

Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)

**PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA**

TYTUŁ PRACY:
Algorytmy sterowania robotów pływających

AUTOR:
Antoni Piałucha

PROMOTOR:
dr inż. Mateusz Cholewiński

Streszczenie

Niniejsza praca dyplomowa poświęcona jest zagadnieniu sterowania i nawigacji bezzałogowych jednostek pływających (USV). W części teoretycznej dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych robotów wodnych oraz przedstawiono model kinematyczny statku o trzech stopniach swobody (3 DOF). Opisano również wykorzystaną platformę badawczą – robota „FOKA” o napędzie różnicowym. Istotnym elementem pracy jest analiza metod nawigacji, obejmująca podejście klasyczne, zliczeniowe oraz hybrydowe. W warstwie sterowania przedstawiono implementację algorytmu napędu różnicowego. Opracowano układ regulacji azymutu realizujący zadanie sterowania do punktu oraz zaimplementowano dwa typy regulatorów śledzenia trajektorii: ILOS (ang. *Integral Line-of-Sight*) oraz PID, zaprojektowane w celu kompensacji stałych uchybów wynikających z zakłóceń środowiskowych. Proces strojenia regulatorów oraz weryfikację skuteczności algorytmów nawigacji i sterowania przeprowadzono w środowisku symulacyjnym Gazebo Sim (gz sim). Całość prac zakończono eksperymentami na obiekcie fizycznym, potwierdzając skuteczność działania algorytmu stabilizacji azymutu w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: USV, roboty pływające, sterowanie różnicowe, nawigacja, ILOS, ROS 2, Gazebo Sim

Abstract

This thesis addresses the issues of control and navigation of Unmanned Surface Vehicles (USV). The theoretical part reviews design solutions for marine robots and presents a kinematic model of a vessel with three degrees of freedom (3 DOF). The research platform utilized, the differential-drive "FOKA" robot, is also described. A significant part of the thesis involves the analysis of navigation methods, covering classical, dead reckoning, and hybrid approaches. The control layer section presents the implementation of a differential drive algorithm. An azimuth control system for point-to-point navigation was developed, and two types of trajectory tracking controllers were implemented: ILOS (*Integral Line-of-Sight*) and PID, both designed to compensate for steady-state errors caused by environmental disturbances. The controller tuning process and the verification of navigation and control algorithm effectiveness were conducted in the Gazebo Sim (gz sim) simulation environment. The work concludes with experiments on the physical platform, confirming the effectiveness of the azimuth stabilization algorithm in real-world conditions.

Keywords: USV, marine robots, differential drive, navigation, ILOS, ROS 2, Gazebo Sim

Spis treści

1 Wstęp	5
1.1 Cel i zakres pracy	6
2 Przegląd robotów pływających	7
2.1 Robot "FOKA"	9
3 Model sterowania	11
4 Algorytmy sterowania i nawigacji	15
4.1 Nawigacja klasyczna	15
4.2 Nawigacja zliczeniowa	17
4.3 Nawigacja hybrydowa	18
4.4 Realizacja sterowania różnicowego	18
4.5 Sterowanie do punktu	19
4.6 Śledzenie trajektorii – kompensacja zakłóceń wolnozmiennych	20
4.6.1 LOS i ILOS	21
5 Analiza skuteczności algorytmów sterowania	23
5.1 Środowisko symulacyjne	23
5.2 Dobór nastaw regulatora azymutu	24
5.3 Dobór nastaw regulatora trajektorii ILOS	27
5.4 Dobór nastaw regulatora trajektorii PID	29
6 Analiza porównawcza nawigacji klasycznej i hybrydowej	33
6.1 Scenariusz testów	33
6.2 Analiza wyników	34
7 Testy fizyczne	41
7.1 Scenariusz testów	41
7.2 Analiza wyników	41
8 Podsumowanie	45
Bibliografia	45

Rozdział 1

Wstęp

Woda od zarania dziejów stanowi fundamentalny element ludzkiej egzystencji, warunkując przetrwanie biologiczne, powodzenie upraw oraz rozwój cywilizacyjny. Od tysiącleci służy ona również jako kluczowy szlak komunikacyjny. Najstarsze pośrednie dowody na wykorzystanie jednostek pływających przez wczesnych homininów to narzędzia kamienne odnalezione na indonezyjskiej wyspie Sulawesi. Artefakty te datowane są na co najmniej milion lat, co przypada na wczesny plejstocen. Biorąc pod uwagę fakt, że nawet przy obniżonym poziomie mórz podczas zlodowaceń tereny te pozostawały oddzielone od lądu stałego głębokimi wodami, obecność przedków człowieka w tym rejonie wskazuje na konieczność wykorzystania środków transportu zdolnych do pokonania cieśnin morskich [7]. Z kolei najstarszym bezpośrednim dowodem szkutnictwa, zachowanym fizycznie do czasów współczesnych, jest dławinka z Pesse (Holandia). To czółno, wykonane z jednego pnia sosny zwyczajnej, datowane jest na około 8000 lat p.n.e. i pochodzi z okresu mezolitu [23]. Jego zdjęcie przedstawiono na rysunku 1.1.

Współcześnie transport morski stanowi fundament globalnej gospodarki, opierając się głównie na jednostkach o wyporności setek tysięcy ton, takich jak kontenerowce czy promy pasażerskie. Do niedawna zastosowanie mniejszych jednostek ograniczało się przede wszystkim do celów rekreacyjnych, jednak sytuacja ta ulega dynamicznej zmianie dzięki postępu w dziedzinie robotyki i automatyki. Tradycyjna łódź, projektowana do wielomiesięcznych misji morskich, musiała posiadać wymiary zapewniające zaplecze dla wieloosobowej załogi. Eliminacja czynnika ludzkiego pozwala na znaczną miniaturyzację i zmianę paradygmatu operacyjnego. Obecnie przedsiębiorstwa takie jak Ocean Infinity wdrażają floty autonomicznych jednostek, zdolnych do skanowania rozległych obszarów oceanicznych bez bezpośredniego udziału człowieka. Bezzałogowe pojazdy nawodne (ang. *Unmanned Surface Vehicles – USV*) znajdują zastosowanie także w badaniu obszarów niebezpiecznych, takich jak zniszczona infrastruktura hydrotechniczna czy zbiorniki skażone chemicznie, na przykład osadniki poflotacyjne w pobliżu kopalń.

Nieodzownym elementem funkcjonowania zarówno wielkogabarytowych, jak i mniejszych jednostek autonomicznych, są algorytmy sterowania i nawigacji. Choć ich specyfika zależy ściśle od konstrukcji kadłuba, układu pędników oraz profilu misji, wiele wyzwań pozostaje uniwersalnych dla całej klasy tych obiektów. Należą do nich między innymi pozycjonowanie, śledzenie zadanej trajektorii oraz zapewnienie odporności układu sterowania na zakłócenia środowiskowe, takie jak zmienny wiatr czy falowanie.



Rysunek 1.1: Czółno z Pesse odnalezione w Holandii (ok. 8000 r. p.n.e.) [9].

1.1 Cel i zakres pracy

Główym celem niniejszej pracy jest opracowanie, implementacja oraz weryfikacja algorytmów sterowania dla robota pływającego klasy USV. Badania te obejmują zarówno symulacje numeryczne, jak i testy w warunkach rzeczywistych na wybranym obiekcie badawczym. Realizacja tak postawionego celu wymagała podjęcia szeregu działań o charakterze analitycznym i inżynieryjnym. W pierwszej kolejności przeprowadzono przegląd literatury przedmiotu dotyczącej metod sterowania jednostkami pływającymi, co pozwoliło na wybór odpowiednich rozwiązań teoretycznych. Następnie opracowano model matematyczny obiektu, niezbędny do przeprowadzenia wiarygodnych symulacji. Kolejnym etapem była implementacja wybranych algorytmów sterowania w środowisku programistycznym. Całość prac zwieńczono przeprowadzeniem eksperymentów weryfikujących przyjęte założenia oraz oceną jakości regulacji w zadanych scenariuszach testowych.

Rozdział 2

Przegląd robotów pływających

Bezzałogowe roboty pływające można podzielić na kilka podstawowych kategorii konstrukcyjnych, które różnią się zastosowanymi układami napędowymi, właściwościami manewrowymi oraz stopniem złożoności integracji z systemami autonomicznymi. Najczęściej spotykane są dwie główne grupy rozwiązań.

Pierwszą z nich stanowią jednostki wykorzystujące układy napędowe, w których kierunek działania siły ciągu jest sterowany niezależnie od jej wartości. Najczęściej realizuje się to poprzez zmianę orientacji zespołu napędowego lub poprzez zastosowanie dodatkowych mechanizmów odpowiedzialnych za kierowanie strumieniem wody. Rozwiązania te charakteryzują się wysoką efektywnością energetyczną, dużą maksymalną wartością ciągu oraz niskimi kosztami eksploatacji. Ze względu na rozdzielenie funkcji generowania ciągu i sterowania jego kierunkiem możliwe jest dynamiczne manewrowanie przy dużych prędkościach bez znaczącej utraty mocy.

Klasycznym przykładem takiego sterowania jest układ składający się ze śruby napędowej oraz płetwy sterowej [12], jednak w wielu nowoczesnych konstrukcjach sterowanie odbywa się poprzez obrót całego zespołu napędowego. Takie rozwiązanie zastosowano między innymi w łodzi wojskowej Protector (obraz 2.1b), w której kierunek ciągu jest zmieniany poprzez obracanie kolumny silnika. Układy tego typu są również łatwe do integracji z systemami autonomicznymi, co sprzyja ich szerokiemu wykorzystaniu w istniejących konstrukcjach pływających [6].

Drugim często spotykanym typem konstrukcji jest układ z dwiema niezależnymi śrubami napędowymi, umieszczonymi w pewnej odległości od siebie, co eliminuje konieczność stosowania płetwy sterowej. Rozwiązanie to charakteryzuje się prostą budową mechaniczną, pozbawioną elementów ruchomych innych niż wirniki silników, oraz dużą łatwością sterowania. Manewrowanie odbywa się różnicowo, poprzez zmianę ciągu po przeciwnych stronach środka oporu hydrodynamicznego. Różnica generowanych sił powoduje powstanie momentu obrotowego, który wywołuje obrót jednostki wokół osi pionowej. Wadą układu dwusilnikowego jest konieczność zastosowania dwóch niezależnych zespołów napędowych, co zwiększa koszt budowy, szczególnie w przypadku jednostek o większych gabarytach. W systemach opartych na silnikach spalinowych sterowanie ciągiem może być mniej efektywne niż w przypadku układów elektrycznych. Ograniczenia mogą wynikać również z braku możliwości zwiększenia ciągu po jednej stronie, co wymusza jego redukcję po stronie przeciwcnej i prowadzi do spadku całkowitej mocy dostępnej dla manewru. Konstrukcje tego typu nie są przystosowane do dynamicznych skrętów przy wysokich prędkościach, jednak bardzo dobrze sprawdzają się w zastosowaniach wymagających precyzyjnego manewrowania przy niskich prędkościach.

Ze względu na prostotę budowy, łatwość sterowania oraz wysoką stabilność, układy

dwusilnikowe są powszechnie stosowane w jednostkach badawczych, zwłaszcza w katamaranach. Katamarany, dzięki dużemu rozstawowi płóz, oferują znaczną przestrzeń roboczą na pokładzie, co ułatwia integrację aparatury pomiarowej. Dwa silniki umożliwiają zwiększenie dostępnej mocy, choć mogą ograniczać prędkość maksymalną, co czyni tego typu konstrukcje szczególnie użytecznymi w niewielkich, kilkumetrowych jednostkach wykorzystywanych między innymi do pomiarów batymetrycznych. Przykładem takiej jednostki są platformy WAM-V 2 firmy Ocean Power Technologies (OPT) (obraz 2.1a) oraz łódź badawcza FOKA, zbudowana przez koło naukowe Solar Boat Team przy Politechnice Wrocławskiej.

Oprócz dwóch głównych kategorii można wyróżnić także konstrukcje niestandardowe, obejmujące wszystkie jednostki, które nie mieścią się w opisanych wcześniej grupach. Do tej kategorii należą między innymi autonomiczne żaglówki. Napędzane są wyłącznie energią wiatru, a sterowanie odbywa się poprzez zmianę ustawienia płetwy sterowej lub regulację kąta natarcia żagla, co wpływa na kierunek siły aerodynamicznej działającej na żagiel. Zaletą takich jednostek jest bardzo wysoka efektywność energetyczna, wynikająca z faktu, że energia potrzebna do przemieszczania się pochodzi całkowicie z wiatru. Pomimo tego autonomiczne konstrukcje żaglowe nie są powszechnie stosowane ze względu na dużą zależność od warunków pogodowych, skomplikowanie procesu sterowania oraz konieczność stosowania specyficznych form kadłuba przeznaczonych dla żeglugi. Przykładem autonomicznej platformy żaglowej sterowanej kątem natarcia żagla są jednostki firmy Saildrone (obraz 2.1c). Natomiast przykładem autonomicznej żaglowki sterowanej klasyczną płetwą sterową jest konstrukcja Passat (obraz 2.1d), rozwijana przez koło naukowe Konar Politechniki Wrocławskiej.



(a) WAM-V [19]



(b) Protector [10]



(c) Saildrone [22]



(d) Passat [14]

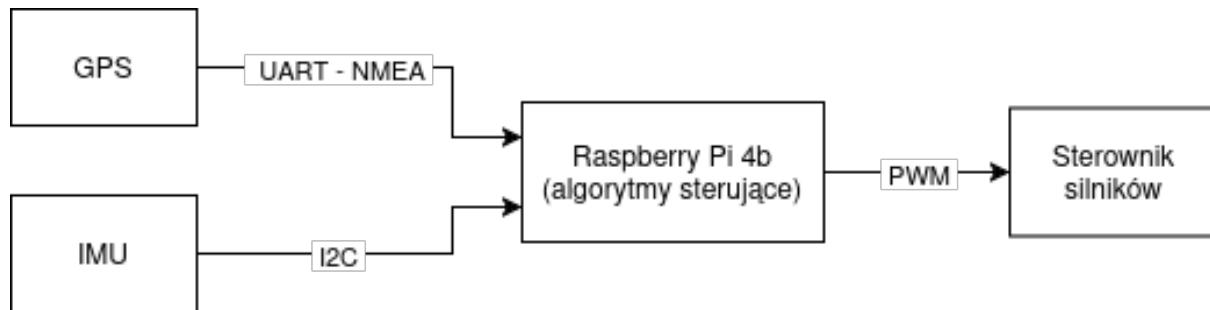
Rysunek 2.1: Porównanie wybranych typów bezzałogowych jednostek pływających

2.1 Robot "FOKA"

Robot „FOKA” został opracowany w celach edukacyjno-badawczych przez zespół „Projekt FOKA” działający w kole naukowym Politechniki Wrocławskiej „PWr Solar Boat Team”. Jednostka ta posłużyła jako platforma testowa dla wybranych algorytmów sterowania opisanych w niniejszej pracy.

Konstrukcja robota opiera się na kadłubie typu katamaran składającym się z dwóch pływaków wykonanych metodą laminacji. Każdy z pływaków ma wymiary: 100 cm długości, 20 cm szerokości oraz 15 cm wysokości, natomiast rozstaw między pływakami wynosi 30 cm. Całkowita masa łodzi wraz z aparaturą badawczą to około 15 kg. Pływaki połączone są profilami aluminiowymi, na których umieszczono skrzynię zawierającą elektronikę sterującą oraz instalację elektryczną. Źródło zasilania stanowi bateria litowo-jonowa o wypadkowej konfiguracji 5S8P (21 V, 21 Ah), zbudowana z czterech połączonych równolegle modułów (zdjęcie 2.3f), z których każdy posiada strukturę wewnętrzną 5S2P.

System sterowania różnicowego realizowany jest poprzez układ dwóch bezszczotkowych silników typu U5 firmy ApisQueen [4] (zdjęcie 2.3a) wraz z dedykowanymi sterownikami 2-6S 100 A Feather [3] (zdjęcie 2.3b) obsługującymi sygnał PWM. Układ napędowy pozwala na niezależne sterowanie ciągiem generowanym przez każdy z silników. Jednostka została wyposażona w zestaw czujników niezbędnych do implementacji oraz testowania algorytmów sterowania autonomicznego. W skład systemu pomiarowego wchodzą odbiornik GPS L76K firmy Waveshare [24] (zdjęcie 2.3d), komunikujący się z komputerem pokładowym poprzez interfejs UART w standardzie NMEA, oraz inercyjna jednostka pomiarowa (IMU) LSM9DS1 9DoF firmy Adafruit [16] (zdjęcie 2.3c). Moduł inercyjny obejmuje trójosiowy akcelerometr, żyroskop oraz magnetometr i komunikuje się za pośrednictwem interfejsu I^2C . Komputerem pokładowym odpowiedzialnym za przetwarzanie danych czujnikowych oraz wykonywanie algorytmów sterowania jest platforma Raspberry Pi 4B (4 GB pamięci RAM) [1] (zdjęcie 2.3e) posiadająca system operacyjny Ubuntu 22.04. Na komputerze uruchomiono środowisko ROS 2 Humble [20] służące do integracji modułów pomiarowych, komunikacji oraz realizacji algorytmów sterowania ruchem jednostki.

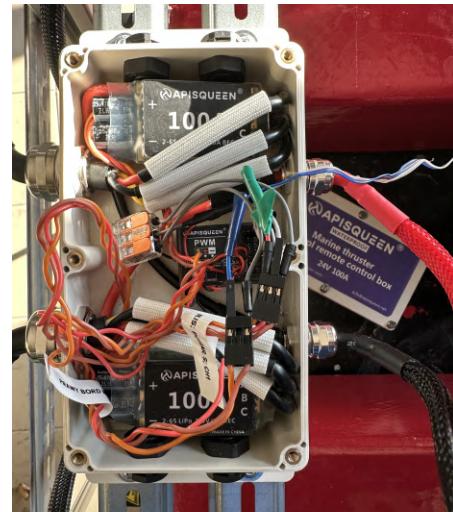


Rysunek 2.2: Schemat przepływu informacji w łodzi FOKA

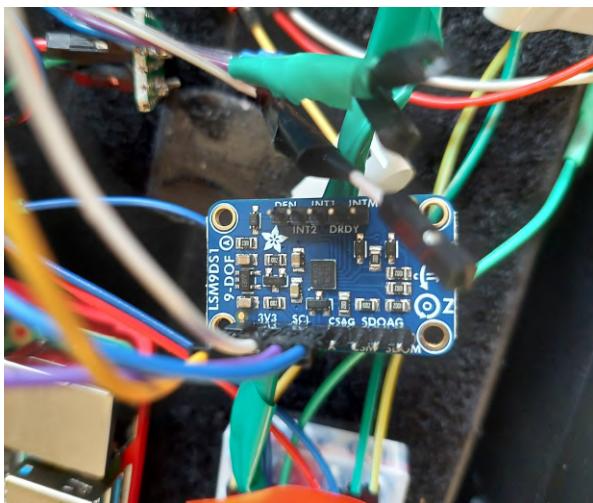
Ze względu na możliwość fizycznych testów z wykorzystaniem dostępnego robota „FOKA”, w dalszej części pracy rozważany jest jego model kinematyczny oraz algorytmy sterowania i nawigacji możliwe do zaimplementowania na platformie USV sterowanej różnicowo.



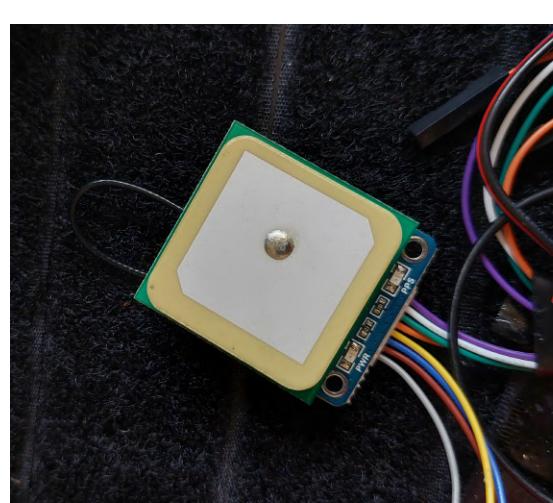
(a) Robot "FOKA" z widocznymi pędnikami U5 firmy ApisQueen.



(b) Sterowniki silników 2-6S 100A Feather firmy ApisQueen.



(c) Jednostka inercyjno pomiarowa LSM9DS1 9DoF firmy Adafruit.



(d) Moduł GNSS L76K firmy Waveshare.



(e) Platforma Raspberry Pi 4b.



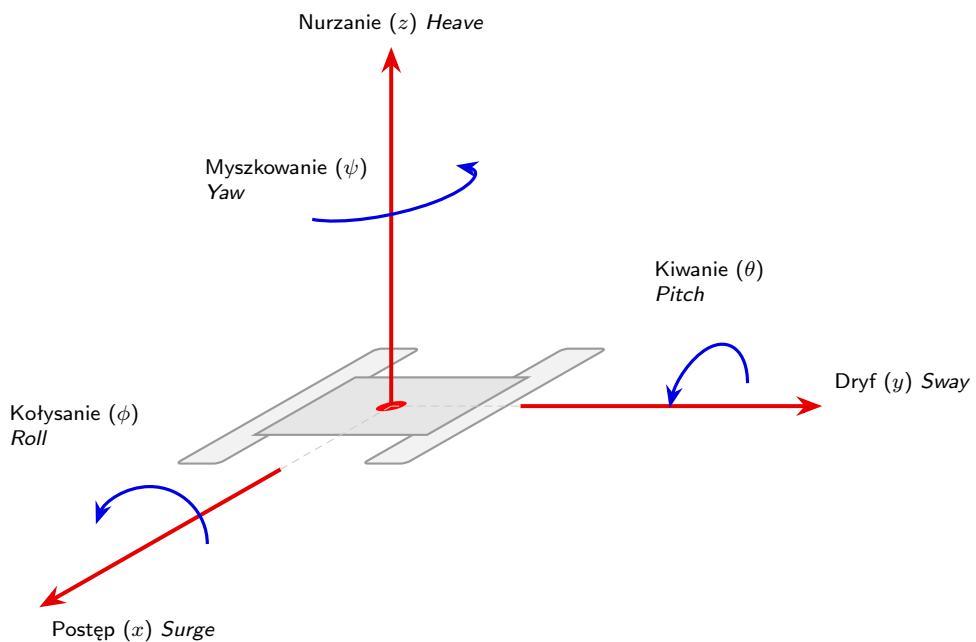
(f) Baterie LiPo

Rysunek 2.3: Wybrane zdjęcia przedstawiające budowę i komponenty robota "FOKA".

Rozdział 3

Model sterowania

Obiekt poruszający się w środowisku wodnym traktowany jest jako ciało sztywne w przestrzeni trójwymiarowej, posiadające sześć stopni swobody (6 DOF). Zgodnie z przyjętą w marynistyce konwencją, ruchy postępowe wzdłuż osi układu kadłubowego definiuje się jako: postęp (x, ang. *surge*), dryf (y, ang. *sway*) oraz nurzanie (z, ang. *heave*). Odpowiadające im ruchy obrotowe to: kołysanie (ϕ , ang. *roll*), kiwanie (θ , ang. *pitch*) oraz myszkowanie (ψ , ang. *yaw*). Zarówno ruchy postępowe jak i obrotowe przedstawione są na schemacie 3.1.



Rysunek 3.1: Schemat przedstawiający 6 stopni swobody USV w środowisku wodnym.

W przypadku analizy ruchu jednostek nawodnych przyjmuje się szereg uproszczeń. Siła wyporu, równoważąc siłę ciężkości, pozwala w warunkach statycznych pominąć ruch wzdłuż osi pionowej (nurzanie). Ponadto geometria kadłuba determinuje stabilność orientacji w dwóch stopniach swobody. O ile dla smukłych jednokadłubowych przechyły boczne (ϕ) mogą być znaczne, o tyle konstrukcja dwukadłubowa (katamaran) charakteryzuje się wysoką statecznością poprzeczną oraz wzdłużną. Dzięki dużej odległości między środkami wyporu płytaków oraz znacznej długości kadłuba, możliwe jest pominięcie dynamiki kołysania (ϕ) i kiwania (θ) w procesie projektowania układu sterowania.

Powyższe założenia pozwalają na zredukowanie modelu matematycznego do trzech

stopni swobody (3 DOF), sprowadzając zagadnienie do analizy ruchu płaskiego, który został schematycznie przedstawiony na rysunku 3.2. Kinematykę katamaranu, w tym jednostki FOKA, opisuje układ równań transformujący prędkości z układu lokalnego do inercjalnego układu globalnego (3.1) [13]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi + v \cos \psi \\ \dot{\psi} &= r\end{aligned}\quad (3.1)$$

\dot{x} – składowa prędkości liniowej wzdłuż osi OX w układzie globalnym,

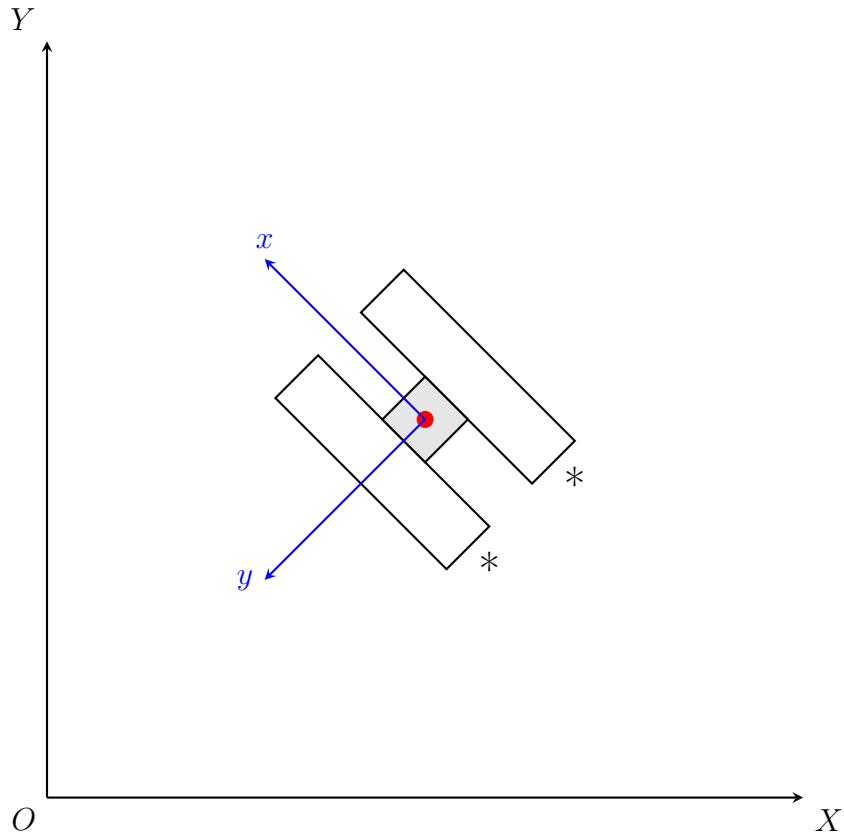
\dot{y} – składowa prędkości liniowej wzdłuż osi OY w układzie globalnym,

ψ – oznacza azymut (orientację) w układzie globalnym,

u – prędkość wzdłużna (postępu) w lokalnym układzie kadłuba,

v – prędkość poprzeczna (dryfu) w lokalnym układzie kadłuba,

r – prędkość kątowa (myszkowania) wokół osi pionowej.



Rysunek 3.2: Schemat układów współrzędnych: globalnego (X, Y) oraz lokalnego USV (x, y). Symbolami gwiazdek oznaczono lokalizacje silników na rufie jednostki.

Dynamikę ruchu jednostki nawodnej o trzech stopniach swobody (3-DOF) w płaszczyźnie horyzontalnej opisuje nieliniowe równanie wektorowe (3.2)[13]:

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu|\nu| = \tau \quad (3.2)$$

gdzie:

M – oznacza macierz bezwładności (uwzględniającą masę ciała sztywnego oraz masę dodaną),

$C(\nu)$ – to macierz sił Coriolisa i sił dośrodkowych,

$D(\nu)$ – reprezentuje macierz tłumienia hydrodynamicznego,

ν – zdefiniowany jest jako wektor prędkości liniowych i kątowej w układzie związanym z kadłubem.

Sybolem τ oznaczony został wektor sił i momentów generowanych przez silniki.

Przyjmując założenie o symetrii kadłuba względem płaszczyzny wzdłużnej (typowej dla większości jednostek pływających), macierze systemowe przyjmują postać przedstawioną w układzie równań (3.3):

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & I - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \\ C(\nu) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_{22}v \\ 0 & 0 & m_{11}u \\ m_{22}v & -m_{11}u & 0 \end{bmatrix} \\ D(\nu) &= \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{u|u} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{v|v} & 0 \\ 0 & 0 & N_{r|r} \end{bmatrix} \\ \tau &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Parametry $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$ oraz $N_{\dot{r}}$ to współczynniki tzw. masy dodanej. Fizyczna interpretacja tego zjawiska wiąże się z koniecznością przyspieszania przez kadłub otaczających go mas wody, co w modelu dynamicznym skutkuje zwiększeniem efektywnej bezwładności układu. Wartości te są ścisłe zależne od geometrii kadłuba i wyznaczane zazwyczaj drogą eksperymentalną.

Z kolei współczynniki $X_{u|u}$, $Y_{v|v}$ i $N_{r|r}$ opisują nieliniowe tłumienie hydrodynamiczne. Siły te, wynikające z tarcia poszycia oraz oporu kształtu, w przybliżeniu wykazują charakterystykę kwadratową względem prędkości ruchu [17]. Podobnie jak w przypadku masy dodanej, parametry te wymagają identyfikacji dla konkretnej konstrukcji jednostki.

Wektor wymuszeń sterujących, definiujący oddziaływanie układu napędowego na dynamikę jednostki, przyjmuje postać $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$. Składowa τ_1 reprezentuje wypadkową siłę ciągu działającą wzdłuż osi podłużnej kadłuba, natomiast τ_3 stanowi moment obrotowy wokół osi pionowej, wynikający z asymetrii ciągów generowanych przez pędniki (sterowanie różnicowe).

W przypadku standardowej konstrukcji typu katamaran, niewyposażonej w pędniki poprzeczne (tzw. stery strumieniowe), układ klasyfikuje się jako niedosterowany (ang. *underractuated*). Oznacza to brak możliwości bezpośredniego generowania siły w osi poprzecznej,

co formalnie wyraża się warunkiem $\tau_2 = 0$. Należy również zaznaczyć, że w konfiguracji napędu różnicowego składowe τ_1 oraz τ_3 są ze sobą ścisłe sprzężone i zależą od geometrii rozmieszczenia pędników względem osi symetrii jednostki.

Rozdział 4

Algorytmy sterowania i nawigacji

W ujęciu klasycznym, zadanie sterowania definiuje się jako wyznaczenie wektora wymuszeń τ (w konfiguracji różnicowej będącego funkcją ciągu pędników), gwarantującego osiągnięcie zadanych parametrów kinematycznych i dynamicznych obiektu. W przypadku bezzałogowych jednostek nawodnych (USV), sterowanie w układzie otwartym jest niewystarczające ze względu na trudny charakter środowiska oraz obecność silnych zakłóceń zewnętrznych, które prowadzą do kumulacji uchybów w czasie. Niezbędne jest zatem zamknięcie pętli regulacji poprzez system nawigacji, dostarczający w czasie rzeczywistym informację zwrotną (estymatę stanu) dla wszystkich sterowanych stopni swobody.

4.1 Nawigacja klasyczna

Nawigacja klasyczna opiera się na pomiarach wykonywanych względem zewnętrznych układów odniesienia. Podstawowymi wielkościami wykorzystywanymi w tym podejściu są: położenie statku określone względem globalnego układu współrzędnych (np. na podstawie odczytu z systemu GPS lub pomiarów wykonywanych sekstantem) oraz orientacja jednostki wyrażona jako kurs kompasowy, wyznaczany z wykorzystaniem kompasu, busoli lub obserwacji ciał niebieskich. W systemach elektronicznych rolę źródeł tych danych pełnią przede wszystkim systemy GNSS oraz magnetometry, umożliwiające pomiar wektora ziemskiego pola magnetycznego.

Nawigacja tego typu była stosowana od momentu powstania pierwszych jednostek pływających. Jej naturalny charakter wynika z faktu, iż najprostsze obserwacje pozycji i kierunku można wykonać wizualnie względem linii brzegowej. Przełomem w rozwoju metod nawigacji było odkrycie igły magnetycznej, stosowanej w Chinach już w XI wieku, a w Europie rozpowszechnionej od XIII wieku. Kolejnym kluczowym wynalazkiem był chronometr zaprojektowany w 1761 roku przez Johna Harrisona, który pozwolił na precyzyjne wyznaczanie długości geograficznej. Rozwiążanie to powstało jako odpowiedź na konkurs ogłoszony w 1714 roku przez rząd brytyjski, którego celem było opracowanie metody dokładnego określania długości geograficznej na morzu. Precyzyjne odmierzanie czasu umożliwiło obliczanie zarówno szerokości geograficznej (zgodnie z zasadami znanymi od setek lat dzięki pomiarom wysokości ciał niebieskich), jak i długości geograficznej — poprzez porównanie czasu lokalnego z czasem w punkcie odniesienia o znanym położeniu. W połączeniu z kompasem wynalazki te umożliwiły prowadzenie nawigacji z dowolnego miejsca na Ziemi.

W nawigacji klasycznej kluczowe jest wyznaczenie azymutu prowadzącego do celu, czyli kursu kompasowego, jaki należy przyjąć, aby przemieścić się z punktu $W_1(\phi_1, \lambda_1)$ do punktu

$W_2(\phi_2, \lambda_2)$. W tym celu wykorzystuje się wzór określający kąt między dwoma punktami na powierzchni sfery, podany w równaniu 4.1. W przypadku nawigacji na dużych dystansach azymut może wymagać dodatkowych poprawek tablicowych uwzględniających wpływ wiatru oraz prądów morskich, jednak w rozważanym przypadku nie jest to konieczne.

ϕ_1 - szerokość geograficzna punktu początkowego (dodatnia dla półkuli północnej, ujemna dla południowej).

ϕ_2 - szerokość geograficzna punktu końcowego (dodatnia dla półkuli północnej, ujemna dla południowej).

λ_1 - długość geograficzna punktu początkowego (dodatnia dla długości wschodnich, ujemna dla zachodnich).

λ_2 - długość geograficzna punktu końcowego (dodatnia dla długości wschodnich, ujemna dla zachodnich).

$\Delta\phi$ - różnica szerokości geograficznych: $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$.

$\Delta\lambda$ - różnica długości geograficznych: $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

R - promień Ziemi wyrażony w metrach (6378137 m).

θ - azymut (kurs) z punktu początkowego do końcowego, obliczony zgodnie ze wzorem:

$$\theta = \text{atan2}(\sin(\Delta\lambda) \cos \phi_2, \cos \phi_1 \sin \phi_2 - \sin \phi_1 \cos \phi_2 \cos(\Delta\lambda)) \quad (4.1)$$

Podczas nawigacji równie istotne jest określenie dystansu pomiędzy bieżącą pozycją jednostki $W_1(\phi_1, \lambda_1)$ a pozycją docelową $W_2(\phi_2, \lambda_2)$. Do tego celu stosuje się formułę Haversine, pozwalającą na obliczanie odległości pomiędzy punktami na powierzchni sfery, zgodnie ze wzorem 4.2.

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right),$$

$$d = 2R \cdot \text{atan2}\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right) \quad (4.2)$$

Aby odczytać aktualny azymut łodzi, można skorzystać z kompasu lub busoli. W systemach elektronicznych kierunek ten wyznacza się na podstawie wskazań magnetometru, który mierzy kierunek wektora ziemskiego pola magnetycznego, a nie bezpośrednio kierunek geograficznej północy. Należy zatem uwzględnić deklinację magnetyczną (stałą różnicę między biegunem magnetycznym i geograficznym, wynoszącą dla Wrocławia około 5° na wschód) oraz dewiację (błąd wynikający z lokalnych zakłóceń elektromagnetycznych). Azymut kompasowy można obliczyć z wykorzystaniem funkcji trygonometrycznej `atan2()`:

$$\begin{aligned} \theta &= \text{atan2}(y, x), \\ \theta' &= \theta + d + \delta \end{aligned} \quad (4.3)$$

θ' - prawdziwy azymut,

θ - azymut odczytany z kompasu lub magnetometru,

d - deklinacja magnetyczna,

δ - dewiacja magnetyczna,

(y, x) - składowe poziome wektora pola magnetycznego.

Nawigacja klasyczna z wykorzystaniem systemów GNSS jest bardzo skuteczna na dużych dystansach i wszędzie tam, gdzie nie jest wymagana wysoka precyzaja pomiarów. Należy jednak pamiętać, że cywilne systemy lokalizacji oferują dokładność rzędu kilku metrów, co bywa niewystarczające na wodach śródlądowych, takich jak rzeki, lub w przypadku wykonywania dokładnych map batymetrycznych bądź paramterów chemicznych akwenów. W takich sytuacjach konieczne jest zastosowanie bardziej zaawansowanych metod lokalizacji lub filtracji pomiarów.

4.2 Nawigacja zliczeniowa

Nawigacja zliczeniowa (ang. *dead reckoning*) polega na wyznaczaniu aktualnej pozycji na podstawie pomiarów przemieszczenia i orientacji w układzie odniesienia związanym z jednostką, a następnie przeliczeniu ich na współrzędne w układzie globalnym. Ze względu na niezależność od pomiarów zewnętrznych była to jedna z podstawowych metod nawigacyjnych stosowanych w warunkach uniemożliwiających wykonanie obserwacji astronomicznych — na przykład przy silnym zachmurzeniu lub przed opracowaniem precyzyjnych metod wyznaczania długości geograficznej.

Przykładem skuteczności nawigacji zliczeniowej jest wyczyn Franka Worsleya podczas wyprawy antarktycznej Ernesta Shackletona w 1916 r. Przez 17 dni prowadził on niewielką szalupę ratunkową na dystansie około 1300 km, opierając się jedynie na estymacji kursu, prędkości, dryfu oraz oddziaływanego prądów morskich. Możliwość weryfikacji obliczeń występowała jedynie sporadycznie, co kilka dni, gdy słońce wychodziło na krótko ponad horyzont. Mimo ekstremalnych warunków oraz małej stabilności jednostki na wzburzonym Morzu Scotia, Worsley zdołał doprowadzić załogę z Wyspy Słoniowej na Georgię Południową, co umożliwiło ocalenie wszystkich członków wyprawy. Historia ta stanowi przykład zaskakującej efektywności metod zliczeniowych, nawet przy ograniczonej dokładności pomiarów.

Nawigacja zliczeniowa opiera się zasadniczo na dwóch parametrach: kursie i szybkości. Znając je, możliwe jest określenie wektora prędkości jednostki, a następnie — poprzez całkowanie w czasie — wyznaczenie przemieszczenia względem punktu początkowego. W tradycyjnej żegludze kurs wyznaczano za pomocą busoli lub obserwacji punktów na horyzoncie, natomiast prędkość mierzono za pomocą logu ręcznego: liny z węzelkami, opuszczanej z rufy statku. Na podstawie liczby wynurzających się z wody węzłów w określonym czasie, określano prędkość w węzłach ($1 \text{ kn} = 1 \text{ Mm/h}$). Na większych dystansach należało dodatkowo uwzględnić poprawki na wiatr, prąd morski oraz odchylenia od kursu, jednak w warunkach spokojnego morza ich wpływ mógł być pomijalny.

W systemach elektronicznych rolę logu i busoli przejmują akcelerometry oraz żyroskopy. Czujniki te dostarczają pomiarów liniowych przyspieszeń oraz prędkości kątowych, co pozwala na wyznaczenie trajektorii poprzez podwójne całkowanie. Współczesne jednostki inercyjne (IMU) umożliwiają wykonywanie pomiarów z dużą częstotliwością i wysoką rozdzielczością. Jednakże metoda ta obarczona jest narastającym w czasie błędem, wynikającym z kumulacji błędów pomiarowych i szumów. Zjawisko to określa się mianem dryfu czujnika. Z tego powodu nawigacja zliczeniowa rzadko jest jedyną metodą określania przemieszczenia.

4.3 Nawigacja hybrydowa

W zastosowaniach, w których konieczne jest precyzyjne lokalizowanie łodzi przy stosunkowo niewielkich przemieszczeniach, lecz podczas długotrwałych pomiarów, najkorzystniejszym rozwiązaniem okazuje się wykorzystanie nawigacji hybrydowej. Metoda ta łączy zalety nawigacji zliczeniowej oraz metod klasycznych, bazujących na zewnętrznych układach odniesienia, takich jak GPS czy systemy wizyjne.

W podejściu hybrydowym pozycja jednostki wyznaczana jest jednocześnie na podstawie pomiarów pochodzących z układu lokalnego (m.in. akcelerometrów, żyroskopów czy enkoderów) oraz danych odnoszących się do układu globalnego. Połączenie tych dwóch źródeł informacji pozwala na ograniczenie typowych błędów obu metod — dryfu charakterystycznego dla nawigacji zliczeniowej oraz niskiej częstotliwości, jakości lub chwilowej niedostępności pomiarów zewnętrznych.

Proces łączenia informacji pochodzących z wielu czujników w celu uzyskania dokładniejszej i odpornej na zakłócenia estymacji nazywany jest *fuzją sensorów* (ang. *sensor fusion*). Metody fuzji, takie jak filtry Kalmana i ich nieliniowe rozszerzenia, stanowią obecnie standard w systemach nawigacji stosowanych w robotyce mobilnej.

Filtr Kalmana jest algorytmem rekurencyjnym wyznaczającym estymatę o minimalnej wariancji błędu dla liniowego modelu dynamicznego. Jego zastosowanie w robotyce jest powszechnie ze względu na efektywność obliczeniową oraz kluczową rolę w fuzji danych sensorycznych.

Działanie algorytmu opiera się na modelu układu w przestrzeni stanu, który definiują dwa równania: ewolucji stanu (4.4) oraz obserwacji (4.5)[15]:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.4)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4.5)$$

W równaniu (4.4), wykorzystywany w fazie predykcji, A jest macierzą przejścia stanu, B macierzą sterowania, a wektor w reprezentuje szum procesu (niedokładność modelu, zakłócenia zewnętrzne). Równanie (4.5) opisuje relację między rzeczywistym stanem a pomiarem z_k poprzez macierz obserwacji H . Wektor v modeluje szum pomiarowy, wynikający z niedoskonałości sensorów. Sam cykl pracy filtru składa się z naprzemiennych faz predykcji (w oparciu o model) i korekcji (w oparciu o pomiar z_k).

Klasyczny filtr Kalmana zakłada liniowość modelu dynamiki (stałe macierze A i H). Ze względu na nieliniową charakterystykę opisywanej jednostki USV (Równanie 3.2), wynikającą głównie z kwadratowego tłumienia hydrodynamicznego, bezpośrednie użycie algorytmu liniowego skutkowałoby błędną estymacją. W związku z tym, w praktycznej realizacji systemu (Rozdział 6) zastosowano rozszerzony filtr Kalmana (EKF). Algorytm ten linearyzuje model obiektu w aktualnym punkcie pracy, co pozwala na skutecną estymację stanu mimo nieliniowości układu.

4.4 Realizacja sterowania różnicowego

Sterowanie łodzią realizowane jest za pomocą dwóch wielkości sterujących: parametru skrętu $d \in [-1, 1]$, pełniącego funkcję kierownicy, oraz parametru prędkości $v \in [-1, 1]$, działającego jak przepustnica. Wartość v determinuje zwrot i maksymalną wartość ciągu generowanego przez silniki, przy czym $v = 1$ odpowiada maksymalnemu ciągowi do przodu, $v = 0$ oznacza brak ciągu, a $v = -1$ definiuje maksymalny ciąg wsteczny. Z kolei parametr

d odpowiada za sterowanie kierunkiem ruchu poprzez różnicowy rozkład ciągów na silniki, gdzie $d = 1$ oznacza maksymalny skręt w prawo, $d = 0$ ruch na wprost, zaś $d = -1$ maksymalny skręt w lewo. Opisane sterowanie odpowiada klasycznemu modelowi typu „przepustnica–kierownica”, w którym wielkość v określa prędkość postępową, natomiast parametr d decyduje o zmianie kierunku ruchu poprzez asymetrię ciągów.

Ciągi generowane przez silniki lewe (T_L) oraz prawe (T_R) wyznaczane są na podstawie funkcji:

$$T_L(v, d), \quad T_R(v, d) \in [-1, 1].$$

Po przeliczeniu przyjmują one postać procentowego wypełnienia sygnału PWM sterującego regulatorami silników. Transformację zapisano w postaci zależności częściowych:

$$T_L(v, d)[\%] = \begin{cases} v \cdot 100\%, & \text{gdy } d \leq 0, \\ v(1 - 2d) \cdot 100\%, & \text{gdy } d > 0, \end{cases} \quad (4.6)$$

$$T_R(v, d)[\%] = \begin{cases} v(1 + 2d) \cdot 100\%, & \text{gdy } d \leq 0, \\ v \cdot 100\%, & \text{gdy } d > 0. \end{cases} \quad (4.7)$$

Taki sposób wyznaczania ciągów silników umożliwia płynne sterowanie różnicowe, przy czym parametr d ogranicza intensywność pracy jednego z silników w zależności od kierunku skrętu, a parametr v określa ogólny poziom generowanego ciągu. Takie rozwiązanie, chociaż z mniejszą sumaryczną ciągiem łączy, zabezpiecza ją przed zbyt dużym wzrostem obrotów oraz z mniejszą jej prędkością w czasie manewrów, podczas których ryzyko uszkodzenia może być większe.

Ostatecznym etapem łańcucha sterowania jest konwersja wyznaczonego ciągu znormalizowanego $T \in \{T_L, T_R\}$ na sygnał sterujący zrozumiały dla sterowników silników (ESC). Sygnał ten ma postać impulsu o zmiennej szerokości (PWM). Dla wartości ciągu $T \in [-1, 1]$, szerokość impulsu u_{pwm} wyrażona w mikrosekundach [μs] wyznaczana jest zgodnie z zależnością:

$$u_{pwm}(T) = 1500 + 450 \cdot T + 50 \cdot \operatorname{sgn}(T), \quad (4.8)$$

1500 – wartość neutralna (spoczynek silnika, $T = 0$),

450 – współczynnik wzmocnienia skalujący zakres sterowania,

50 – stała kompensująca strefę martwą (ang. *deadband*) silników,

$\operatorname{sgn}(T)$ – funkcja signum, zwracająca znak wartości ciągu.

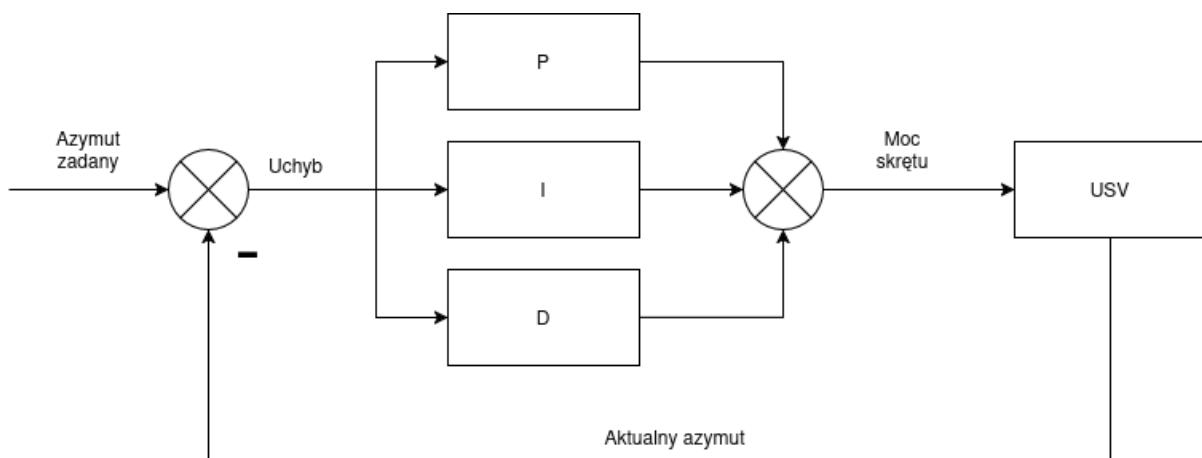
4.5 Sterowanie do punktu

W klasycznych algorytmach nawigacji typu punkt-punkt (point-to-point navigation), kluczowym zadaniem jest wyznaczenie azymutu zadanego, pozwalającego na przemieszczenie jednostki z punktu początkowego A do punktu docelowego B (4.1). W przypadku bezzałogowych jednostek nawodnych (USV) o napędzie różnicowym, sterowanie kursem (ψ , ang. yaw) realizowane jest najczęściej w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, z wykorzystaniem algorytmu PID (proporcjonalno-całkującco-różniczkującego) (4.1).

W praktyce implementacyjnej pełna struktura regulatora PID bywa często redukowana ze względu na specyfikę obiektu sterowania. Z uwagi na znaczną inercję jednostki oraz

częste, skokowe zmiany wartości zadanej kursu, nierzadko rezygnuje się z członu całkującącego (I). Ponadto, w systemach, w których estymacja stanu obarczona jest znacznym szumem pomiarowym (np. w przypadku polegania wyłącznie na danych z odbiornika GPS), stosowanie członu różniczkującego (D) może prowadzić do niepożądanej amplifikacji zakłóceń. Warto przy tym zauważyć, że opory hydrodynamiczne, rosnące proporcjonalnie do kwadratu prędkości postępowej, wprowadzają do układu naturalne tłumienie, pełniąc funkcję analogiczną do członu różniczkującego.

Zaletą omawianego podejścia jest brak konieczności identyfikacji pełnego modelu dynamicznego łodzi oraz wyznaczania jej współczynników hydrodynamicznych. Należy jednak podkreślić, że choć metoda ta – przy założeniu wystarczającego zapasu mocy napędu – gwarantuje osiągnięcie celu, nie zapewnia ona precyzyjnego śledzenia zadanej trajektorii. Oddziaływanie zakłóceń środowiskowych, takich jak wiatr czy prądy wodne, powoduje zjawisko dryfu, co w konsekwencji prowadzi do wydłużenia rzeczywistej drogi przebytej przez jednostkę względem trasy optymalnej.



Rysunek 4.1: Schemat układu regulacji azymutu ze sprzężeniem zwrotnym

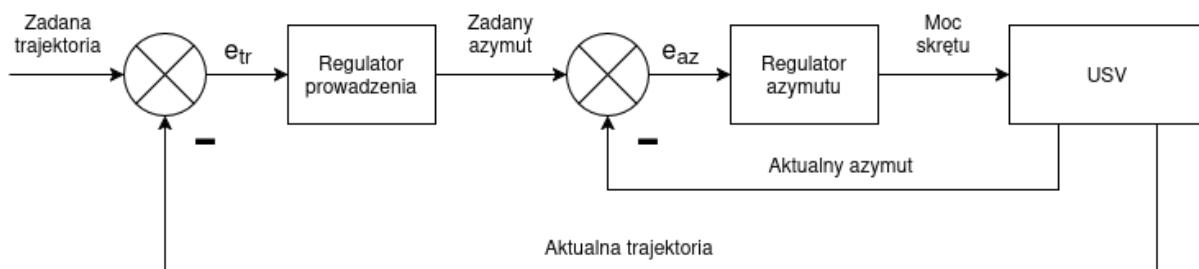
4.6 Śledzenie trajektorii – kompensacja zakłóceń wolnozmiennych

W uproszczonych modelach matematycznych dynamiki jednostek nawodnych często uwzględnia się jedynie siły wyporu, grawitacji oraz oddziaływanie układu napędowego. W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych środowisko wodne charakteryzuje się jednak obecnością istotnych zakłóceń zewnętrznych. Na kadłub statku oddziałują przede wszystkim siły aerodynamiczne (wiatr) oraz hydrodynamiczne (prądy wodne, falowanie). W kontekście sterowania procesem śledzenia trasy, wypadkową tych oddziaływań modeluje się zazwyczaj jako wolnozmienne zakłócenie o stałym kierunku i zwrocie w globalnym układzie odniesienia.

Aby zapewnić precyzyjne śledzenie zadanej trajektorii, algorytm sterowania nie może ograniczać się jedynie do wyznaczania azymutu celowania. Konieczne jest wprowadzenie mechanizmów kompensujących zjawisko znoszenia (dryfu) wywołane przez wspomniane czynniki środowiskowe. Jednym z podejść jest bezpośredni pomiar prędkości i kierunku wiatru oraz prądów, a następnie uwzględnienie ich w modelu kinematycznym. Metoda ta wymaga jednak stosowania kosztownej i skomplikowanej aparatury pomiarowej.

Alternatywnym i częściej stosowanym rozwiązańiem jest estymacja wpływu zakłóceń na podstawie uchybu regulacji. Pozwala to na skutecną kompensację dryfu bez konieczności rozbudowywania systemu sensorycznego. Do algorytmów realizujących to zadanie poprzez zastosowanie członu całkującego w prawie sterowania należą m.in. metoda ILOS (ang. *Integral Line-of-Sight*) [5] oraz regulator PID.

Realizacja zadania śledzenia trajektorii przez jednostkę USV odbywa się w architekturze sterowania kaskadowego. Struktura ta zakłada hierarchiczny podział układu na dwie sprzężone pętle regulacji: pętlę zewnętrzną (nawigacyjną) oraz pętlę wewnętrzną (autopilota kursu). Zadaniem regulatora zewnętrznego, opartego na algorytmie ILOS lub PID, jest minimalizacja uchybu od ścieżki poprzez wyznaczenie wartości zadanej kursu (ψ_d) dla pętli podrzednej. Pętla wewnętrzna odpowiada za stabilizację orientacji jednostki, sterując bezpośrednio elementami wykonawczymi w celu osiągnięcia zadanego kąta (ψ). Dynamika pętli wewnętrznej musi być znaczaco szybsza od dynamiki pętli zewnętrznej. W ujęciu teoretycznym pozwala to na przyjęcie upraszczającego założenia, że z perspektywy wolnozmiennej pętli nawigacyjnej, pętla wewnętrzna jest obiektem reagującym w sposób natychmiastowy. Schemat blokowy omawianej struktury sterowania kaskadowego dla jednostki USV przedstawiono na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2: Schemat blokowy kaskadowego układu sterowania jednostką USV.

4.6.1 LOS i ILOS

Algorytm sterowania LOS (ang. *Line-of-Sight*) jest geometryczną metodą prowadzenia obiektu, która umożliwia śledzenie zadanej trajektorii poprzez wyznaczanie zadanego kąta kursu [12]. W stanie ustalonym, przy idealnych warunkach, jednostka utrzymuje kurs zgodny z azymutem ścieżki (Ψ_p). W przypadku wystąpienia błędu poprzecznego, algorytm generuje korektę, kierując statek na wirtualny punkt celowania (p_{los}) znajdujący się na ścieżce. Punkt ten przemieszcza się wzdłuż zadanej trasy wraz z ruchem postępowym jednostki. Kluczowym parametrem strojenia algorytmu jest odległość wyprzedzenia Δ (ang. *lookahead distance*), determinująca dystans do punktu celowania. W literaturze przyjmuje się, że optymalna wartość Δ mieści się w przedziale od 2 do 5 długości kadłuba statku [5]. Należy jednak zaznaczyć, że klasyczna metoda LOS nie gwarantuje kompensacji stałych zakłóceń środowiskowych (np. dryfu), co może prowadzić do powstania uchybu ustalonego.

Wzór na zadany kąt kursu (prawo sterowania LOS) wyraża się następującym równaniem (4.9):

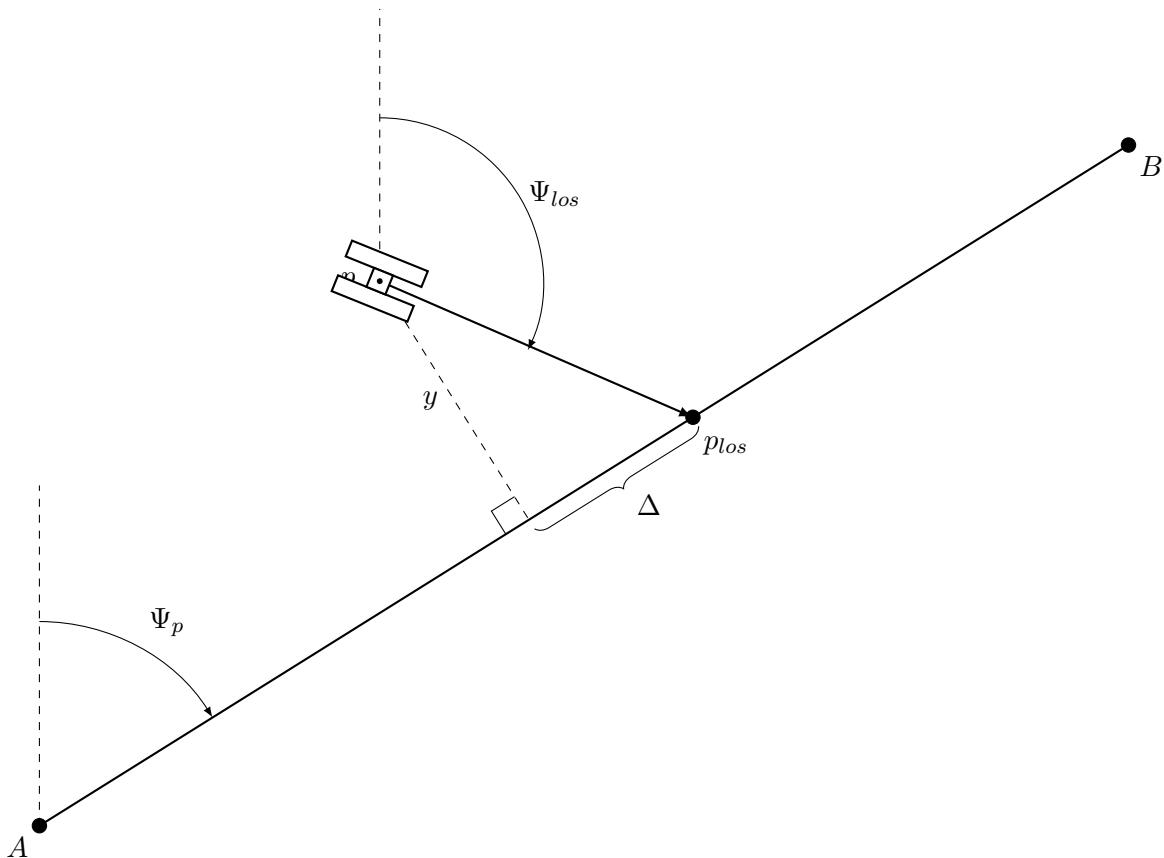
$$\Psi_{los} = \Psi_p + \arctan\left(\frac{-y}{\Delta}\right) \quad (4.9)$$

Ψ_{los} – zadany kąt kursu (kąt celowania),

Ψ_p – kąt nachylenia ścieżki (kąt prostej),

y – błąd poprzeczny (odległość prostopadła od ścieżki),

Δ – odległość wyprzedzenia (ang. *Lookahead distance*).



Rysunek 4.3: Zasada działania LOS.

Algorytm sterowania ILOS (ang. *Integral Line-of-Sight*) stanowi rozwinięcie klasycznej metody geometrycznej LOS o dodatkowy człon całkujący. Wprowadzenie tego elementu ma na celu kompensację wpływu stałych zakłóceń środowiskowych, które w standardowym układzie prowadzą do powstania uchybu ustalonego. Dzięki akumulacji błędu poprzecznego w czasie, algorytm odpowiednio koryguje zadany kurs, niwelując odchylenie od ścieżki.

Prawo sterowania wyznaczające zadany kąt kursu w metodzie ILOS opisane jest zależnością (4.10) [5]:

$$\Psi_{los} = \Psi_p + \arctan\left(\frac{-y - \sigma y_{int}}{\Delta}\right) \quad (4.10)$$

gdzie $\sigma > 0$ stanowi współczynnik wzmacniania członu całkującego y_{int} . Dynamika zmiany wartości składnika całkującego zdefiniowana jest równaniem różniczkowym (4.11):

$$\dot{y}_{int} = \frac{\Delta y}{(y + \sigma y_{int})^2 + \Delta^2} \quad (4.11)$$

Przedstawiona postać równania dynamiki składnika całkującego (4.11) pełni istotną rolę stabilizującą. Obecność zmiennych stanu w mianowniku wprowadza nieliniowe tłumienie, które ogranicza szybkość narastania wartości y_{int} przy dużych uchybach. Mechanizm ten działa jako wbudowane zabezpieczenie przed nasyceniem integratora (tzw. funkcja *anti-windup*), zapobiegając nadmiernemu przesterowaniu sygnału sterującego.

Rozdział 5

Analiza skuteczności algorytmów sterowania

5.1 Środowisko symulacyjne

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej oraz weryfikacji skuteczności opracowanych algorytmów sterowania, przygotowano dedykowane środowisko wirtualne. Jako platformę symulacyjną wybrano oprogramowanie Gazebo Sim w wersji 8.9.0. Decyzja ta podkutowana była natywną kompatybilnością tego środowiska z systemem ROS 2 (dystrybucja Jazzy) oraz dostępnością dedykowanych interfejsów komunikacyjnych, co znaczaco ułatwiało integrację układu sterowania.

Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu Maritime Gazebo [2], stanowiącego specjalistyczne rozszerzenie symulatora o fizykę środowiska wodnego. Sceneria eksperymentów bazuje na cyfrowym modelu toru regatowego *Sydney International Regatta Centre*, zlokalizowanego we współrzędnych geograficznych: szerokość $33,7229^{\circ}$ S, długość $150,6709^{\circ}$ E.

Ze względu na brak modelu hydrodynamicznego robota FOKA w środowisku Gazebo, do weryfikacji algorytmów użyto kinematycznie zbliżonego modelu WAM-V (ang. *Wave Adaptive Modular Vessel*), dostępnego w bibliotece Maritime Gazebo. Należy podkreślić, że użycie modelu zastępczego w symulacji służy weryfikacji struktury i logiki działania zaimplementowanych algorytmów sterowania. Ze względu na różnice w masie i hydrodynamicie między robotem w symulacji a rzeczywistą jednostką FOKA, konkretne wartości nastaw regulatorów (wzmocnienia) nie mogą być przeniesione bezpośrednio, jednak sama metoda strojenia i architektura systemu pozostają tożsame. Szczegółowe parametry fizyczne i geometryczne łodzi WAM-V zestawiono w tabeli 5.1. Odwzorowanie dynamiki ruchu jednostki oraz oddziaływań hydrodynamicznych w symulatorze zrealizowano w oparciu o równania ruchu Fossena [11]. Rysunek 5.1 przedstawia zrzut ekranu z symulacji.

Środowisko testowe uwzględnia również wpływ zakłóceń zewnętrznych. Zaimplementowano model falowania powierzchni swobodnej, przyjmując jednak parametry generujące fale o minimalnej amplitudzie. Dodatkowo, w celu weryfikacji odporności układu na wymuszenia wiatrowe, wykorzystano wtyczkę systemową `gz-sim-wind-effects-system`. W scenariuszu testowym zdefiniowano wektor wiatru o wartości 3 jednostek skierowany wzdłuż osi *OX* układu globalnego, przy współczynniku skalowania siły oddziaływania (ang. *scaling factor*) równym 0.2.

Warstwa logiczna systemu sterowania została zaimplementowana w języku Python 3. W celu zapewnienia transparentności oraz powtarzalności badań, kompletny kod źródłowy oprogramowania symulacyjnego udostępniono w publicznym repozytorium w serwisie

GitHub [21].



Rysunek 5.1: Zrzut ekranu z symulacji w gz sim przedstawiający łódź WAM-V na torze Sydney International Regatta Centre

5.2 Dobór nastaw regulatora azymutu

Na podstawie analizy literatury przedmiotu [26] przyjęto, że typowe odchylenie kursu jednostek klasy USV od wartości zadanej w nominalnych warunkach eksploatacyjnych nie przekracza 10° . Jednakże, uwzględniając eksperymentalny charakter platformy „FOKA” oraz specyfikę prac w ramach studenckiego koła naukowego, zdecydowano się na przyjęcie dwukrotnego marginesu bezpieczeństwa. W konsekwencji, jako maksymalny spodziewany uchyb kursu w warunkach normalnych zdefiniowano wartość 20° .

W celu zapewnienia płynności sterowania oraz ochrony układu napędowego, dobór wzmacnienia K_p regulatora proporcjonalnego przeprowadzono z uwzględnieniem ograniczeń fizycznych pędników. Kluczowym kryterium projektowym było niedopuszczenie do pracy rewersyjnej silników (generowania ciągu wstecznego) przy maksymalnym założonym uchybie ($e = 20^\circ$). Ograniczenie to ma na celu minimalizację ryzyka wystąpienia zjawiska kawitacji przy dużych kątach wychylenia, co mogłoby prowadzić do nieliniowości w charakterystyce hydrodynamicznej i potencjalnej utraty stabilności sterowania.

Zgodnie z zaimplementowanym algorytmem mieszanego ciągów, warunek braku rewersji jest spełniony, gdy wartość bezwzględna sygnału sterującego $|d|$ jest mniejsza od 0,5. Dla granicznego błędu $e = 20^\circ$, pozwala to wyznaczyć maksymalną dopuszczalną wartość wzmacnienia:

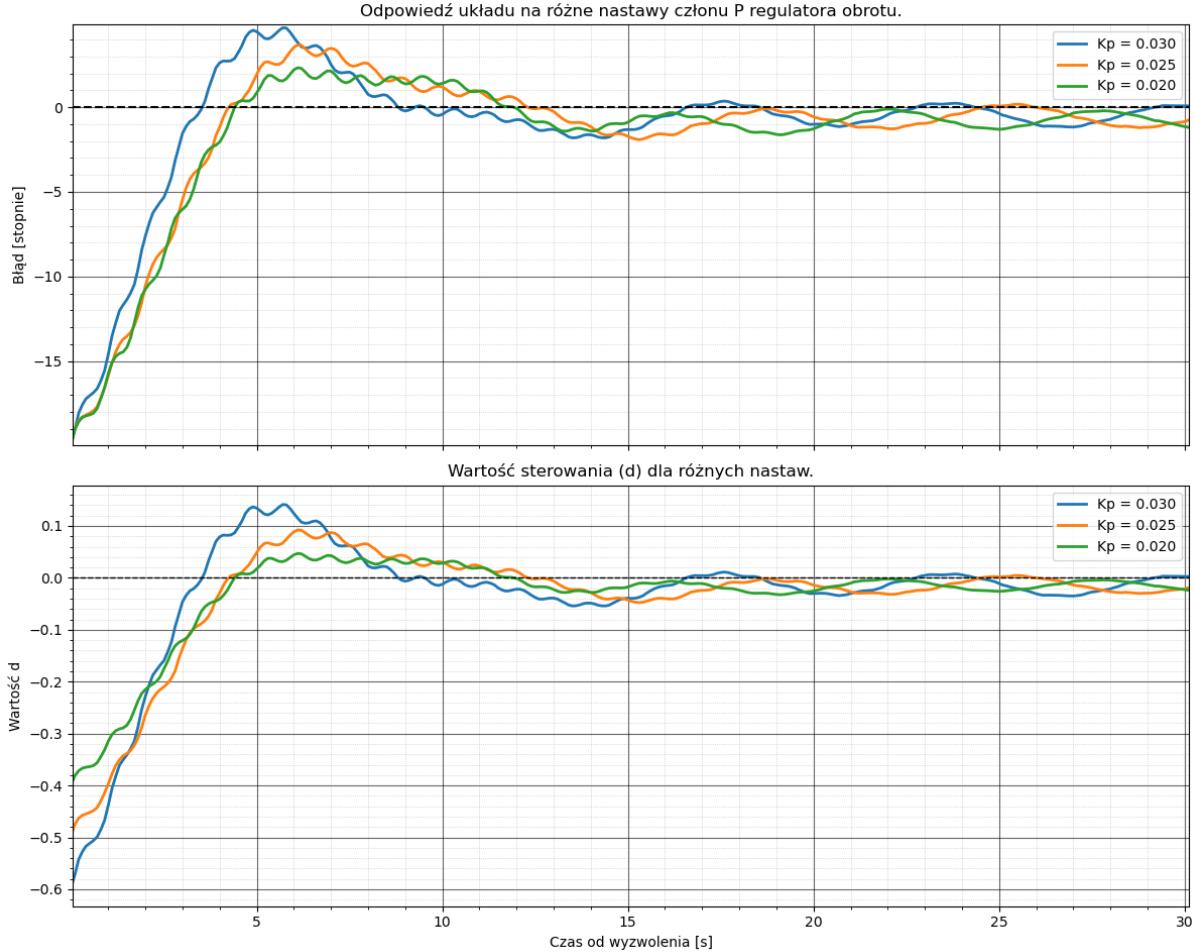
$$K_p = \frac{d_{max}}{e_{max}} = \frac{0,5}{20} = 0,025 \quad (5.1)$$

Przyjęta wartość $K_p = 0,025$ stanowi kompromis pomiędzy dynamiką układu (szybkością powrotu na zadany kurs) a efektywnością energetyczną i minimalizacją zużycia mechanicznego silników.

Parametr	Symbol/Jednostka	Wartość
<i>Parametry inercyjne i geometryczne</i>		
Masa kadłuba (baza)	m [kg]	180.0
Masa silnika (pojedynczy)	m_{eng} [kg]	15.0
Długość pływaka	L [m]	4.9
Moment bezwładności osi x	I_{xx} [kg·m ²]	120.0
Moment bezwładności osi y	I_{yy} [kg·m ²]	393.0
Moment bezwładności osi z	I_{zz} [kg·m ²]	446.0
<i>Parametry hydrodynamiczne (tłumienie)</i>		
Opór liniowy wzdluzny (surge)	X_u	-51.3
Opór kwadratowy wzdluzny	$X_{ u u}$	-72.4
Opór liniowy poprzeczny (sway)	Y_v	-40.0
Opór liniowy pionowy (heave)	Z_w	-500.0
Opór obrotowy (roll)	K_p	-50.0
Opór obrotowy (pitch)	M_q	-50.0
Opór obrotowy (yaw)	N_r	-400.0
<i>Układ napędowy</i>		
Współczynnik ciągu	T_{coeff}	0.004422
Średnica śruby	D [m]	0.2
Gęstość medium (woda)	ρ [kg/m ³]	1000
<i>Sensoryka</i>		
Częstotliwość IMU	f_{imu} [Hz]	50
Częstotliwość magnetometru	f_{mag} [Hz]	50
Częstotliwość GPS	f_{gps} [Hz]	10
Szum GPS (poziomy, std)	σ_h	1.7×10^{-5}
Szum GPS (pionowy, std)	σ_v	2.0×10^{-5}
<i>Warunki początkowe symulacji</i>		
Pozycja startowa x	x_0 [m]	-532
Pozycja startowa y	y_0 [m]	162
Orientacja startowa (yaw)	ψ_0 [rad]	1.0

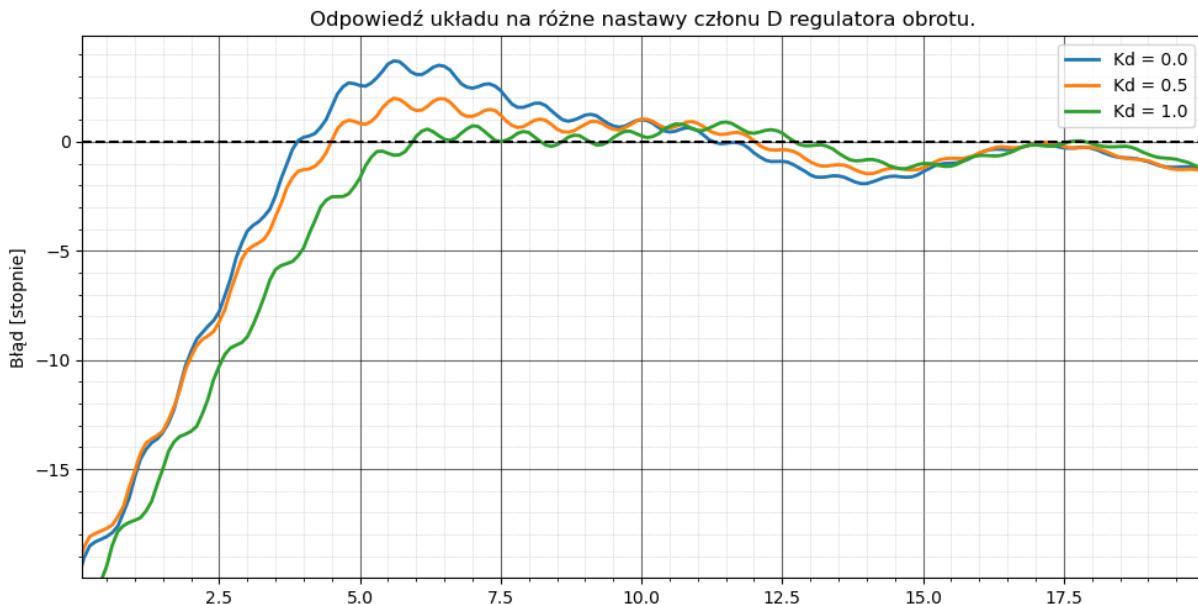
Tablica 5.1: Zestawienie parametrów symulacyjnego modelu USV WAM-V

Na rysunku 5.2 przedstawiono przebiegi czasowe odpowiedzi układu na skokową zmianę kursu przy początkowym uchybie wynoszącym 20° . Zaprezentowano reakcję łodzi oraz przebieg zmiennej sterującej d dla wybranego wzmacnienia optymalnego ($K_p = 0,025$) oraz dla wartości alternatywnych, skutkujących odpowiednio maksymalnym wysterowaniem ($d = 0,4$ (sterowanie zachowawcze) i $d = 0,6$ (sterowanie agresywne z rewersją)).



Rysunek 5.2: Reakcja układu na różne wartości wzmacnienia K_p członu proporcjonalnego regulatora azymutu.

W celu poprawy jakości regulacji i ograniczenia przeregulowania, będącego konsekwencją przyjętego wzmacnienia części proporcjonalnej, strukturę sterownika azymutu rozszerzono o czon różniczkujący (D). Dobór nastawy przeprowadzono metodą eksperymentów symulacyjnych, przyjmując jako kryterium kompromis pomiędzy tłumieniem oscylacji a szybkością działania układu. Wybrana wartość $K_d = 0,5$ pozwoliła na dwukrotną redukcję amplitudy przeregulowania (spadek z 4° do 2°). Co istotne, wprowadzenie dodatkowego tłumienia wpłynęło na dynamikę układu w stopniu nieznacznym – czas pierwszego osiągnięcia wartości zadanej wydłużył się jedynie o 0,5 s (wzrost z 4,0 s do 4,5 s). Wpływ członu różniczkującego na odpowiedź skokową układu dla różnych wartości wzmacnienia K_d przedstawiono na wykresie 5.3.



Rysunek 5.3: Reakcja układu na różne wartości wzmacnienia K_d członu różniczkującego (D) regulatora azymutu.

5.3 Dobór nastaw regulatora trajektorii ILOS

W celu wyznaczenia optymalnych wartości parametrów algorytmu sterowania, tj. odległości wyprzedzenia Δ (ang. *lookahead distance*) oraz wzmacnienia członu całkującego σ , przeprowadzono serię eksperymentów symulacyjnych. Scenariusz testowy zakładał realizację ruchu po trajektorii prostoliniowej zdefiniowanej przez punkt początkowy $A(-33, 72276; 150, 67400)$ oraz punkt końcowy $B(-33, 72119; 150, 67426)$. Całkowita długość odcinka testowego wynosiła 176,41 m. Symulację inicjowano przy zerowej prędkości początkowej oraz z uchybem kursowym wynoszącym 20° względem azymutu ścieżki zadanej.

Zgodnie z literaturą przedmiotu [8], dobór parametru Δ opiera się na regule, według której jego wartość nie powinna być mniejsza niż dwukrotność długości całkowitej kadłuba (L). Zależność ta wpływa bezpośrednio na dynamikę układu regulacji w sposób odwrotnie proporcjonalny do wzmacnienia w klasycznym regulatorze P: wyższe wartości Δ skutkują łagodniejszym dochodzeniem do ścieżki i mniejszymi oscylacjami, lecz wydłużają czas regulacji. Niskie wartości Δ zapewniają szybszą reakcję, ale zwiększą ryzyko przeregulowań i niestabilności.

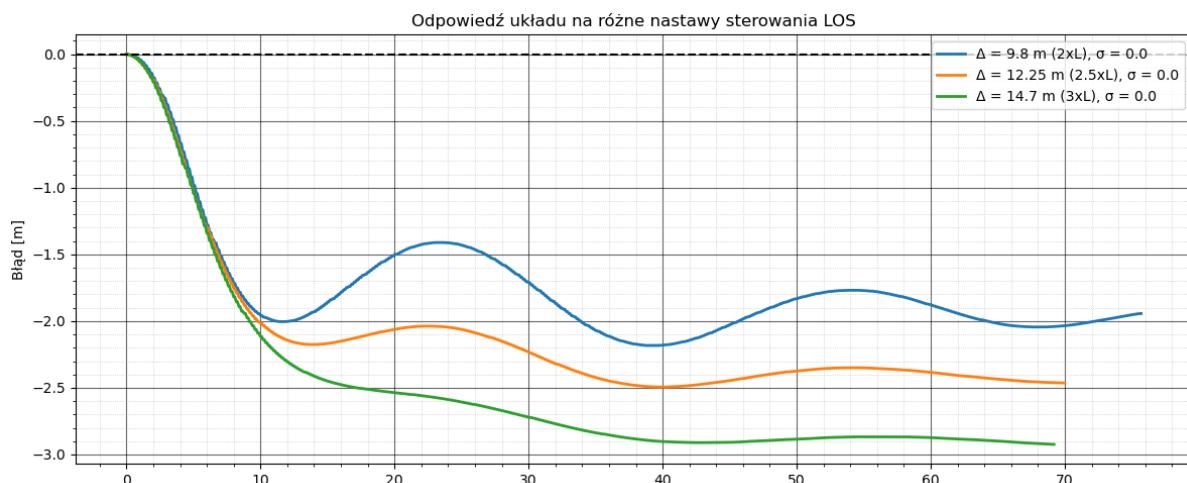
Biorąc pod uwagę przeznaczenie docelowej platformy badawczej „FOKA” do operowania na wodach śródlądowych (rzeki, jeziora), priorytetem było zapewnienie relatywnie szybkiej zbieżności do zadanej trajektorii, przy akceptacji niewielkich oscylacji w stanie przejściowym. Na drodze eksperimentalnej dobrano wartość $\Delta = 12,25$ m, co odpowiada 2,5-krotności długości kadłuba ($L = 4,9$ m). Wybrana nastawa zapewniła stabilizację oscylacji na poziomie amplitudy poniżej 0,25 m po upływie 20 s symulacji, co uznano za wynik satysfakcyjny w odniesieniu do gabarytów jednostki. Osiagnięty czas regulacji pętli zewnętrznej (20 s) pozostaje w zgodzie z czasem pracy pętli wewnętrznej (autopilota kursu), której czas ustalania wynosi ok. 4 s, zapewniając tym samym pięciokrotny margines błędu.

W pierwszej fazie strojenia, w celu izolacji wpływu parametru Δ , współczynnik całkujący σ został wyzerowany, redukując algorytm ILOS do klasycznej wersji LOS. W rezultacie

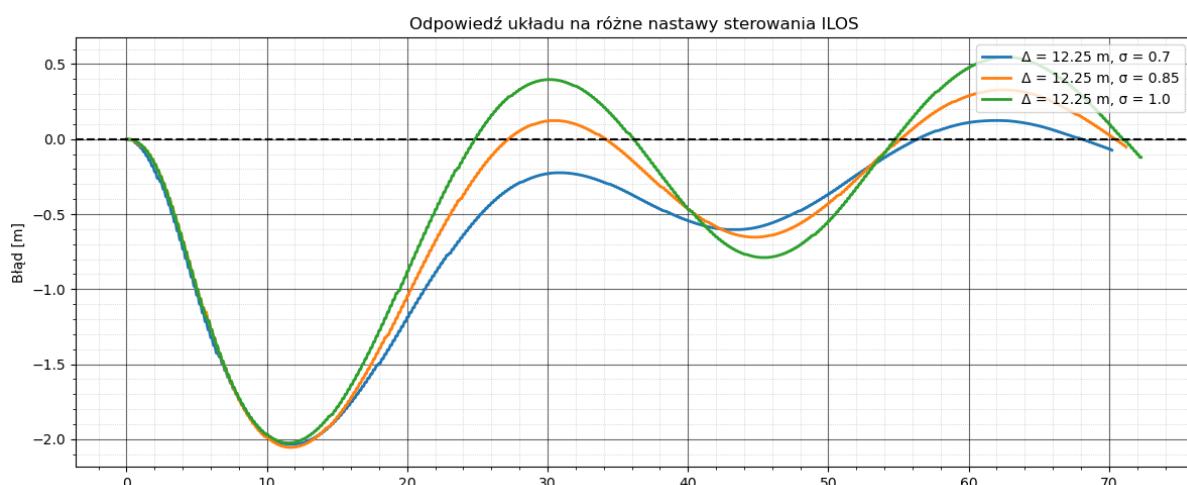
zaobserwowano wystąpienie uchybu ustalonego na poziomie ok. $-2,4$ m (dla wybranej wartości Δ). Przebiegi odpowiedzi układu dla różnych wartości parametru Δ (przy $\sigma = 0$) przedstawiono na wykresie 5.4.

Współczynnik σ wyznaczono eksperymentalnie, badając odpowiedź układu dla ustalonej Δ i zmiennych wartości wzmacnienia członu całkującego. Jako optymalną przyjęto wartość $\sigma = 0,85$. Kryterium wyboru stanowiło pierwsze przejście uchybu przez zero przed upływem połowy czasu trwania symulacji oraz ograniczenie amplitudy oscylacji poniżej $0,5$ m. Przebiegi dla różnych wartości σ przedstawiono na wykresie 5.5.

Mimo doboru nastaw, układ wykazuje oscylacje w stanie ustalonym. Ich redukcja poprzez zwiększenie parametru Δ jest niemożliwa ze względu na wymóg krótkiego czasu regulacji. Wskazuje to, że w analizowanym przypadku skuteczniejszym rozwiązaniem może okazać się zastosowanie klasycznego regulatora PID.



Rysunek 5.4: Reakcja układu na różne wartości parametru Δ przy wyłączonym członie całkującym.



Rysunek 5.5: Reakcja układu na różne wartości parametru σ .

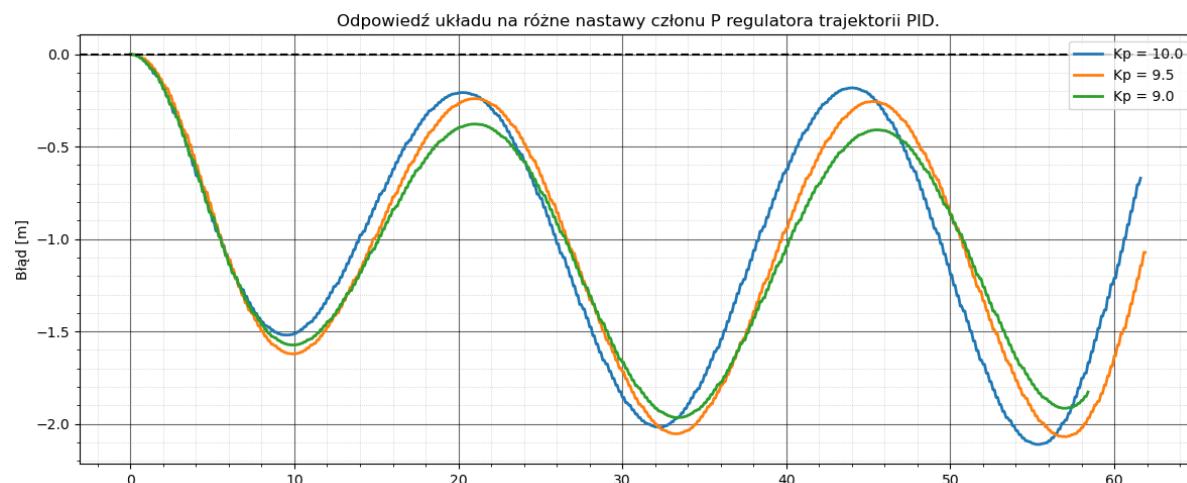
5.4 Dobór nastaw regulatora trajektorii PID

W celu wyznaczenia nastaw regulatora trajektorii PID przeprowadzono testy symulacyjne w scenariuszu identycznym jak przy doborze parametrów regulatora ILOS. Pierwszy etap polegał na znalezieniu wzmacnienia krytycznego K_u członu proporcjonalnego. Wartość ta, przy której występują niegasnące oscylacje, wyniosła 9,5. Na wykresie 5.6 przedstawiono przebieg tych oscylacji – ich amplituda początkowo rośnie, a następnie się stabilizuje. Wyznaczony okres oscylacji T_u wyniósł 24 s.

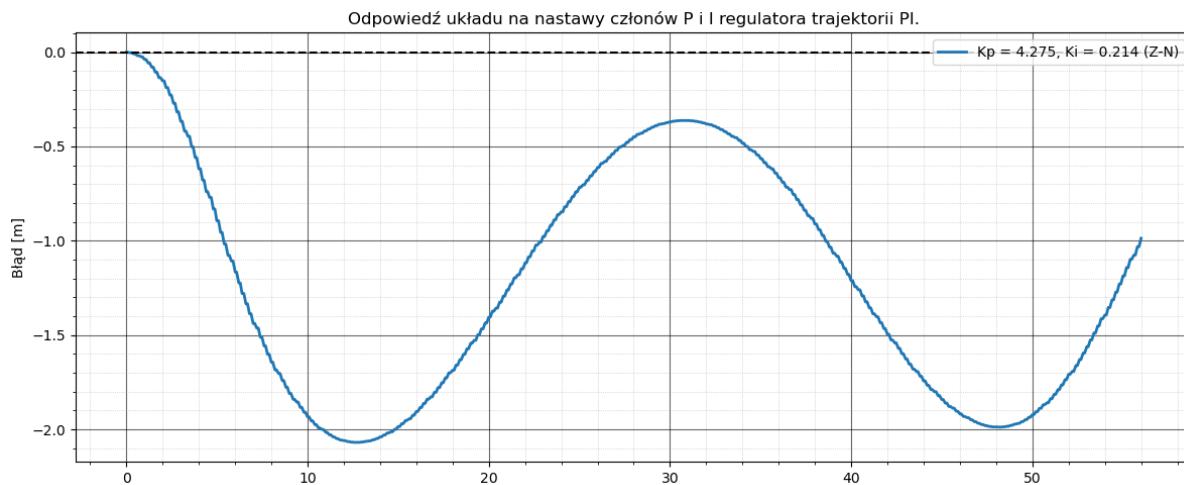
Do wstępniego doboru parametru K_i wykorzystano metodę Zieglera-Nicholsa dla regulatora PI. Wyliczone wzmacnienia wyniosły $K_p = 4,275$ oraz $K_i = 0,214$. Odpowiedź układu dla tych nastaw (wykres 5.7) wykazała stabilność, jednak amplituda początkowych oscylacji była zbyt duża (ponad 1,5 m), a redukcja uchybu zbyt wolna.

Ze względu na niezadowalające wyniki metody Zieglera-Nicholsa, ostateczne nastawy dobrano eksperymentalnie. Wzmocnienie K_p ustalone na poziomie 9,0, co zapewniło dużą szybkość reakcji przy zachowaniu stabilności. Wartość K_i przyjęto jako 0,856. Pozwoliło to na zniwelowanie uchybu ustalonego już w pierwszej oscylacji, co jest kluczowe przy pracy na krótkich dystansach. Wzmocnienie różniczkujące K_d ustawiono na 25, co ograniczyło amplitudę oscylacji bez utraty płynności przejścia przez zero. Wpływ różnych nastaw na odpowiedź układu przedstawiono na wykresie 5.8.

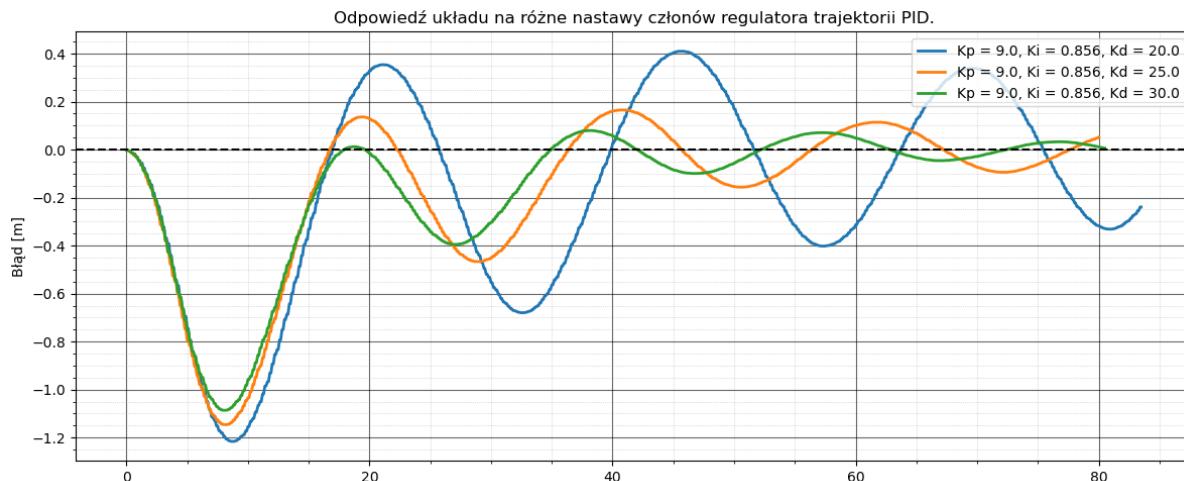
W analizowanym scenariuszu regulator PID osiągnął lepsze wyniki niż ILOS, zapewniając krótszy czas ustalania i mniejsze oscylacje. Nie oznacza to jednak, że jest to rozwiązanie lepsze w każdych warunkach. Przyjęte nastawy mogą nie sprawdzić się przy zmiennym wietrzu lub innym kierunku jego oddziaływania. Regulator PID posiada również człon różniczkujący, którego wzmacnienie można bezpośrednio regulować, co pozwala na stosowanie agresywnych i mało uniwersalnych nastaw, w odróżnieniu od regulatora ILOS. Porównanie działania obu regulatorów pokazano na wykresie 5.9. Trajektoria USV z kompensacją wiatru regulatorem PID oraz bez kompensacji wiatru została pokazana na rysunku 5.10.



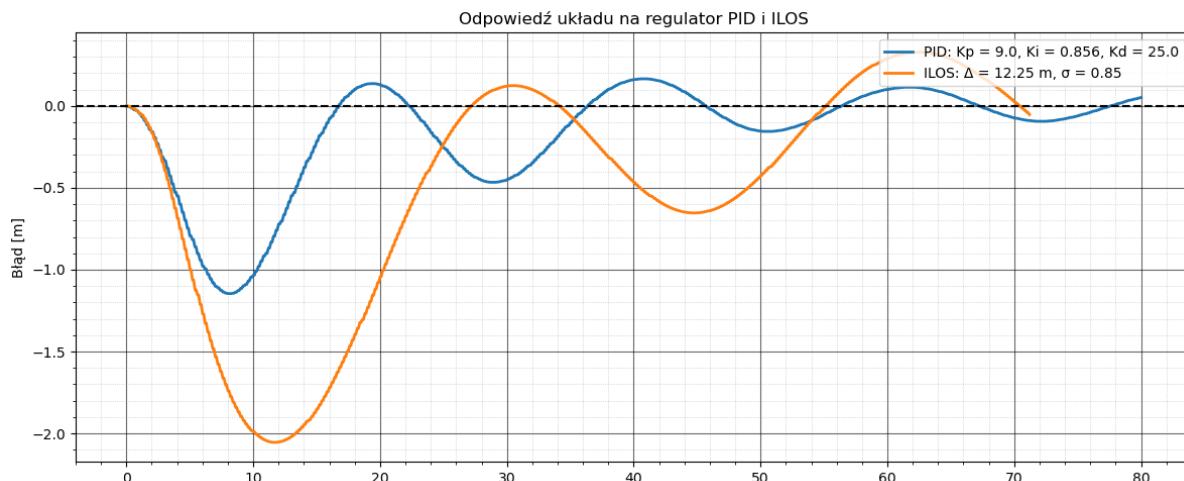
Rysunek 5.6: Reakcja układu na różne wartości wzmacnienia K_p członu proporcjonalnego (P) regulatora trajektorii PID.



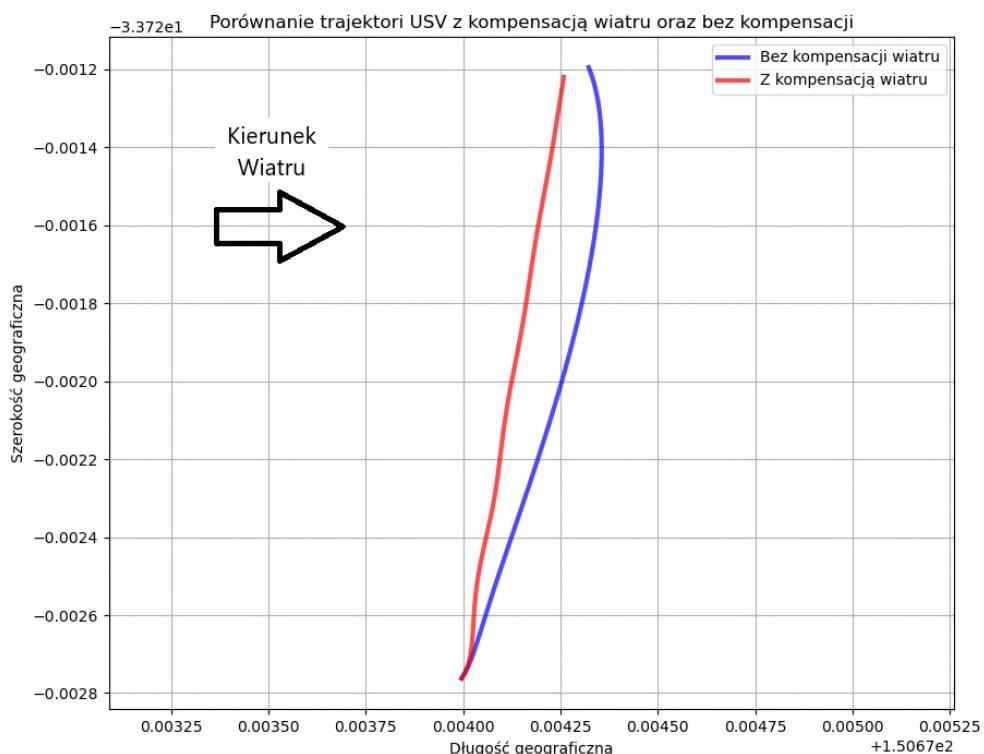
Rysunek 5.7: Reakcja układu na wartości K_p i K_i wyliczone metodą Zieglera-Nicholsa.



Rysunek 5.8: Reakcja układu na różne wartości członów regulatora trajektorii PID.



Rysunek 5.9: Reakcja układu na regulator PID i ILOS.



Rysunek 5.10: Porównanie trajektorii z kompensacją wiatru oraz bez kompensacji wiatru.

Rozdział 6

Analiza porównawcza nawigacji klasycznej i hybrydowej

6.1 Scenariusz testów

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej nawigacji klasycznej oraz hybrydowej zrealizowano serię testów symulacyjnych. Scenariusz badawczy obejmował przemieszczenie bezzałogowej jednostki nawodnej (USV) z pozycji startowej W_0 ($-33, 722760; 150, 674000$) poprzez sekwencję punktów nawigacyjnych o współrzędnych W_1 ($-33, 721192; 150, 674264$), W_2 ($-33, 721365; 150, 675368$) oraz W_3 ($-33, 722538; 150, 675245$). Ostatecznym celem trajektorii był powrót do punktu W_1 . Sterowanie jednostką wzdłuż zadanych odcinków prostoliniowych realizowano przy wykorzystaniu regulatora trajektorii typu ILOS.

Kluczowym elementem symulacji było odwzorowanie charakterystyki rzeczywistego odbiornika GPS Waveshare 76K. Zgodnie ze specyfikacją techniczną urządzenia, dokładność pozycjonowania określona parametrem CEP (ang. *Circular Error Probable*) wynosi $2,0\text{ m}$ [25]. Wartość ta oznacza promień okręgu, wewnątrz którego z prawdopodobieństwem 50% znajduje się wyznaczona pozycja. W celu implementacji tego parametru w algorytmach estymacji stanu, dokonano konwersji CEP na wariancję szumu pomiarowego. Przyjmując założenie o normalnym rozkładzie błędów, odchylenie standardowe σ wyznaczono zgodnie z zależnością (6.1), wykorzystując współczynnik konwersji $\alpha \approx 0,849$:

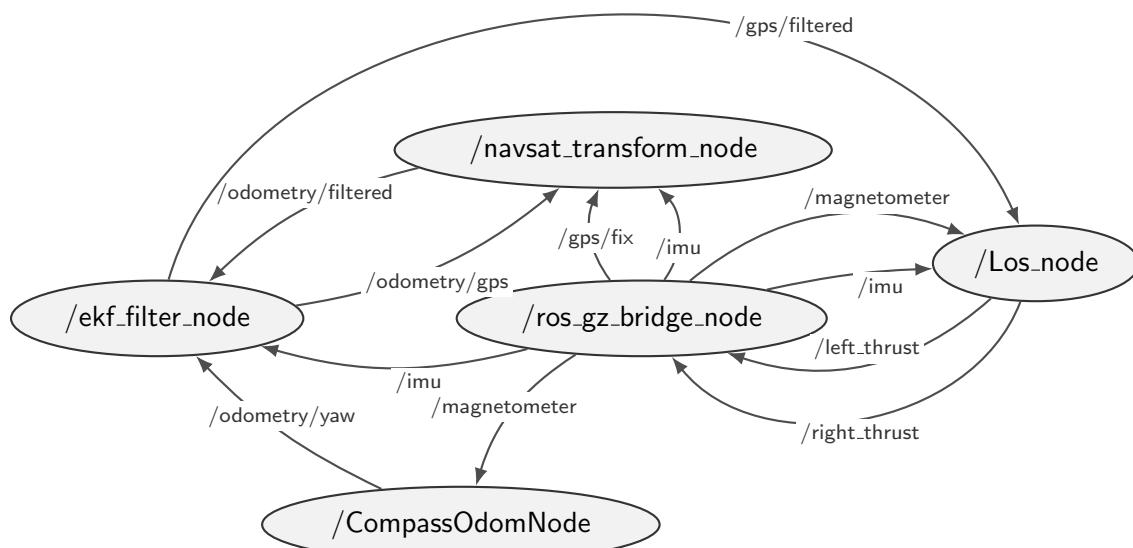
$$\sigma = \alpha \cdot CEP \quad (6.1)$$

Dla analizowanego modułu GPS wyznaczona wariancja pozycji (σ^2) wyniosła $2,88\text{ m}^2$. Ze względu na niedokładny charakter pomiarów satelitarnych, zdefiniowano strefę akceptacji punktu docelowego jako obszar kołowy o promieniu równym błędowi CEP ($2,0\text{ m}$). Takie podejście gwarantuje zaliczenie punktu nawigacyjnego w sytuacji, gdy rzeczywista pozycja jednostki pokrywa się z celem, nawet przy występowaniu dużego błędu pomiarowego. Zrzut ekranu z programu Gazebo Sim przedstawiający moment wpłynięcia łodzi WAM-V w obszar akceptacji oznaczony markerem znajduje się na rysunku 6.2.

W wariancie nawigacji hybrydowej zastosowano fuzję danych sensorycznych, wykorzystując pakiet `robot_localization` środowiska ROS 2 [18], który implementuje algorytm Rozszerzonego Filtra Kalmana (EKF). Architektura systemu opierała się na integracji danych z inercyjnej jednostki pomiarowej (IMU) oraz magnetometru, pracujących z częstotliwością 50 Hz , z danymi pozycyjnymi GPS dostarczanymi z częstotliwością 10 Hz . Pozwoliło to na estymację przemieszczenia i orientacji w lokalnym układzie współrzędnych przy jednoczesnej korekcie pozycji globalnej.

Wobec braku danych producenta dotyczących szumów własnych dla sensora symulowanego, parametry macierzy kowariancji skonfigurowano w oparciu o specyfikację układu TDK InvenSense ICM-20602. Zgodnie z dokumentacją techniczną, całkowity szum RMS dla żyroskopu wynosi $0,04^\circ/\text{s}$, natomiast dla akcelerometru wartość ta równa jest $1,0 \text{ mg}$. Dla magnetometru przyjęto odchylenie standardowe na poziomie $1,0 \mu\text{T}$.

Architektura zaprojektowanego systemu symulacyjnego w środowisku ROS 2 opiera się na wymianie danych między pięcioma niezależnymi węzłami za pośrednictwem tematów, co przedstawiono na schemacie 6.1. Centralnym elementem struktury jest węzeł `/ros_gz_bridge_node`, pełniący funkcję interfejsu dokonującego dwukierunkowej translacji komunikatów między silnikiem fizycznym symulatora Gazebo a standardem ROS. W warstwie nawigacyjnej węzeł `/navsat_transform_node` transformuje surowe dane GNSS (temat `/gps/fix`) do lokalnego układu współrzędnych, zasilając węzeł `/ekf_filter_node`. Jednostka ta, implementująca rozszerzony filtr Kalmana, integruje dane pozycyjne z pomiarami inercyjnymi (`/imu`) oraz danymi magnetometru – wstępnie przetworzonymi przez węzeł pomocniczy `/CompassOdomNode` – w celu precyzyjnej estymacji stanu robota na temacie `/gps/filtered`. Na podstawie tak wyznaczonej lokalizacji, węzeł decyzyjny `/Los_node` realizuje algorytmy sterowania, generując sygnały sterujące pędnikami (`/right_thrust`, `/left_thrust`), które poprzez mostek trafiają do symulacji. Zastosowana modułowość i abstrakcja sprzętowa umożliwiają przy tym bezpośrednią migrację oprogramowania sterującego na komputer pokładowy docelowej jednostki „FOKA”.



Rysunek 6.1: Graf przepływu danych w systemie ROS 2 (wizualizacja węzłów i tematów).

6.2 Analiza wyników

Symulacja działania układu w obecności szumu pomiarowego wymusiła modyfikację nastaw wewnętrznego regulatora kursu (PD). Ze względu na skokowy charakter zmian estymowanej lokalizacji i azymutu, człon różniczkujący (D) wprowadzał znaczące uchyby sterowania, uniemożliwiające stabilne śledzenie trajektorii, co skutkowało koniecznością jego wyzerowania.



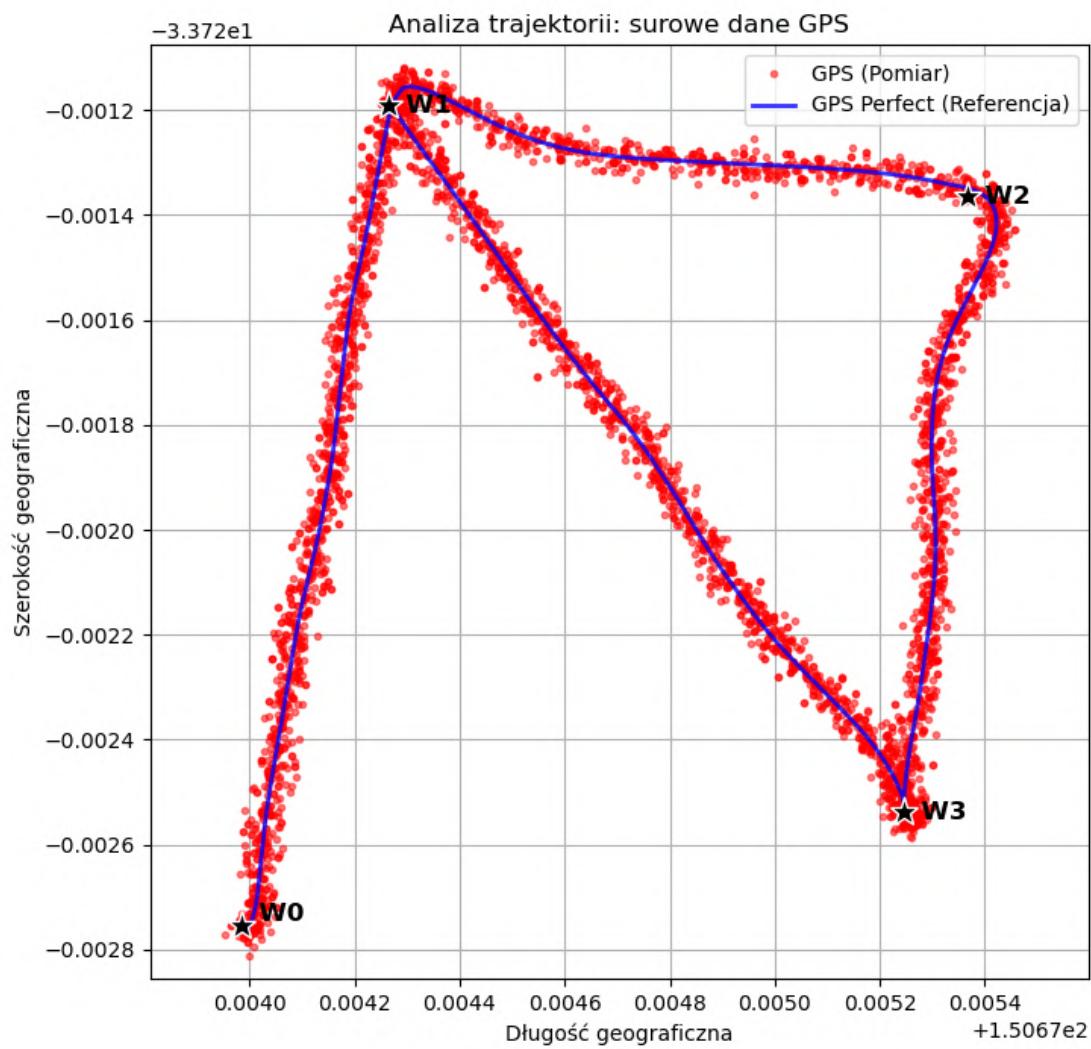
Rysunek 6.2: Zrzut ekranu z programu gz sim przedstawiający moment wpłynięcia łodzi wam-v w obszar akceptacji oznaczony markerem.

Weryfikacja algorytmów nawigacji zakończyła się powodzeniem dla obu badanych konfiguracji. Jednostka USV osiągnęła wszystkie zadane punkty kontrolne (W_0 , W_1 , W_2 oraz W_3), zarówno przy wykorzystaniu surowych danych GPS, jak i fuzji sensorów. Rzeczywistą trajektorię jednostki na tle zarejestrowanych danych pomiarowych przedstawiono na Rys. 6.3 (surowy GPS) oraz Rys. 6.4 (estymacja filtrem Kalmana). W celu wizualizacji rozkładu i charakterystyki szumu pomiarowego, na Rys. 6.5a i 6.5b zaprezentowano powiększone fragmenty trajektorii odpowiednio dla danych surowych i przetworzonych.

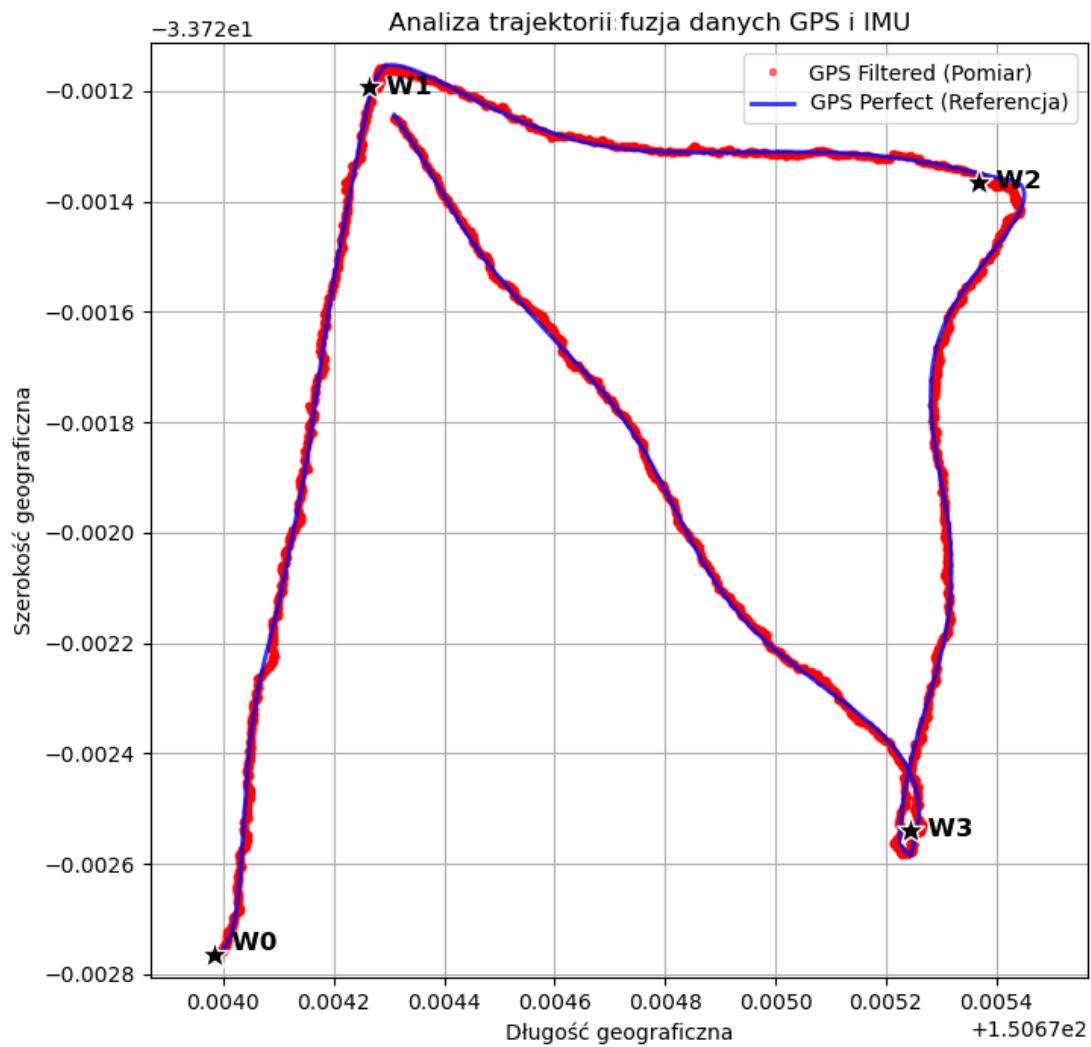
Analiza porównawcza wykazuje istotną przewagę algorytmu fuzji danych nad podejściem opartym wyłącznie na module GPS. Zastosowanie rozszerzonego filtru Kalmana (EKF) łączącego pomiary satelitarne i inercyjne pozwoliło na około 3,5-krotną redukcję błędu pozycjonowania. Uzyskany średni błąd bezwzględny (MAE) oscylujący w granicach 40 cm stanowi wynik przewyższający typową dokładność cywilnych odbiorników GNSS. Ilościowe zestawienie wskaźników jakości pozycjonowania zawarto w tabeli 6.1, natomiast przebiegi czasowe błędów dla szerokości i długości geograficznej przedstawiono odpowiednio na wykresach 6.6b i 6.6a.

Metryka	Oś	Surowe dane GPS	Fuzja GPS + IMU
MAE (Śr. błąd bezwzgl.)	Lat	$1.34 \times 10^{-5^\circ}$ (1.486 m)	$3.77 \times 10^{-6^\circ}$ (0.418 m)
	Lon	$1.37 \times 10^{-5^\circ}$ (1.268 m)	$4.30 \times 10^{-6^\circ}$ (0.398 m)
STD (Odchylenie std.)	Lat	$1.68 \times 10^{-5^\circ}$ (1.862 m)	$4.75 \times 10^{-6^\circ}$ (0.527 m)
	Lon	$1.72 \times 10^{-5^\circ}$ (1.597 m)	$5.44 \times 10^{-6^\circ}$ (0.504 m)
Wariancja [deg ²]	Lat	2.82×10^{-10}	2.26×10^{-11}
	Lon	2.97×10^{-10}	2.96×10^{-11}

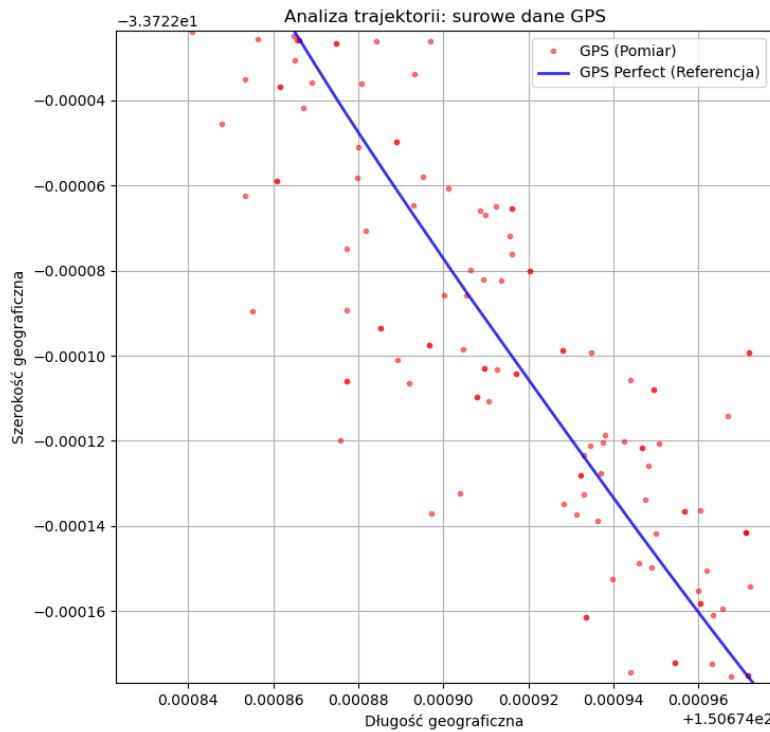
Tablica 6.1: Porównanie statystyk błędu pozycjonowania.



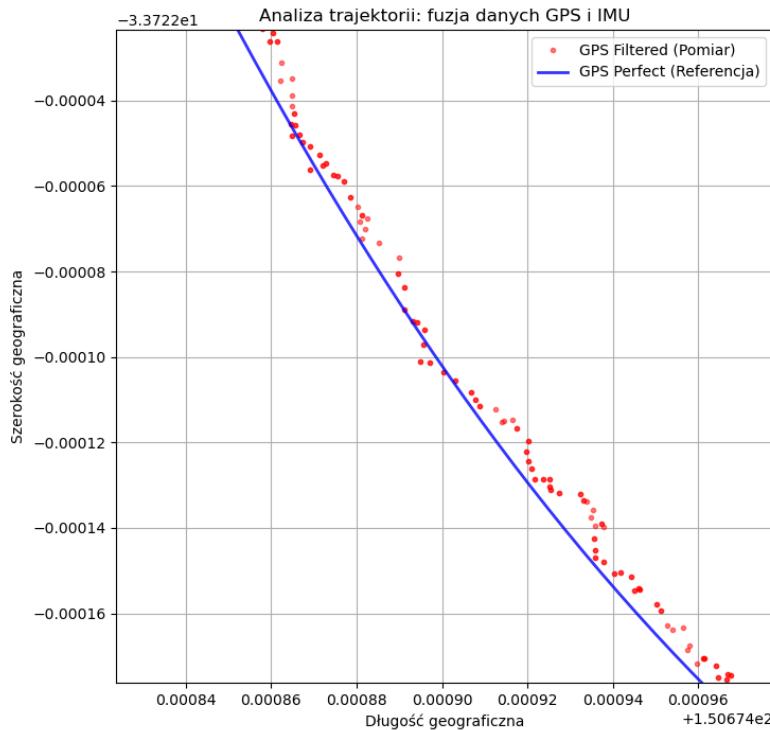
Rysunek 6.3: Trajektoria wraz z punktami pomiarowymi GPS.



Rysunek 6.4: Trajektoria wraz z punktami oszacowanymi przez filtr Kalmana.

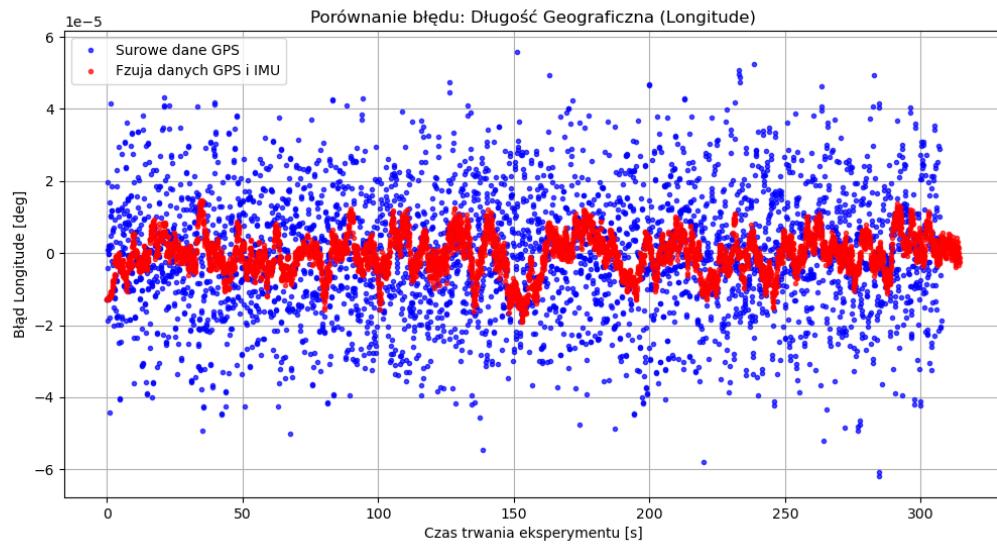


(a) Fragment trajektorii wraz z punktami pomiarowymi GPS.

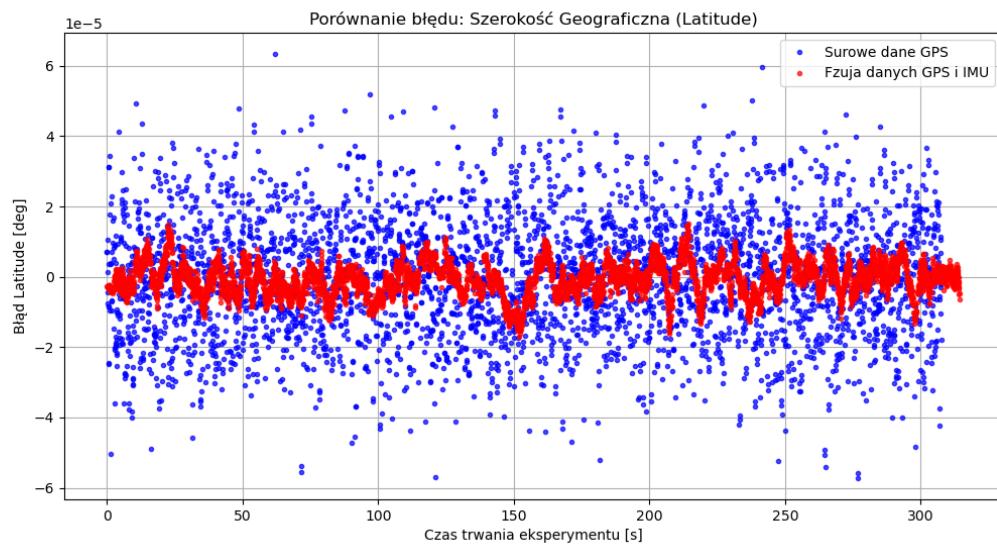


(b) Fragment trajektorii wraz z punktami oszacowanymi przez rozszerzony filtr Kalmana.

Rysunek 6.5: Przybliżone trajektorie łodzi WAM-V wraz z zaznaczonymi pomiarami.



(a) Błędy estymacji długości geograficznej surowego odbiornika GPS i fuzji sensorów.



(b) Błędy estymacji szerokości geograficznej surowego odbiornika GPS i fuzji sensorów.

Rozdział 7

Testy fizyczne

7.1 Scenariusz testów

Zidentyfikowane błędy wskazań magnetometru, obejmujące stałe przesunięcie (ang. *offset*) oraz nieliniowość charakterystyki (rozbieżność między fizycznym kątem obrotu a zmianą wartości zmierzonej), uniemożliwiły prawidłową implementację algorytmów nawigacji do punktu oraz śledzenia trajektorii. W związku z tym zakres badań ograniczono do dwóch eksperymentów weryfikacyjnych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem łodzi „FOKA”, skonstruowanej przez koło naukowe PWr Solar Boat Team. Miejscem testów był odcinek rzeki Odry przy bulwarach Politechniki Wrocławskiej (współrzędne geograficzne: 51,106509; 17,061303). Konfigurację jednostki z zamocowaną linią asekuracyjną przedstawiono na rysunku 7.1.

Pierwszy eksperyment miał na celu weryfikację poprawności pomiaru azymutu oraz oszacowanie błędu magnetometru. Procedura badawcza polegała na ręcznym, jednostajnym obrocie jednostki wokół osi pionowej, przy zachowaniu stałej płaszczyzny poziomej. Częstotliwość próbkowania sygnału azymutu wynosiła 10 Hz.

Drugi test obejmował weryfikację działania regulatora kursu w pętli sprzężenia zwrotnego. Przyjęto wartość zadaną kursu kompasowego równą 130° , przy czym ze względu na nieliniowość sensora, wartość ta nie musiała pokrywać się z rzeczywistym azymutem geograficznym. Do łodzi zamocowano linię, która pełniła funkcję zabezpieczającą oraz służyła do wprowadzania wymuszeń (zakłóceń zewnętrznych) po osiągnięciu przez układ stanu ustalonego. Zadaniem układu sterowania było utrzymanie zadanego kursu na dystansie około 15 m. W algorytmie zastosowano regulator proporcjonalny (P) o wzmacnieniu $K_p = 0,03$. Sygnał sterujący prędkością wzdużną ograniczono do wartości $v = 0,15$. Rejestracja danych odbywała się również z częstotliwością 10 Hz. Jako wskaźnik jakości przyjęto uchyb wartości zmierzonej względem zadanej.

7.2 Analiza wyników

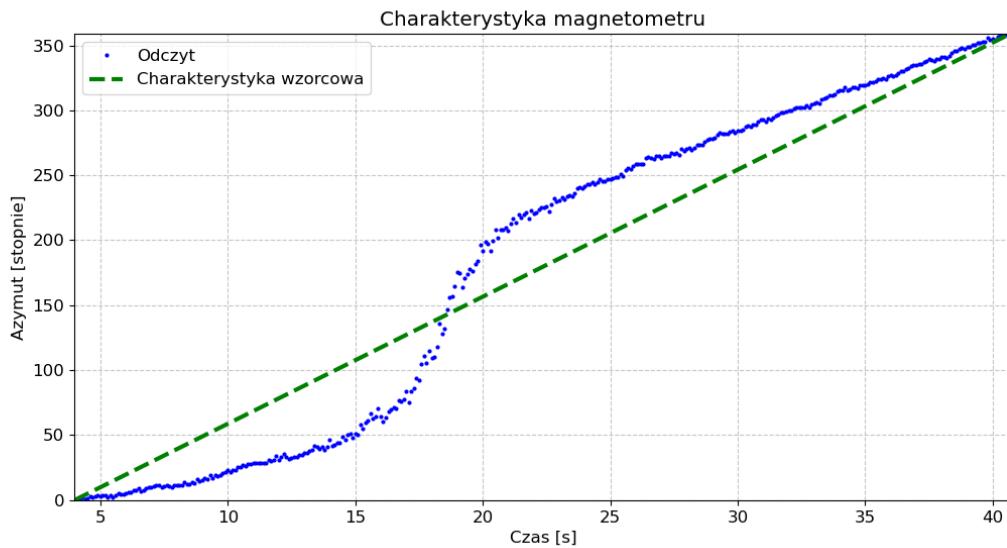
Pierwszy etap badań wykazał istotną nieliniowość charakterystyki magnetometru, co zilustrowano na rysunku 7.2. Największą rozbieżność wskazań względem charakterystyki wzorcowej zaobserwowano w przedziale czasowym $t \in \langle 10, 25 \rangle$ s, przy czym w 15. sekundzie uchyb przekroczył wartość 50° . Tak znaczące błędy odwzorowania dyskwalifikują możliwość wykorzystania surowych danych sensorowych w układzie sterowania i wskazują na konieczność przeprowadzenia procesu kalibracji. W celu zwiększenia czytelności analizy, dane na wykresie zostały znormalizowane względem początkowej orientacji jednostki



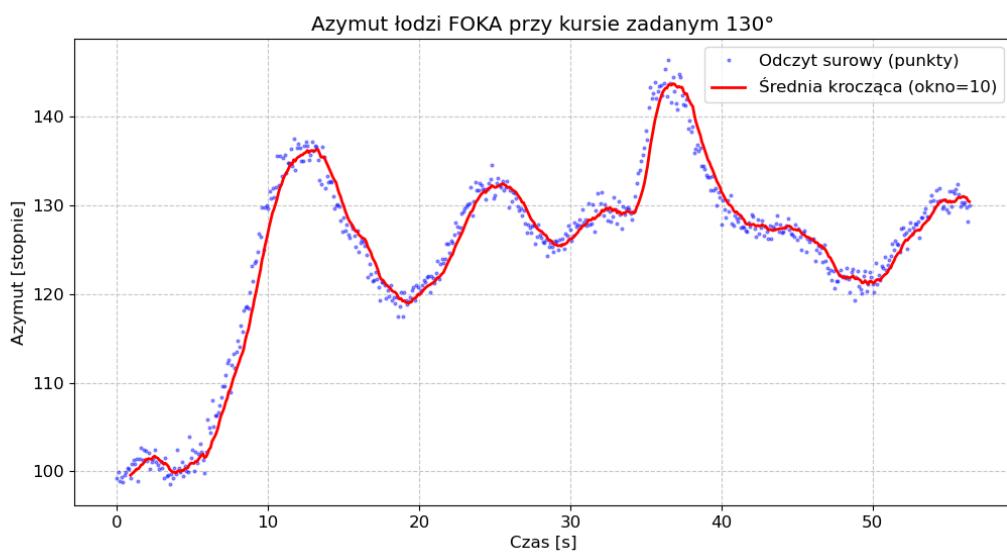
Rysunek 7.1: Zdjęcie przedstawiające łódź „FOKA” z zamocowaną linią.

(0°), co wynikało z braku możliwości weryfikacji bezwzględnego błędu względem północy magnetycznej.

W trakcie drugiego testu (rys. 7.3) weryfikowano działanie regulatora proporcjonalnego (P) w zadaniu utrzymania kursu. Układ osiągnął wartość zadaną po 10 s, jednak pełna stabilizacja nastąpiła w 33. sekundzie próby. Wprowadzone celowo w 34. sekundzie zakłócenie zewnętrzne (wymuszenie liną) spowodowało odchylenie od kursu o ok. 13° , po czym układ powrócił do stanu ustalonego w ciągu 22 s (w 55. sekundzie testu). Odpowiedź układu charakteryzowała się znacznym przeregulowaniem o początkowej amplitudzie ok. 10° , co pozwoliło jednak na uzyskanie krótkiego czasu narastania, kluczowego przy manewrowaniu na niewielkich akwenach. Zaobserwowano również występowanie uchybu ustalonego rzędu 1° , mogącego wynikać z asymetrii hydrodynamicznej kadłuba lub błędów pomiarowych. Mimo że regulator azymutu zadziałał poprawnie, należy podkreślić, że ze względu na nieliniowość sensora zarejestrowane wartości kątowe są obarczone błędem odwzorowania. W celu wizualizacji trendu na wykresie naniesiono średnią kroczącą z okna o szerokości 10 punktów.



Rysunek 7.2: Charakterystyka magnetometru wraz z charakterystyką wzorcową.



Rysunek 7.3: Przebieg azymutu łodzi „FOKA” przy kursie zadanym 130° wraz ze średnią kroczącą w celu lepszej wizualizacji trendu.

Rozdział 8

Podsumowanie

Główny cel pracy, zdefiniowany jako zaproponowanie, implementacja oraz weryfikacja algorytmów sterowania dla robota pływającego klasy USV, został zrealizowany. W ramach przeglądu literatury przeanalizowano różnorodne koncepcje bezzałogowych jednostek pływających, szczególną uwagę poświęcając konstrukcjom typu katamaran o napędzie różnicowym. Na tej podstawie opracowano model matematyczny dynamiki jednostki, który po przyjęciu stosownych uproszczeń zredukowano do trzech stopni swobody (3 DOF) dla ruchu płaskiego.

Weryfikacja opracowanych rozwiązań została przeprowadzona dwuetapowo. Pierwszą fazę stanowiły testy symulacyjne zrealizowane w oprogramowaniu Gazebo Sim, zintegrowanym ze środowiskiem ROS 2. Scenariusze testowe uwzględniały obecność zakłóceń środowiskowych, w tym zmiennego wiatru, co pozwoliło na sprawdzenie odporności układu regulacji. Kluczowym aspektem badań była analiza algorytmów nawigacji, które podzielono na trzy główne kategorie: nawigację klasyczną (opartą wyłącznie na układzie globalnym), zliczeniową (wykorzystującą pomiary lokalne) oraz hybrydową. Przeprowadzone symulacje wykazały znaczącą przewagę podejścia hybrydowego. Wykorzystanie fuzji danych sensorycznych przy użyciu rozszerzonego filtra Kalmana (EKF) pozwoliło na około 3,5-krotną redukcję błędu pozycjonowania w porównaniu do nawigacji opartej wyłącznie na surowych danych z odbiornika GPS.

Warstwa sterowania została zaimplementowana w oparciu o mapowanie sygnałów sterujących na parametry prędkości wzdluznej (przepustnicy) oraz prędkości obrotowej (kierownicy). Ze względu na specyfikę zadania, wartość przepustnicy w testach przyjęto jako stałą, skupiając się na precyzji manewrowania. Opracowano algorytmy realizujące dwa typy zadań: stabilizację orientacji (sterowanie do punktu) oraz śledzenie zadanej ścieżki (trajektorii). Pierwsze z zadań realizowano w pętli sprzężenia zwrotnego przy użyciu regulatora azymutu. Choć pierwotnie zakładano użycie struktury PD, analiza wpływu szumów pomiarowych, zarówno w symulacji, jak i w układzie rzeczywistym, wymusiła redukcję algorytmu do członu proporcjonalnego (P). Zadanie śledzenia trajektorii zrealizowano w strukturze kaskadowej, gdzie pętlę zewnętrzną obsługiwali algorytmy PID oraz ILOS. Wyniki symulacyjne wskazały, że w analizowanym scenariuszu regulator PID zapewnił szybszą stabilizację układu na zadanej ścieżce w porównaniu do metody ILOS.

Ostatnim etapem prac były testy weryfikacyjne przeprowadzone na rzeczywistym obiekcie badawczym – robocie „FOKA”. Eksperymenty potwierdziły poprawność konstrukcji oraz bezpieczeństwo eksploracji jednostki. Ze względu na zidentyfikowane silne nielinowości magnetometru, zakres testów ograniczono do weryfikacji regulatora azymutu. Mimo niedoskonałości sensorów, układ sterowania oparty na regulatorze P działał poprawnie, skutecznie stabilizując kurs jednostki.

Bibliografia

- [1] Adafruit. *Raspberry Pi 4 Model B Specification*. Dokumentacja techniczna.
- [2] C. Aguero, i in. Maritime gazebo - open source buoyancy plugin, 2024. Dostęp: 2025-05-01.
- [3] ApisQueen. *Propeller Controll Specification*. Dokumentacja techniczna.
- [4] ApisQueen. *Under Water Thruster Specification*. Dokumentacja techniczna.
- [5] M. Bibuli, W. Caharija, K. Y. Pettersen, G. Bruzzone, M. Caccia, E. Zereik. Illos guidance: Experiments and tuning. *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*, strony 1217–1222, Cape Town, South Africa, 2014.
- [6] M. Breivik, V. Hovstein, T. Fossen. Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles. *Modeling, Identification and Control (MIC)*, strony 131–149, 10 2008.
- [7] G. D. v. d. B. D. Y. R. J.-B. A. D. S. R. S. I. A. N. M. R. P. I. M. A. H. K. A. A. A. M. S. P. A. B. S. A. P. H. M. A. A. N. S. F. B. B. Z. M. M. W. M. Y. L. P. W. Y. M. A. . A. B. Budianto Hakim, Unggul Prasetyo Wibowo. Hominins on sulawesi during the early pleistocene. *nature*, 2025.
- [8] W. Caharija. *Integral Line-of-Sight Guidance and Control of Underactuated Marine Vehicles*. Praca doktorska, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway, 2014.
- [9] Drents Museum. The pesse canoe: The world's oldest boat. <https://drentsmuseum.nl/en/collection/pesse-canoe>.
- [10] Euronaval Online 2020. Bezzałogowa łódź protector. <https://www.armyrecognition.com/archives/archives-naval-defense/naval-defense-2020/euronaval-online-2020-rafael-presents-its-combat-proven-protector-usv-unmanned-surface-vessel>.
- [11] T. I. Fossen. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2011.
- [12] T. I. Fossen, M. Breivik, R. Skjetne. Line-of-sight path following of underactuated marine craft. *Proceedings of the 6th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*, strony 211–216, Girona, Spain, 2003.
- [13] J. Jin, J. Zhang, D. Liu. Design and verification of heading and velocity coupled nonlinear controller for unmanned surface vehicle. *Sensors*, 18(11), 2018.

- [14] A. Kolesińska. Łódź stworzona przez wrocławskich studentów ruszy w rejs po atlantyku. statek passat przeszedł pierwsze testy na odrze. <https://gazetawroclawska.pl/lodz-stworzona-przez-wroclawskich-studentow-ruszy-w-rejs-po-atlantyku-statek-passat-przeszedl-pierwsze-testy-na-odrze/ar/c1p2-27651277>.
- [15] J. Kędzierski. Filtr kalmana - zastosowania w prostych układach sensorycznych, 2007. Dostęp: 2025-05-01.
- [16] lady ada. *LSM9DS1 Accelerometer + Gyro + Magnetometer 9-DOF Specification*. Adafruit. Dokumentacja techniczna.
- [17] C. Marchaj. *Teoria żeglowania: Hydrodynamika kadłuba*. Almapress, Warszawa, 2013.
- [18] T. Moore, C. Stache. *robot_localization: A ros package for nonlinear state estimation*, 2014. Dostęp: 2025-05-01.
- [19] Ocean Power Technologies. Ocean power technologies - hydrographic applications. <https://oceannpowertechnologies.com/solutions/hydrographic/>.
- [20] Open Robotics. *ros2 Humble Specification*. Dokumentacja techniczna.
- [21] A. Piąłucha. Kod źródłowy symulacji: Sterowanie jednostką usv w środowisku gazebo. https://github.com/antpijal/thesis_SUV_gazebo.
- [22] C. Saildrone. Saildrone voyager equipped for coastal mapping in the atlantic ocean. <https://www.saildrone.com/media-room>.
- [23] S. Verhagen. The pesse canoe: the oldest boat of the world. *Maritime Archaeology Periodical*.
- [24] Waveshare. *L76K GNSS Module Specification*. Dokumentacja techniczna.
- [25] C. Widłak. Porównanie wartości cep (circular error probable) obliczonych według różnych zależności podawanych w literaturze. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2010. (Publikacja poglądowa / Techniczna).
- [26] S. Wu, H. Ye, W. Liu, X. Yang, Z. Liu, H. Zhang. A ship path tracking control method using a fuzzy control integrated line-of-sight guidance law. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024.