



POLITECHNIKA ŚLĄSKA

WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ELEKTRONIKI I INFORMATYKI

KIERUNEK AUTOMATYKA I ROBOTYKA

Obszerne Streszczenie Rozprawy Doktorskiej

Zastosowanie czujników bezwładnościowych w nawigacji osób pieszych

Autor: mgr inż. Paweł Iwaneczko

Promotor: prof. dr hab. inż. Aleksander Nawrat

Promotor pomocniczy: dr inż. Roman Koterak

Gliwice, 2019

Spis treści

1. Wstęp	2
2. Proponowane rozwiązanie problemu	4
2.1. Algorytm wykrycia kroku	6
2.2. Algorytmy optymalizacyjne	8
3. Konfiguracja aparatury testowej	14
3.1. Prototyp obuwia	14
3.2. Czujnik bezwładnościowy	15
3.3. Oprogramowanie	17
4. Podsumowanie	18
Bibliografia	21
Oświadczenie autorstwa	22
Dorobek naukowy doktoranta	23

1. Wstęp

Praca została poświęcona zastosowaniu czujników bezwładnościowych w nawigacji osób pieszych. Nawigacja jest działem wiedzy zajmującym się sposobami określania położenia oraz wyznaczania trasy dla wszelkiego rodzaju obiektów. Nawigacja osób pieszych w dzisiejszych czasach dzieli na nawigację satelitarną, radiową oraz bezwładnościową. Nawigacja satelitarna dotyczy stosowanych powszechnie systemów satelitarnych GPS lub GLONASS. Nawigacja radiowa jest oparta na bezprzewodowej komunikacji między tak zwanymi radio latarniami a lokalizowanym obiektem. Nawigacja bezwładnościowa dotyczy natomiast algorytmów zliczania położenia wyznaczonego przez algorytmy podwójnego całkowania przyspieszenia.

Do badań wykorzystany został czujnik IMU (ang. *Inertial Measurment Unit*), czyli inercyjna jednostka pomiarowa. IMU jest urządzeniem elektronicznym służącym do pomiaru: przyspieszeń, prędkości obrotowych oraz nierzadko do mierzenia kierunku ziemskiego pola magnetycznego. Pomiaru te są wykonywane za pomocą trzyosiowych sensorów typu MEMS (ang. *Micro-Electro Mechanical Systems*) takich jak: przyspieszeniomierze, żyroskopy oraz magnetometry. Kombinacja wszystkich tych sensorów pozwala na wyznaczenie orientacji obiektu w przestrzeni liczonej względem płaszczyzny elipsoidy ziemskiej. Orientacja ta jest wyznaczana za pomocą algorytmów filtracji komplementarnych i jest zazwyczaj opisywana jako trzy kąty Eulera ϕ , θ i ψ . Kąty te odpowiadają przechyleniu, pochyleniu i odchyleniu obiektu, przy czym przechylenie i pochylenie dotyczy płaszczyzny stycznej do kuli ziemskiej, natomiast odchylenie to inaczej azymut.

W pracy sformułowano następującą tezę:

Możliwe jest stworzenie systemu nawigacji pieszej, który pracuje w czasie rzeczywistym oraz który wykorzystywałby: czujniki bezwładnościowe IMU, sensory siły nacisku FSR, algorytmy odometrii, informacje o strukturze budynku oraz którego dokładność wyznaczania położenia byłaby mniejsza od jednego metra.

W związku z tym w pracy zostanie wykazane, że zliczanie położenia z wykorzystaniem zminiaturyzowanych czujników bezwładnościowych IMU, w zastosowaniach nawigacji osób pieszych, może być na tyle dokładne, aby określić położenie człowieka z dokładnością, która pozwoliłaby na weryfikację wyznaczonej trasy i nawigację tej osoby do określonego miejsca wewnątrz budynku. Pośrednim celem pracy jest przeprowadzenie badań nad samymi czujnikami bezwładnościowymi IMU gwoli weryfikacji powtarzalności wyznaczania orientacji oraz wpływu zakłóceń pola magnetycznego na wyniki wyznaczonego azymutu.

Krytyczną technologią w pracy są same czujniki bezwładnościowe, które są bardzo wrażliwe na zmianę przyspieszenia, prędkości kątowej oraz pola magnetycznego. Podczas wyznaczania orientacji oraz położenia obiektu korzystając z czujników IMU wykorzystywane są algorytmy całkowania, czego skutkiem jest gromadzenie się dużej ilości błędów. Błędy te minimalizuje się za pomocą różnego rodzaju algorytmów optymalizacji oraz filtracji danych. Bezpośrednią przyczyną błędów jest kumulacja błędu zera i powstawanie tak zwanego dryftu, spowodowana stosowaniem nisko-kosztowych sensorów MEMS. Błędy dotyczą także wyznaczonej orientacji spowodowanej zakłóceniami pola magnetycznego pochodzącymi z otoczenia.

Założenia sformułowane w pracy doktorskiej są następujące:

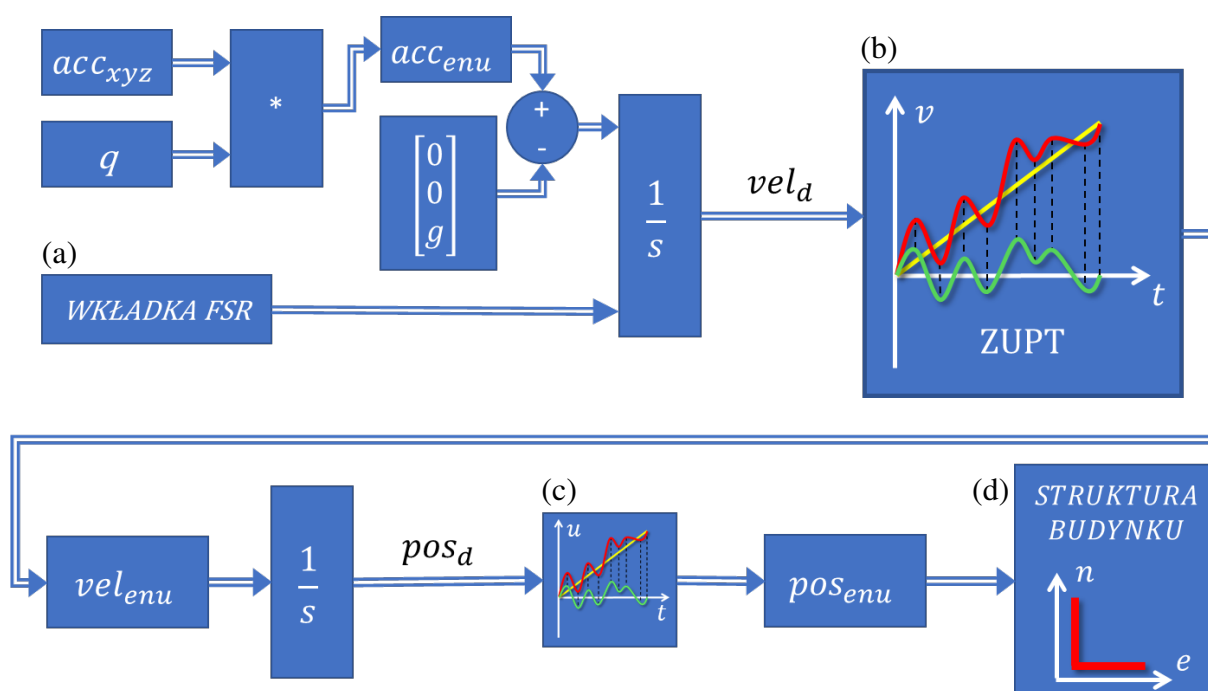
- propozycja kilku algorytmów zliczania położenia opartego na odometrii,
- wykorzystanie czujników bezwładnościowych IMU wykonanych w technologii MEMS,
- zastosowanie sensorów siły nacisku FSR (ang. *Force Sensing Resistor*),
- wykorzystanie tras wzorcowych
- dokładność wyznaczania lokalizacji nie będzie przekraczać jednego metra

Warunki brzegowe pracy doktorskiej niezbędne w celu wyznaczenia poprawnej lokalizacji człowieka wewnątrz budynku są następujące:

- znajomość wartości przyspieszenia ziemskiego, która jest zależna od szerokości geograficznej oraz wysokości nad poziomem morza,
- znajomość położenia początkowego wykorzystywanego w algorytmach odometrii,
- wiedza na temat ośrodka w którym człowiek się porusza (np. geometria budynku)
- możliwość mierzenia dokładnego czasu rozpoczęcia i zakończenia kroku (np. za pomocą sensorów siły nacisku FSR)

2. Proponowane rozwiązanie problemu

Proponowana wersja algorytmu odometrii integruje ze sobą dane o przyspieszeniu i orientacji czujnika oraz dane o sile nacisku stopy na podeszwę obuwia uzyskiwaną z wkładki tensometrycznej FSR. Schemat proponowanego algorytmu został zobrazowany na rys. 2.1.



Rysunek 2.1. Schemat proponowanego algorytmu odometrii wykorzystującego wkładki FSR oraz strukturę budynku, (a) Metoda wykrycia kroku, (b) Usunięcie dryftu prędkości metodą ZUPT, (c) Eliminacja dryftu przesunięcia dla składowej pos_u (d) Metoda optymalizacji wyniku.

Pierwszym krokiem algorytmu jest przemnożenie wektora przyspieszeń acc_{xyz} lewostronnie przez estymowany kwaternion orientacji czujnika q . Celem tego przekształcenia jest uzyskanie przyspieszenia, które jest niezależne od orientacji czujnika, czyli mierzone zgodnie z układem współrzędnych związanym z płaszczyzną styczną do powierzchni ziemskiej ENU (ang. *East-North-Up*) [4].

Wynikiem pierwszego kroku algorytmu, opisanego we wzorze 2.1, jest wektor przyspieszeń acc_{ENU} . Następnym etapem jest usunięcie z przyspieszenia acc_{ENU} jego składowej stałej, która

oddziałuje w kierunku pionowym (acc_U) oraz która jest związana z wartością grawitacyjnego przyspieszenia ziemskiego g (wzór 2.2, bloczek sumacyjny na schemacie 2.1).

$$acc_{ENU}(t) = q * acc_{xyz}(t) \quad (2.1)$$

$$acc_U(t) = acc_U(t) - g \quad (2.2)$$

Kolejnym krokiem jest wykonanie pierwszego całkowania, co zostało przedstawione we wzorze 2.3

$$vel_d(t) = \int_{t_0}^{t_n} acc_{ENU}(t) dt \quad (2.3)$$

gdzie: t_0 - jest momentem rozpoczęcia kroku, t_n - jest chwilą czasu zakończenia kroku, a vel_d - jest wyznaczoną prędkością kroku z tak zwanym dryftem prędkości. Moment zakończenia całkowania t_n jest wyznaczany za pomocą zaproponowanej metody wykrycia kroku, która wykorzystuje czujniki siły nacisku FSR (bloczek (a) na schemacie 2.1), opisaną w rozdziale 2.1.

Dryft prędkości może zostać usunięty stosując funkcję liniową opisaną wzorem 2.4, przy czym w stacjonarnym układzie odniesienia prędkość $vel_0(t_n)$ jest pomijana

$$vel_{ENU}(t) = vel_d(t) - (vel_d(t_n) - vel_0(t_n)) * \frac{t - t_0}{t_n - t_0} \quad (2.4)$$

gdzie: $vel_0(t_n)$ - jest znaną prędkością układu odniesienia w czasie t_n .

Po wyznaczeniu prędkości vel_{ENU} jest wyznaczana przebyta odległość liczona względem poprzedniego położenia korzystając z drugiej całki oznaczonej. Wyznaczenie przebytego wektora dystansu pos_d jest opisane we wzorze 2.5.

$$pos_d(t) = \int_{t_0}^{t_n} vel_{ENU}(t) dt \quad (2.5)$$

Kolejnym krokiem jest analogiczne usunięcie dryftu położenia dla pionowej składowej dystansu pos_U korzystając ze wzoru 2.6, co obrazuje bloczek (c) na schemacie 2.1

$$pos_U(t) = pos_{dU}(t) - (pos_{dU}(t_n) - pos_{dU}(t_0)) * \frac{t - t_0}{t_n - t_0} \quad (2.6)$$

gdzie: pos_{dU} - jest pionową częścią wektora dystansu z dryftem (pos_d) wyliczonego na podstawie całkowania prędkości vel_{ENU} w przedziale czasu od t_0 do t_n .

Wektor dystansu pos_{ENU} nie powinien mieć jednak zmienionej długości po zastosowaniu przeliczenia ze wzoru 2.6, dlatego należy również odpowiednio przeskalować składowe wektora pos_E oraz pos_N korzystając ze wzorów 2.7 i 2.8

$$pos_E(t) = pos_{dE}(t) * \frac{\sqrt{pos_{dE}(t_n)^2 + pos_{dN}(t_n)^2 + pos_{dU}(t_n)^2}}{\sqrt{pos_{dE}(t_n)^2 + pos_{dN}(t_n)^2}} \quad (2.7)$$

$$pos_N(t) = pos_{dN}(t) * \frac{\sqrt{pos_{dE}(t_n)^2 + pos_{dN}(t_n)^2 + pos_{dU}(t_n)^2}}{\sqrt{pos_{dE}(t_n)^2 + pos_{dN}(t_n)^2}} \quad (2.8)$$

gdzie: pos_{dE} i pos_{dN} - są odpowiednio składowymi poziomymi wyznaczonego położenia z dryftem pos_d , natomiast pos_E i pos_N - są przeskalowanymi składowymi dystansu w płaszczyźnie poziomej wektora pos_{ENU} .

Ostatnim etapem algorytmu jest bloczek (d) na schemacie 2.1, czyli ograniczenie wyznaczonego położenia dla części składowych pos_E oraz pos_N do obszaru określonego strukturą otoczenia w którym się poruszamy. Aspekty związane z zastosowaniem struktury budynku są opisane w podrozdziale 2.2.

Opisany algorytm nawigacji osobistej ma zastosowanie tylko do tras w płaszczyźnie poziomej, natomiast modyfikacje aproksymujące zmianę wysokości polegające na obserwacji dryftu położenia w płaszczyźnie poziomej są opisane w podrozdziale 2.2.

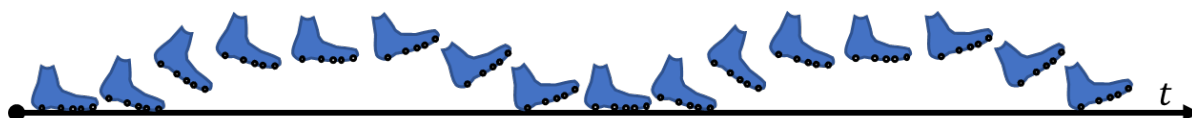
2.1. Algorytm wykrycia kroku

W trakcie realizacji pracy powstały trzy algorytmy wykrywania kroku z wykorzystaniem sensorów siły nacisku FSR.

Metoda SDFT (ang. *Step Detection with Force Sensing Resistor Threshold*) polega na sprawdzeniu czy wartość zarejestrowanego napięcia w czujniku FSR jest większa od przyjętego progu granicznego V_{tr} . Kolejny algorytm o nazwie SDF2 (ang. *Step Detection with at least 2 of Force Sensing*), polega na sprawdzeniu, czy odczyty napięcia z co najmniej dwóch z pięciu

sensorów FSR przekroczyły minimalną wartość graniczną V_{min} . Metody SDF2 oraz SDFT działają w trybie online i polegają na wykryciu fazy kroku na podstawie analizy aktualnie przetwarzanych danych z sensorów FSR.

Ostatnim z zaprojektowanych mechanizmów wykrycia kroku z wykorzystaniem sensorów FSR jest metoda SDFP (ang. *Step Detection with Force Sensing Resistors Process*). Interpretacja graficzna algorytmu została zaprezentowana na rysunku 2.2. Rysunek prezentuje wybrane położenia stopy w trakcie chodu po linii prostej oraz rozmieszczenie sensorów FSR na podeszwie stopy. Algorytm SDFP, w przeciwieństwie do dwóch poprzednich metod, pozwala na wyznaczenie momentów kroku również na schodach, gdy podczas kontaktu stopy z podłożem są wykorzystywane tylko niektóre sensory FSR spośród wszystkich umieszczonych w podeszwie obuwi. Metoda polega na weryfikacji, czy wszystkie czujniki FSR, które były wykorzystywane podczas kontaktu stopy z ziemią, pomiędzy poprzednim i kolejnym krokiem, osiągnęły wartość większą niż minimalne napięcie progowe o potencjale V_{min} . Sąsiadujące kroki są wykrywane w pierwszej fazie algorytmu, poprzez sprawdzenie czy każdy czujnik posiada wartość mniejszą niż niezerowa wielkość progowa (środkowa część rysunku 2.2). Drugą fazą algorytmu jest rozciągnięcie momentów początku i końca kroku, wyznaczonych za pomocą pierwszego etapu metody, do chwili w której rozpoczęto odrywanie stopy od podłogi oraz do momentu, w którym stopa kończy ruch, czyli gdy cała podeszwa dotyka podłoża ponownie. Dla potrzeb algorytmu SDFP, moment rozpoczęcia odrywania stopy od ziemi jest uznawany za taki, w którym przynajmniej jeden z sensorów biorących udział w pierwszym kontakcie stopy z podłożem osiągnie *wartość zerową*, czyli napięcie mniejsze niż V_{min} . Chwila zakończenia ruchu jest interpretowana przez algorytm jako czas w którym wszystkie czujniki FSR wykorzystywane w etapie zakończenia kroku będą przyjmować *wartość niezerową*, czyli większą niż V_{min} .



Rysunek 2.2. Interpretacja graficzna algorytmu wykrycia kroku za pomocą metody SDFP

2.2. Algorytmy optymalizacyjne

Podczas badań nad systemem nawigacji bezwładnościowej zaprojektowano szereg optymalizacji mających na celu poprawę wyników badań. Należą do nich między innymi takie usprawnienia jak:

- wyznaczenie średniego przyspieszenia początkowego,
- filtracja górnoprzepustowa i dolnoprzepustowa,
- eliminacja dryftu przesunięcia,
- algorytmy kwantyzacji położenia

Pierwsza optymalizacja polegająca na wyznaczeniu średniej wartości przyspieszenia początkowego powstała z uwagi na fakt, iż natężenie pola grawitacyjnego Ziemi g nie jest stałe oraz zależy od szerokości geograficznej oraz wysokości nad poziomem morza. Metoda polega na wyznaczeniu średniej wartości z długości wektora przyspieszenia ziemskiego z 20 pierwszych próbek dostarczonych do systemu z czujnika IMU po rozpoczęciu badania (wzór 2.9).

$$\bar{g} = \sum_{i=1}^{20} \frac{\sqrt{acc_E(i)^2 + acc_N(i)^2 + acc_U(i)^2}}{20} \quad (2.9)$$

Wyznaczona wartość średnia \bar{g} zastępuje natomiast zmienną g we wzorze 2.2 eliminującym wpływ przyspieszenia ziemskiego na wektor acc_{ENU} .

Wykorzystywane metody filtracji górnoprzepustowej oraz filtracji dolnoprzepustowej przyspieszenia zostały opisane w przeglądzie literatury znajdującym się w dyertacji. Należy dodać, iż filtr górnoprzepustowy jest również używany do poprawy wstępnych wskazań z żyroskopów. Metoda eliminacji dryftu przesunięcia została natomiast wstępnie zaprezentowana w rozdziale 2, jednak nie uwzględnia ona możliwości zmiany wysokości, a co się z tym wiąże, wykrycia chodzenia po schodach.

Dlatego też opracowano kilka algorytmów usunięcia dryftu przesunięcia w płaszczyźnie pionowej, które bazują na podstawowej wersji opisanej we wzorach 2.6, 2.7 oraz 2.8. Metoda pierwsza, która polega na obróceniu wektora dryftu w badaniach została nazwana PDR (ang. *Position Drift Rotation*). Druga metoda polegająca na zrzutowaniu przebiegu kroku do płaszczyzny poziomej, która nazwana jest zgodnie z jej zastosowaniem, PDCD (ang. *Position*

Drift Cast-Down), w odróżnieniu od metody podstawowej, nie wydłuża kroku dla współrzędnych pos_E oraz pos_N , natomiast wykorzystuje tylko pierwsze z trzech jej równań, czyli równanie 2.6. Kolejna metoda upraszczająca przebieg kroku wykorzystywana do eliminacji dryftu, która polega na spłaszczeniu trasy kroku, nosi nazwę PDF (ang. *Position Drift Flattening*) i w przeciwieństwie do metody drugiej, wykorzystuje tylko dwa wzory (2.7 i 2.8), natomiast współrzędna pos_U jest przyrównywana do zera. Ostatnim opracowanym algorytmem służącym do analizy i usunięcia dryftu przesunięcia jest algorytm PDA (ang. *Position Drift Auto-Detection*). Metoda bazuje na obserwacji przebiegu kąta dryftu przesunięcia w płaszczyźnie pionowej i weryfikacji czy kąt ten nie przekracza przyjętego przedziału ufności wokół wyznaczonej wartości średniej.

Kolejnym algorytmem optymalizacyjnym wykorzystywanym do badań była poprawa kierunku kroku, poprzez zmianę cząstkowych składowych wyznaczonego wektora pos_{ENU} dla osi poziomych E oraz N według wzorów 2.10 oraz 2.11.

$$pos_E(t) = \sin(\alpha) * \sqrt{pos_E(t)^2 + pos_N(t)^2} \quad (2.10)$$

$$pos_N(t) = \cos(\alpha) * \sqrt{pos_E(t)^2 + pos_N(t)^2} \quad (2.11)$$

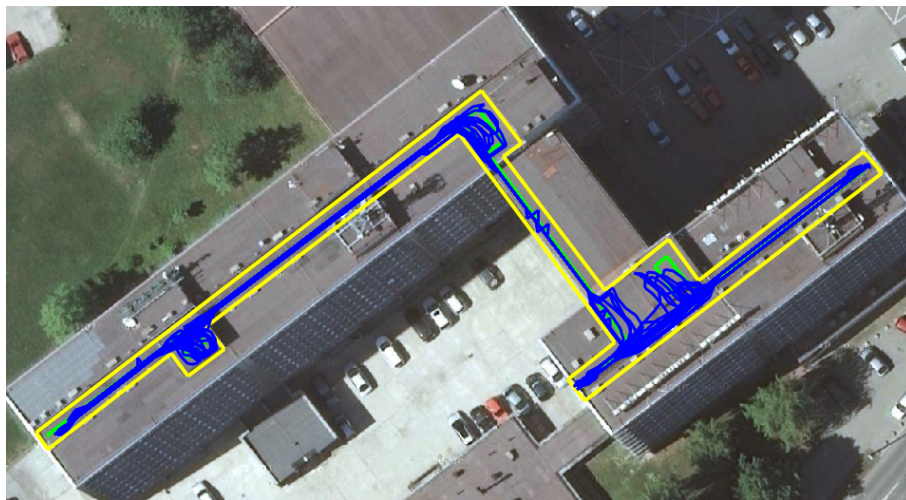
gdzie: α - jest średnim kątem kroku wyznaczonym za pomocą różnych metod uśredniających, takich jak: mediana, wartość środkowa, średnia, lub poprzez podmianę kąta wszystkich cząstkowych części kroku na kąt wypadkowy liczony ze wzoru 2.12.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{pos_E(t_n)}{pos_N(t_n)}\right) \quad (2.12)$$

Należy tutaj podkreślić, iż poprawa azymutu α dla kroku jest elementem kluczowym w nawigacji zliczeniowej ze względu na zakłócenia pola magnetycznego istniejące w budynku. Podczas badań nad prototypem z wkładką FSR (opisanym w podrozdziale 2.1), zastosowano dodatkowy czujnik IMU umieszczony na wysokości bioder. Sensor ten został wykorzystany jako kolejne źródło kierunku poruszania się, które w odróżnieniu od czujnika w obuwiu, nie posiadało tak dużych amplitud długości wektora pola magnetycznego.

Podczas badań zaprojektowano również kolejne udoskonalenie, które polega na kwantyzacji kąta trasy, czyli na ograniczeniu zmiany kąta każdego następnego kroku względem poprzedniego o ustaloną wielokrotność n dla przyjętej wartości kąta ψ . Algorytm, w przypadku gdy kąt ψ wynosi 90° , może być wykorzystany tylko przy założeniu, że zakręty pomiędzy korytarzami w budynku są prostopadłe względem siebie. Metoda kwantyzacji zaimplementowana przez autora pracy doktorskiej nosi nazwę algorytmu HHR (ang. *Heuristic Heading Reduction*). Należy zauważyć iż metoda ta pojawia się w literaturze pod nazwami *Compass*, HDE oraz HDR [1, 2, 6], jednakże w odróżnieniu od algorytmu HHR, metody te zmniejszają błąd wartości kąta ψ poprzez redukcję dryftu prędkości kątowej.

Ostatnim algorytmem optymalizacyjnym, który został stworzony dla potrzeb wykonania badań do niniejszej dysertacji jest metoda ograniczająca położenie wyjściowe wykorzystująca modele budynków.



Rysunek 2.3. Przykładowy model budynku z wynikiem zoptymalizowanej trasy o długości 3077 m

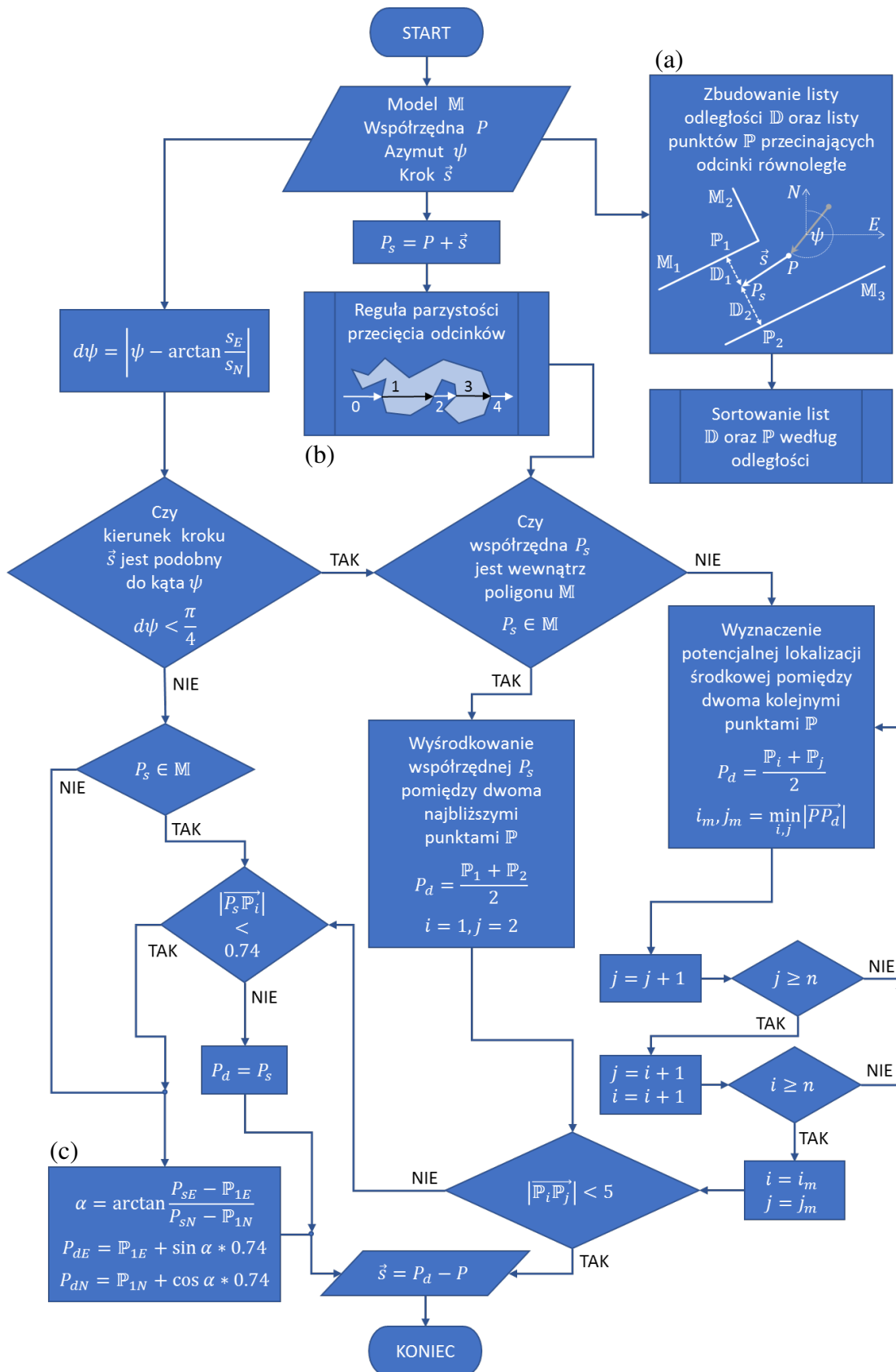
Rysunek 2.3 przedstawia przykładowy model struktury budynku Politechniki Śląskiej, dla którego została wyznaczona trasa o długości 3077 metrów. Utworzony wcześniej model budynku jest zaznaczony kolorem żółtym, natomiast linie zaznaczone kolorem zielonym wyznaczają trasę referencyjną. Wynik przykładowej trasy po optymalizacji, został oznaczony kolorem niebieskim, a dotyczył pięciokrotnego powtórzenia drogi wzdłuż korytarzy wewnątrz budynku z uwzględnieniem kilku zmiany kondygnacji z szóstego na piąte piętro.

Struktura budynku jest w badaniach tworzona ze zbioru współrzędnych geograficznych, który przekłada się na tak zwany model korytarzy. Niemniej jednak możliwe jest wykorzystywanie stworzonych już modeli obrysów budynków dostępnych między innymi za pomocą darmowego i otwartego projektu map cyfrowych OSM.

Schemat algorytmu optymalizacji trasy oraz wykrywania korytarzy w budynku na podstawie znanego modelu został przedstawiony na rysunku 2.4. Wejściem algorytmu jest stworzony wcześniej model \mathbb{M} oraz dane aktualizowane w każdej pętli procesu algorytmu nawigacji takie jak: poprzednia współrzędna P , kąt poprzedniego kroku ψ oraz wektor wyznaczonego kroku \vec{s} . W pierwszej kolejności tworzona jest lista odległości \mathbb{D} pomiędzy każdym kolejnym odcinkiem modelu budynku a wstępną lokalizacją docelową P_s poprzez wyznaczenie prostej prostopadłej przecinającej je ze sobą, oraz lista punktów \mathbb{P} , w przypadku, gdy odcinek tworzący ścianę jest skierowany podobnie jak kierunek poruszania się (błoczek (a) na schemacie algorytmu). Kierunek ten jest podobny, gdy wartość bezwzględna różnicy kąta pomiędzy kierunkiem wyznaczonego kroku a kątem odcinka jest mniejsza niż 60° (wzór 2.13).

$$\left| \arctan \frac{\mathbb{M}_{iE}}{\mathbb{M}_{iN}} - \arctan \frac{s_E}{s_N} \right| < \frac{\pi}{3} \quad (2.13)$$

Lista odległości oraz słownik punktów są następnie sortowane od najmniejszej do największej według odległości. Następnym krokiem jest sprawdzenie, czy bezwzględna różnica kąta pomiędzy aktualnym kierunkiem kroku a poprzednim azymutem ψ jest mniejsza niż 45° . Jeśli tak, to kolejnym krokiem algorytmu jest sprawdzenie czy wstępnie wyznaczona lokalizacja docelowa P_s znajduje się wewnątrz, czy na zewnątrz poligonu określonego przez model budynku. Jeżeli położenie znajduje się wewnątrz modelu \mathbb{M} oraz gdy szerokość pomiędzy dwoma najbliższymi ścianami, które razem z wektorem kroku \vec{s} spełniają warunek 2.13, jest mniejsza niż 5 metrów, wtedy położenie docelowe P_d jest wyznaczona w środku zidentyfikowanego korytarza. W innym przypadku, jeżeli lokalizacja P_s jest poza poligonem \mathbb{M} , poszukiwany jest tak zwany korytarz alternatywny, którym osoba prawdopodobnie się porusza. Wyznaczanie potencjalnego korytarza odbywa się poprzez przegląd zupełny kolejnych par punktów z listy \mathbb{P} i znalezienie takich elementów \mathbb{P}_i oraz \mathbb{P}_j , dla których obliczona lokalizacja środkowa P_d jest położona w najbliższej odległości od położenia P . Jeżeli natomiast kierunek



Rysunek 2.4. Schemat algorytmu wykorzystującego model budynku, (a) Tworzenie listy odległości do odcinków modelu \mathbb{M} , (b) Metoda EORA, (c) Obliczenie pozycji docelowej.

kroku, wyznaczany na początku algorytmu, jest inny niż poprzedni azymut ψ ($d\psi \geq \pi/4$) lub gdy wyznaczone położenie docelowe znajduje się poza granicami modelu budynku \mathbb{M} albo zbyt blisko najbliższej ściany \mathbb{P}_i , wtedy położenie docelowe P_d jest wyznaczane w minimalnie przyjętej odległości od najbliżej występującego odcinka, którego kierunek jest podobny (warunek 2.13) do kierunku kroku \mathbb{P}_1 , według wzorów zamieszczonych w bloczku (c) schematu algorytmu. Minimalna odległość od ściany wewnątrz budynku została przyjęta jako połowa średniej długości kroku dorosłego człowieka, czyli 0.74 metra. Ostatnim etapem algorytmu jest aktualizacja wektora kroku \vec{s} względem wyznaczonego położenia docelowego P_d . Algorytm detekcji korytarzy będzie w pracy nazywany BSCD (ang. *Building's Structure Corridor Detection*), albo BSOUT (ang. *Building's Structure Outline*), jeżeli zamiast dokładnego modelu struktury korytarzy, będzie wykorzystywany zewnętrzny i prosty obrys budynku.

Zamiast modelu budynku można również wykorzystać trasy wektorowe, które określają ścieżki, po których użytkownik może się poruszać. Systemy map wektorowych dróg są współcześnie wykorzystywane w nawigacjach samochodowych do poprawy określenia położenia i kierunku jazdy [3] i z powodzeniem mogłyby znaleźć zastosowanie w systemach nawigacji pieszej. W odróżnieniu od modeli korytarzy budynków, korzystanie z map wektorowych dostępnych tras jest dużo łatwiejsze. Jest tak ponieważ algorytm poprawy położenia według możliwych tras wektorowych, który będzie w dysertacji nazywany BSVM (ang. *Building's Structure Vector Map*), ogranicza się jedynie do wyznaczenia wektora \vec{v} , który razem z wektorem \vec{s} spełniają warunek 2.14 i znajduje się najbliższej obliczonej lokalizacji docelowej. Algorytm w pracy będzie również używany pod nazwą PVM (ang. *Pedestrian Vector Map*), który dotyczył będzie zastosowań na zewnątrz budynków. Wynikiem otrzymanej poprawki jest położenie znajdujące się na przecięciu najbliższego wektora i linii prostopadłej do tego wektora wyznaczone tą samą metodą, która jest używana w algorytmie optymalizacji wykorzystującym model budynku (BSCD).

$$\left| \arctan \frac{v_E}{v_N} - \arctan \frac{s_E}{s_N} \right| < \frac{\pi}{3} \quad (2.14)$$

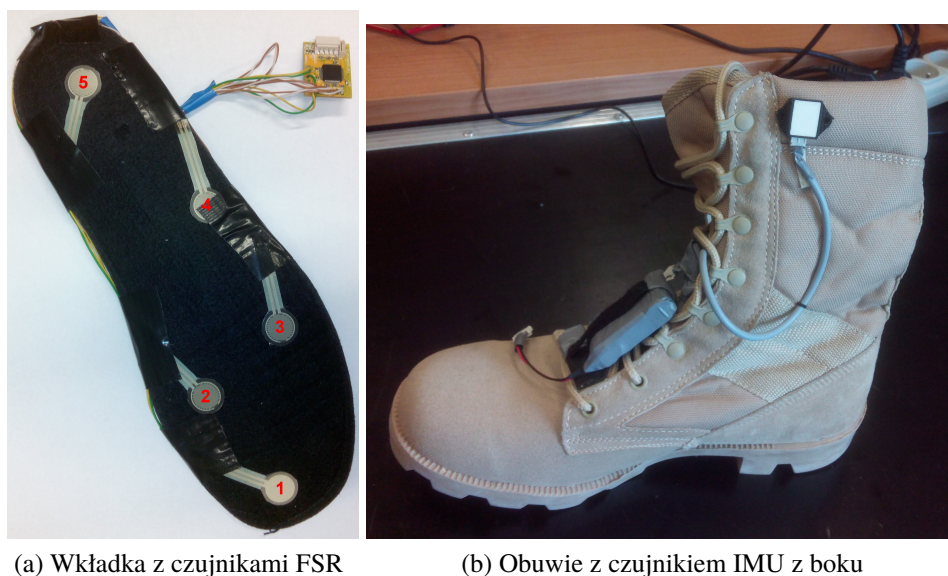
3. Konfiguracja aparatury testowej

Badania przeprowadzone w pracy doktorskiej wymagały przygotowania odpowiedniej aparatury testowej. Wykorzystywana aparatura testowa została podzielona na:

- finalny prototyp obuwia
- wykorzystywany czujnik IMU
- oprogramowanie komputerowe

3.1. Prototyp obuwia

Finalnym prototypem systemu MINT stworzonym do celów realizacji badań w pracy doktorskiej jest obuwie, w którym został zastosowany jeden czujnik bezwładnościowy i pięć czujników FSR (ang. *Force Sensing Resistor*).



Rysunek 3.1. Finalny prototyp wykorzystujący wkładkę tensometryczną FSR

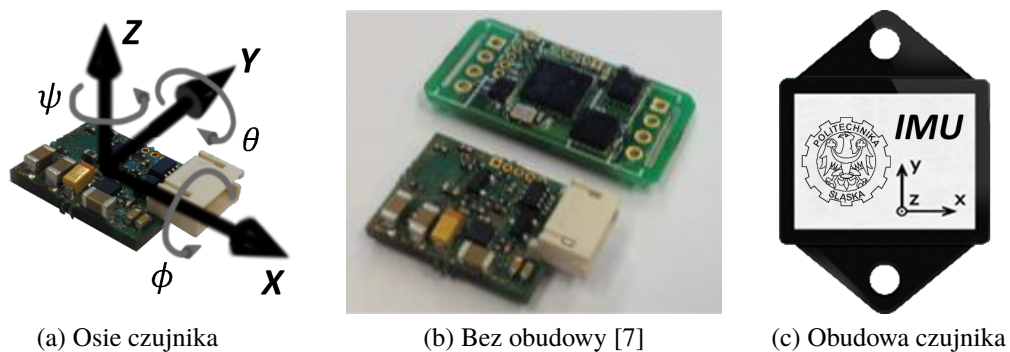
W prototypie użyto lekkie wojskowe obuwie pustynne, które jest zobrazowane na rysunku 3.1b z czujnikiem IMU umieszczonym w górnej części buta.

Do wykrycia kroku zostały wykorzystane sensory siły nacisku FSR402 firmy Interlink Electronics [5], które są przyklejone do płaskiej wkładki obuwniczej, która została zilustrowana na rysunku 3.1a. Na dolnej części wkładki jest umieszczonych 5 czujników FSR, przy czym pierwszy znajduje się w okolicy palców, trzy kolejne w śródstopiu oraz jeden pod piętą stopy.

Zaletą użycia wkładki FSR jest możliwość analizy dokładnego przebiegu zmiany natężenia siły nacisku stopy na podłoże w czasie rzeczywistym w wielu miejscach jednocześnie. Dodatkową zaletą tego prototypu jest wykorzystanie tylko jednego czujnika bezwładnościowego. Układ elektroniczny widoczny na rysunku 3.1a w prawym górnym rogu został tak skonstruowany, aby wraz ze wzrostem siły nacisku przykładanej do czujników rosła wyjściowa wartość napięcia. Przy braku nacisku napięcie powinno przyjmować wartość zerową.

3.2. Czujnik bezwładnościowy

Czujnik IMU wykorzystywany w badaniach zamieszczonych w dysertacji został w pełni opracowany i stworzony przez zespół badaczy z Politechniki Śląskiej. Używany czujnik IMU, oprócz pomiaru przyspieszenia i prędkości kątowej, uwzględnia także pomiar pola magnetycznego ziemi. Czujnik ten został zbudowany z sensorów mikro elektromechanicznych MEMS i jest uznawany jako system AHRS (ang. *Altitude and Heading Reference System*), czyli referencyjny system wyznaczania orientacji w przestrzeni.



Rysunek 3.2. Wykorzystywany czujnik bezwładnościowy IMU

Typ mierzonej wielkości fizycznej	Przyspieszenie	Pole magnetyczne	Prędkość kątowna
Model sensora MEMS	LSM303DLM		L3G4200D
Interfejs pomiarowy	12 bitów, I2C		16 bitów, I2C/SPI
Zakres pomiarowy	$[\pm 2, \pm 8] g$	$[\pm 1.3, \pm 8.1] Gs$	$[\pm 250, \pm 2000] ^\circ/s$
Współczynnik sygnału do szumu	16, 35 dB	28, 85 dB	24, 05 dB

Tabela 3.1. Parametry sensorów wewnątrz wykorzystywanego czujnika IMU

Czujnik wykorzystany do badań został zobrazowany na zdjęciu 3.2. Osie obrotu czujnika w kartezjańskim układzie współrzędnych są następujące (rys. 3.2a):

- ϕ - (ang. *Roll*) - kąt przechylenia obiektu, obrót wokół osi x
- θ - (ang. *Pitch*) - kąt pochylenia obiektu, obrót wokół osi y
- ψ - (ang. *Yaw*) - kąt odchylenia obiektu, azymut, obrót wokół osi z

Do komunikacji z czujnikiem wykorzystywana jest magistrala CAN (ang. *Controller Area Network*) w wersji 2.0A. Okres próbkowania danych wyjściowych z czujnika IMU może zostać zmieniony z wykorzystaniem protokołu CANopen, za pomocą którego można również ustawić między innymi jakie dane wyjściowe są transmitowane przez układ pomiarowy. Czujniki na zdjęciu 3.2b różnią się jedynie wielkością płytki stykowej i miejscem umieszczenia wyprowadzeń magistrali CAN. Czujniki te posiadają identyczne elementy elektroniczne, zaś dłuższa wersja czujnika przedstawia ich drugą stronę z sensorami MEMS. Obudowa mniejszej wersji czujnika IMU została zaprezentowana na zdjęciu 3.2c.

W podstawowej konfiguracji, która była wykorzystywana do badań, czujnik IMU wysyłał następujące dane:

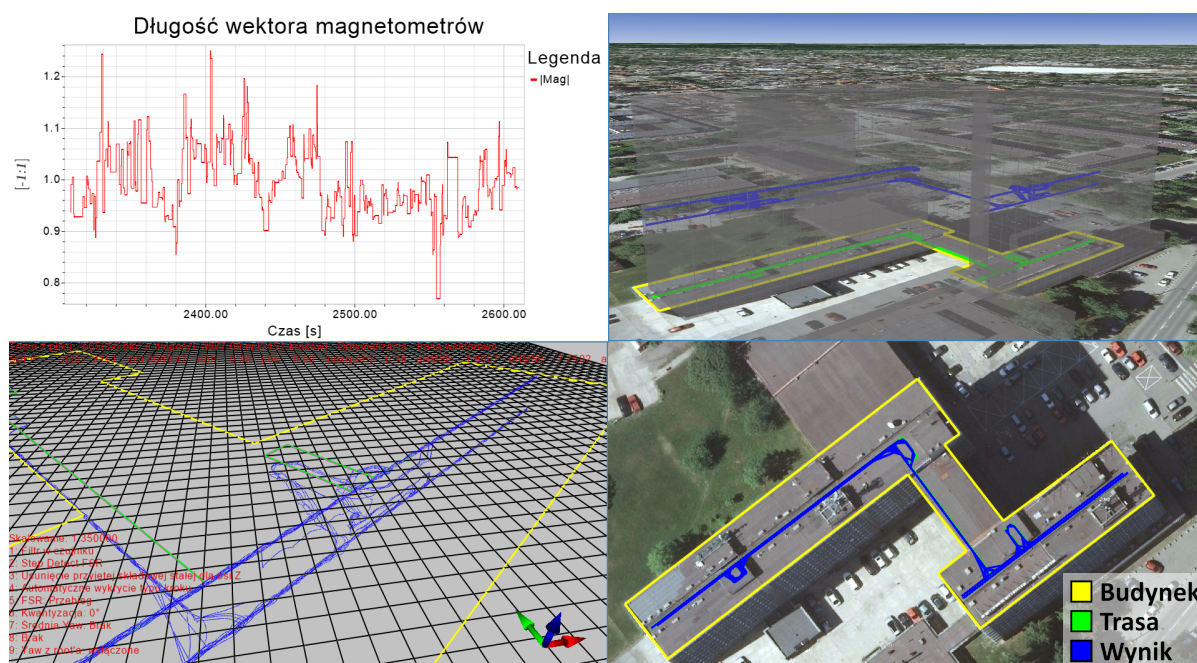
- przyspieszenie po kalibracji w trzech osiach: acc_x, acc_y, acc_z w m/s^2
- prędkość kątowna po kalibracji w trzech osiach: $rate_x, rate_y, rate_z$ w rad/s
- natężenie pola magnetycznego w trzech osiach: mag_x, mag_y, mag_z
- macierz orientacji - kwaternion obrotu: q

Po etapie kalibracji i wyznaczenia wartości sensorów czujnika bezwładnościowego możliwe jest wyznaczenie orientacji, która jest przesyłana przez czujnik w formie kwaternionów poprzez

interfejs CAN. Parametry czujnika IMU zostały zamieszczone w tabeli 3.1. Zakres temperatur pracy układu pomiarowego IMU wynosi od -40 do 80 °C.

3.3. Oprogramowanie

Prezentacja wyników oraz analiza danych została przygotowana z wykorzystaniem aplikacji „Project SYBIL”, która powstała głównie na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej. Przykładowy zrzut ekranu z aplikacji został przedstawiony na rysunku 3.3. Aplikacja jest oparta na autorskim silniku graficznym GLEMM (ang. *OpenGL Engine for Multi Monitors*) napisanym w języku C++ dla systemu Windows.



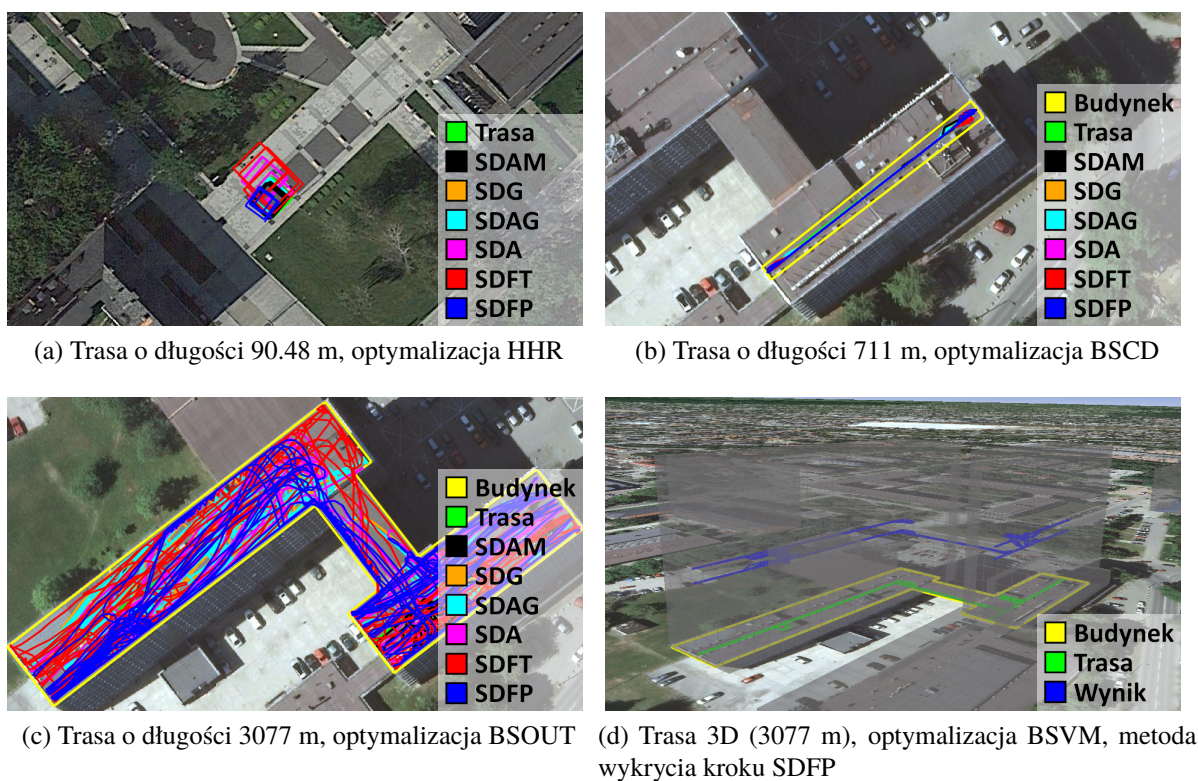
Rysunek 3.3. Aplikacja SYBIL - widok wielu okien, które przedstawiają wyniki trasy przeprowadzonej wewnątrz budynku Politechniki Śląskiej o długości 3077 metrów dla zastosowanej optymalizacji wektorowej

Ważne jest aby podkreślić, że badania zostały przeprowadzone w trybie offline wykorzystując dane zarejestrowane w formacie binarnym. Podczas testów dane były rejestrowane bezpośrednio na komputerze PC wykorzystując przejściówkę CAN/USB oraz wtyczkę „CAN Logger” w aplikacji SYBIL, lub na urządzeniu mobilnym Xperia Z5 Compact wykorzystując bezprzewodową przejściówkę CAN/Bluetooth oraz aplikację mobilną napisaną w języku Java Android.

4. Podsumowanie

Celem rozprawy doktorskiej było wykazanie, że zliczanie położenia z wykorzystaniem czujników IMU stworzonych w technologii MEMS oraz sensorów siły nacisku FSR, w zastosowaniach nawigacji osób pieszych, może być na tyle dokładne, aby określić położenie człowieka z dokładnością do jednego metra przy założeniu, że znana jest struktura budynku.

Badania dotyczące nawigacji bezwładnościowej w pracy doktorskiej koncentrują się głównie na wyznaczaniu położenia wewnątrz budynków przy pomocy czujników bezwładnościowych IMU. Jak wskazują wyniki zamieszczone w dysertacji, trudno było uzyskać satysfakcjonujące rezultaty wyznaczania położenia na zewnątrz budynków bez zastosowania jakichkolwiek metod optymalizacji. Przykładowe wyniki, dla trasy o długości 90.48 metrów, zostały przedstawione na rysunku 4.1a. Szczególnie było to zauważalne dla trzeciej analizowanej trasy, dla której dokładność była niewiele większa od dokładności systemów GPS, dlatego według autora pracy doktorskiej, zasadne jest wykorzystywanie nawigacji bezwładnościowej na zewnątrz budynku tylko w połączeniu z systemami satelitarnymi. Na podstawie otrzymanych wyników, które dotyczą wyznaczania położenia wewnątrz budynku, można stwierdzić, że możliwe było uzyskanie dokładności wyznaczania położenia mniejszej niż jeden metr tylko w przypadku zastosowania metod optymalizacji. Dla eksperymentu dotyczącego trasy liniowej o długości 711 metrów (przykładowy rysunek 4.1b) wystarczyło użyć algorytmu HHR polegającego na kwantyzacji kąta ψ równej 90° . Jednakże dla bardziej złożonej trasy o długości 3077 metrów, która trwała około 45 minut, optymalizacja HHR okazała się niewystarczająca, niemniej jednak wykorzystanie metody BSOUT (rys. 4.1c), która polega na ograniczeniu wyznaczonego położenia na podstawie znajomości zewnętrznego modelu budynku, pozwoliło na osiągnięcie dokładności wynoszącej 0.6 metra.



Rysunek 4.1. Zestawienie wybranych wyników badań

Wnioski obejmują podsumowanie dotyczące tras wykonanych wewnątrz budynku oraz metod eliminacji zakłóceń pola magnetycznego, które zostały zastosowane w celu poprawy wyników uzyskanych dla tych tras. Na rysunku 4.1 zostały zamieszczone niektóre z wyniki badań, które zostały szczegółowo opisane w rozprawie doktorskiej.

Podsumowując wyniki pierwszej analizowanej trasy wewnątrz budynku Politechniki Śląskiej (o długości 711 metrów), można wyprowadzić wniosek, że niezależnie od stosowanej metody optymalizacji, najlepszą metodą wykrycia kroku, która pozwala na uzyskanie najmniejszych błędów położenia i dystansu została metoda SDFP, zaproponowana przez autora pracy doktorskiej, polegająca na analizie przebiegu pięciu sensorów siły nacisku FSR. Należy jednak zauważyć, że bez zastosowania metod optymalizacji i ograniczenia położenia końcowego błędy uzyskiwane przez algorytm odometrii znacząco przekraczają założoną dokładność jednego metra. Dopiero wyniki uzyskane dla zastosowanych optymalizacji algorytmem BSVM oraz metodą BSCD (rys. 4.1b), przynoszą akceptowalne rezultaty końcowego błędu położenia $|e_p(n)|$ oraz sumarycznego wskaźnika jakości dla położenia i dystansu $RMSE_A$, jednakże dokładność wyznaczania położenia mniejszą niż założona wartość jednego metra może być uzyskana nawet przy zastosowaniu metody optymalizacji HHR.

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla trasy o długości 3077 metrów, pozwalają wnioskować, że tak samo jak w przypadku pierwszej trasy wewnątrz budynku, niezależnie od zastosowanego w badaniach algorytmu optymalizacji, najlepszą metodą wykrycia kroku został algorytm SDFP. Algorytm osiągał najlepsze wyniki dla optymalizacji metodą BSVM (rys. 4.1d), oraz niewiele gorsze dla metody BSCD. Jednakże wyniki, które pozwalają na uzyskanie dokładności wyznaczania położenia mniejsze od jednego metra, można było uzyskać korzystając z optymalizacji wektorowej oraz dla algorytmów BSOUT i BSCD. Na koniec należy zaznaczyć, że dla żadnej metody wykrycia kroku, która została zaczerpnięta z literatury, niezależnie od zastosowanego algorytmu optymalizacji, nie udało się uzyskać satysfakcjonującego rezultatu, dla którego sumaryczny wskaźnik jakości $RMSE_p$ wynosiłby mniej niż dwa metry.

Zaprezentowane w pracy wyniki badań dotyczące tras wewnątrz budynku można poprawić wykorzystując drugi czujnik bezwładnościowy, który podczas badań został umieszczony na plecach przy pasie. Jednakże, jak wykazują badania, nie jest możliwe otrzymanie lepszych wyników wyznaczania położenia i dystansu, korzystając ze wskaźnika jakości $RMSE_A$, gdy wykorzystamy inni spośród badanych filtrów komplementarnych. Dodatkowo, analizując pozostałe eksperymenty zamieszczone dysertacji, można wyprowadzić wniosek, że zastosowanie innego czujnika bezwładnościowego (spośród pięciu które zostały przetestowane), nie jest możliwa poprawa wskazań uzyskiwanych w zakresie estymowanego kąta ψ , który według przeprowadzonych w pracy badań jest bardzo istotny w kwestii wyznaczania położenia.

Na koniec można sformułować wniosek, że badania zaprezentowane w pracy są wystarczające, by potwierdzić tezę, która została zdefiniowana na początku pracy.

Bibliografia

- [1] Johann Borenstein. „Personal Dead-reckoning (PDR) System for Firefighters”. W: *Precision Indoor Personnel Location and Tracking for Emergency Responders, Worcester, MA* (2010), s. 13.
- [2] Johann Borenstein, Lauro Ojeda i Surat Kwanmuang. „Heuristic reduction of gyro drift in IMU-based personnel tracking systems”. W: *Proc. SPIE*. T. 7306. 2009, 73061H.
- [3] Błażej Ciepluch, Ricky Jacob, Peter Mooney i Adam C Winstanley. „Comparison of the accuracy of OpenStreetMap for Ireland with Google Maps and Bing Maps”. W: *Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences 20-23rd July 2010*. University of Leicester. 2010, s. 337.
- [4] S.P. Drake. „Converting GPS coordinates ($\phi\lambda h$) to navigation coordinates (ENU)”. W: *Technical Report, DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory* (2002).
- [5] Interlink Electronics ®. *FSR 402 Data Sheet*. Zasoby sieciowe, dostęp 20.07.2016. URL: <http://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf>.
- [6] Antonio Ramón Jiménez, F Seco, José Carlos Prieto i Jorge Guevara. „Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU”. W: *Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2010 7th Workshop on*. IEEE. 2010, s. 135–143.
- [7] Marek Kulbacki, Roman Koterias, Agnieszka Szczęsna, Krzysztof Daniec, Robert Bieda, Janusz Słupik, Jakub Segen, Aleksander Nawrat, Andrzej Polański i Konrad Wojciechowski. „Scalable, wearable, unobtrusive sensor network for multimodal human monitoring with distributed control”. W: *6th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*. Springer. 2015, s. 914–917.

Oświadczenie autorstwa

Oświadczam, że ja, Paweł Iwaneczko jestem autorem przedłożonej rozprawy doktorskiej.

Dorobek naukowy doktoranta

Rozdziały w monografiach:

- [1] P. Iwaneczko, A. Nawrat, K. Kozak, K. Daniec, R. Koterak, Mobile Differential GPS reference station for UAV platforms, *Automatyzacja Procesów Dyskretnych*, ISBN 978-83-62652-01-3, pp. 143-150, 2010, Punkty MNiSW = 5 pkt, deklarowany wkład 20%
- [2] P. Iwaneczko, K. Jędrasiak, K. Daniec, A. Nawrat, Prototyping the Autonomous Flight Algorithms Using the Prepar3D® Simulator, *Studies in Computational Intelligence* vol. 481, DOI 10.1007/978-3-319-00369-6, pp. 219-232, 2013, Punkty MNiSW = 5 pkt, deklarowany wkład 25%
- [3] P. Iwaneczko, K. Jędrasiak, K. Daniec, A. Nawrat, Design and Implementation of Mobile Ground Base Station for UGV, *Studies in Systems, Decision and Control* Volume 2, DOI 10.1007/978-3-319-04624-2_44, pp 57-71, 2014, Punkty MNiSW = 5 pkt, deklarowany wkład 25%
- [4] P. Iwaneczko, K. Jędrasiak, A. Nawrat, Augmented Reality in UAVs applications, *Innovation Simulation Systems*, vol. 33, DOI 10.1007/978-3-319-21118-3_6, pp 77-86, 2016, Punkty MNiSW = 5 pkt, deklarowany wkład 33%
- [5] P. Iwaneczko, K. Jędrasiak, A. Nawrat, Indoor Navigation with Micro Inertial Navigation, *Advanced Technologies in Practical Applications for National Security*, DOI 10.1007/978-3-319-64674-9_19, pp. 337-346, 2018, Punkty MNiSW = 5 pkt, deklarowany wkład 33%
- [6] M. Domżał, K. Jędrasiak, P. Iwaneczko, K. Jaskot, A. Nawrat, UAV Swarm Management Using Prepar3D, *Advanced Technologies in Practical Applications for National Security*, DOI 10.1007/978-3-319-64674-9_11, pp. 169-192, 2018, Punkty MNiSW = 5 pkt, deklarowany wkład 20%

Publikacje w materiałach konferencyjnych:

- [1] P. Iwaneczko, K. Jędrasiak, K. Daniec, A. Nawrat, A Prototype of Unmanned Aerial Vehicle for Image Acquisition, Lecture Notes In Computer Science, vol. 7594, DOI 10.1007/978-3-642-33564-8, pp. 87-94, 2012, punkty MNiSW = 5 pkt, deklarowany wkład 25%

Wzory przemysłowe:

- [1] Prawo z rejestracji nr 20193 wzoru przemysłowego pt. „Małogabarytowa kamera wieloobiektywowa” ogłoszonego dn. 20.05.2013 r., Ogłoszonego dn. 31.12.2013 r. Twórcy: Aleksander NAWRAT, Damian BERESKA, Krzysztof DANIEC, Sławomir FRAŚ, Karol JĘDRASIAK, Roman KOTERAS, Paweł Iwaneczko; Punkty MNiSW = 10 pkt, deklarowany wkład 14,29%
- [2] Prawo z rejestracji nr 21387 wzoru przemysłowego pt. „Maszyna kalibracyjna” ogłoszonego dn. 29.09.2014 r., Ogłoszonego dn. 29.05.2015 r. Twórcy: Aleksander NAWRAT, Damian BERESKA, Krzysztof DANIEC, Sławomir FRAŚ, Witold ILEWICZ, Karol JĘDRASIAK, Roman KOTERAS, Paweł IWANECZKO, Maciej SIMEK; Punkty MNiSW = 10 pkt, deklarowany wkład 11,11%

Udział w konferencjach, zjazdach sympozjach:

- [1] ICCVG, Warszawa, Wrzesień 2012 – artykuł
- [2] 5th International Conference on Scientific Aspects of Unmanned Mobile Objects, Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Dęblin, Maj 2013 - poster
- [3] XXI Międzynarodowy Salon Przemysłu Obronnego MSPO, Wrzesień 2013 – wystawca
- [4] Event Technologiczny MEDIA TENT, 19.09.2014 – wystawca jako Wydział AEiI POLSL Gliwice
- [5] DZIEŃ NAUKI DLA WOJSKA - wydarzenie z okazji Święta Niepodległości, 11.11.2014 – reprezentacja Instytutu Automatyki
- [6] XXIII Międzynarodowy Salon Przemysłu Obronnego MSPO, Wrzesień 2015 – wystawca
- [7] Event Technologiczny MEDIA TENT II, 26.09.2015 – wystawca jako Politechnika Śląska Gliwice

Udział w projektach badawczych, rozwojowych i celowych:

- [1] DOB-BIO7/13/05/2015, tytuł: WIMA – wirtualny maszt jako platforma dla sensorów obserwacyjnych na potrzeby Straży Granicznej, miejsce realizacji: Politechnika Śląska, charakter udziału: wykonawca.
- [2] DOB-BIO6/90/11/2014, tytuł: Wirtualny symulator działań ochronnych Biura Ochrony Rządu, miejsce realizacji: Politechnika Śląska, charakter udziału: wykonawca.
- [3] numer projektu: 178438 (nr umowy: PBS1/A3/10/2012), (nr Pol.Śl.: PST6/RAU1/2012), tytuł: Kostium do akwizycji ruchu człowieka oparty na sensorach IMU z oprogramowaniem gromadzenia, wizualizacji oraz analizy danych, miejsce realizacji: Politechnika Śląska, charakter udziału: wykonawca, data zakończenia: 28.02.2015
- [4] O-R00 0151 11, Projekt zaawansowanego demonstratora technologii bezpiecznego systemu dostępu radiowego odpornego na zakłócenia i próby podsłuchu przeznaczonego dla systemów administracji publicznej pracującego w oparciu o standard IEEE 802.16, Politechnika Śląska, data zakończenia: 08.06.2012, wykonawca,
- [5] O-R00 0132 12, Projekt i implementacja innowacyjnych bezzałogowych platform mobilnych na potrzeby monitorowania granic Państwa, Politechnika Śląska, 08.12.2012, wykonawca,
- [6] O-R00 0113 12, Projekt i wykonanie demonstratora technologii do bezpiecznej identyfikacji, zapewnienia rozliczalności oraz monitorowania położenia dokumentów papierowych jako elementów infrastruktury krytycznej wykorzystywanych przez służby bezpieczeństwa państwa, Politechnika Śląska, data zakończenia: 08.06.2012, wykonawca,
- [7] O-R00 0112 12, Projekt i implementacja platformy perymetrycznego monitorowania infrastruktury krytycznej sieci dystrybucyjnej gazu, Politechnika Śląska, data zakończenia: 06.12.2012, wykonawca,
- [8] 420/BO/A, Opracowanie technologii oraz uruchomienie produkcji urządzeń do bezpiecznej transmisji danych, Politechnika Śląska, data zakończenia: 30.04.2012, wykonawca,

Prowadzenie zajęć dydaktycznych:

- [1] Programowanie obiektowe – nauka programowania w języku C++
- [2] Komunikacja i Nawigacja w Systemach Mobilnych - nauka programowania w językach C#, Java Android, zarządzanie projektami w grupach studenckich, rozliczanie z zaplanowanego projektu GANTA
- [3] Navigation in Mobile Systems - nauka programowania w językach C#, Java Android – zajęcia prowadzone w języku angielskim
- [4] Projektowanie i Sterowanie Robotów Mobilnych – nauka algorytmów jazdy wzdłuż linii, odometrii, omijania przeszkód i komunikacji dla mikro robotów w dedykowanym języku blokowym lub w języku C
- [5] Control of Mobile Robots – nauka algorytmów jazdy wzdłuż linii, odometrii, omijania przeszkód i komunikacji dla mikro robotów w dedykowanym języku blokowym lub w języku C – zajęcia prowadzone w języku angielskim
- [6] Podstawy Sterowania Robotów – nauka sterowania robotów i niektórych zagadnień używanych w robotyce w środowisku LabView