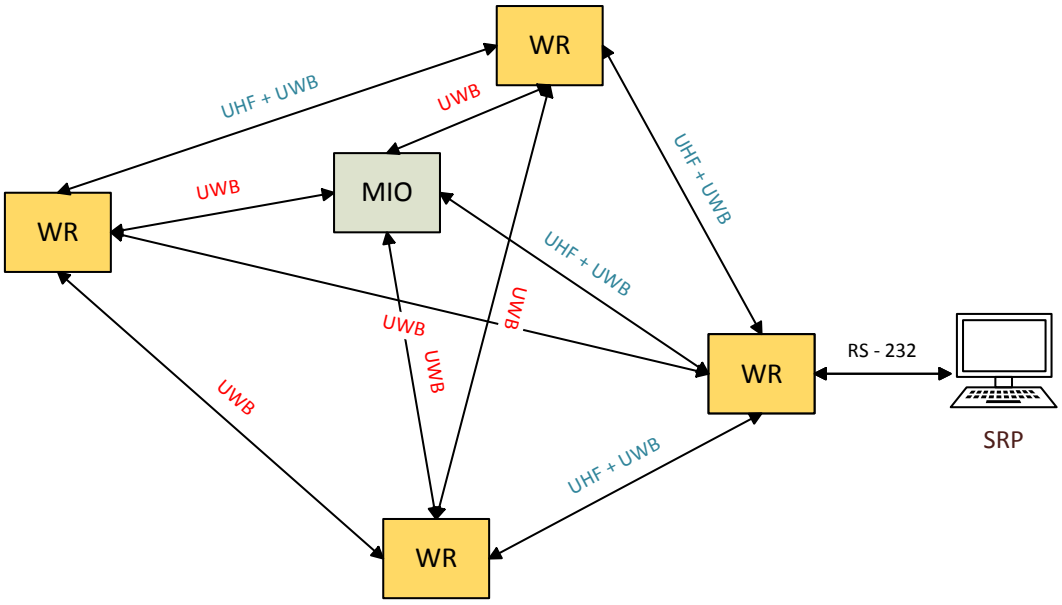
Rys. 5.1. Widok ogólny urządzeń prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

5.1.1. Sposób wymiany danych w prototypie hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Organizacja sposobu wymiany danych w sieci złożonej z węzłów WR oraz węzła MIO jest niezależna od geometrycznego ułożenia węzłów. Przyjęto, że węzeł MIO przesyła drogą radiową w pasmie UHF (*Ultra High Frequency*) wyznaczone estymaty położenia poruszającej się osoby do węzła referencyjnego WR, który ma bezpośrednie połączenie ze stanowiskiem SRP. Do pozostałych węzłów realizowane są jedynie radiowe pomiary odległości.

Każdy z węzłów referencyjnych realizuje radiowe pomiary odległości wyłącznie do pozostałych węzłów referencyjnych, a wyniki przesyła drogą radiową w pasmie UHF do węzła referencyjnego połączonego przewodowo ze stanowiskiem SRP. Na rys. 5.2 przedstawiono schemat blokowy i wymianę danych drogą radiową (z użyciem dwóch niezależnych interfejsów radiowych) i przewodową w hybrydowym systemie lokalizacyjnym.



UWB – komunikacja radiowa z użyciem interfejsu radiowego UWB 6,4896 GHz
UHF + UWB – komunikacja radiowa z użyciem interfejsu radiowego UHF 868 MHz i UWB 6,4896 GHz
RS - 232 – komunikacja przewodowa z użyciem interfejsu przewodowego RS -232

Rys. 5.2. Schemat blokowy budowy i wymiany danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym.

Komunikacja radiowa w paśmie UHF pomiędzy węzłami referencyjnymi WR utrzymywana jest w celu zapewnienia synchronicznego taktu szczelinowego TDMA wspólnego dla każdego z interfejsów radiowych [14, 82]. W rozdziale nie opisano zaimplementowanych mechanizmów synchronizacyjnych obydwu interfejsów radiowych, jako że wykracza to poza tematykę niniejszej rozprawy.

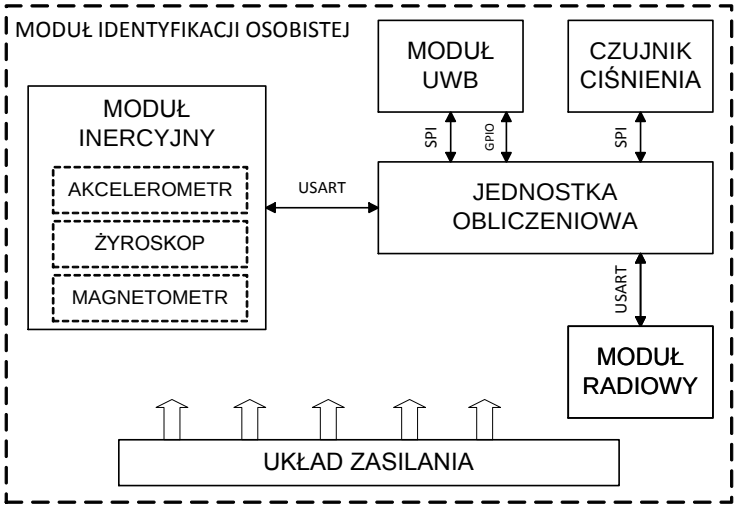
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

5.1.2. Opis budowy modułu identyfikacji osobistej MIO

Każdy z węzłów sieci niezależnie od pełnionej funkcji posiada wspólną platformę sprzętową, aby implementowane oprogramowanie algorytmów lokalizacyjnych i warstwy komunikacyjnej nie musiało być modyfikowane indywidualnie dla każdego z urządzeń.

Na rys. 5.3 przedstawiono schemat blokowy modułu identyfikacji osobistej MIO. Głównym elementem węzła MIO jest tzw. jednostka obliczeniowa. Konieczność wykonywania wielu obliczeń numerycznych wymaga użycia 32-bitowego mikrokontrolera STM32F405 firmy ST, wyposażonego w rdzeń ARM Cortex-M4, ze wsparciem obliczeń zmiennoprzecinkowych pojedynczej precyzji [92].

Głównym zadaniem jednostki obliczeniowej jest sterowanie pracą oraz odbieranie danych od modułu inercyjnego ORIENTUS firmy Advanced Navigation, dokonującego w sposób ciągły rejestracji parametrów ruchu poruszającej się osoby. Pomierzone przyspieszenia liniowe, prędkości kątowe oraz składowe wektora ziemskiego pola magnetycznego przesyłane są z modułu inercyjnego do jednostki obliczeniowej łączem szeregowym USART (*Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter*), pracującego z szybkością 230,4 kb/s. Cyfrowy czujnik ciśnienia powietrza atmosferycznego zamontowany węźle MIO komunikuje się z jednostką obliczeniową z zastosowaniem interfejsu SPI (*Serial Peripheral Interface*).



Rys. 5.3. Schemat blokowy modułu identyfikacji osobistej MIO.

Radiowe pomiary odległości wykonywane są w sposób synchroniczny z taktem czasowym techniki wielodostępu do kanału radiowego TDMA interfejsu radiowego UHF. Oznacza to, że oba interfejsy radiowe posiadają wspólną synchronizację czasową.

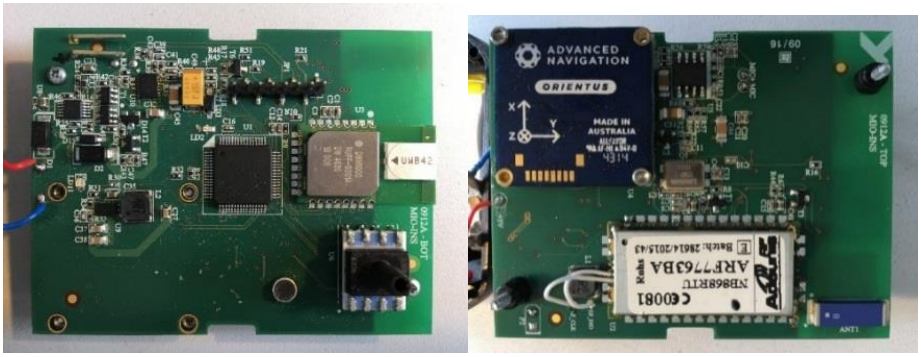
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Do realizacji radiowych pomiarów odległości zastosowano moduł UWB DWM1000 firmy DecaWave. Jest on zgodny w obrębie warstwy fizycznej ze standardem 802.15.4-2011 [19,20], co umożliwia wykorzystanie sprzętowego wsparcia w zakresie formowania nagłówka pakietów warstwy fizycznej oraz pomiarów czasów odebrania i nadania danych w interfejsie radiowym. Komunikacja z tym modułem odbywa się z zastosowaniem łącza szeregowego SPI, jak i przy wykorzystaniu portów GPIO (*General Purpose Input-Output*), w celu wymiany danych oraz konfiguracji rejestrów wewnętrznych układu.

Wyznaczone w jednostce obliczeniowej estymaty położenia oraz wyniki radiowych pomiarów odległości przekazywane są do wąskopasmowego modułu komunikacyjnego ARF7763BA firmy Adeunis, który drogą radiową w paśmie UHF za pośrednictwem węzła WR przesyła je do stanowiska SRP. W wąskopasmowym module radiowym zaimplementowano autorskie oprogramowanie odpowiedzialne za rozwiązania protokolarne, wykorzystując jedynie układ elektroniczny wybranych modułów radiowych. Komunikacja pomiędzy jednostką obliczeniową, a modułem łączności radiowej UHF realizowana jest z użyciem łącza szeregowego USART pracującego z szybkością 230,4 kb/s.

Węzeł MIO zasilany jest z akumulatora litowo-polimerowego, którego pojemność zapewnia około 8 godzin nieprzerwanej pracy. Podzespoły zasilane są napięciem 3,3 V, z wyjątkiem modułu inercyjnego, wymagającego napięcia 5 V [2, 3, 4, 19, 20, 38, 74, 82, 92, 93, 94, 95].

Wszystkie podzespoły odpowiadające wymienionym blokom funkcjonalnym węzła MIO (rys. 5.3) umieszczone zostały na wielowarstwowym obwodzie drukowanym PCB (*Printed Circuit Board*) i zamknięte w plastikowej obudowie. Na rys. 5.4 przedstawiono widok strony spodniej i wierzchniej obwodu PCB modułu identyfikacji osobistej MIO.



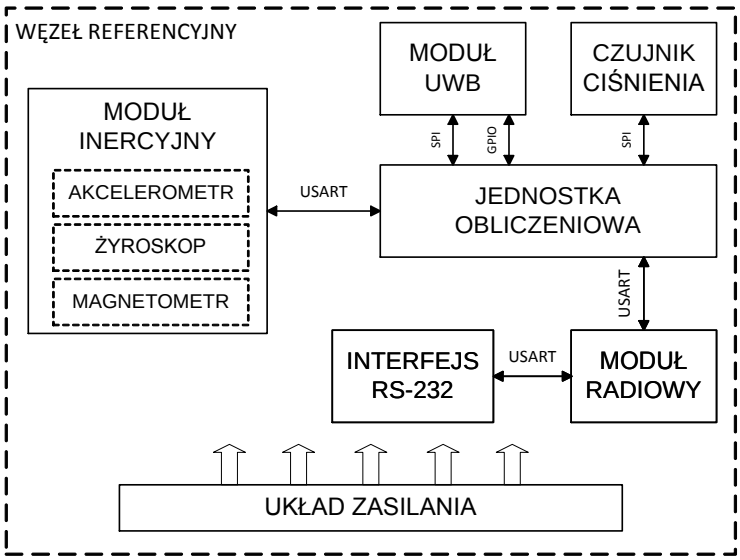
Rys. 5.4. Strona spodnia i wierzchnia obwodu PCB modułu identyfikacji osobistej MIO.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

5.1.3. Opis budowy węzła referencyjnego WR

Konstrukcja węzła referencyjnego WR w znacznym stopniu jest wspólna z węzłem MIO. Jest on również wyposażony w moduł inercyjny, umożliwiający wykrycie jego bezruchu. Węzły referencyjne zostały dodatkowo wyposażone w przewodowy interfejs komunikacyjny łączący jeden z węzłów WR ze stanowiskiem do rejestracji i prezentacji danych. Ma on służyć wymianie danych o estymatach położenia poruszającej się osoby (dane otrzymywanej drogą radiową od węzła MIO) oraz wynikach radiowych pomiarów odległości (dane otrzymywane drogą radiową z węzła MIO i pozostałych węzłów WR). Łącze to zostało zrealizowane z wykorzystaniem interfejsu RS-232, pracującego z szybkością 115,2 kb/s.

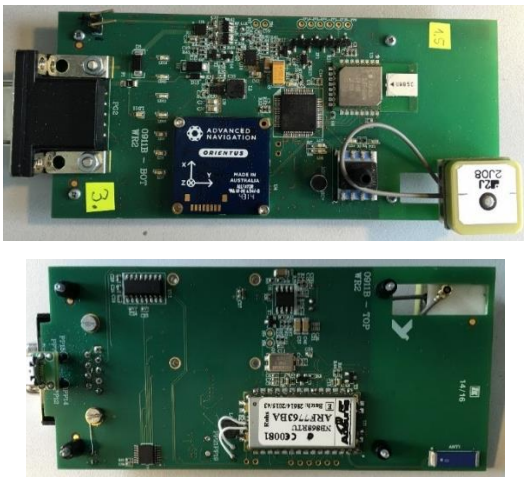
Na rys. 5.5 przedstawiono schemat blokowy węzła referencyjnego WR. W odniesieniu do rys. 5.3 widoczne jest, że węzeł WR dodatkowo wyposażono w przewodowy interfejs komunikacyjny RS-232.



Rys. 5.5. Schemat blokowy węzła referencyjnego WR.

Na rys. 5.6 przedstawiono w skali 1:2 stronę spodnią i wierzchnią obwodu PCB węzła referencyjnego WR. Brak konieczności miniaturyzacji urządzeń umożliwił zastosowanie akumulatora o większej pojemności, względem węzła MIO, celem wydłużenia czasu pracy z 8 do 12 godzin [2, 3, 4, 19, 20, 79, 92, 93, 95, 106].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 5.6. Strona spodnia i wierzchnia obwodu PCB węzła referencyjnego WR.

5.1.4. Stanowisko do rejestracji i prezentacji danych SRP

Rolę stanowiska do rejestracji i prezentacji danych pełni tablet przemysłowy typu F110 firmy GETAC wyposażony w czterowątkowy procesor Intel Core i5 2,3 GHz, 4 GB pamięci RAM oraz dysk SSD. Posiada on zainstalowany systemem operacyjny Microsoft Windows 7 Professional oraz dedykowane oprogramowanie opracowane na potrzeby prowadzonych badań. Wybrany tablet wyposażony jest w sprzętowe złącze RS-232, wykorzystywane do komunikacji z jednym z węzłów referencyjnych WR [82].

5.2. Oprogramowanie prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Oprogramowanie prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego zostało rozdzielone na część lokalizacyjną, realizującą algorytmy nawigacji inercyjnej i radiowych pomiarów odległości, implementowaną w mikrokontrolerze węzła pomiarowego (w jednostce obliczeniowej) oraz część obliczeniową odpowiedzialną za łączenie radiowych pomiarów odległości z wynikami działania algorytmu nawigacji inercyjnej, w postaci aplikacji środowiska Windows.

Oprogramowanie dla mikrokontrolera zostało napisane w języku C z elementami języka asembler w środowisku Microsoft Visual Studio 2013 z dodatkiem VisualGDB. Aplikację dla tabletu przemysłowego opracowano w środowisku MS Visual Studio w języku C# [41, 77, 82]

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

5.2.1 Oprogramowanie modułu identyfikacji osobistej MIO oraz węzłów referencyjnych WR

Oprogramowanie sterujące urządzeniami prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego jest wspólne dla węzła MIO oraz WR. Rozróżnienie funkcjonalności realizowane jest na podstawie identyfikacji adresu urządzenia, nadawanego na etapie kompilacji oprogramowania.

Program jednostki obliczeniowej został podzielony na dwa etapy wykonawcze – etap konfiguracji peryferii sprzętowych oraz etap roboczy.

Po włączeniu zasilania węzła referencyjnego i modułu identyfikacji osobistej realizowany jest proces konfiguracji układów peryferyjnych mikrokontrolera (interfejsy USART i SPI, porty GPIO) oraz podłączonego modułu inercyjnego i modułu UWB. Dodatkowo konfiguracji podlegają wewnętrzne liczniki modułu UWB wykorzystywane podczas procedury radiowych pomiarów odległości.

Konfiguracja modułu inercyjnego polega na modyfikacji ustawień wewnętrznego mikrokontrolera w zakresie doboru parametrów filtracji dolnoprzepustowej (ograniczającej wpływ szumów czujników inercyjnych dla specyfiki ludzkiego chodu), zakresów pomiarowych czujników inercyjnych oraz szybkości próbkowania rejestrowanych parametrów. Na podstawie badań opisanych w rozdziale 4.2.1 rozprawy postanowiono, że wystarczające będzie zbieranie 200 próbek przyspieszeń liniowych, prędkości kątowych oraz składowych ziemskiego pola magnetycznego na sekundę.

W trakcie inicjalizacji modułu UWB DWM1000 wykonywane jest zerowanie jego rejestrów przez okres 10 ms. Kolejnym krokiem, po uruchomieniu oscylatorów lokalnych modułu, jest konfiguracja wewnętrznych rejestrów układu. Wywoływana funkcja zawiera 23 podfunkcje dokonujące programowej konfiguracji modułu oraz ustalające parametry jego pracy oraz warstwy fizycznej interfejsu radiowego UWB [19, 20].

Ostatnim elementem procedury startowej węzła jest inicjalizacja protokołu radiowych pomiarów odległości, polegająca na przyjęciu wartości zerowych wszystkich wykorzystywanych zmiennych adresowych. Po zakończeniu procedury startowej ustawiana jest flaga informująca o zakończeniu procesu inicjalizacji peryferii sprzętowych węzła, co skutkuje wywołaniem części roboczej oprogramowania [2, 3, 4, 14, 19, 20, 77].

5.2.2. Oprogramowanie stanowiska SRP

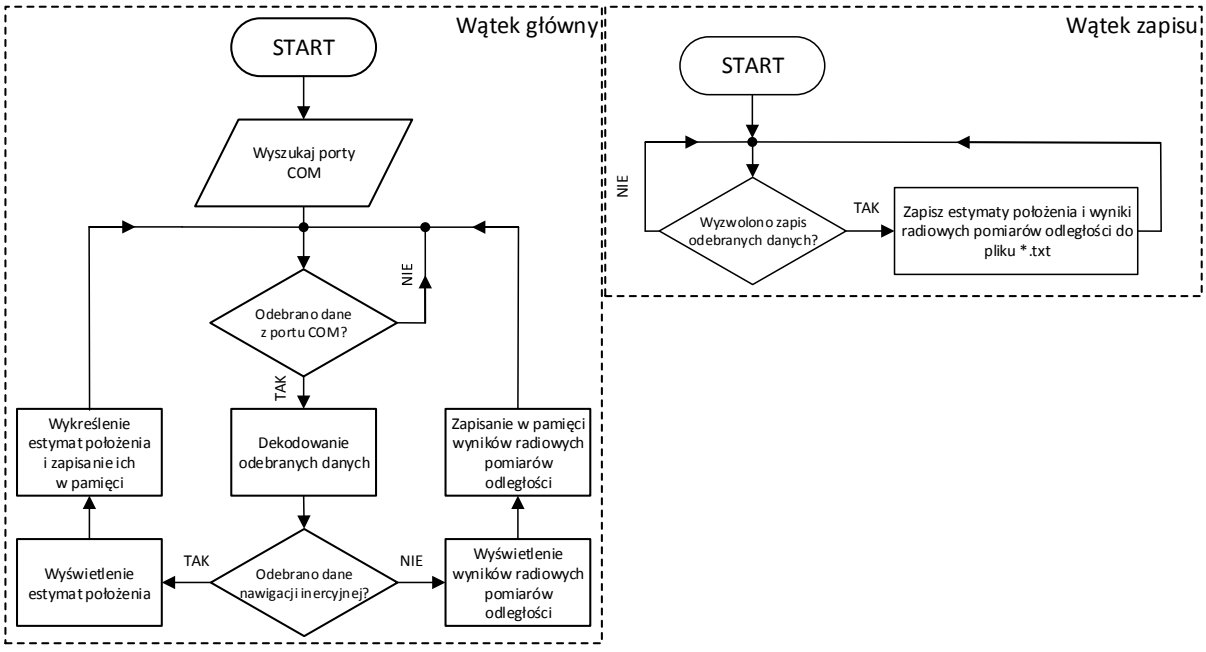
Oprogramowanie stanowiska do rejestracji i prezentacji, nazywane w dalszej części rozprawy *serwer_SRP*, jest wielowątkową aplikacją w środowisku Windows z graficznym

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

interfejsem użytkownika. Zadaniem aplikacji jest akwizycja danych pomiarowych, w skład których wchodzą wyznaczone w węźle MIO estymaty położenia poruszającej się osoby oraz wyniki radiowych pomiarów odległości, zarówno od węzła MIO jak i węzłów referencyjnych WR. Aplikacja umożliwia odbiór danych, z użyciem szeregowego portu komunikacyjnego RS-232, od jednego węzła referencyjnego WR pełniącego funkcję pośrednika pomiędzy interfejsem radiowym, a przewodowym. W graficznym interfejsie użytkownika możliwe jest wizualizowanie w czasie rzeczywistym wyznaczonych w węźle MIO estymat położenia poruszającej się osoby oraz wyników radiowych pomiarów odległości realizowanych przez węzeł MIO i węzły referencyjne WR. W pomocniczym oknie wyświetlane są komunikaty zawarte w odebranych pakietach danych od poszczególnych węzłów sieci [14, 82].

Na rys. 5.7 przedstawiono algorytm przetwarzania danych w aplikacji *serwer_SRP*. Wynikiem działania aplikacji jest plik tekstowy zawierający estymaty położenia wyznaczone w węźle MIO z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz wyniki radiowych pomiarów odległości.

Ostatnim elementem oprogramowania stanowiska SRP jest skrypt funkcyjny środowiska symulacyjnego MATLAB. Jest on odpowiedzialny za wczytywanie danych pomiarowych zawartych w pliku tekstowym generowanym w aplikacji *serwer_SRP*, a następnie przeprowadzenie integracji danych pozycyjnych stosując zaproponowaną metodę.



Rys. 5.7. Algorytm przetwarzania danych w aplikacji serwer_SRP.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rozdział 6

Badania pomiarowe hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że zaproponowana metoda umożliwia zwiększenie dokładności estymacji położenia poruszającej się osoby stosując integrację danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, nawet w przypadku mniejszej od trzech liczby węzłów referencyjnych. Opracowane i wykonane urządzenia, przedstawione w rozdziale 5 rozprawy, pozwoliły sprawdzić w warunkach rzeczywistych zaproponowaną koncepcję funkcjonowania hybrydowego systemu lokalizacyjnego.

W niniejszym rozdziale przedstawiono przeprowadzone testy funkcjonalne w środowisku wewnątrzbudynkowym, których celem było sprawdzenie efektywności pracy zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, gdzie miarą efektywności zaproponowanej metody określono błąd RMSE wyznaczonych estymat położenia poruszającej się osoby, względem trasy referencyjnej, gdzie zmniejszenie błędu przekłada się na wzrost efektywności estymacji położenia. Opisano użyte stanowisko badawcze i uzyskane wyniki estymacji położenia poruszającej się osoby, wyznaczone przy wykorzystaniu zaproponowanej metody łączącej wyniki działania algorytmu nawigacji inercyjnej z radiowymi pomiarami odległości.

6.1. Scenariusz badań pomiarowych

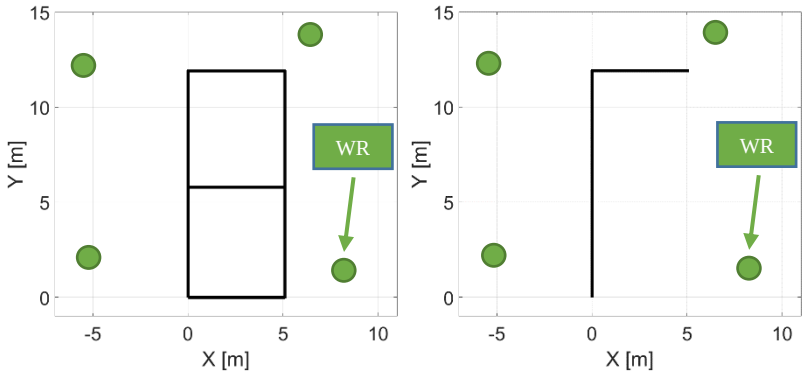
Scenariusz badań pomiarowych zakładał przeprowadzenie serii prób lokalizacji osoby poruszającej się na płaszczyźnie w środowisku wewnątrzbudynkowym, wyposażonej w moduł identyfikacji osobistej MIO. Na obszarze działania hybrydowego systemu lokalizacyjnego rozstawiono węzły referencyjne jako punkty odniesienia do wykonywania radiowych pomiarów odległości. Struktura środowiska testowego spowodowała, że komunikacja w interfejsie radiowym UHF i UWB odbywała się w warunkach LOS i NLOS. Otrzymane dane

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pomiarowe zostały przetworzone z użyciem zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych.

6.1.1. Środowisko badań pomiarowych hybrydowego systemu lokalizacyjnego

Testy funkcjonalne zaproponowanego hybrydowego systemu lokalizacyjnego przeprowadzono w budynku Wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Na jednym z korytarzy wytyczono dwie trasy wzorcowe, przedstawione na rys. 6.1, po których poruszała się monitorowana osoba, a wokół obszaru testowego rozmieszczono cztery węzły referencyjne WR. Jak to miało miejsce podczas badań symulacyjnych, jedna z tras miała kształt litery L, druga zaś cyfry 8. Długość całkowita trasy o kształcie litery L wynosiła 17,1 m, natomiast trasy o kształcie cyfry 8 36,3 m. Początek układu współrzędnych jest punktem, w którym rozpoczynano ruch podczas każdej próby pomiarowej.



Rys. 6.1. Kształty tras przyjętych podczas badań pomiarowych.

W tabeli 6.1 przedstawiono współrzędne węzłów referencyjnych WR rozmieszczonych na obszarze testowym.

Tab. 6.1. Położenie węzłów referencyjnych WR podczas badań pomiarowych.

Nr węzła	X [m]	Y [m]
WR1	-5,3	2
WR2	8,3	1,3
WR3	-5,6	12
WR4	6,5	14

6.1.2. Stanowisko badawcze

Przeprowadzenie testów funkcjonalnych wymagało zestawienia stanowiska pomiarowego, w skład którego wchodził moduł identyfikacji osobistej MIO, umieszczony na

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

stopie poruszającej się osoby, cztery węzły referencyjne WR oraz tablet przemysłowy. Oprogramowanie węzłów MIO, WR oraz serwera SRP umożliwiało realizację funkcjonalności zaproponowanego rozwiązania hybrydowego systemu lokalizacyjnego, przedstawionego w rozdziale 3 rozprawy.

Wybrane parametry warstwy fizycznej szerokopasmowego interfejsu radiowego UWB, wykorzystywanego do realizacji radiowych pomiarów odległości, przedstawiono w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Parametry warstwy fizycznej interfejsu radiowego UWB.

Parametr	**Wartość**	**Jednostka**
Częstotliwość środkowa	6,4896	GHz
Szybkość transmisji	6,8	Mb/s
Szerokość zajmowanego pasma	499,2	MHz
Widmowa gęstość mocy sygnału nadawanego	-41,3	dBm/MHz
Długość preambuły	256	Symboli
Szybkość powtarzania impulsów PRF (*Pulse Repetition Frequency*) w interfejsie radiowym UWB	64	MHz

Dobór parametrów warstwy fizycznej interfejsu radiowego UWB podyktowany był zamiarem realizacji jak największej liczby radiowych pomiarów odległości w jak najkrótszym przedziale czasu. Ustalono, że w szczelinie TDMA o czasie trwania 20 ms wykonane zostanie do ośmiu radiowych pomiarów odległości, pomiędzy danym węzłem, a innymi znajdującymi się w zasięgu komunikacyjnym. Podczas przeprowadzonych testów, w rzeczywistym scenariuszu wykonywano do czterech radiowych pomiarów odległości (cztery węzły referencyjne WR, jeden moduł identyfikacji osobistej MIO) w przydzielonym danemu węzłowi czasie dostępu do kanału radiowego. Nie zakładano większej liczby węzłów referencyjnych, gdyż na podstawie przeprowadzonych badań opisanych w rozdziale czwartym rozprawy, wynika, że w docelowych warunkach pracy zaproponowanego hybrydowego systemu lokalizacyjnego ciągła realizacja radiowych pomiarów odległości do więcej niż czterech węzłów referencyjnych wymagałaby ich rozmieszczenia w niewielkich odległościach od modułu identyfikacji osobistej. Spowodowane jest to silnym tłumieniem propagacyjnym sygnałów radiowych interfejsu radiowego UWB przekładającym się na utratę pakietów danych w interfejsie radiowym [19, 20, 23].

Na rys. 6.2 przedstawiono sposób umieszczenia modułu identyfikacji osobistej MIO na stopie monitorowanej osoby.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 6.2. Sposób umieszczenia modułu identyfikacji osobistej MIO na stopie monitorowanej osoby.

Umieszczenie modułu identyfikacji osobistej na stopie poruszającej się osoby umożliwia prawidłowe zarejestrowanie parametrów ruchu. Do montażu węzła MIO użyto plastikowego łoża przyczepionego taśmą typu „rzep" do buta, na podbiciu stopy.

Węzły referencyjne umieszczono na statywach (rys. 6.3) na wysokości 0,54 m. W algorytmie radiolokalizacji skompensowano wpływ wysokości zawieszenia węzłów referencyjnych na wyniki radiowych pomiarów odległości, stosując podstawowe operacje matematyczne bazujące na funkcjach trygonometrycznych.

Rys. 6.3. Sposób umieszczenia węzłów referencyjnych WR na statywach.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W scenariuszu testów funkcjonalnych założono, że węzły referencyjne nie zmieniają swojego położenia oraz, że monitorowane będzie położenie w osi OZ.

6.1.3. Ocena dokładności uzyskiwanych wyników

Wyznaczanie estymat położenia z użyciem metod lokalizacyjnych realizowane jest periodycznie, a z racji niejednostajności ruchu monitorowanej osoby trudne jest dokonanie oceny dokładności otrzymywanych estymat względem trasy wzorcowej. Zaproponowane scenariusze testów zakładały poruszanie się po trasach składających się z odcinków prostych, zatem zgodnie z metodą zaproponowaną w [81] kryterium oceny jest pierwiastek błędu średniokwadratowego (w sensie odległości estymowanego położenia od danego odcinka modelującego trasę wzorcową). Poszczególne odcinki trasy wzorcowej przybliżane są odcinkami z punktem początku (a_1, b_1) i końca (a_2, b_2) i równaniu $x = a_1 + (a_2 - a_1) \cdot t$, $y = b_1 + (b_2 - b_1) \cdot t$, dla przypadku dwuwymiarowego. W [81] przyjęto, że wartość parametru t, opisana równaniem (6.1), pozwala określić, czy dany punkt (wyznaczona estymata położenia) przynależy do danego odcinka trasy wzorcowej

$$t_i = \frac{(a_1 - \hat{x}_i)\cdot(a_2 - a_1) + (b_1 - \hat{y}_i)\cdot(b_2 - b_1)}{(a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}, \tag{6.1}$$

gdzie:

i numer kolejno analizowanego punktu,

a_1, b_1, a_2, b_2 współrzędne początku i końca odcinka.

Parametr t_i może przyjmować wartość z zakresu od 0 do 1, co świadczy o przynależności analizowanego punktu do danego odcinka, bądź też może przyjąć wartość spoza tego przedziału. W takim przypadku punkt wypada poza odcinkiem i jako odległość przyjmuje się mniejszą z odległości tego punktu do jednego z końców odcinka (6.3). Odległość punktu od prostej opisuje równanie

$$d_i = \frac{\sqrt{((\hat{x}_i - a_1)\cdot(\hat{y}_i - b_2) - (\hat{y}_i - b_1)\cdot(\hat{x}_i - a_2))^2}}{\sqrt{(a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}}, \tag{6.2}$$

a odległość analizowanego punktu od odcinka modelującego trasę wzorcową określa zależność

$$d_{i\ odcinka} = \begin{cases} d_i,\ dla\ \ 0 \le t \le 1 \\ \sqrt{(\hat{x}_i - a_1)^2 + (\hat{y}_i - b_1)^2},\ dla\ \ t < 0 \\ \sqrt{(\hat{x}_i - a_2)^2 + (\hat{y}_i - b_2)^2},\ dla\ \ t > 1 \end{cases}. \tag{6.3}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Każdą z zaproponowanych tras przybliżono *c* liczbą odcinków i obliczono błędy RMSE wyznaczonych estymat położenia przynależnych do danego odcinka $RMSE_{o\,n}$ korzystając z zależności [44, 77, 78]

$$RMSE_{o\,n} = \sum_{i=1}^{j} \begin{cases} d_i \text{ , } dla \;\; 0 \le t \le 1 \\ \sqrt{(\hat{x}_i - a_1)^2 + (\hat{y}_i - b_1)^2} \text{ , } dla \;\; t < 0 \text{ , } \\ \sqrt{(\hat{x}_i - a_2)^2 + (\hat{y}_i - b_2)^2} \text{ , } dla \;\; t > 1 \end{cases} \tag{6.4}$$

gdzie *j* oznacza liczbę analizowanych estymat położenia przynależnych do danego odcinka trasy wzorcowej. Całkowity błąd RMSE estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej obliczono korzystając z zależności

$$RMSE_{st_p} = \frac{\sum_{n=1}^{c} RMSE_{o\,n}}{c}, \tag{6.5}$$

gdzie *c* jest równe liczbie odcinków modelujących trasę wzorcową. W trakcie badań pomiarowych na podstawie zależności (6.4) i (6.5) określono błędy estymat położenia wyznaczonych: z użyciem algorytmu radiolokalizacji $RMSE_{rad_p}$ oraz z użyciem metod integracji danych pozycyjnych $RMSE_{kor_p}$.

6.2. Wyniki badań pomiarowych

W podrozdziale opisano wyniki badań pomiarowych przeprowadzonych w środowisku wewnątrzbudynkowym. Podobnie jak w przypadku badań symulacyjnych, scenariusze podzielono zależnie od liczby dostępnych węzłów referencyjnych. Jako kryterium oceny dokładności wyznaczanych estymat położenia przyjęto wartość pierwiastka błędu średniokwadratowego pozycji RMSE, a dla trasy zamkniętej dodatkowo obliczono różnicę pomiędzy punktem początkowym a końcowym $d_{start\text{-}stop}$ trasy. Należy zauważyć, że algorytm nawigacji inercyjnej zaimplementowano w oprogramowaniu węzła MIO, który w czasie rzeczywistym wyznaczał położenie poruszającej się osoby, natomiast operacje wykorzystujące wyniki radiowych pomiarów odległości realizowane były w stanowisku do rejestracji i prezentacji danych.

Estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej obarczone były błędem RMSE względem trasy odniesienia (oznaczonej kolorem czarnym), równym $RMSE_{st_p}$ = 1,05 m, dla trasy o kształcie litery L i $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m dla trasy o kształcie cyfry 8.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6.2.1. Przypadek nadokreśloności przy dostępności czterech węzłów referencyjnych

Podczas próby pomiarowej osoba poruszała się po trasie w kształcie litery L i cyfry 8, a moduł identyfikacji osobistej MIO realizował radiowe pomiary odległości do czterech węzłów referencyjnych. Aby zweryfikować efektywność pracy zaproponowanego rozwiązania przyjęto, że położenia węzłów referencyjnych są znane. W badań pomiarowych dokonano modyfikacji elementów macierzy **R,** opisanej zależnością (3.64)

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0{,}5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}05 \end{bmatrix}. \tag{6.6}$$

Elementy macierzy (6.6) dobrano w sposób empiryczny, na podstawie analizy charakteru błędów pomiarowych modułu inercyjnego.

Na rys. 6.4 i rys. 6.6 przedstawiono trasę poruszającej się osoby wyznaczoną z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, pracującego w module identyfikacji osobistej oraz z użyciem algorytmu radiolokalizacji, na podstawie wyników radiowych pomiarów odległości. Zauważalne jest, że trasa wyznaczona z użyciem algorytmu Foya zapewnia wystarczającą dokładność, aby estymować położenie poruszającej się osoby wewnątrz pomieszczeń w rzeczywistym środowisku, a błąd wyznaczonych estymat położenia poruszającej się osoby względem trasy wzorcowej (oznaczonej kolorem czarnym) wynosi $RMSE_{rad_p}$ = 0,38 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 6.4) oraz $RMSE_{rad_p}$ = 0,54 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 6.6). W dalszym kroku na podstawie estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz algorytmu radiolokalizacji przy zastosowaniu filtracji Kalmana obliczono skorygowane estymaty położenia poruszającej się osoby (rys. 6.5 i rys. 6.7). Otrzymany błąd RMSE estymat położenia względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,33 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 6.5) oraz $RMSE_{kor_p}$ = 0,5 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 6.7). W odniesieniu do początkowego błędu wynoszącego $RMSE_{st_p}$ = 1,05 m (trasa „L") i $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m (trasa „8") stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 68 % i 50 %. Obliczona odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla trasy zamkniętej o kształcie cyfry 8 (rys. 6.7) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,2 m.

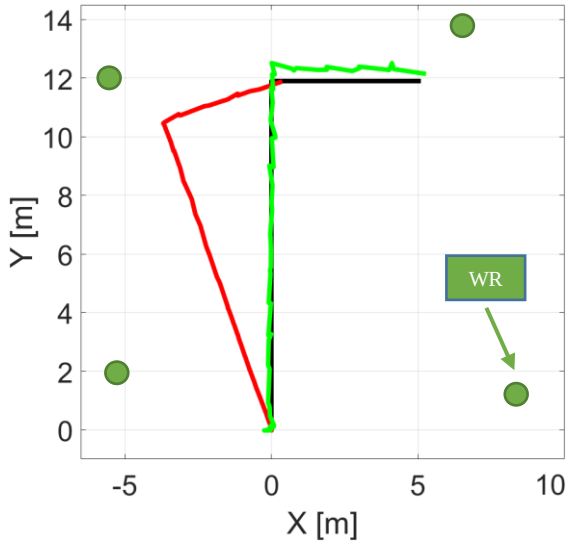
Dalsze badania obejmowały przeprowadzenie testów dla nieznanego a priori położenia węzłów referencyjnych. Położenie trzech węzłów zostało wyznaczone z użyciem przedstawionego w rozdziale 3.3.3 rozprawy algorytmu ABC, zaś położenie czwartego węzła

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

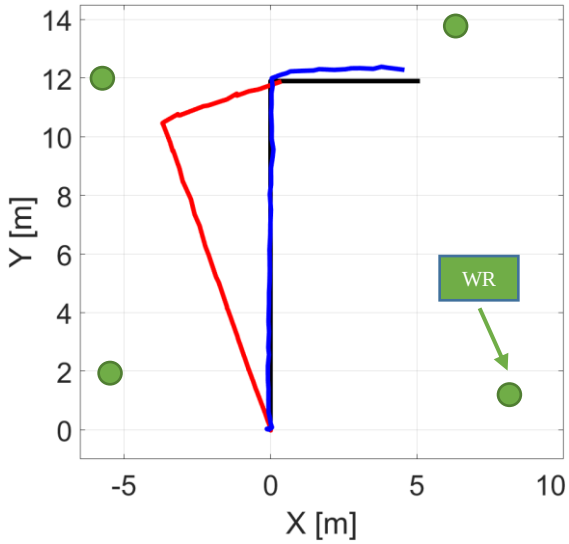
wyznaczono z użyciem algorytmu Foya na podstawie realizowanych przez węzły referencyjne radiowych pomiarów odległości. W tab. 6.3 przedstawiono wyznaczone współrzędne położenia węzłów referencyjnych na podstawie 100 zrealizowanych radiowych pomiarów odległości.

Tab. 6.3. Współrzędne położenia węzłów referencyjnych WR wyznaczone przy użyciu algorytmu ABC i algorytmu radiolokalizacji.

Nr węzła	X [m]	Y [m]	Błąd RMSE wyznaczonego położenia węzłów referencyjnych względem rzeczywistego położenia [m]
WR1	-5,47	1,69	0,11
WR2	8,1	1,7	0,09
WR3	-6,18	11,84	0,36
WR4	6,48	13,95	0,46



Rys. 6.4. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

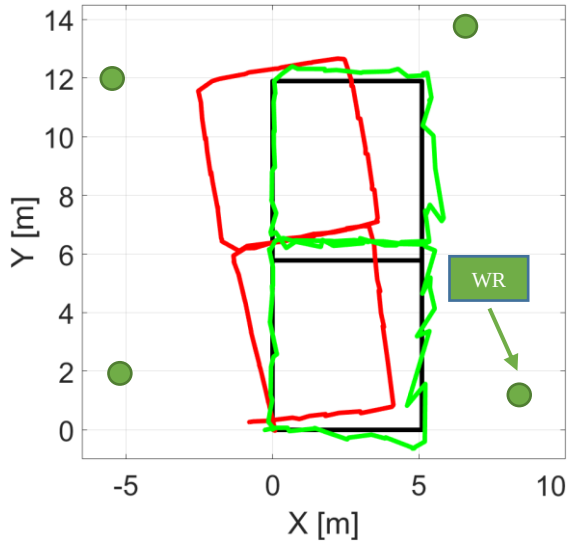


Rys. 6.5. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

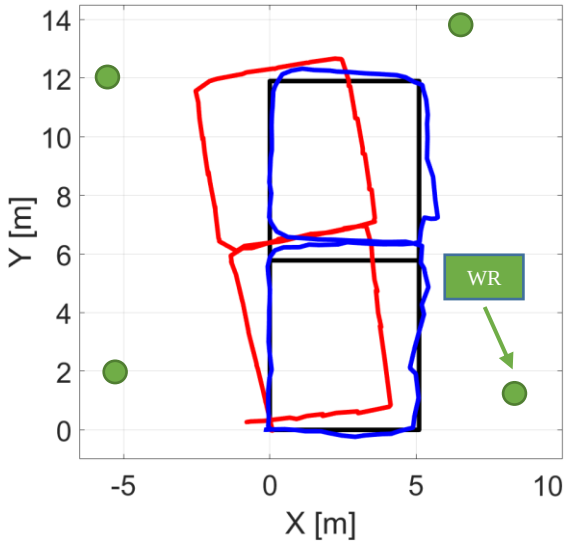
Na rys. 6.9 zilustrowano trasę poruszającej się osoby, oznaczoną kolorem niebieskim, obliczoną w procesie filtracji Kalmana, łączącej wynik działania algorytmu nawigacji inercyjnej oraz algorytmu radiolokalizacji. Błąd RMSE wyznaczonych skorygowanych estymat położenia poruszającej się osoby względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,57 m. W odniesieniu do błędu estymat położenia wyznaczonych wyłącznie z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej wynoszącego $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m (rys. 6.8) stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby o 44 %. Przesunięcie punktu końcowego względem punktu początkowego skorygowanej trasy wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,33 m. Błąd estymacji

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

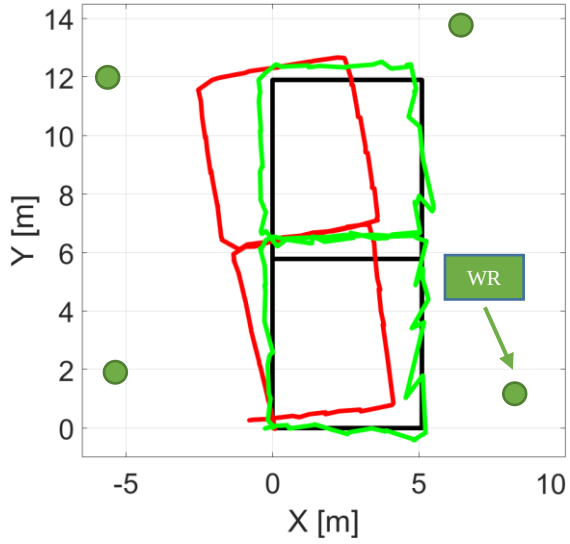
położenia przy użyciu wyłącznie algorytmu radiolokalizacji (rys. 6.8) wyniósł $RMSE_{rad_p}$ = 0,61 m.



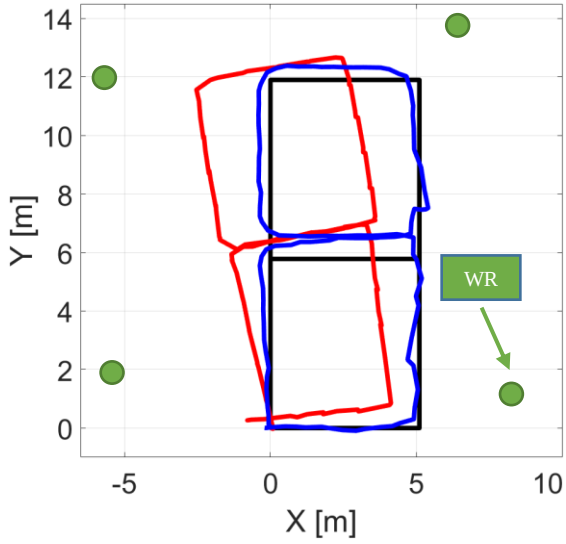
Rys. 6.6. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 6.7. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 6.8. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.



Rys. 6.9. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6.2.2. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych

Wyniki kolejnej próby pomiarowej przedstawiono na rys. 6.10 i rys. 6.12. Trasa poruszającej się osoby została wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz przy użyciu algorytmu radiolokalizacji, na podstawie radiowych pomiarów odległości realizowanych do trzech węzłów referencyjnych (*WR1, WR2, WR3*). W analizowanym przypadku błąd wyznaczonych estymat położenia poruszającej się osoby (z użyciem algorytmu radiolokalizacji) względem trasy wzorcowej (oznaczonej kolorem czarnym) wynosi $RMSE_{rad_p}$ = 0,44 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 6.10) oraz $RMSE_{rad_p}$ = 0,61 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 6.12). Następnie zastosowano filtrację Kalmana do wyznaczenia estymat położenia, na podstawie wyników działania algorytmu nawigacji inercyjnej oraz algorytmu radiolokalizacji. Skorygowaną trasę poruszającej się osoby przedstawiono na rys. 6.11 i rys. 6.13. Otrzymany błąd RMSE estymat położenia względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,4 m (dla trasy o kształcie litery L, rys. 6.11) oraz $RMSE_{kor_p}$ = 0,58 m (dla trasy o kształcie cyfry 8, rys. 6.13). W odniesieniu do początkowego błędu wynoszącego $RMSE_{st_p}$ = 1,05 m (trasa „L") i $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m (trasa „8") stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 62 % i 43 %. Obliczona odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla trasy zamkniętej o kształcie cyfry 8 (rys. 6.13) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,19 m.

W kolejnym kroku przeanalizowano dokładność wyznaczania estymat położenia węzła MIO przy konieczności wyznaczenia położenia węzłów referencyjnych. Wyznaczone współrzędne położenia węzłów (*WR1, WR2, WR3*) przedstawiono w tab. 6.3.

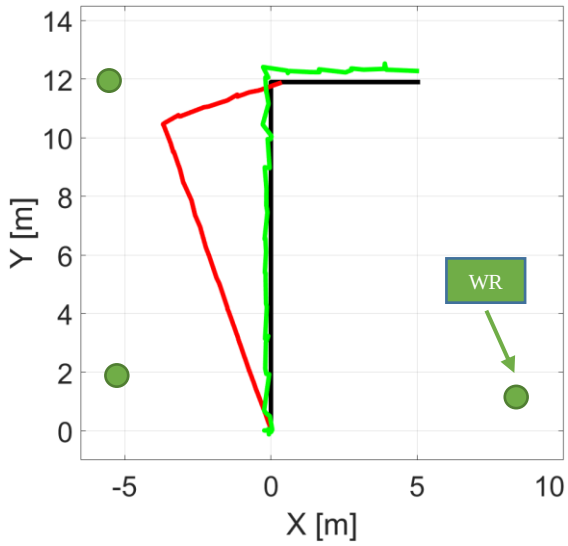
Na rys. 6.14 przedstawiono trasę poruszającej się osoby wyznaczoną z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz przy użyciu algorytmu radiolokalizacji. Użyto radiowych pomiarów odległości do trzech węzłów referencyjnych, których położenie zostało wyznaczone z użyciem algorytmu ABC. Błąd estymat położenia poruszającej się osoby (wyznaczonych z użyciem algorytmu radiolokalizacji) względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{rad_p}$ = 0,7 m.

W następnym kroku na podstawie wyników algorytmu nawigacji inercyjnej oraz algorytmu radiolokalizacji w procesie filtracji Kalmana obliczono skorygowane estymaty położenia poruszającej się osoby (rys. 6.15).

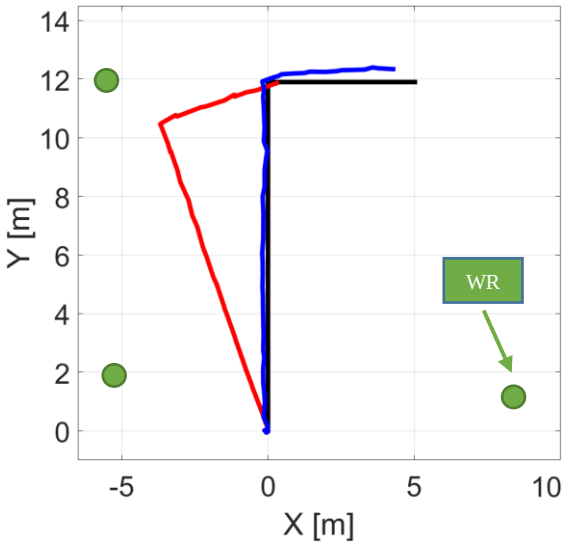
Otrzymany błąd RMSE estymat położenia względem trasy wzorcowej wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,68 m. W stosunku do początkowego błędu wynoszącego $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 33 %. Obliczona

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

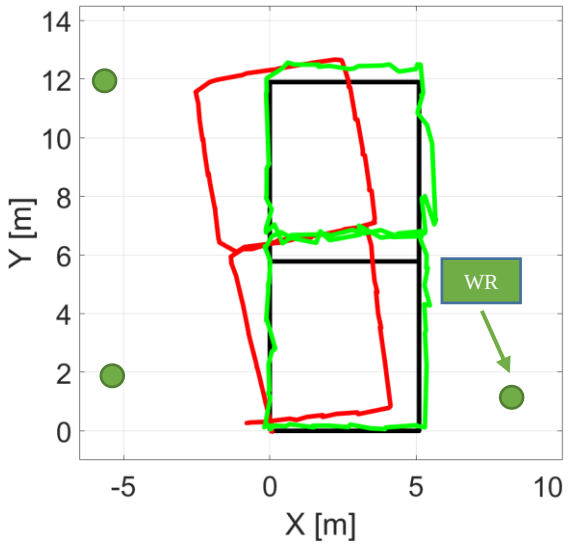
odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,24 m (rys. 6.15).



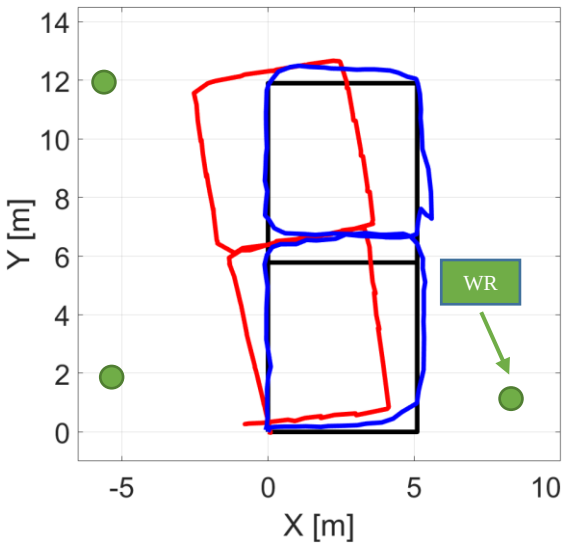
Rys. 6.10. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 6.11. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

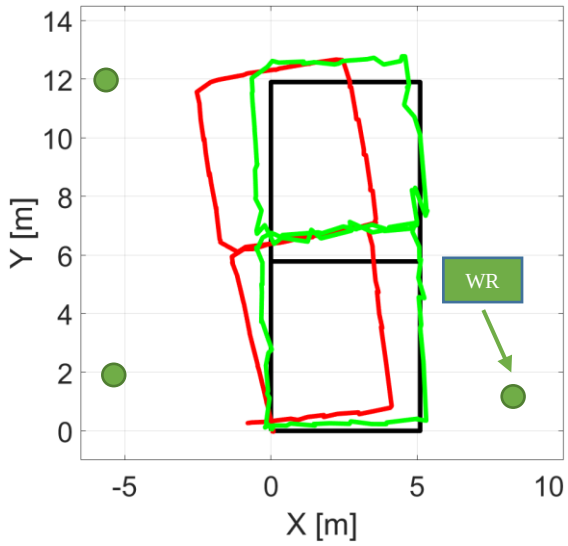


Rys. 6.12. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

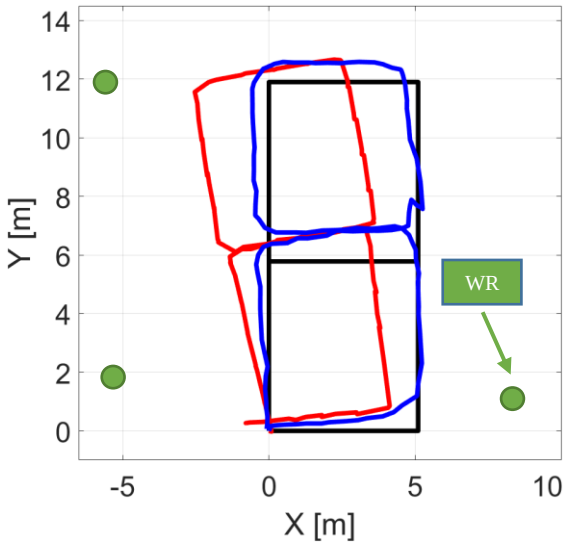


Rys. 6.13. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.14. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.



Rys. 6.15. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.

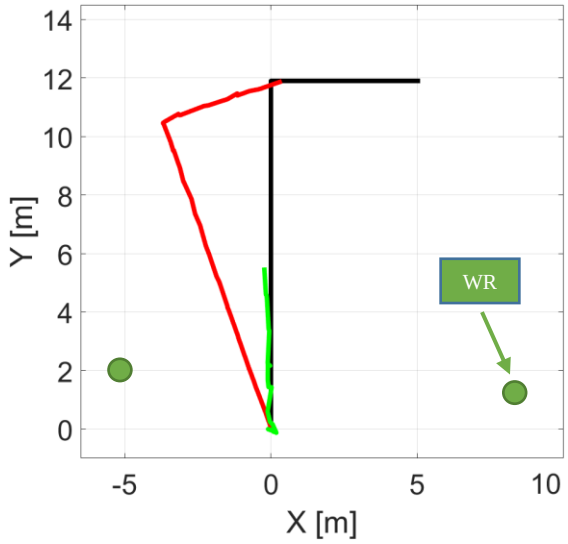
6.2.3. Przypadek zredukowany przy dostępności dwóch węzłów referencyjnych

Scenariusz badań pomiarowych efektywności zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym przy zredukowanej do dwóch liczbie węzłów referencyjnych zakładał przeprowadzenie analizy wyznaczanych estymat położenia dla trasy w kształcie litery L i cyfry 8. Radiowe pomiary odległości były realizowane pomiędzy modułem identyfikacji osobistej MIO i dwoma węzłami referencyjnymi *WR1*, *WR2* (tab. 6.1).

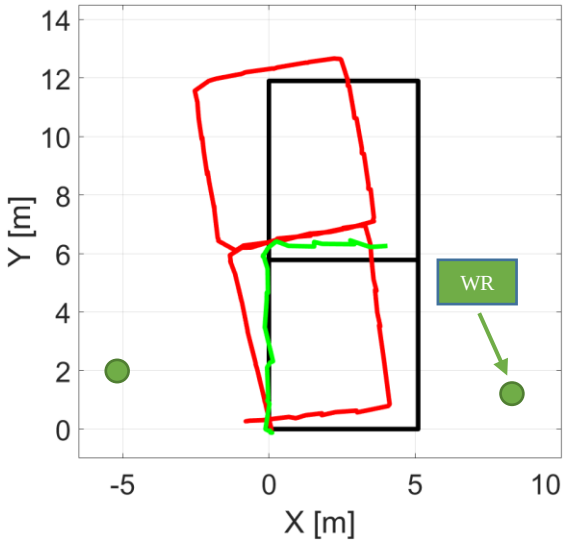
Zgodnie z zaproponowaną metodą przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych, początkowo wykonywaną operacją jest rotacja pierwszych 30 estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, aby skompensować błąd orientacji początkowej.

Na rys. 6.16 i 6.17 przedstawiono wynik pierwszego kroku algorytmu korekty estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej. Dokonano iteracyjnej rotacji pierwszych 30 estymat położenia poszukując minimum błędu RMSE pomiędzy nimi, a estymatami położenia umieszczonymi na okręgach stałej odległości do dwóch węzłów referencyjnych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.16. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) częściowo skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 6.17. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) częściowo skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

Operacja ta pozwoliła oszacować błąd kąta orientacji α_{or} trasy wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, który wynosi α_{or} = -0,2 rad (dla trasy o kształcie litery L) oraz α_{or} = -0,165 rad (dla trasy o kształcie cyfry 8). Wyznaczony kąt orientacji względem rzeczywistego błędu orientacji początkowej α_{or_pom} = -0,213 (dla trasy o kształcie litery L) i α_{or} = -0,17 rad (dla trasy o kształcie cyfry 8) rad różni się odpowiednio o -7 % i 3 %.

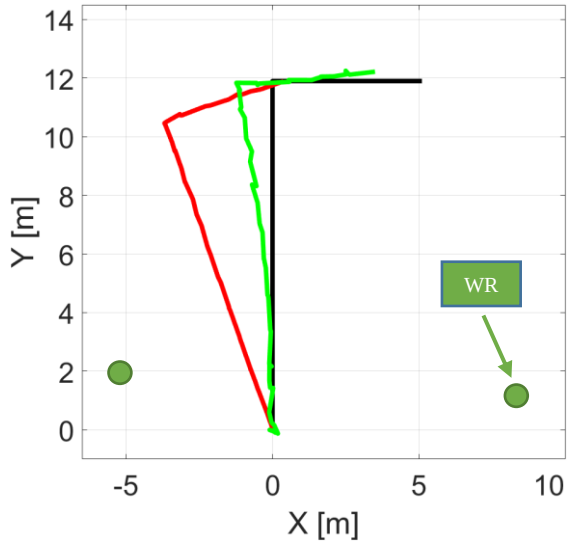
Przed przystąpieniem do korekty błędów orientacji kolejno wyznaczanych estymat położenia z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, dokonano rotacji wszystkich estymat położenia o wyznaczony kąt α_{or} i umieszczono je na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych (rys. 6.18) i (rys. 6.20).

Na rys. 6.19 i rys. 6.21 zaprezentowano wynik działania drugiego etapu zaproponowanej metody. Otrzymany błąd RMSE skorygowanych estymat położenia wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,33 m (dla trasy o kształcie litery L) oraz $RMSE_{kor_p}$ = 0,5 m (dla trasy o kształcie cyfry 8).

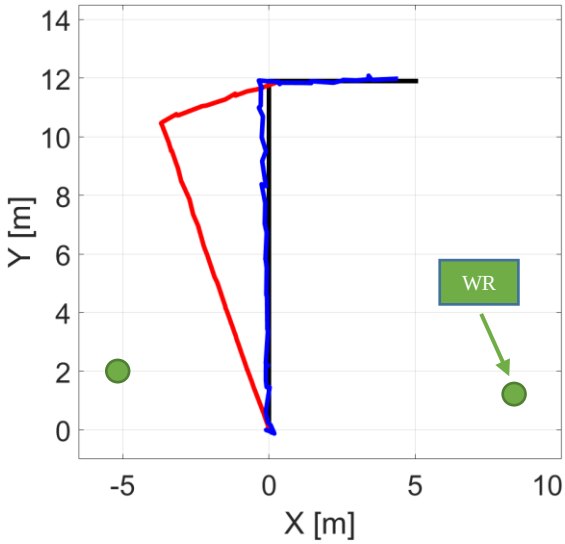
W odniesieniu do błędu estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej wynoszącego $RMSE_{st_p}$ = 1,05 m (dla trasy o kształcie litery L) i $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m (dla trasy o kształcie cyfry 8) stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 69 % i 50 %. Obliczona odległość punktu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

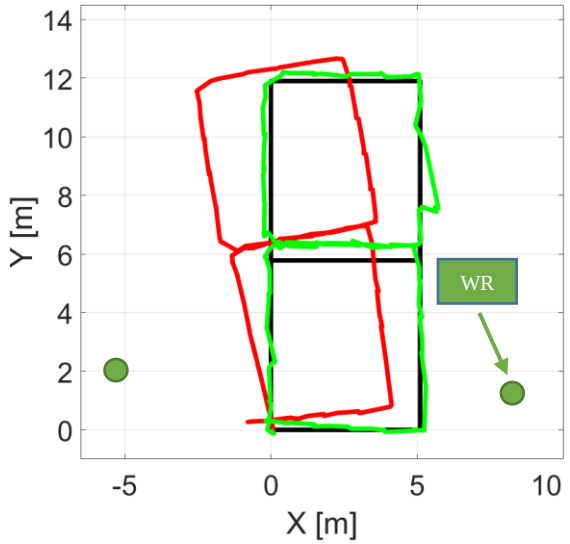
końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla trasy zamkniętej w kształcie cyfry 8 (rys. 6.21) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,5 m.



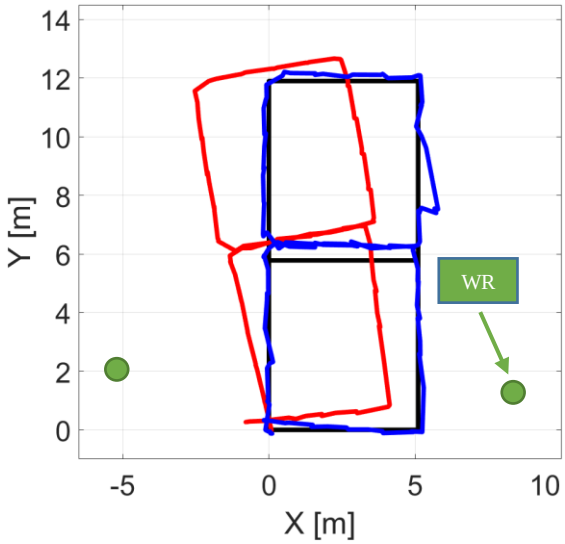
Rys. 6.18. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 6.19. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.



Rys. 6.20. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

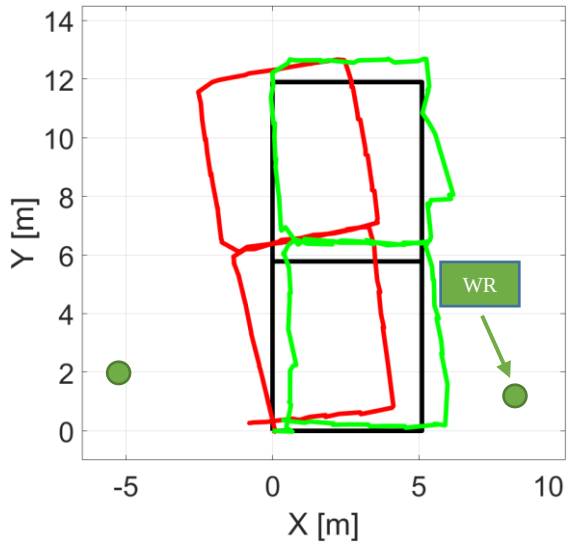


Rys. 6.21. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu.

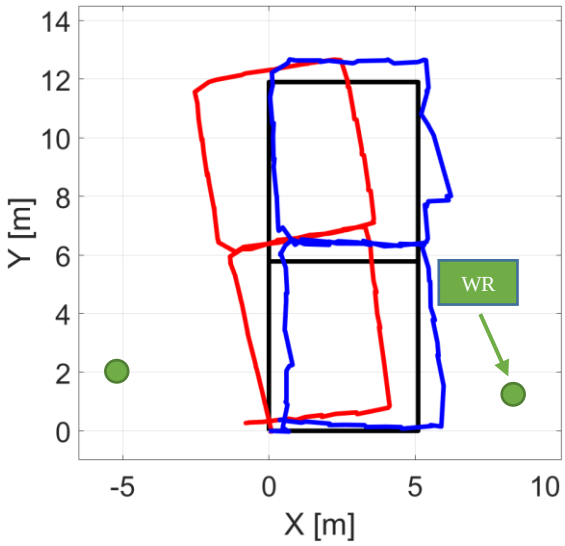
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Podczas testów zweryfikowano efektywność zaproponowanej metody w przypadku, kiedy położenie węzłów referencyjnych nie było znane a priori i zostało wyznaczone przy użyciu algorytmu opisanego w rozdziale 3.3.3 rozprawy. Jako położenie węzła referencyjnego przyjęto estymatę położenia wyznaczoną z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, kiedy to osoba z zamontowanym modułem identyfikacji osobistej MIO zbliżyła się do danego węzła referencyjnego na odległość co najmniej 0,75 m (wartość dobrana eksperymentalnie). Sytuacja ta została wykryta z użyciem opracowanego algorytmu, czego wynikiem było przyjęcie aktualnej estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, jako współrzędne węzła referencyjnego. Na tej podstawie węzłom referencyjnym *WR1* i *WR2* zostały przypisane następujące współrzędne położenia: (x_{WR1} = -0,485, y_{WR1} = 2,84), (x_{WR2} = 9,19, y_{WR2} = 2,17).

Na rys. 6.22 przedstawiono wynik pierwszego etapu korekty zaproponowanej metody, przy uprzednio wyznaczonym położeniu węzłów referencyjnych. Trasę wzorcową oznaczono kolorem czarnym. Otrzymany błąd RMSE skorygowanych w drugim etapie korekty (rys. 6.23) estymat położenia wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,67 m, co względem błędu $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m stanowi zmniejszenie błędu trasy o 33 %.



Rys. 6.22. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.



Rys. 6.23. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6.2.4. Przypadek minimalny przy dostępności jednego węzła referencyjnego

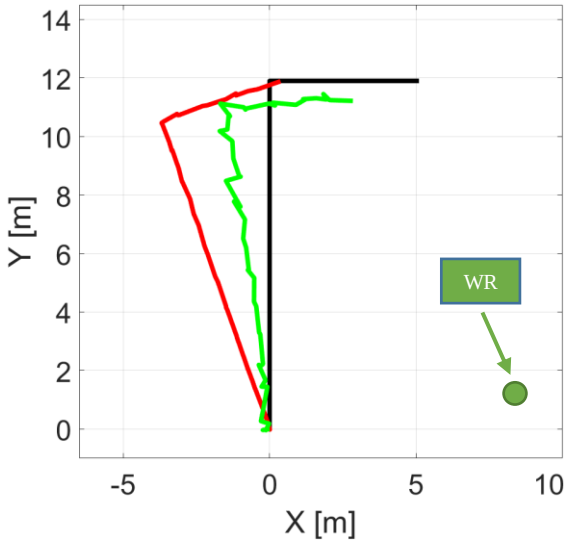
W przypadku dostępności tylko jednego węzła referencyjnego przed wykonaniem drugiego etapu korekty błędów orientacji estymat położenia wyznaczanych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej dokonano ich rotacji o wyznaczony kąt α_{or} i umieszczono je na okręgach stałej odległości do węzłów referencyjnych (rys. 6.24) i (rys. 6.26). Oszacowany błąd kąta orientacji trasy wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej wynosi α_{or} = -0,191 rad (dla trasy o kształcie litery L) oraz α_{or} = -0,175 rad (dla trasy o kształcie cyfry 8), co względem rzeczywistych błędów orientacji początkowej stanowi różnicę około -11,4 % i +2,9 %.

Na rys. 6.25 i rys. 6.27 przedstawiono trasy wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej ze skorygowanymi błędami orientacji kolejno wyznaczanych estymat położenia. Otrzymany błąd RMSE skorygowanych estymat położenia wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,49 m (dla trasy o kształcie litery L) oraz $RMSE_{kor_p}$ = 0,54 m (dla trasy o kształcie cyfry 8). W odniesieniu do błędu estymat położenia wyznaczonych wyłącznie z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej wynoszącego $RMSE_{st_p}$ = 1,05 m (dla trasy o kształcie litery L) i $RMSE_{st_p}$ = 1,01 m (dla trasy o kształcie cyfry 8) stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia osoby odpowiednio o 53 % i 47 %. Obliczona odległość punktu końcowego względem punktu początkowego (0,0) dla trasy zamkniętej o kształcie cyfry 8 (rys. 6.27) wynosi $d_{start\text{-}stop}$ = 0,65 m.

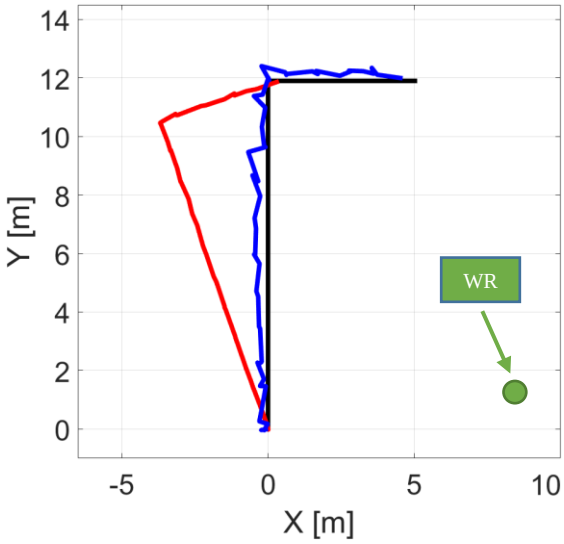
Przy dostępności wyników radiowych pomiarów odległości wyłącznie do jednego węzła referencyjnego ponownie przeprowadzono próbę korekty estymat położenia wyznaczanego z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej przy konieczności uprzedniego określenia położenia węzła referencyjnego *WR2* (x_{WR2} = 9,19, y_{WR2} = 2,17).

Na rys. 6.29 przedstawiono wynik działania (kolor niebieski) drugiego etapu korekty zaproponowanej metody, po wstępnym skorygowaniu błędu orientacji początkowej α_{or} (rys. 6.28). Trasę wzorcową oznaczono kolorem czarnym. Widoczne jest, że występujące błędy radiowych pomiarów odległości przekładają się na mniejszą efektywność zaproponowanej metody, co objawia się występującym zniekształceniem skorygowanej trasy. Otrzymany błąd RMSE skorygowanych estymat położenia wynosi $RMSE_{kor_p}$ = 0,68 m, co względem błędu wyjściowego $RMSE_{st_p}$ = 1,05 m stanowi to zmniejszenie błędu wyznaczonego położenia o 32 %. Przesunięcie punktu końcowego względem punktu początkowego wynosi d_{start_stop} = 1,1 m (rys. 6.29).

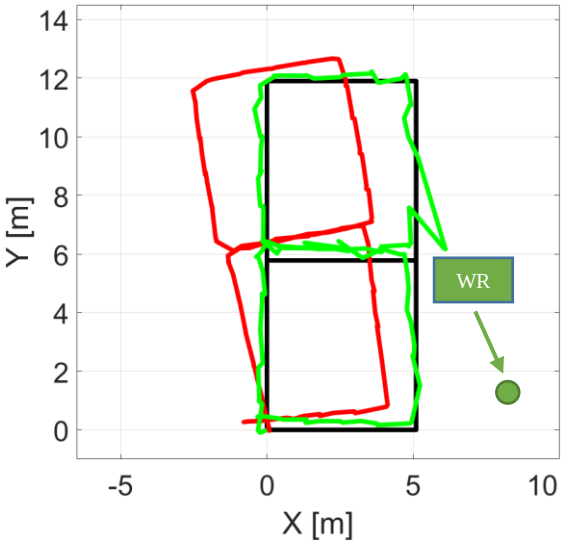
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



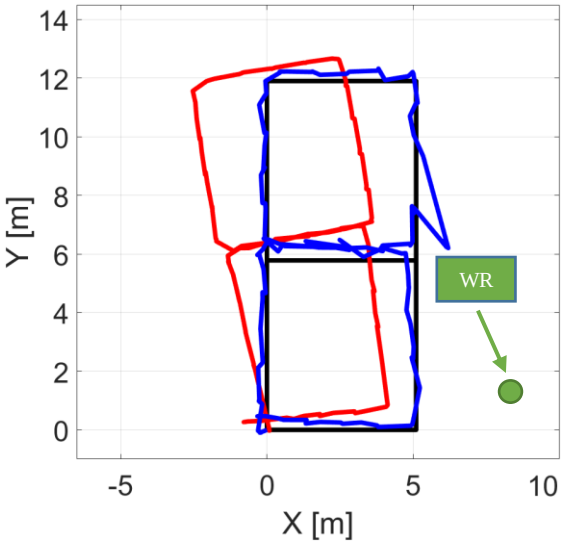
Rys. 6.24. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu.



Rys. 6.25. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu.

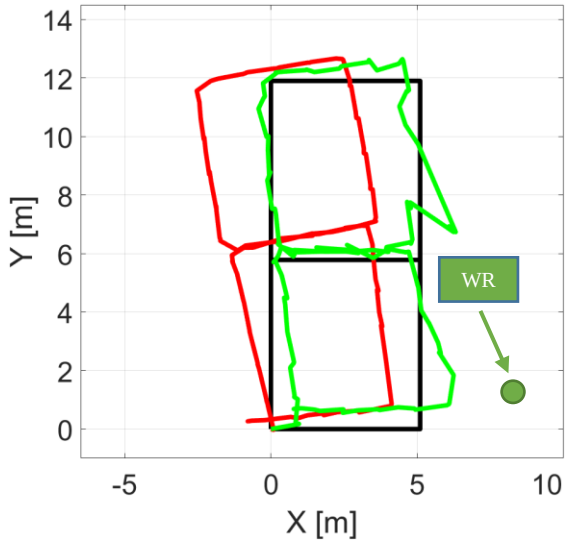


Rys. 6.26. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu.

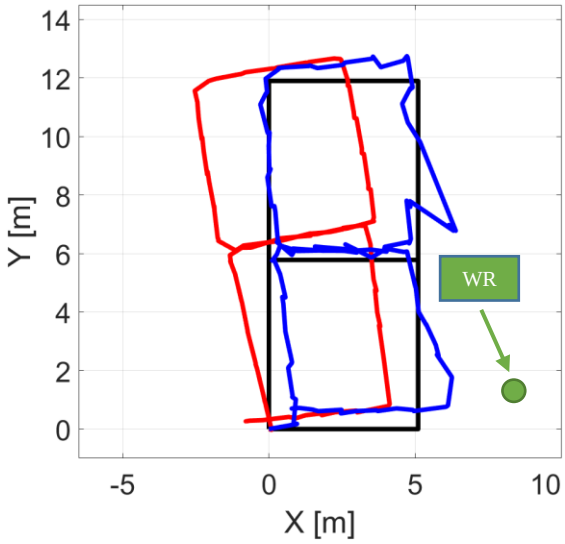


Rys. 6.27. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.28. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o wyznaczonym położeniu.



Rys. 6.29. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o wyznaczonym położeniu.

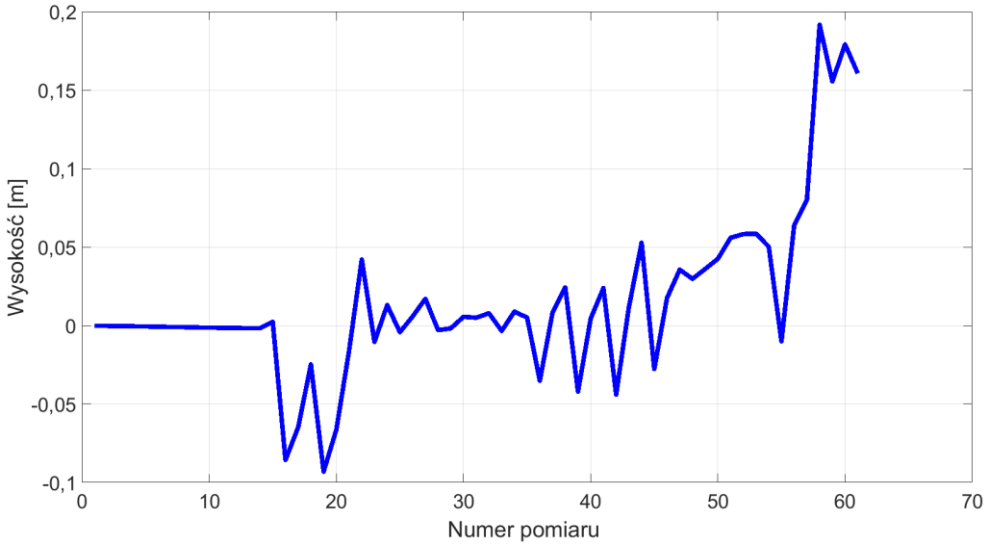
6.2.5. Analiza przemieszczenia osoby w osi OZ

W dalszej części badań, estymaty położenia osoby wyznaczone w węźle MIO z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej przeanalizowano w zakresie przemieszczenia w osi OZ. Zgodnie ze scenariuszem badań pomiarowych, monitorowana osoba poruszała się po płaszczyźnie, a zaimplementowany algorytm nawigacji inercyjnej umożliwiał wyznaczenie estymat położenia w przestrzeni trójwymiarowej.

Na rys. 6.30 przedstawiono względne przemieszczenie poruszającej się osoby w osi OZ (podczas ruchu po trasie w kształcie litery L), wyznaczone w procesie filtracji Kalmana na podstawie estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz danych pomiarowych ciśnienia atmosferycznego. Przemieszczenie w osi OZ wyznaczono względem punktu początkowego o współrzędnych (0, 0, 0). Podczas pierwszych 15 pomiarów (interwał między pomiarami wynosił 500 ms) monitorowana osoba nie poruszała się, co przekłada się brak rejestrowanego przemieszczenia w osi OZ. Podczas kolejnych pomiarów widoczne jest, że występujące błędy pomiarowe rejestrowanych przyspieszeń liniowych, prędkości kątowych oraz ciśnienia atmosferycznego prowadzą do wyznaczenia przemieszczenia w osi OZ, pomimo poruszania się na płaszczyźnie, jednakże są one na tyle małe, że nie sugerują ruchu osoby np. pomiędzy kondygnacjami budynku. W każdym ze

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

scenariuszy badawczych sprawdzono, że błąd przemieszczenia w osi OZ nie przekraczał $^{+}/_{-}$ 0,53 m.



Rys. 6.30. Przemieszczenie poruszającej się osoby wyznaczone w osi OZ.

6.3. Podsumowanie badań pomiarowych

Przeprowadzone testy funkcjonalne, z wykorzystaniem zaproponowanego prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego, pozwoliły na zebranie estymat położenia poruszającej się osoby wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej oraz wyników radiowych pomiarów odległości. Zgromadzony materiał badawczy, w każdym ze scenariuszy pomiarowych, umożliwił odtworzenie trasy przebytej przez monitorowaną osobę. W tab. 6.4 zestawiono uzyskiwane błędy RMSE skorygowanych estymat położenia względem trasy referencyjnej.

Przeprowadzona analiza wyników wykazała, że w każdym ze scenariuszy uzyskano zmniejszenie błędów estymowanego położenia, względem estymat wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, nawet dla zredukowanej liczby węzłów referencyjnych. Stwierdzono, że otrzymywana dokładność wyznaczanych estymat położenia jest wystarczająca do monitorowania położenia poruszającej się osoby w środowisku wewnątrzbudynkowym.

Podczas badań zauważono, że radiowe pomiary odległości realizowane przez moduł identyfikacji osobistej MIO, zamontowany na stopie poruszającej się osoby, charakteryzują się większą wariancją estymowanej odległości niż miało to miejsce podczas pomiarów stacjonarnych, przedstawionych w rozdziale 4.3.1 rozprawy. Spowodowane jest to stosunkowo

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

szybkimi ruchami stopy podczas poruszania się osoby oraz naprzemiennym wykonywaniem pomiarów odległości w warunkach LOS / NLOS.

Tab. 6.4. Zestawienie błędów RMSE estymat położenia poruszającej się osoby wyznaczonych z użyciem omawianych metod lokalizacyjnych przy dostępnej różnej liczbie węzłów referencyjnych.

Rodzaj trasy	Błąd RMSE estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej [m]	Liczba węzłów referencyjnych WR	Błąd RMSE estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu radiolokalizacji [m]	Błąd RMSE skorygowanych estymat położenia, wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, w procesie filtracji Kalmana, znane położenie węzłów referencyjnych WR [m]	Zmniejszenie błędu RMSE skorygowanych estymat położenia względem estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej [%]	Błąd RMSE skorygowanych estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, wyznaczone położenie węzłów WR [m]	Zmniejszenie błędu RMSE skorygowanych estymat położenia względem estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej [%]
L	1,05	4	0,38	0,33	68,4	0,52	50,1
		3	0,44	0,4	61,9	0,59	44,3
		2	-	0,33	68,9	0,6	42,8
		1	-	0,49	53,1	0,77	26,5
8	1,01	4	0,54	0,5	50,5	0,57	43,6
		3	0,61	0,58	42,6	0,68	32,7
		2	-	0,5	50,4	0,67	33,9
		1	-	0,54	46,7	0,68	32,5

Zauważyć można, że dla pewnych przypadków zmniejszenie błędów estymat położenia wyznaczanych w procesie filtracji Kalmana względem algorytmu radiolokalizacji jest nieznaczne. Jednakże, jak to przedstawiono na rysunkach w niniejszym rozdziale, zastosowanie filtracji Kalmana powoduje wygładzenie kształtu wyznaczonej trasy do rzeczywistego przemieszczenia.

Można zauważyć, że błąd RMSE skorygowanych estymat położenia, przy wykorzystaniu wyników radiowych pomiarów odległości do mniej niż trzech węzłów referencyjnych, osiąga mniejszą wartość względem przypadku typowego gdzie możliwe jest użycie algorytmu radiolokalizacji. Jest to spowodowane użyciem w procesie integracji danych pozycyjnych wyników radiowych pomiarów odległości wykonywanych w warunkach, kiedy moduł identyfikacji osobistej MIO znajdował się w warunkach bezpośredniej widoczności z węzłami referencyjnymi WR co przełożyło się na mniejsze błędy pomiarowe.

Badania pomiarowe zaproponowanej metody przeprowadzono również dla dłuższych tras zamkniętych, o kształcie cyfry 8, stanowiących kilkukrotne przejście po wyznaczonym wzorcu (rys. 6.1). Stwierdzono, że w takim przypadku również uzyskiwano zmniejszenie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

błędów RMSE, względem estymat położenia wyznaczonych z użyciem jedynie algorytmu nawigacji inercyjnej, a dodatkowo zniwelowano rotację kolejno wyznaczanych tras zamkniętych (rotację trasy wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej poglądowo zobrazowaną na rys. 2.5).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rozdział 7

Analiza granicznej dokładności zaproponowanego rozwiązania

Każda ze znanych metod lokalizacyjnych cechuje się pewnym minimalnym błędem średniokwadratowym wyznaczanych estymat położenia, wynikającym z różnych przyczyn, np. z zastosowanej linearyzacji nieliniowych równań pozycyjnych. Możliwe jest określenie teoretycznej granicy uzyskiwanej dokładności danego rozwiązania w zależności od analizowanych parametrów wejściowych, której nie można przekroczyć w rzeczywistych rozwiązaniach, niezależnie od sposobu implementacji danej metody do obliczania estymat położenia.

W tym rozdziale przedstawiono porównanie dokładności zaproponowanej metody wyznaczania estymat położenia i jednej z metod znanej z literatury, analizując dolną granicę Cramera – Rao. Podczas badań przyjęto normalny rozkład błędów pomiarowych, zgodnie z wynikami uzyskanymi w trakcie badań pomiarowych.

7.1. Dolna granica Cramera – Rao

Wyznaczając dolną granicę Cramera – Rao możliwe jest określenie minimalnego błędu średniokwadratowego (pośrednio wariancji) estymatora nieobciążonego, zakładając określony, skończony zbiór danych wejściowych.

W wielu przypadkach niezwykle trudne jest dokładne określenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa obserwowanych deterministycznych parametrów występujących w systemach lokalizacyjnych z racji nieznajomości rozkładu prawdopodobieństw ich występowania. Prowadzi to do zastosowania uproszczenia dla nieobciążonego przypadku skalarnego w postaci założenia gaussowskiego rozkładu błędów. W takiej sytuacji wariancją nieobciążonego estymatora θ ograniczona jest przez odwrotność macierzy informacyjnej Fishera $\mathbf{I}_F(\theta)$, zwaną dolną granicą Cramera – Rao, zgodnie z nierównością [12, 23, 39, 43, 98]

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\sigma^2(\theta) \geq \frac{1}{-E\left[\frac{\partial^2 \ln(p(x|\theta))}{\partial \theta^2}\right]}, \tag{7.1}$$

gdzie $p(x|\theta)$ jest prawdopodobieństwem warunkowym o rozkładzie gaussowskim i przyjmuje postać

$$p(x|\theta) = -\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\theta)^2\right], \tag{7.2}$$

gdzie:

θ wektor danych wejściowych,

x wektor danych wyjściowych,

co z kolei umożliwia określenie granicznego błędu średniokwadratowego

$$RMSE_{CRLB} = \sqrt{\sigma^2(\theta^2)}\,. \tag{7.3}$$

Stosując powyższe założenia postanowiono wyznaczyć dolną granicę Cramera – Rao z uprzednim wyznaczeniem macierzy informacyjnej Fishera $\mathbf{I_F}$ dla zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych oraz algorytmu Foya. Macierz Fishera dla algorytmu Foya przyjmuje postać [12, 23, 39, 43, 98]

$$\mathbf{I_F} = -E\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \ln p(i|\theta)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 \ln p(i|\theta)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 \ln p(i|\theta)}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 \ln p(i|\theta)}{\partial y^2} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \begin{bmatrix} p_x \cdot p_x & p_x \cdot p_y \\ p_y \cdot p_x & p_y \cdot p_y \end{bmatrix}, \tag{7.4}$$

gdzie:

$$p(\theta) = \sqrt{\left(x - x_{WR\,i}\right)^2 + \left(y - y_{WR\,i}\right)^2}\,, \tag{7.5}$$

$$p_x = \frac{\partial p(\theta)}{\partial x} = -\frac{x - x_{WR\,i}}{\sqrt{\left(x - x_{WR\,i}\right)^2 + \left(y - y_{WR\,i}\right)^2}}\,, \tag{7.6}$$

$$p_y = \frac{\partial p(\theta)}{\partial y} = -\frac{y - y_{WR\,i}}{\sqrt{\left(x - x_{WR\,i}\right)^2 + \left(y - y_{WR\,i}\right)^2}}\,, \tag{7.7}$$

$\frac{1}{\sigma^2}$ informacja Fishera, dla błędów pomiarowych o rozkładzie normalnym,

$x_{WR\,i}$, $y_{WR\,i}$ współrzędnymi położenia węzłów referencyjnych.

Zakładając normalny rozkład błędów pomiarowych, o zerowej wartości średniej i wariancji σ^2 znormalizowana postać macierzy informacyjnej Fishera opisana jest zależnością

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\mathbf{I_F} = \begin{bmatrix} i_{f1,1} & i_{f1,2} \\ i_{f2,1} & i_{f2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x \cdot p_x & p_x \cdot p_y \\ p_y \cdot p_x & p_y \cdot p_y \end{bmatrix}. \tag{7.8}$$

7.2. Wyznaczenie dolnej granicy Cramera – Rao

Wyznaczenie dolnej granicy Cramera – Rao przeprowadzono dla dwóch przypadków: zaproponowanej metody, przy dostępności mniej niż trzech węzłów referencyjnych oraz dla algorytmu Foya, przy dostępności trzech węzłów referencyjnych. Dla każdego z nich wyznaczono zestaw równań, opisujących operacje wykonywane w procesie lokalizowania, w celu określenia macierzy informacyjnej Fishera.

7.2.1. Przypadek typowy przy dostępności trzech węzłów referencyjnych

Przypadek typowy radiolokalizacji dwuwymiarowej, bazującej na lateracji kołowej przy dostępności danych pomiarowych do trzech lub więcej węzłów referencyjnych, można opisać równaniami (7.4), (7.5), (7.6), (7.7). Podczas wyznaczenia teoretycznego, minimalnego błędu $RMSE_{CRLB}$ dla metody Foya, przyjęto normalny rozkład błędów pomiarowych, przez co wartość wyrażenia $\frac{1}{\sigma^2} = 1$ [12, 23, 39].

7.2.2. Przypadek zredukowanej liczby węzłów referencyjnych

W przypadku mniejszej od trzech liczby dostępnych węzłów referencyjnych operacje wykonywane przy zastosowaniu zaproponowanej metody opisano równaniem

$$p(\theta) = \sqrt{\begin{matrix}(x_{WRi} - ((x - x_{WRi}) \cdot \cos(\beta) - (y - y_{WRi}) \cdot \sin(\beta)) + x_{WRi})^2 \\ + (y_{WRi} - ((x - x_{WRi}) \cdot \sin(\beta) - (y - y_{WRi}) \cdot \cos(\beta)) + y_{WRi})^2\end{matrix}}, \tag{7.9}$$

gdzie pochodne cząstkowe przyjmują postać:

$$p_x = \frac{\partial p(\theta)}{\partial x} = -\frac{(x_{WRi} - ((x - x_{WRi}) \cdot \cos(\beta)) + x_{WRi}) \cdot \cos(\beta) + ((x - x_{WRi}) \cdot \sin(\beta)) \cdot \sin(\beta)}{\sqrt{\begin{matrix}(x_{WRi} - ((x - x_{WRi}) \cdot \cos(\beta) - (y - y_{WRi}) \cdot \sin(\beta)) + x_{WRi})^2 \\ + (y_{WRi} - ((x - x_{WRi}) \cdot \sin(\beta) - (y - y_{WRi}) \cdot \cos(\beta)) + y_{WRi})^2\end{matrix}}}, \tag{7.10}$$

$$p_y = \frac{\partial p(\theta)}{\partial x} = -\frac{(y - y_{WRi}) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\beta) - (y_{WRi} + (y + y_{WRi}) \cdot \cos(\beta)) + y_{WRi}) \cdot \cos(\beta)}{\sqrt{\begin{matrix}(x_{WRi} - ((x - x_{WRi}) \cdot \cos(\beta) - (y - y_{WRi}) \cdot \sin(\beta)) + x_{WRi})^2 \\ + (y_{WRi} - ((x - x_{WRi}) \cdot \sin(\beta) - (y - y_{WRi}) \cdot \cos(\beta)) + y_{WRi})^2\end{matrix}}}. \tag{7.11}$$

Należy zauważyć, że w równaniu (7.9) występuje parametr β, określający krok poszukiwań rozwiązania w kolejnych iteracjach zaproponowanej metody, opisanej w rozdziale

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3 rozprawy. Parametr β ma wpływ na dokładność zaproponowanej metody, podczas dokonywania korekty wyznaczonych estymat położenia.

Wyznaczone pochodne cząstkowe (7.10), (7.11) zostały podstawione jako elementy macierzy informacyjnej Fishera, zgodnie z równaniem (7.4).

7.2.3. Wyniki obliczeń

Podczas obliczeń przyjęto, że poszukiwania minimalnego błędu $RMSE_{CRLB}$ realizowane będzie na płaszczyźnie w kształcie prostokąta o wymiarach (10 m, 30 m), przy przyjętych współrzędnych położenia węzłów referencyjnych WR zawartych w tab. 7.1.

Tab. 7.1. Przyjęte współrzędne położenia węzłów referencyjnych podczas obliczania dolnej granicy Cramera – Rao.

Nr węzła	X [m]	Y [m]
WR 1	-6	2
WR 2	12	2
WR 3	-7	40
WR 4	12	35

Podczas obliczania błędu $RMSE_{CRLB}$ dla przypadku typowego, przy dostępności wyników radiowych pomiarów odległości do czterech węzłów referencyjnych, wykonano 10000 iteracji. Symulowano współrzędne położenia rozmieszczone równomiernie na przyjętym obszarze. Błąd $RMSE_{CRLB}$ obliczono wykorzystując zależność

$$RMSE_{CRLB} = \sqrt{i_{f\,1,1}^{\,2} + i_{f\,2,2}^{\,2}}\,, \tag{7.12}$$

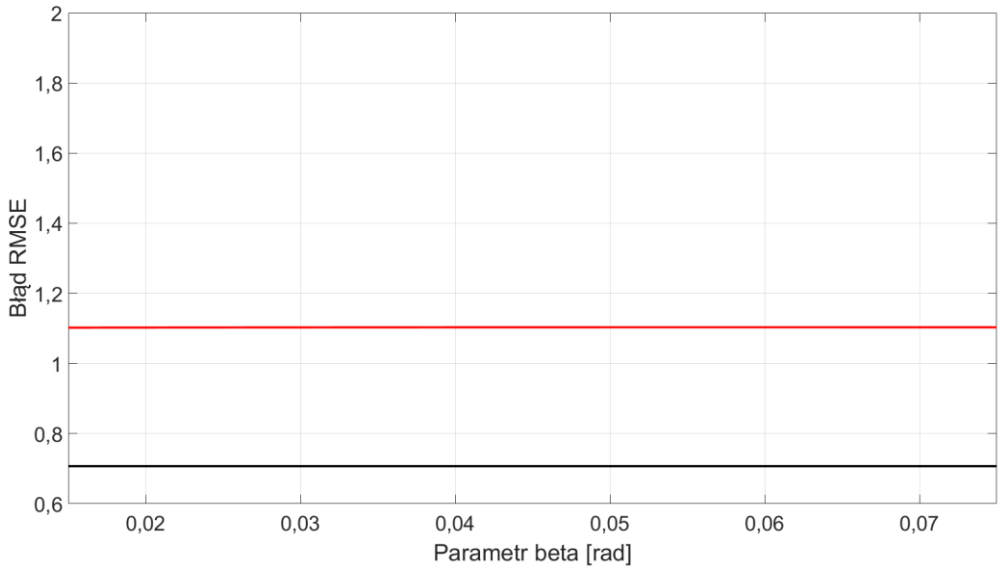
gdzie $i_{f\ 1,1}$ oraz $i_{f\ 2,2}$ są elementami macierzy informacyjnej Fischera $\mathbf{I_F}$, i wynosi on $RMSE_{CRLB} = 0{,}701$, co stanowi wartość odniesienia dla zaproponowanej metody.

W kolejnym kroku badania przeprowadzono dla liczby węzłów referencyjnych mniejszej od trzech. Przyjęto analogiczne założenia jak w pierwszym przypadku, a zmianie poddawano wartość parametru β odpowiedzialnego za krok w każdej z iteracji algorytmu obliczeń.

Na rys. 7.1 przedstawiono błędy $RMSE_{CRLB}$ dla zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym (kolor czerwony) oraz dolną granicę Cramera–Rao dla algorytmu Foya (kolor czarny), stanowiącą wartość odniesienia. Należy zauważyć, że zmniejszenie kroku poszukiwania rozwiązania końcowego (parametru β) wydłuża czas korekty pojedynczej estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

nawigacji inercyjnej. Podczas badań symulacyjnych oraz pomiarowych przyjęto eksperymentalnie dobraną wartość parametru β = 0,06 [$^{rad}/_{krok}$].



Rys. 7.1. Błędy $RMSE_{CRLB}$ dla zaproponowanej metody wyznaczania estymat położenia w funkcji parametru beta (kolor czerwony) oraz granica Cramera–Rao (kolor czarny) dla algorytmu Foya.

7.2.4. Nakład przetwarzania zaproponowanej metody

Zaproponowaną metodę integracji danych pozycyjnych poddano analizie wymaganego nakładu przetwarzania w odniesieniu do podejścia opisywanego w literaturze, bazującego na filtracji Kalmana. W tym celu przeprowadzono symulację dla trasy wzorcowej o kształcie cyfry 8 przy dostępności wyników radiowych pomiarów odległości do czterech węzłów referencyjnych. Badania przeprowadzono w środowisku symulacyjnym MATLAB R2016b, używając komputera klasy PC wyposażonego w procesor Intel Core i5 2,9 GHz piątej generacji, 8 GB pamięci RAM i dysk SSD [16, 48].

W tabeli 7.2 przedstawiono procentowy udział nakładu przetwarzania poszczególnych etapów przetwarzania danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, algorytmu Foya oraz filtracji Kalmana.

Tab. 7.2. Procentowy udział czasu przetwarzania dla algorytmu Foya oraz filtracji Kalmana.

Operacja	**Procentowy udział czasu przetwarzania**
Algorytm Foya	72,7%
Filtracja Kalmana	23,3%

Widoczne jest, że procesem o najwyższej złożoności obliczeniowej jest iteracyjny algorytm lateracji kołowej, zajmujący około 70 % czasu obliczeń.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

W tabeli 7.3 przedstawiono procentowy udział nakładu przetwarzania poszczególnych operacji zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym. Elementem wymagającym największego nakładu przetwarzania jest proces umieszczania estymat położenia na okręgach o stałej odległości do węzła referencyjnego, który przedstawiono w rozdziale 3 rozprawy. Procentowy udział nakładu przetwarzania poszczególnych operacji jest porównywalny dla przypadku z dwoma oraz jednym węzłem referencyjnym.

Tab. 7.3. Procentowy udział czasu przetwarzania poszczególnych operacji zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym.

Operacja	**Procentowy udział czasu przetwarzania**
Umieszczanie estymat położenia na okręgach stałej odległości	96,2 %
Obrót trasy wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej	2,6 %
Obliczanie błędów RMSE	1,2 %

W dalszym kroku sprawdzono, jaki czas jest wymagany na korektę jednej estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej stosując opisywaną w literaturze filtrację Kalmana oraz zaproponowaną metodę.

W tab. 7.4 przedstawiono zestawienie czasów wymaganych na dokonanie korekty jednej estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej. Zauważalny jest wyższy wymagany nakład przetwarzania zaproponowanej metody, lecz różnica pomiędzy znaną metodą hybrydową wynosi zaledwie 23 %. Pomimo występującej różnicy możliwe jest realizowanie korekty estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej w czasie rzeczywistym, gdyż kolejne estymaty położenia wyznaczane są z interwałem 500 ms.

Tab. 7.4. Czas wymagany do dokonania korekty pojedynczej estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej stosując filtrację Kalmana i zaproponowaną metodę.

Operacja	**Czas korekty pojedynczej estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej [ms]**
Zastosowanie filtracji Kalmana	2,1
Zastosowanie zaproponowanej metody	2,6

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Podsumowanie

Lokalizowanie poruszających się osób w środowisku wewnątrzbudynkowym jest przedmiotem zainteresowania wielu służb państwowych. Konieczność posiadania informacji o bieżącym położeniu funkcjonariuszy ma na celu zwiększenie stopnia ich bezpieczeństwa w trakcie wykonywanych zadań. Zastosowanie dedykowanego hybrydowego systemu lokalizacyjnego daje możliwość estymowania położenia poruszających się osób w środowiskach wewnątrzbudynkowych, bez konieczności dostępu do zewnętrznych systemów radiolokalizacyjnych.

W niniejszej rozprawie zaproponowano metodę hybrydowego systemu lokalizacyjnego, która umożliwia zwiększenie dokładności estymat położenia wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej dokonując ich integracji z wynikami radiowych pomiarów odległości, również w przypadku dostępności wyników radiowych pomiarów odległości do dwóch bądź jednego węzła referencyjnego.

W pierwszym etapie prac badawczych opracowano i wykonano stanowisko badawcze, umożliwiające zarejestrowanie parametrów ruchu poruszającej się osoby i wyników radiowych pomiarów odległości celem ich późniejszej analizy i opracowania modeli symulacyjnych systemu nawigacji inercyjnej i radiowych pomiarów odległości. Statystyczna analiza wyników radiowych pomiarów odległości oraz estymat położenia, wyznaczonych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, pozwoliła opracować symulator, dostarczający dane wejściowe dla zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania symulacyjne zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym. Wybrano dwie trasy, w kształcie litery L oraz cyfry 8, wzorem których zasymulowano działanie algorytmu nawigacji inercyjnej, a wyznaczane estymaty położenia obarczone były błędami kąta orientacji zamodelowanymi na podstawie wcześniej przeprowadzonych rzeczywistych pomiarów. Dodatkowo zasymulowano wyniki radiowych pomiarów odległości, z losowymi błędami, a następnie wykonano próbę integracji danych pozycyjnych. Badania przeprowadzono dla dostępnej różnej liczby węzłów referencyjnych. W każdym z zasymulowanych przypadków uzyskano zwiększenie dokładności estymacji położenia względem trasy wyznaczonej z użyciem symulatora systemu nawigacji inercyjnej.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Dalszy etap prac badawczych obejmował opracowanie prototypu urządzeń i oprogramowania hybrydowego systemu lokalizacyjnego. Podczas projektu badawczo-rozwojowego realizowanego w Katedrze Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych Politechniki Gdańskiej zbudowano zestaw urządzeń do lokalizowania poruszającej się osoby w środowisku wewnątrzbudynkowym. Opracowano oprogramowanie dla modułu identyfikacji osobistej MIO i węzłów referencyjnych WR posiadające zaimplementowany algorytm nawigacji inercyjnej i radiowych pomiarów odległości, przedstawiony w rozdziale trzecim rozprawy. Dane pomiarowe gromadzone z użyciem opracowanego stanowiska do rejestracji i prezentacji SRP stanowiły dane wejściowe algorytmu obliczeń zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych. Uzyskane wyniki wykazały, że w każdym ze scenariuszy pomiarowych uzyskano zwiększenie dokładności estymat położenia wyznaczanych z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej, dokonując ich integracji z wynikami radiowych pomiarów odległości nawet w przypadku zredukowanej liczby węzłów referencyjnych.

W ostatnim etapie prowadzonych prac badawczych sprawdzono teoretyczną dokładność opisywanej w literaturze metody radiolokalizacji, bazującej na pomiarach odległości i obliczaniu położenia przy użyciu algorytmu Foya oraz zaproponowanego rozwiązania. W tym celu wyznaczono dolną granicą Cramera – Rao dla każdej z metod lokalizacyjnych.

Przeprowadzone badania oraz analiza uzyskanych wyników symulacyjnych i pomiarowych wykazała słuszność postawionej tezy w niniejszej rozprawie doktorskiej, iż

możliwe jest zwiększenie dokładności estymacji położenia poruszających się osób w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, integrującym rozwiązanie inercyjne z radiowymi pomiarami odległości ze zredukowaną liczbą węzłów referencyjnych.

Do najważniejszych osiągnięć niniejszej rozprawy można zaliczyć:

1. Zaproponowanie nowej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym, łączącym rozwiązania inercyjne z radiowymi pomiarami odległości z zastosowaniem zredukowanej liczby węzłów referencyjnych. Umożliwia ona dokonywanie ciągłej korekty pozycji monitorowanej osoby nawet przy problemach z zapewnieniem realizacji radiowych pomiarów odległości do przynajmniej trzech węzłów referencyjnych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2. Opracowanie i wykonanie urządzeń i oprogramowania w ramach stanowiska badawczego do przeprowadzenia wstępnych badań pomiarowych algorytmu nawigacji inercyjnej i radiowych pomiarów odległości.

3. Przeprowadzenie badań pomiarowych radiowych pomiarów odległości oraz dokładności estymacji położenia z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej w wybranych środowiskach wewnątrzbudynkowych oraz promu pasażerskiego, w celu wyznaczenia charakterystyk występujących błędów pomiarowych.

4. Opracowanie modeli symulujących działanie systemu nawigacji inercyjnej i radiowych pomiarów odległości oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych dla potrzeb oceny efektywności pracy zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym.

5. Przeprowadzenie badań pomiarowych funkcjonowania zaproponowanej metody w warunkach rzeczywistych, korzystając z wykonanego prototypu hybrydowego systemu lokalizacyjnego.

6. Przeprowadzenie analizy wyników pomiarów pod kątem efektywności opracowanego rozwiązania.

7. Wyznaczenie dolnej granicy Cramera – Rao dla metody radiolokalizacji opisywanej w literaturze, bazującej na pomiarach odległości i obliczaniu położenia przy użyciu algorytmu Foya oraz zaproponowanej metody, a następnie przeprowadzenie teoretycznej analizy porównawczej dokładności każdej z metod.

Wyniki prowadzonych prac badawczych zostały opublikowane na łamach czasopism naukowych ([14] [38], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [80], [82]) oraz były zaprezentowane na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych, m. in. Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Krajowej Konferencji Elektroniki oraz Krajowym Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Pozytywne wyniki badań i testów zaproponowanego rozwiązania dla lokalizacji dwuwymiarowej mogą stanowić punkt wyjścia dla dalszych badań nad integracją danych inercyjnych i radiowych dla przypadku trójwymiarowego.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Spis literatury

[1] Abdel Meniem M. H., Hamad A. M., Shaaban E., *Fast and Accurate Practical Positioning Method Using Enhanced – Lateration Technique and Adaptive Propagation Model in GSM Mode*, International Journal of Computer Science Issues, Vol. 9, Issue 2, No 1, 188 – 193, 3/2012

[2] AdeunisRF, *Narrow Band NB868-500mW RF Module v.2.2.5*, 2014

[3] Advanced Navigation, *ORIENTUS OEM Reference Manual v.1.1*, 2013

[4] Advanced Navigation, *SPATIAL OEM Reference Manual v.2.7*, 2013

[5] Analog Devices, *Compact, Precision Ten Degrees of Freedom Inertial Sensor ADIS16448*, 2013

[6] Bach. W. i inni, *An Iterative Quality – Based Localization Algorithms for Ad-Hoc Networks*, University of Twente, Netherlands, 11/2002

[7] Bachrach J., Taylor C., *Localization in Sensor Networks*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 11/20047

[8] Barlett D., *Essentials of Positioning and Location Technology*, The Cambridge Wireless Essentials Series, 2013

[9] Bellusci G., *Ultra – Wideband Ranging for Low – Complexity Indoor Positioning Applications*, Proedschrift, Universita degli Studi di Pisa, 6/2011

[10] Callagham T. i inni, *Correlation-Based Radio Localization in an Indoor Environment*, EURASIP – JWCN, 2010

[11] Callaway E. H. Jr., *Wireless Sensor Networks*, Auerbach Publications, 2003

[12] Chang C., Sahai A., *Cramer-Rao Type Bounds for Localization*, EURASIP Journal of Applied Signal Processing, Vol. 2006, 01/2006

[13] Cheung K. W. i inni, *Least Squares Algorithms for Time – of – Arrival – Based Mobile Location*, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol 52, No 4, 1121 – 1128, 4/2004

[14] Cwalina K., **Rajchowski P.**, *Realizacja samoorganizującej się radiowej sieci ad hoc dedykowanej do pracy w środowiskach zamkniętych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 540 – 543, 6/2016

[15] Dalce R., Van den Bosshe A., Val T., *An Experimental Performance Study of an Original Ranging Protocol Based on an IEEE 802.15.4a UWB Testband*, HAL Id: hal-01147259, 4/2015

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[16] Dardari D., Falletti E., Luise M., *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques: A Signal Processing Perspective*, Academic Press, 2012

[17] Dargie W., Poellabauer C., *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*, Wiley & Sons, 2010

[18] De Angelis A. i inni, *Indoor Positioning by Ultra Wideband Radio Aided Inertial Navigation*, XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, Lisbon, 8/2009

[19] Deca Wave, *DWM1000 User Manual v. 2.07*, 2016

[20] Deca Wave, *ScenSor, Designing the First Commercial IEEE 802.15.4a chip*, 11/2012

[21] Djaja-Jośko V., Kołakowski J., *A New Method for Wireless Synchronization and TDOA Error Reduction in UWB Positioning System*, IEEE 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), Kraków, 05.2016

[22] Duan Ch. i inni, *A Non – Coherent 802.15.4a UWB Impulse Radio*, Mitsubishi Electronics Research Laboratories, 9/2007

[23] ETSI, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Evaluation of the Inclusion of Path Loss Based Location Technology in the UTRAN*, Technical Report TR 125 907, V9.0.1, 02/2010

[24] Flenninken W. S., *Modeling Inertial Measurement Units and Analyzing the Effects of Their Errors in Navigation Applications*, Master Thesis, Auburn University, 8/2005

[25] Gadka P., *Badanie dokładności określania odległości w środowisku zamkniętym przy użyciu modemów UWB w standardzie 802.15.4-2011*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 220– 224, 4/2015

[26] Gezicki S. i inni, *Localization via Ultra-Wideband Radios*, A Look at Positioning Aspects of Future Sensor Networks, IEEE Signal Processing Magazine, 70 – 84, 7/2015

[27] Gomez-Gil j. i inni, *A Kalman Filter Implementation for Precision Improvement in Low-Cost GPS Positioning of Tractors*, Sensors, 15308 – 15323, 11/2013

[28] Gong F., Qing W. i inni, *A New Distance Based Algorithms for TDOA Localization in Cellular Networks*, Southwest University Nanjing, China, 502 – 505, 2010

[29] Gosiewski Z., Ortył R., *Strapdown Inertial Navigation System Part 2 – Error Models*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 937 – 962, 1998

[30] Grewal M. S., Weil L. R., Andrews A. P., *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*, Wiley & Sons 2007

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[31] Grewal, M. S., Andrews A. P., *Kalman Filtering, Theory and Practice Using MATLAB, Third Edition*, Wiley & Sons, 2008

[32] Groves P. D., *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition*, Artech House, 2013

[33] Haupt S., Haupt R., *Genetic Algorithms and Their Applications in Environmental Sciences*, Utah State University, Logan, 2002

[34] Hol J. D. i inni, *Tightly Coupled UWB / IMU Pose Estimation*, Linkoping University, Sweeden, 6/2009

[35] Humayun K., Kohno R., *A Hybrid TOA-Fingerprinting Based Localization of Mobile Node Using UWB Signaling for Non Line – of – Sight Conditions*, Sensors, 11187 – 11204, 12/2012

[36] IEEE Computer Society, *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, 8/2007

[37] IEEE Standards Association, *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 15.4: Low – Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, 9/2011

[38] Jagodzińska K., Cwalina K., **Rajchowski P.**, *Badanie i analiza anten PCB w zastosowaniu ich w urządzeniach o ograniczonych rozmiarach*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 645 – 648, 6/2016

[39] Kalkan Y., *Cramer-Rao Bounds for Target Position and Velocity Estimations for Widely Separated MIMI Radar*, Radioengineering, Vol. 22, No. 4, 12/2013

[40] Kaniewski P. T., *Struktury, modele i algorytmy w zintegrowanych systemach pozycjonujących i nawigacyjnych*, Wojskowa Akademia Techniczna, 2010

[41] Kardaś M., *Mikrokontrolery AVR, Język C – podstawy programowania*, Helion, 2015

[42] Katulski R. J., *Propagacja fal radiowych w telekomunikacji bezprzewodowej*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, 2010

[43] Kay, S. M., *Fundamentals of Statistical Signal Processing Estimation Theory*, Prentice Hall PTR, 1993

[44] Khan S., Pathan A. S., Alrajeh N. A., *Wireless Sensor Networks: Current Status and Future Trends*, CRC Press, 2016

[45] Kok M., Hol D. K. Schon T., *Indoor Positioning Using Ultrawideband and Inertial Measurements*, Uppsala University, 2/2015

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[46] Kong X., *Inertial Navigation System Algorithms for Low Cost IMU*, Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, The University of Sydney, 8/2000

[47] Kosz P., *Implementacja zintegrowanego systemu kursowego w systemie nawigacji inercyjnej*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 289 – 292, 6/2016

[48] Kubale M., *Łagodne wprowadzenie do algorytmów*, Politechnika Gdańska, 2013

[49] Kuper A., *Mobile Services, Summer Term - Positioning*, Technische Universitat Berlin, 2010

[50] Laaraiedh M. Avrillon S., Uguen B., *Hybrid Data Fusion Techniques for Localization in UWB Networks*, HAL Id: hal-00375238, 4/2009

[51] Larin V. B., Tunik A. A., *On Inertial-Navigation System Without Angular-Rate Sensors*, International Applied Mechanics, Vol. 49, 488 – 499, 2013

[52] Mainwaring A., Polaste J., *Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*, WSNA '02 Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless sensor Networks and Applications, 88 – 97, 2002

[53] Markowska A. S., *Models and Algorithms for Ultra-Wideband Localization in Single and Multi – Robot Systems*, PhD Thesis No 5746, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2013

[54] Mitchell M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, The MIT Press, 1998

[55] Mochnacki W., *Kody korekcyjne i kryptografia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997

[56] Modelski J., *Analiza stanu oraz kierunki rozwoju elektroniki i telekomunikacji*, Monografia, Komitet Elektroniki i Telekomunikacji Polskiej Akademii Nauk, 2009

[57] Molins R., *Development and Optimization of a Simulation Framework for Data Fusion in Hybrid Localization Systems*, Bachelor Thesis, Karlsruhe Institute of Technology, Fakultat fur Elektrotechnik, 7/2015

[58] Monge A., *Synchronized MAC Layer for Ultra – Wideband Wireless Sensor Network, Design, Implementation, Analysis and Evaluation*, Degree project in Communication Systems Second level, KTH Royal Institute of Technology, 3/2013

[59] Nam Y. S. i inni, *Wireless Synchronized One – Way Ranging Algorithm With Active Mobile Nodes*, ETRI Journal, Vol. 31, No 4, 8/2009

[60] Nam Y. S., *Location Estimation of Mobile Devices in CSS WPANs*, International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, Vol. 9, No 3, 31 – 40, 3/2014

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[61] Nanotron Technologies GMBH, *Real Time Location Systems (RTLS) v. 1.02*, 5/2007

[62] Narkiewicz J., *Podstawy układów nawigacyjnych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1999

[63] Nassar S., *Improving Inertial Navigation System (INS) Error Model for INS and INS/DGPS Applications*, UCGE Report num. 20183 Calgary University, 2003

[64] Nilsson J., Skog I., *„Foot-Mounted INS for Everybody – An Open-Source Embedded Implementation*", IEEE Position Location and Navigation Symposium (PLANS), Myrtle Beach, SC, 140 – 14, 2012

[65] Noureldin A., Karamat T. B., Georgy J., *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-Based Positioning and Their Integration*, Springer Science & Business Media, 2012

[66] Olson F., Rantakokko J. i inni, *Cooperative Localization Using a Foot-Mounted Inertial Navigation System and Ultrawideband Ranging*, 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 10/2014

[67] Olsson F., *Cooperative Localization Using Foot-Mounted Inertial Navigation and Ultrawideband Ranging, a Simulation Study*, Uppsala Universitat, UPTEC-F14046, 10/2014

[68] Pedley M., *Electronic Compass: Tilt Compensation and Calibration*, Circuit Cellar, issue 265, 8/2012

[69] Piotrowski P., Zieliński R.: *Algorytm określania momentu rozpoczęcia odbioru sygnału użytecznego na potrzeby pomiaru odległości w systemach radiowych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 143 – 146, 4/2015

[70] Piotrowski P., Zieliński R.: *Przegląd komercyjnych rozwiązań systemów lokalizacji osób i mienia*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 452 – 455, 4/2008

[71] **Rajchowski P.**, Cwalina K., *Badanie i analiza algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów w systemie nawigacji inercyjnej*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 1296 – 1301, 8-9/2015

[72] **Rajchowski P.**, Cwalina K., *Badanie i analiza metod lokalizacyjnych zaimplementowanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 293 – 296, 6/2016

[73] **Rajchowski P.**, Cwalina K., Sadowski J., *Research and Analysis of Accuracy of Location Estimation in Inertial Navigation System*. Applied Mechanics and Materials Vol. 817: 308 – 316, 2016

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[74] **Rajchowski P.**, Cwalina K., *Stanowisko badawcze nawigacji radiowej hybrydowego systemu lokalizacyjnego,* Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, 21 – 23, 10/2016,

[75] **Rajchowski P.**, *Stanowisko do badania algorytmów stosowanych w nawigacji inercyjnej*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 1448 – 1452, 12/2014

[76] **Rajchowski P.**, *Zwiększanie dokładności estymacji położenia obiektów w systemie nawigacji inercyjnej poprzez wykorzystanie radiowych pomiarów odległości*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 341 – 344, 4/2015

[77] Robinson S. i inni, *Professional C#, 3rd Edition*, Wiley & Sons, 2004

[78] Ross. P., Corne D., *Applications of Genetic Algorithms*, AISB Quarterly on Evolutionary Computation, Paper No. 94-007, 2007

[79] Sadowski J., *Projektowanie sieci radiokomunikacyjnych*, Materiały dydaktyczne, Politechnika Gdańska, 2011

[80] Sadowski J., **Rajchowski P.**, Cwalina K., *Tracking Body Movement for Radio Channel Measurements in BAN With Indoor Positioning System*, IEEE 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), Seoul, 1380 – 1382, 8/2016

[81] Sadowski J. i inni, *Raport końcowy z realizacji projektu nr DOBR-BIO4/058/13045/2013 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju*, Politechnika Gdańska, 2016

[82] Sadowski J., Stefański J., **Rajchowski P.**, Cwalina K., Gilski P., Magiera J., *System do zdalnego monitoringu położenia osób w środowiskach zamkniętych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 365 – 368 6/2016

[83] Sathyan T. Humprey D., Hedley M., *WASP – A System and Algorithms for Accurate Radio Localization Using Low-Cost Hardware*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part C, Applications and Review, 1 – 13, 2010

[84] Savarese C., Rabaey J. M., Beutel J., *Location in Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 4, 2037 – 2040, 2001

[85] Savioli A. i inni, *Low Complexity Indoor Localization in Wireless Sensor Networks by UWB and Inertial Data Fusion*, University of Pavia, 3/2013

[86] Scanell B., *Precision MEMS Sensors Enable New Navigation Applications*, Analog Devices, Massachusetts 2011

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[87] Seybold J. S., *Introduction to RF Propagation*, Wiley & Sons, 2014

[88] Seyed A., *Handbook of Position Location, Theory Practice and Advances*, Wiley & Sons, 2012

[89] Shuai H., Dong X., Lu S., *Asynchronous Time Difference of Arrival Positioning System*, Department of Electronical and Computer Engineering, University of Victoria, Canada, 2012

[90] Simić M., Pejović P., *Cellular Networks – Positioning, Performance Analysis, Reliability – Positioning in Cellular Networks*, University of Belgrade, Serbia, 6/2012

[91] Sirola N., *Closed-Form Algorithms in Mobile Positioning: Myths and Misconceptions*, IEEE 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication WPNC, Drezno, 03.2010

[92] ST Microelectronics, *STM32F405xx - STM32F407xx Datasheet – Production Data, Rev. 5*, 3/2015

[93] ST Microelectronics, *STM32L151x6/8/B - STM32L152x6/8/B Datasheet – Production Data, Rev. 11*, 1/2015

[94] ST Microelectronics, *STM32L152DISCOVERY, Rev. 3*, 1/2013

[95] ST Microelectronics, *STM32F407DISCOVERY Rev. 1*, 9/2011

[96] Stefański J., *Badanie metod i projektowanie usług lokalizacyjnych w sieciach radiokomunikacyjnych*, Politechnika Gdańska, 2012

[97] Sung H. i inni, *One – Way Ranging Technique for CSS – Based Indoor Localization*, The IEEE International Conference on Industrial Informatics, Korea, 7/2008

[98] Syska J., *Metoda największej wiarygodności i informacja Fisher'a w fizyce i ekonofizyce*, Skrypt dla studentów ekonofizyki, 2012

[99] Szumny R., *Metoda lokalizacji terminali radiowych wewnątrz budynków*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Warszawa 2008

[100] Tritterton D., Weston J., *Strapdown Navigation Technology*, The Institution of Electrical Engineers, 2004

[101] Tse D., *Fundamentals of Wireless Communication*, University of California, Berkley, 8/2004

[102] Walsh M. i inni, *A Fully – Coupled Hybrid IEEE 802.15.4a Ultra-Wideband / Inertial Sensor Platform for Wearable Applications*, University College Cork, Cork Ireland, 5/2014

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[103] Wang Y., *Localization and Communication for UWB – Based Wireless Sensor Networks*, Proefschrift, Technische Universiteit Delft, 11/2011

[104] Wei L., Chunzi W., Jian Z., *RSSI – SDS – TWR Estimation Method for Indoor Ranging*, Hubei University of Technology, 2/2013

[105] Wei L., i inni, *Kalman Filter Localization Algorithm Based on SDS – TWR Ranging*, Telkomnika, Vol. 11, 1436 – 1448, No 3, 3/2013

[106] Werner M., *Indoor Location-Based Services: Prerequisites and Foundations*, Springer, 2014

[107] Wesołowski K., *Systemy radiokomunikacji ruchomej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2006

[108] Win M. Z., Scholz R. A., *Characterization of Ultra – Wide Bandwidth Wireless Indoor Channels: A Communication – Theoretic View*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No 9, 1613 – 1627, 12/2002

[109] Wojnar A., *Systemy radiokomunikacji ruchomej lądowej: zasady analizy i syntezy*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1989

[110] Woodman O. J., *An Introduction to Inertial Navigation*, University of Cambridge, August 2007

[111] Yu K., Sharp I., Guo Y. J., *Ground-Based Wireless Positioning*, Wiley & Sons, 2009

[112] Zhang D. i inni, *Localization Technologies for Indoor Human Tracking*, Dalian University of Technology, China, 3/2010

[113] Zhao F., Gibas L., *Wireless Sensor Networks – An Information Processing Approach*, Elsevier, 2004

[114] Zhao S. i inni, *Hybrid Ultrawideband Modulations Compatible for Both Coherent and Transmit – Reference Receivers*, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 6, No. 7, 2551 – 2559, 7/2007

[115] Zheng J., Jamalipour A., *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*, Wiley & Sons, 2009

[116] Zwick T., Weisbeck W., Timmerman J., Adamiuk G., *Ultra – Wideband RF System Engineering*, Cambridge University Press, 2013

[117] Zwirello L., *Realization Limits of Impulse-Radio UWB Indoor Localization Systems*, KIT Scientific Publishing, 2014

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Spis rysunków

Rys. 2.1. Proces przetwarzania danych w algorytmie bezkardanowej nawigacji inercyjnej. 26
Rys. 2.2. Przykładowy moduł inercyjny z oznaczonymi mierzonymi wielkościami fizycznymi. 28
Rys. 2.3. Struktura pakietu warstwy fizycznej według standardu IEEE 802.15.4-2011. 31
Rys. 2.4. Schemat przepływu pakietów oraz procedury radiowego pomiaru odległości dla metody SDS-TWR. 32
Rys. 2.5. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej z widocznymi przyrostowymi błędami orientacji. 34
Rys. 3.1. Przykład realizacji radiowych pomiarów odległości w szczelinie TDMA. 51
Rys. 3.2. Schemat blokowy operacji wykonywanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym. 57
Rys. 3.3. Schemat blokowy operacji wykonywanych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym przy użyciu zaproponowanej metody integracji danych pozycyjnych. 59
Rys. 3.4. Ilustracja sposobu umieszczania korygowanej estymaty położenia na okręgu stałej odległości do węzła referencyjnego WR. 61
Rys. 3.5. Ilustracja błędu orientacji kolejno wyznaczonych estymat położenia. 63
Rys. 3.6. Schemat blokowy operacji wykonywanych w opracowanym algorytmie zaproponowanej metody korygującej estymaty położenia wyznaczone z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej przy zredukowanej do dwóch liczbie węzłów referencyjnych. 65
Rys. 4.1. Widok modułu inercyjnego umieszczonego na podbiciu stopy. 69
Rys. 4.2. Trasa wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) w środowisku symulacyjnym MATLAB na podstawie parametrów ruchu zarejestrowanych wewnątrz promu MF WAWEL. 70
Rys. 4.3. Trasa wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) w środowisku symulacyjnym MATLAB na podstawie parametrów ruchu zarejestrowanych wewnątrz budynku. 70
Rys. 4.4. Schemat blokowy algorytmu symulującego działanie systemu nawigacji inercyjnej. 72

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 4.5. Trasa poruszającej się osoby (kolor czerwony) wyznaczona z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej wraz z trasą wzorcową oznaczoną kolorem czarnym. 73
Rys. 4.6. Urządzenie pomiarowe podczas testów radiowych pomiarów odległości. 74
Rys. 4.7. Wyniki radiowych pomiarów odległości wykonanych w warunkach stacjonarnych w środowisku wewnątrzbudynkowym przy bezpośredniej widoczności urządzeń pomiarowych. 75
Rys. 4.8. Histogram błędów radiowych pomiarów odległości wykonywanych w warunkach stacjonarnych w środowisku promu pasażerskiego w warunkach LOS. 76
Rys. 4.9. Wyniki radiowych pomiarów odległości zrealizowanych podczas poruszania się osoby ruchem jednostajnym w środowisku wewnątrzbudynkowym. 77
Rys. 4.10. Symulowane wyniki radiowych pomiarów odległości w warunkach statycznych. 78
Rys. 4.11. Histogram symulowanych błędów radiowych pomiarów odległości dla środowiska wewnątrzbudynkowego i środowiska promu pasażerskiego. 79
Rys. 4.12. Trasa wyznaczona z użyciem modelu symulacyjnego systemu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) na tle trasy wzorcowej (kolor czarny). 80
Rys. 4.13. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 82
Rys. 4.14. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 82
Rys. 4.15. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 82
Rys. 4.16. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 82

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 4.17. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 84
Rys. 4.18. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 84
Rys. 4.19. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 85
Rys. 4.20. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 85
Rys. 4.21. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 86
Rys. 4.22. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 86
Rys. 4.23. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 86
Rys. 4.24. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 86
Rys. 4.25. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 88
Rys. 4.26. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 88
Rys. 4.27. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 88
Rys. 4.28. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 88
Rys. 4.29. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu. 90
Rys. 4.30. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanym błędem orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnych o znanym położeniu..... 90
Rys. 4.31. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu. 90
Rys. 4.32. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanym błędem orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnych o znanym położeniu..... 90
Rys. 5.2. Schemat blokowy budowy i wymiany danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym. 95
Rys. 5.3. Schemat blokowy modułu identyfikacji osobistej MIO. 96
Rys. 5.4. Strona spodnia i wierzchnia obwodu PCB modułu identyfikacji osobistej MIO. 97
Rys. 5.5. Schemat blokowy węzła referencyjnego WR. 98
Rys. 5.6. Strona spodnia i wierzchnia obwodu PCB węzła referencyjnego WR. 99
Rys. 5.7. Algorytm przetwarzania danych w aplikacji serwer_SRP. 101
Rys. 6.1. Kształty tras przyjętych podczas badań pomiarowych. 104
Rys. 6.2. Sposób umieszczenia modułu identyfikacji osobistej MIO na stopie monitorowanej osoby. 106
Rys. 6.3. Sposób umieszczenia węzłów referencyjnych WR na statywach. 106

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 6.4. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 110
Rys. 6.5. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 110
Rys. 6.6. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 111
Rys. 6.7. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 111
Rys. 6.8. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 111
Rys. 6.9. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych czterech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 111
Rys. 6.10. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 113
Rys. 6.11. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 113
Rys. 6.12. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 113
Rys. 6.13. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 113
Rys. 6.14. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz algorytmu radiolokalizacji (kolor zielony) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 114
Rys. 6.15. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) oraz w procesie integracji danych z użyciem filtracji Kalmana (kolor niebieski) przy dostępnych trzech węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 114
Rys. 6.16. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) częściowo skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 115
Rys. 6.17. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) częściowo skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 115
Rys. 6.18. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 116
Rys. 6.19. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 116
Rys. 6.20. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 116
Rys. 6.21. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o znanym położeniu. 116
Rys. 6.22. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 117

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 6.23. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami (kolor niebieski) przy dostępnych dwóch węzłach referencyjnych o wyznaczonym położeniu. 117
Rys. 6.24. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu. 119
Rys. 6.25. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu. 119
Rys. 6.26. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu. 119
Rys. 6.27. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o znanym położeniu. 119
Rys. 6.28. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) skorygowana o kąt α_{or} (kolor zielony) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o wyznaczonym położeniu. 120
Rys. 6.29. Trasa poruszającej się osoby wyznaczona z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej (kolor czerwony) ze skorygowanymi błędami orientacji (kolor niebieski) przy dostępnym jednym węźle referencyjnym o wyznaczonym położeniu. 120
Rys. 6.30. Przemieszczenie poruszającej się osoby wyznaczone w osi OZ. 121
Rys. 7.1. Błędy $RMSE_{CRLB}$ dla zaproponowanej metody wyznaczania estymat położenia w funkcji parametru beta (kolor czerwony) oraz granica Cramera–Rao (kolor czarny) dla algorytmu Foya. 129

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Spis tabel

Tab. 4.1. Przyjęte parametry statystyczne błędów w modelach symulacyjnych systemu nawigacji inercyjnej i radiowych pomiarów odległości. 80
Tab. 4.2. Estymaty położenia węzłów referencyjnych WR wyznaczone z użyciem algorytmu ABC i z użyciem algorytmu Foya. 83
Tab. 4.3. Zestawienie błędów RMSE estymat położenia wyznaczonych z użyciem omawianych metod lokalizacyjnych przy dostępnej różnej liczbie węzłów referencyjnych na podstawie symulowanych danych pozycyjnych. 91
Tab. 6.1. Położenie węzłów referencyjnych WR podczas badań pomiarowych. 104
Tab. 6.2. Parametry warstwy fizycznej interfejsu radiowego UWB. 105
Tab. 6.3. Współrzędne położenia węzłów referencyjnych WR wyznaczone przy użyciu algorytmu ABC i algorytmu radiolokalizacji. 110
Tab. 6.4. Zestawienie błędów RMSE estymat położenia poruszającej się osoby wyznaczonych z użyciem omawianych metod lokalizacyjnych przy dostępnej różnej liczbie węzłów referencyjnych. 122
Tab. 7.1. Przyjęte współrzędne położenia węzłów referencyjnych podczas obliczania dolnej granicy Cramera – Rao 128
Tab. 7.2. Procentowy udział czasu przetwarzania dla algorytmu Foya oraz filtracji Kalmana. 129
Tab. 7.3. Procentowy udział czasu przetwarzania poszczególnych operacji zaproponowanej metody integracji danych w hybrydowym systemie lokalizacyjnym. 130
Tab. 7.4. Czas wymagany do dokonania korekty pojedynczej estymaty położenia wyznaczonej z użyciem algorytmu nawigacji inercyjnej stosując filtrację Kalmana i proponowaną metodę. 130

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl