

POLITECHNIKA KRAKOWSKA
IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Rozprawa doktorska
Mgr inż. Tomasz Talarczyk

System wzajemnej lokalizacji optycznej grupy
pływających robotów mobilnych

Promotor:
prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec

Kraków 2025

Podziękowania

Pragnę podziękować władzom Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki oraz FutureLab PK za wsparcie finansowe budowy pojazdów w ramach projektu "Ławica Hybrydowych Pojazdów Podwodnych".

Wszystkim współpracownikom Katedry Inżynierii i Automatyzacji Produkcji, którzy pomogli mi w realizacji prac, a w szczególności opiekunom i przyjaciołom dr inż. Marcinowi Malcowi i dr inż. Marcinowi Morawskiemu, którzy wspierali mnie na każdym kroku realizacji badań. Dziękuję też promotorowi prof. dr hab. inż. Sebastianowi Skoczypiecowi za wysiłek, cenne uwagi i wskazówki w trakcie redagowania niniejszej pracy doktorskiej.

Słowa podziękowania składam komandorowi Marynarki Wojennej dr. hab inż. Piotrowi Szymakowi Prof AMW oraz naukowcom i pracownikom Akademii Marynarki Wojennej, z którymi miałem przyjemność pracować w ramach projektu SABUVIS II.

Pragnę podziękować rodzinie, a w szczególności mojej narzeczonej, niedługo żonie Karolinie za wyrozumiałość, wsparcie i słowa otuchy w trudnych momentach.

Spis treści

Wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów	7
1 Wprowadzenie	9
2 Analiza zagadnienia w świetle danych literaturowych	13
2.1 Taksonomia systemów wielorobotowych	13
2.2 Zbiorowy ruch ławicy	17
2.3 Ławice podwodne - istniejące rozwiązania	19
2.4 Badania symulacyjne algorytmów ławicowych	26
2.5 Model ruchu pojazdu podwodnego	26
2.6 Wnioski z analizy literatury	32
3 Cel, zakres oraz metodyka badawcza	33
3.1 Cel pracy	33
3.2 Zakres pracy	34
3.3 Metodyka badawcza	34
4 Projekt i budowa Hybrydowego Bezzałogowego Pojazdu Podwodnego	37
4.1 Założenia do budowy	37
4.2 Część mechaniczna	38
4.3 Część elektroniczna i oprogramowanie	40
5 Model ruchu pojazdu	45
5.1 Model matematyczny	45
5.2 Identyfikacja parametrów modelu	52
5.3 Model ruchu pojazdu w programie Matlab	65
5.4 Eksperymentalna weryfikacja modelu ruchu pojazdu	66
6 Badania symulacyjne i eksperymentalne ławicy	73
6.1 Założenia do algorytmu śledzenia lidera	73
6.2 Lokalizacja optyczna pojazdów w ławicy	74
6.2.1 Koncepcja lokalizacji	74
6.2.2 Obszar widzenia kamery pojazdu	74
6.2.3 Algorytm detekcji masztu	75
6.2.4 Wnioski do lokalizacji optycznej	78
6.3 Badania symulacyjne	78

6.3.1	Koncepcja algorytmu ruchu ławicy	78
6.3.2	Model ruchu ławicy w programie Matlab	79
6.3.3	Regulator obrotu kamery	81
6.3.4	Regulator zanurzenia dynamicznego	82
6.3.5	Regulator dystansu	86
6.3.6	Regulator namiaru względnego	91
6.3.7	Ruch ławicy złożonej z czterech pojazdów	94
6.4	Badania eksperymentalne	98
6.4.1	Koncepcja badań	98
6.4.2	Minimalizacja dystansu i namiaru do nieporuszającego się lidera	98
6.4.3	Podążanie za liderem wykonującym spokojne manwery	102
6.4.4	Podążanie za liderem wykonującym dynamiczne manwery	106
6.4.5	Test ławicy złożonej z lidera i dwóch pojazdów śledzących	110
6.4.6	Podsumowanie i wnioski do badań eksperymentalnych	115
7	Podsumowanie i wnioski	119
	Literatura	122
	Streszczenie	133
	Summary	135
	Załącznik 1. Śledzenie ruchu pojazdów - Motion Capture	137

Wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów

HUUV - hybrydowy bezzałogowy pojazd podwodny (ang. *Hybrid Unmanned Underwater Vehicle*)

LOS - metoda sterowania w linii wzroku (ang. *Line of Sight*)

COG - środek ciężkości pojazdu (ang. *Center of Gravity*)

COB - środek wyporu pojazdu w pełnym zanurzeniu (ang. *Center of Buoyancy*)

CFD - obliczeniowa mechanika płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics*)

T - napór generowany przez pędnik śrubowy [N]

c_T - sygnał sterujący naporem pędnika śrubowego (-100, +100%)

T_Σ - napór wzdłużny [N] (siła napędowa powodująca ruch postępowy pojazdu)

T_Δ - różnica naporu [N] (różnica naporu między pędnikami śrubowymi, powodująca skręcanie pojazdu)

c_{T_Σ} - sygnał sterujący naporem wzdłużnym pojazdu (-100, +100%)

c_{T_Δ} - sygnał sterujący różnicą naporu pojazdu (-100, +100%)

δ - kąt wychylenia sterów zanurzenia (-30, +30%),

δ_n - neutralny kąt wychylenia sterów zanurzenia,

ψ_c - namiar względny na śledzony pojazd,

$\psi_{c_{zad}}$ - zadany namiar względny na śledzony pojazd,

d_c - dystans do śledzonego pojazdu,

$d_{c_{zad}}$ - zadany dystans do śledzonego pojazdu,

Rozdział 1

Wprowadzenie

Środowisko wodne jest miejscem nieprzyjaznym dla człowieka. Dużo więcej na dzień dzisiejszy wiemy o kosmosie niż o dnie mórz i oceanów, które zajmują ponad 70% powierzchni Ziemi. Podwodna flora i fauna a także morskie zasoby naturalne sprawiają, że robotyka podwodna jest w kręgu ciągłego zainteresowania naukowego. Woda jednak skutecznie utrudnia człowiekowi samodzielną eksplorację więc jedynym sensownym rozwiązaniem jest budowa robotów zdolnych do wykonywania różnego typu zadań podwodnych. Wyróżnić można trzy obszary ich zastosowania tj. do celów naukowych, przemysłowych i militarnych. Te ostatnie w obliczu ostatnich wydarzeń zbrojnych na granicach NATO nabierają coraz większego znaczenia. Do zadań naukowych zalicza się zbieranie danych o parametrach wody (zasolenie, temperatura), misje badawcze czy tworzenie szczegółowych map dna [1], [2], [3]. Jest to też poszukiwanie i wydobywanie obiektów archeologicznych [4], [5]. Zadania przemysłowe związane są z wydobywaniem zasobów naturalnych z dna mórz i oceanów (np. ropy naftowej), utrzymywaniem rurociągów lub kabli komunikacyjnych czy monitorowania przybrzeżnych farm rybnych [6], [7], [8]. Do zadań militarnych natomiast zaliczyć można zabezpieczanie rurociągów, infrastruktury portowej czy gazoportów.

Robotyka podwodna pomimo obecnego rozwoju technologicznego wciąż jest dużym wyzwaniem. Głównym tego powodem jest samo środowisko pracy. Woda skutecznie tłumi fale elektromagnetyczne przez co komunikacja z wykorzystaniem standardowych metod WiFi, GPS, Bluetooth jest niemożliwa. Jediną skuteczną metodą jest komunikacja akustyczna jednak i ona nie jest rozwiązaniem idealnym. Przesył danych kanałem akustycznym jest bardzo wolny i narażony na zakłócenia w postaci hałasu generowanego przez śruby napędowe statków czy odbicia dźwięku od powierzchni wody, dna morskiego, przeszkód znajdujących się w wodzie czy warstw wody o innej gęstości lub temperaturze. Dodatkowym ograniczeniem komunikacji akustycznej jest fakt, że jest to komunikacja half-duplex. W danej chwili tylko jeden hydromodem może nadawać, aby nie dochodziło do kolizji wiadomości w wodzie. Te zakłócenia i ograniczenia dotyczą nie tylko systemu komunikacji akustycznej ale wszystkich systemów opierających swoje działanie o fale akustyczne, czyli m.in. sonarów do wykrywania przeszkód. W przypadku sonarów pojawia się dodatkowy problem identyfikacji obiektów na obrazach akustycznych. To wszystko sprawia, że budowa pojazdu podwodnego zdolnego do wykonania prostej misji przeplłynięcia trasy między wyznaczonymi punktami pochłania

znaczne ilości środków pieniężnych i pomimo dostępności zaawansowanych sensorów wciąż jest bardzo wymagającym przedsięwzięciem również o charakterze naukowym. Wysokie koszty budowy pojazdów podwodnych wynikają między innymi z wysokich cen sensorów: DVL (ang. *Doppler Velocity Meter*) do pomiaru własnej prędkości, FOG (ang. *Fiber Optic Gyroscope*) do określenia kierunku, USBL (ang. *Ultra Short Baseline*) do określenia położenia, FSL (ang. *Forward Looking Sonar*) do obserwacji otoczenia w celu unikania przeszkód. Koszt dodatkowo rośnie wraz z każdym metrem zanurzenia pojazdu ze względu na rosnące ciśnienie wody. W przypadku awarii, uszkodzenia czy zalania pojazdu autonomicznego wyposażonego we wszystkie wymagane systemy koszty jego naprawy, o ile w ogóle jest to możliwe, są zazwyczaj bardzo wysokie.

Rozwiązaniem wydaje się być zastosowanie systemów wielorobotowych, dzięki czemu możliwe jest rozproszenie zadań i rozdzielenie drogiego systemu komunikacyjnych i nawigacyjnych pomiędzy mniej zaawansowanymi pojazdami co skutkuje mniejszym ryzykiem finansowym w przypadku awarii czy uszkodzenia jednego z nich. Dodatkowo proste i tanie pojazdy mogą służyć jako pojazdy zwiadowcze lub inspekcyjne w miejscach niebezpiecznych, gdzie wysłanie zaawansowanego i drogiego pojazdu jest zbyt ryzykowne. Budowa takiej grupy robotów jest bardzo ciekawym, ale też wymagającym przedsięwzięciem. Dlatego, pomimo intensywnego rozwoju systemów wielorobotowych powietrznych, naziemnych czy nawodnych, rozwój pojazdów podwodnych w tym zakresie jest nadal ograniczony. W niniejszej pracy termin system wielorobotowy, ze względu na fakt, że dotyczy pojazdów pływających został zastąpiony słowem ławica.

W ramach pracy doktorskiej zmodyfikowane zostały cztery identyczne pojazdy podwodne zbudowane w ramach pracy magisterskiej autora. Pojazdy te, zdolne do wspólnego ruchu z prędkościami do 1,2 m/s wykorzystują światło widzialne do lokalizacji innych pojazdów. Główny problem stanowi opracowanie algorytmu sterującego ruchem każdego z pojazdów, który pozwoli mu na utrzymanie się w ławicy niezależnie od zmian prędkości i kursu lidera prowadzącego ławicę. Każdy z pojazdów wchodzących w skład ławicy ma prostą konstrukcję i niski koszt wykonania, a co za tym idzie ma ograniczony do minimum zasób informacji o sobie i innych członkach ławicy. Jedynymi znanymi parametrami są własna głębokość zanurzenia oraz dystans i namiar względny na lidera. Jest to problem rzadko poruszany w literaturze ze względu na zbyt małą ilość parametrów, które można wykorzystać do opracowania skutecznego algorytmu sterowania, a prace które poruszają ten problem w większości bazują na metodach uczenia maszynowego. Kolejnym dużym problemem jest opracowanie modelu matematycznego ruchu pojazdu podwodnego, który możliwie precyzyjnie oddawałby zachowanie rzeczywistego pojazdu, co jest kluczowe, zakładając niewielki zasięg lokalizacji jaki daje światło widzialne pod wodą. Podjęta w pracy próba ujęcia dynamiki pojazdu pozwoli na oszacowanie przy jakich parametrach ruchu lidera możliwe jest utrzymanie się ławicy w formacji typu linia.

W rozdziale 2 przedstawiona została analiza zagadnienia w świetle danych literaturowych. W podrozdziale 2.1 opisany został zaproponowany w literaturze podział zachowań zbiorowych systemów wielorobotowych na cztery kategorie: przestrzenno-organizacyjne, nawigacyjne, podejmowanie decyzji i inne. W podrozdziale 2.2 rozpatrzone zostały metody stosowane w zbiorowym ruchu ławicy, będącym jednym z zachowań nawigacyjnych.

Następnie w podrozdziale 2.3 przedstawione zostały istniejące systemy wielorobotowe pojazdów podwodnych powstałe w ostatnich 15 latach, i zostały one zestawione pod kątem wykorzystywanych metod komunikacji i lokalizacji wewnątrz ławicy. W podrozdziale 2.4 opisane zostały specjalistyczne programy wykorzystywane do symulacji ruchu pojazdów podwodnych. W podrozdziale 2.5 opisano model matematyczny ruchu pojazdu podwodnego. W podrozdziale 2.6 przedstawiono podsumowanie stanu rozwoju systemów wielorobotowych pojazdów podwodnych.

Rozdział 3 przedstawia lukę badawczą, która wynika z wykonanej analizy literatury. Na jej podstawie zdefiniowana została teza pracy a następnie cel i zakres. Rozdział kończy opis przyjętej metodyki badawczej.

Rozdział 4 poświęcony został omówieniu opracowanej przez autora konstrukcji mechanicznej pojazdów, części elektronicznej i elektrycznej oraz oprogramowaniu pozwalającemu na zarządzanie działaniem pojazdów. Rozdział ten stanowi opis aspektu inżynierskiego wykonanych prac, które umożliwiły osiągnięcie celów naukowych.

W rozdziale 5 przedstawiony został proces opracowania modelu ruchu pojazdu, poczynając od modelu matematycznego w podrozdziale 5.1, poprzez identyfikację parametrów modelu w podrozdziale 5.2, kończąc na eksperymentalnej weryfikacji i kalibracji parametrów modelu w podrozdziale 5.4. Wykonana kalibracja parametrów modelu miała na celu zwiększenie zgodności ruchu symulowanego z rzeczywistym.

Rozdział 6 stanowi opis badań symulacyjnych, na opracowanym w rozdziale 5 modelu ruchu pojazdu, i eksperymentalnych na basenie pływackim z wykorzystaniem ławicy pojazdów HUUUV. W podrozdziale 6.1 przedstawione zostały założenia do opracowanego algorytmu śledzenia lidera, określone na podstawie przeprowadzonej analizy literatury. Następnie w podrozdziale 6.2 opisany został system lokalizacji optycznej pojazdów w ławicy. Podrozdział 6.3 prezentuje przeprowadzone badania symulacyjne, w ramach których opracowany został system sterowania pojazdu śledzącego umożliwiający mu podążanie za innym pojazdem. Podrozdział 6.4 opisuje realizację testów eksperymentalnych opracowanego algorytmu śledzenia lidera na basenie pływackim.

Pracę kończy rozdział 7, w którym przedstawiono podsumowanie i wnioski dotyczące zrealizowanych prac.

Rozdział 2

Analiza zagadnienia w świetle danych literaturowych

2.1 Taksonomia systemów wielorobotowych

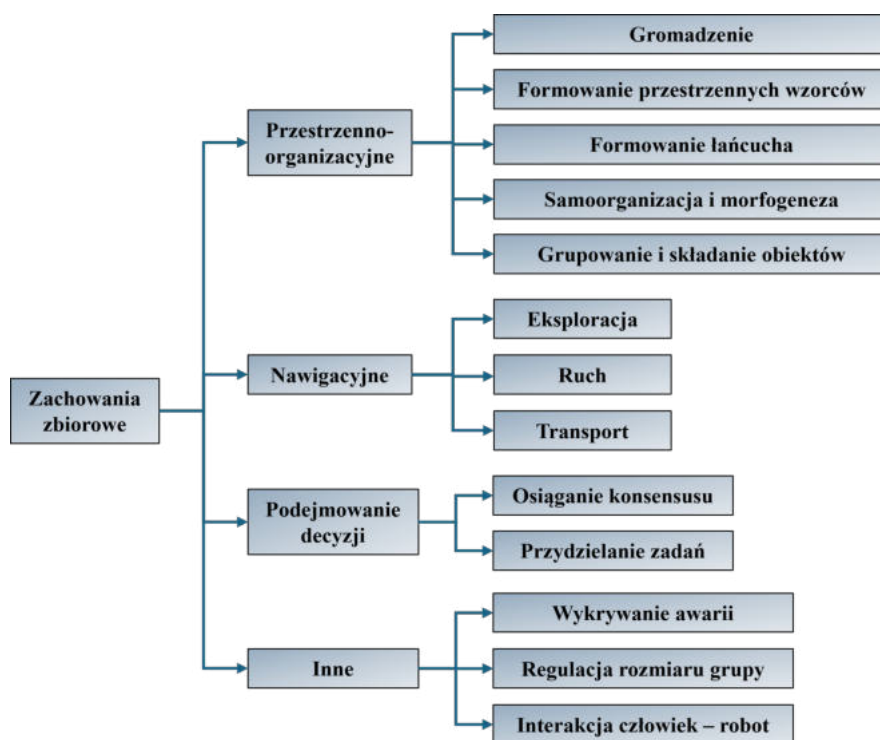
Jedną z pierwszych publikacji poruszających tą tematykę, a konkretniej proponującą taksonomię systemu wielorobotowych jest [9] z roku 1993. Wzięto w niej pod uwagę różnorodność z jaką można rozumieć system wielorobotowy i dokonano podziału ze względu na:

- rozmiar systemu wielorobotowego – pojedynczy robot (w kontekście systemu wielorobotowego bez kolektywu), para robotów (najprostsza forma grupy), kilka robotów (niewielka liczba robotów w większym środowisku roboczym), wiele robotów (duża liczba robotów w stosunku do środowiska roboczego),
- zasięg komunikacji - brak komunikacji (komunikacja niebezpośrednia poprzez obserwację zachowania innych robotów), komunikacja krótkiego zasięgu (w najbliższym otoczeniu), komunikacja nieskończona (niezależnie od odległości),
- topologia sieci komunikacyjnej - broadcast (każdy z każdym), adres (każdy robot może się komunikować z każdym innym w grupie z wykorzystaniem nazw lub adresów), drzewo (tylko poprzez odpowiednią hierarchię drzewa), graf (roboty są połączone w topologię grafu, czyli bardziej generalnej metody niż drzewa),
- koszt komunikacji - jeżeli mówimy o czasie procesowania wiadomości przez robota, komunikacja może być tania jeżeli w trakcie robot realizuje zadanie, lub kosztowna, jeżeli wstrzymuje robota przed wykonaniem jakiegoś zadania. W tym świetle wyróżniona jest darmowa (nic nie kosztuje), ruchu (komunikacja kosztuje każdego robota tyle co ruch który musi wykonać aby przesłać informację np. ruch robotów w roju imitujący taniec pszczoł do przekazania informacji), kosztowna (przesłanie informacji jest droższe niż przemieszczenie się jednej lokacji do drugiej), zerowa (brak komunikacji),
- zdolność do rekonfiguracji - rozumiana jako szybkość z jaką grupa robotów może zmieniać swoje przestrzenne ustawienie. Jest to ściśle powiązane z zasięgiem komunikacji poszczególnych robotów. Zmiany w układzie połączeń pomiędzy

jednostkami wpływają na relacje z najbliższymi sąsiadami i nie są równoważne ze zwykłym skalowaniem zasięgu komunikacji. W ten sposób wyróżnione zostały topologie: statyczna (topologia jest stała i niezmienna), skoordynowana (komunikacja tylko z wybranymi członkami z którymi się komunikują), dynamiczna (członkowie mogą się dowolnie zmieniać),

- zdolność obliczeniową jednostki – sumacyjny (nieliniowa jednostka sumacyjna - neurony), automat skończony, automat przesuwający, odpowiednik maszyny Turinga,
- według składu systemu wielorobotowego - jednorodny (każda jednostka jest taka sama), różnorodny (jednostki nie są takie same).

Wraz z rozwojem techniki i badań nad algorytmami wielorobotowymi jakie poczynione zostały od roku 1993, pojawiła się taksonomia, która prezentuje różne zachowania zbiorowe jakie pojawiają się w systemach wielorobotowych. Została ona opracowana i przedstawiona w publikacji przeglądowej [10] w roku 2013. Poddano w niej analizie ponad 190 pozycji literaturowych z lat 1980 - 2013 dotyczących pojazdów podwodnych, nawodnych, naziemnych i powietrznych. Autorzy zaproponowali taksonomię, którą przedstawia Rysunek 2.1. Zachowania zbiorowe robotów (ang. *Collective behaviors*) zostały podzielone na cztery omówione poniżej kategorie.



Rysunek 2.1. Taksonomia zachowań zbiorowych systemów wielorobotowych zaproponowana w 2013 roku [10].

Zachowania przestrzenno-organizacyjne (ang. *Spatially-organizing behaviors*) – koncentrują się na tym jak rozstawić roboty i obiekty w przestrzeni. Do tej grupy należą:

- gromadzenie – (ang. *Aggregation*) czyli grupowanie robotów na wybranym obszarze tak, aby mogły się ze sobą np. komunikować,
- formowanie przestrzennych wzorców – (ang. *Pattern formation*) regularne i powtarzalne rozmieszczanie robotów między sobą aby uformować określony wzorec,
- formowanie łańcucha – (ang. *Chain formation*) ustawienie robotów w taki sposób aby utworzyć łańcuch nawigacyjny lub komunikacyjny między dwoma punktami w przestrzeni,
- samoorganizacja i morfogeneza – (ang. *Self-assembly and morphogenesis*) roboty łączą się ze sobą np. w celu zwiększenia stabilności ruchu w nierównym terenie lub zwiększenia siły pociągowej,
- grupowanie i składanie obiektów – (ang. *Object clustering and assembling*) roboty grupują lub składają obiekty blisko siebie.

Zachowania nawigacyjne (ang. *Navigation behaviors*) – dotyczą koordynacji ruchu robotów w systemie wielorobotowym. Wyróżnione zostały tutaj:

- eksploracja – (ang. *Collective exploration*) roboty mają za zadanie rozstawić się na danym obszarze i wspólnie poruszać w celu skutecznego poszukiwania np. źródeł wycieków lub prowadzenia innych robotów,
- ruch – (ang. *Collective motion*) roboty poruszają się w formacji np. kłucza, tak jak stada ptaków,
- transport – (ang. *Collective transport*) grupa robotów musi współpracować aby przetransportować obiekt, ponieważ jest on np. za ciężki dla jednostki.

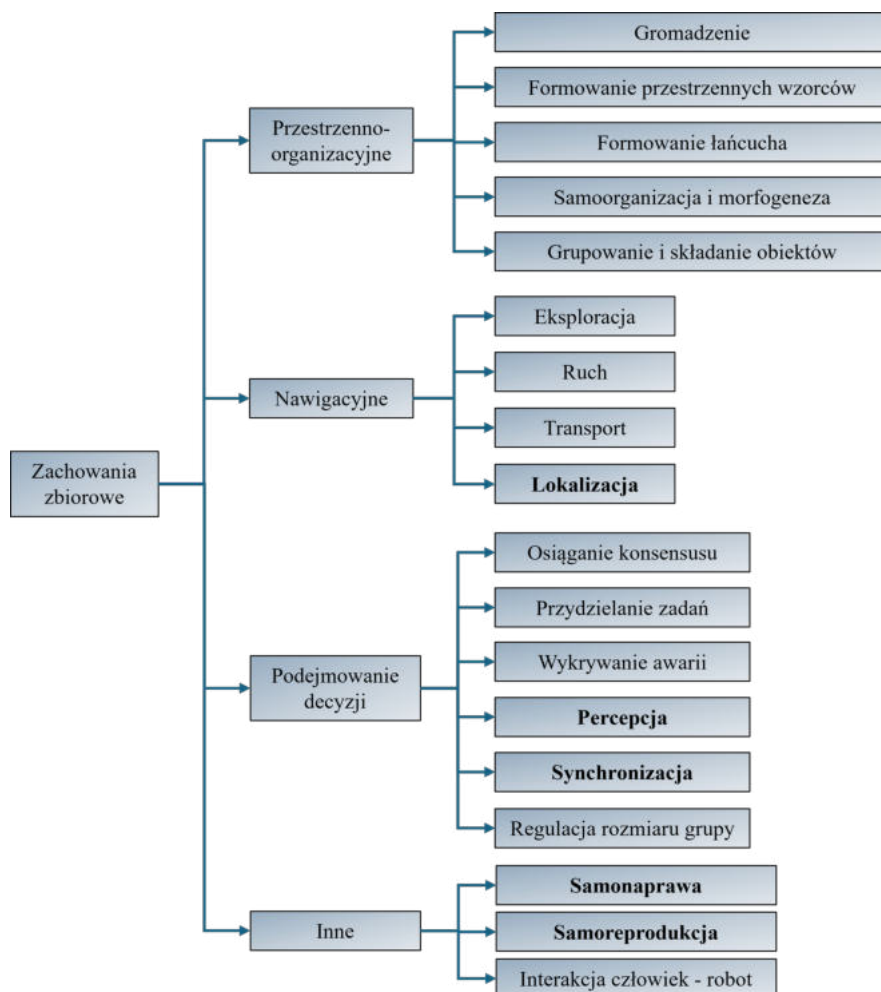
Zbiorowe podejmowanie decyzji – (ang. *Decision making behaviors*) przedstawiają wpływ jednych robotów na inne podczas podejmowania różnych decyzji. Wyróżnić tutaj można dwie kategorie:

- poszukiwanie konsensusu – (ang. *Consensus achievement*) maksymalizacja efektów i jakości działania systemu wielorobotowego poprzez znalezienie jednego najlepszego rozwiązania dla wszystkich jego członków spośród wielu alternatyw,
- przydzielanie zadań – (ang. *Task allocation*) maksymalizacja efektów i jakości działania systemu wielorobotowego poprzez dynamiczne przydzielanie różnych zadań jego członkom.

Inne zachowania zbiorowe – (ang. *Other collective behaviors*) inne typy zachowań zbiorowych, których nie można przyporządkować do powyższych kategorii:

- wykrywanie awarii – (ang. *Collective fault detection*) wykrywanie awarii i błędnych zachowań swoich i innych członków systemu,
- regulacja rozmiaru grupy – (ang. *Group size regulation*) nadmierna ilość robotów może negatywnie wpływać na jakość realizacji zadań,

- interakcja człowiek – robot – (ang. *Human-Robot interaction*) jest istotna do skutecznej kontroli zachowania systemu wielorobotowego i przydzielania zadań.



Rysunek 2.2. Taksonomia zachowań zbiorowych systemów wielorobotowych zaproponowana w 2020 roku [11].

Taksonomia [10] z roku 2013 została rozbudowana w artykule przeglądowym [11] z roku 2020 o dodatkowe obszary wyróżnione pogrubioną czcionką (Rysunek 2.2), a są to:

- lokalizacja – (ang. *Collective localization*) pozwala robotom określić swoją pozycję i orientację względem siebie poprzez ustanowienie lokalnego systemu współrzędnych w całym systemie. Są tu dwa podejścia:
 - tworzenie mapy środowiska i lokalizacja względem niej (SLAM - ang. *simultaneous localization and mapping*),
 - stacjonarne punkty orientacyjne o znanych pozycjach mogą być używane do lokalizacji względnej wobec nich. Aby uniknąć polegania na informacjach zewnętrznych, jako punkty orientacyjne można wykorzystać inne roboty,
- percepcja – (ang. *Collective perception*) łączy dane lokalnie zebrane przez roboty, tworząc ogólny obraz sytuacji. Umożliwia to systemowi wielorobotowemu podejmowanie decyzji zbiorowych,

- synchronizacja – (ang. *Synchronization*) wyrównuje częstotliwość i fazę zegarów robotów w grupie, co pozwala na synchronizację czasu działania. Przykładem może być zachowanie robotów analogiczne do niektórych gatunków żywych świetlików, które synchronizują swoje błyskania w procesie godowym,
- samonaprawa – (ang. *Self-healing*) jest to zdolność do odzyskiwania sprawności zbiorowej przez grupę robotów po awariach pojedynczych członków. Samonaprawianie ma na celu minimalizację wpływu awarii jednostek na resztę grupy,
- samoreprodukcja – (ang. *Self-reproduction*) pozwala grupie robotów na tworzenie nowych robotów (kopii samych siebie) lub odtwarzanie wzorca złożonego z wielu jednostek (roboty odwzorowują strukturę składającą się z wielu jednostek).

2.2 Zbiorowy ruch ławicy

Jednym z obszarów rozwoju robotyki podwodnej sklasyfikowanej w powyższej taksonomii jest zbiorowy ruch ławicy. Zarządzanie ruchem ławicy może odbywać się na kilka sposobów. Do najpopularniejszych metod należą:

- algorytm śledzenia lidera (ang. *leader-follower*) [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20],
- algorytm wirtualnej struktury (ang. *Virtual-Structure approach*) [21], [22],
- metoda oparta na zachowaniach (ang. *Behavior-Based method*) [23].

Metody te dotyczą organizacji ruchu ławicy i połączone są ściśle z systemem sterowania każdego robota, który dzieli się na podsystem sterowania wysokiego poziomu (ang. *high-level control*) [24] i podsystem sterowania niskiego poziomu (ang. *low-level control*) [25]. System wysokiego poziomu jak sama nazwa wskazuje odpowiedzialny jest za decyzje wysokopoziomowe, do których należą między innymi wyżej wymienione metody kontroli ławicy. Aby te decyzje miały przełożenie na konkretne ruchy pojazdu podwodnego konieczny jest system niskopoziomowy, którego zadaniem jest sterowanie napędami pojazdu poprzez metody m.in. takie jak:

- regulatory ślizgowe (ang. *Sliding Mode Control*) [13], [20], [22],
- regulatory predykcyjne (ang. *Model Predictive Control*) [14],
- uczenie przez wzmacnianie (ang. *Reinforcement Learning*) [16],
- sieci neuronowe – (ang. *Neural Networks*) [26],
- procesy decyzyjne Markowa (ang. *Markov Decision Process*) [15],
- sztuczne pola potencjału (ang. *Artificial Potential Fields*) [16] [17],
- teorię grafów (ang. *Graph Theory*) [12].

Jedną z popularniejszych wyżej wymienionych metod sterowania systemami wielorobotowymi jest algorytm śledzenia lidera. W większości pozycji literaturowych lider określany jest jako pojazd, wyposażony w zaawansowane systemy nawigacji i komunikacji, który prowadzi ławicę po wyznaczonej trasie, często określając położenie każdego

śledzącego pojazdu w formacji. Pojazd śledzący natomiast posiada mniej liczne i mniej zaawansowane wyposażenie, które umożliwia mu podążanie za liderem. Początki prac nad algorytmem wywodzą się z [27] i dotyczą wózków mobilnych z napędem różnicowym. W pracy tej algorytm śledzenia lidera został sprowadzony do dwóch metod: $(l - \psi)$ oraz $(l - l)$. Pierwsza metoda polega na kontroli dystansu l i namiaru względnego ψ do lidera, a druga zakłada śledzenie lidera i innego lidera/pojazdu śledzącego na podstawie odległości do nich obu $l - l$. Ważnym aspektem zaproponowanego algorytmu jest brak wykorzystania informacji o kursie lidera przez śledzący pojazd oraz brak komunikacji między pojazdami. Algorytm sterowania pojazdu śledzącego opierał się tylko na informacji pozyskanej z analizy obrazu. Zakładając brak poślizgu kół wózka, model dynamiki można sprowadzić do kinematyki oraz pominąć ruch w innych osiach niż te, nad którymi jest pełna kontrola poprzez napędy. To założenie pozwoliło w [28] na określenie warunków dotyczących prędkości ruchu i zakrzywienia trajektorii lidera zapewniających utrzymanie zadanego położenia względnego pojazdu śledzącego. Dołożenie informacji o kursie lidera zostało zrealizowane w [29] dzięki wyposażeniu każdego pojazdu w charakterystyczny wzorec, który pozwalał na określenie orientacji wykrytego pojazdu w obrazie z kamery. Próba zaadaptowania algorytmu śledzenia lidera z wózków mobilnych do pojazdów podwodnych i nawodnych jest niezwykle trudnym zadaniem, ze względu na silną nieliniowość zjawisk fizycznych zachodzących w środowisku wodnym (np. oporów hydrodynamicznych, wirów, prądów wody), co pociąga za sobą konieczność stosowania nieliniowych modeli matematycznych. Drugim problemem jest duża niepewność parametryczna tych modeli, które nie są w stanie precyzyjnie opisać zachowania pojazdu, ponieważ współczynniki hydrodynamiczne i masy towarzyszące zmieniają się w zależności od parametrów wody, ruchu pojazdu, ruchu samej wody w postaci prądów wodnych czy dryfu. W dostępnej literaturze algorytm śledzenia lidera dla pojazdów nawodnych lub podwodnych wymaga przesyłania dużej ilości danych między pojazdami takich jak prędkość ruchu, kurs i globalna pozycja. Jedną z publikacji podejmujących temat utrzymania formacji z wykorzystaniem algorytmu śledzenia lidera w pojazdach nawodnych jest [30]. Do symulacji ruchu pojazdów wykorzystano model Fossen'a [31], w którym uwzględniono wyżej wymienione problemy nieliniowości zjawisk fizycznych i niepewności modelu. Pojazd śledzący dzięki znajomości własnego położenia globalnego oraz położenia globalnego lidera i kursu lidera wyznacza w przestrzeni wirtualny cel, który próbuje osiągnąć z wykorzystaniem regulatorów kursu i prędkości opartych na algorytmie wstecznego całkowania (ang. *backstepping*). Założenie informacji o globalnej pozycji, orientacji i prędkości lidera i pojazdu śledzącego pozwoliło na rozwój algorytmu śledzenia lidera w kierunku niezawodności i stabilności działania przy różnych zakłóceniach zewnętrznych i niepewnościach modelu np. poprzez rozbudowę regulatora wstecznego całkowania o adaptacyjny regulator ślizgowy, co zostało zaprezentowane w [32] z wykorzystaniem pojazdów nawodnych. Obecnie systemy sterowania oparte o klasyczną teorię sterowania wspomagane są np. przez uczenie maszynowe czy systemy eksperckie. Takie podejście do realizacji algorytmu śledzenia lidera przedstawione zostało w [33]. Klasyczny regulator prędkości i kursu otrzymuje polecenia od podwójnej głębokiej sieci Q (ang. *double Deep Q-Network*). Sieć na podstawie aktualnego stanu pojazdu określa, która z 9 akcji powinna zostać wykonana. W ten sposób realizowany

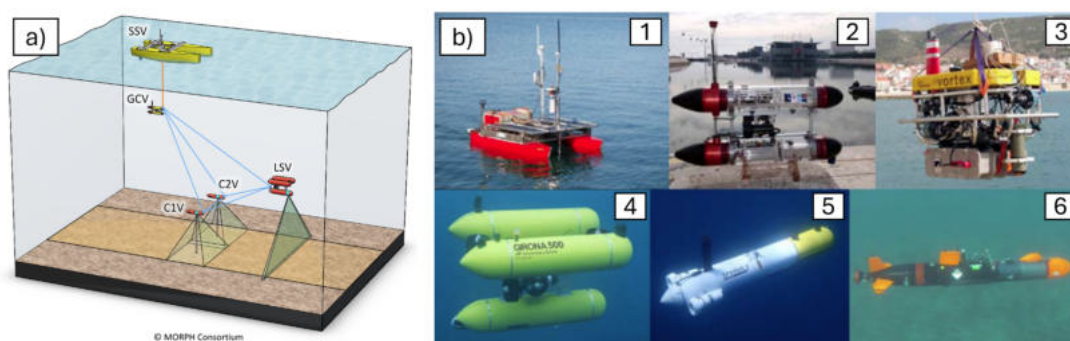
jest algorytm śledzenia lidera, w którym lider jest pojazdem nawodnym, a pojazd śledzący pojazdem podwodnym. Pełna informacja o globalnej pozycji, orientacji i prędkości pojazdów jest, ze względu na charakter środowiska jakim jest woda, niedostępna albo silnie ograniczona. W artykule [34] przedstawiony został algorytm śledzenia lidera dla pojazdów podwodnych, w którym pojazd śledzący otrzymuje od lidera tylko informację o jego pozycji i orientacji globalnej, bez danych o jego prędkości. Pojazd śledzący z wykorzystaniem obserwatora prędkości sam ją szacuje w czasie rzeczywistym i wykorzystuje w algorytmie sterowania. Sam algorytm sterowania oparty został o metodę sterowania w linii wzroku LOS (ang. *Line-of-sight*), a żeby nie przekroczyć ograniczeń kąta i dystansu wykorzystana została metoda asymetrycznej barierowej funkcji Lyapunova (BLF ang. *Barrier Lyapunov Function*). W przypadku zakłóceń kanałów komunikacyjnych napowietrznych czy podwodnych wyżej wymienione metody tracą zastosowanie. W pracach [35], [36] zaproponowany został algorytm śledzenia lidera, w którym pojazdy śledzące posiadają bardzo ograniczone informacje o liderze, przez co ich zadanie sprowadza się do utrzymania dystansu do lidera w trakcie jego ruchu po zadanej trajektorii i unikanie kolizji z nim i z innymi pojazdami śledzącymi. Problem sterowania zachowaniem pojazdów śledzących jest niezwykle trudnym zadaniem, dlatego wykorzystany został do tego algorytm neuro-ewolucyjny zwany ang. *Hill Climb Assembler Encoding*.

2.3 Ławice podwodne - istniejące rozwiązania

Wspomniane na wstępie trudności, z którymi musi sobie radzić robotyka podwodna sprawiają, że pomimo rozwoju zaawansowanych systemów komunikacji akustycznej, nawigacji podwodnej, sonarów akustycznych zdolnych do wykrywania przeszkód i algorytmów sterowania tematyka ławic robotów podwodnych wciąż jest na wczesnym etapie rozwoju. W artykule [37] z roku 2021 przedstawionych zostało pięć dużych projektów dotyczących ławic robotów podwodnych, które były realizowane w ostatnich latach. W zestawieniu uwzględnione zostały także: projekt będący wynikiem pracy doktorskiej [38], ławica H-SURF, której budowa rozpoczęła się w 2022 roku, a prace nad nią wciąż trwają oraz projekt SABUVIS2, który realizowany jest od 2022 roku, a którego autor niniejszej pracy jest uczestnikiem.

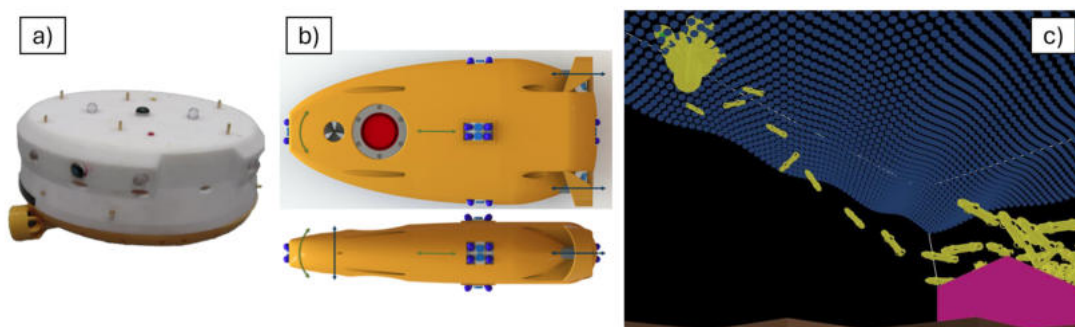
EC MORPH - (ang. *Marine robotic system of self-organizing, logically linked physical nodes*) (Rysunek 2.3) – finansowany ze środków Unii Europejskiej w latach 2012 - 2016. Całkowita kwota projektu to 8,5 mln €. Projekt polegał na stworzeniu ławicy składającej się z 5 robotów z przypisanymi indywidualnie rolami. Liderem ławicy był pojazd „GCV Medusa”. Poruszając się pod powierzchnią wody prowadził resztę pojazdów z dala od dna morskiego. Posiadał zaawansowane systemy nawigacyjne umożliwiające mu precyzyjne podążanie po zadanej ścieżce poniżej fal morskich. Ta dokładność w podążaniu po zadanej trasie wykorzystywana była przez pojazd „LSV G500” do utrzymania stałej prędkości i zanurzenia wymaganego przez wielowiązkowy sonar zbierający dane o kształcie dna. Za „LSV G500” w stałej odległości podążały pojazdy „C1V Sparus II” i „C2V SeaCat”, których zadaniem było nagrywanie obrazu dna z wykorzystaniem kamer. Aby ławica

miała ciągły kontakt z operatorem, po powierzchni poruszał się pojazd „SSV Charlie” w celu zapewnienia komunikacji radiowej dalekiego zasięgu. Efekty kolejnych etapów prac przedstawiono w [39], [40], [41].



Rysunek 2.3. Schemat działania łańcucha w trakcie precyzyjnego mapowania dna morskiego (a), pojazdy podwodne wchodzące w skład łańcucha (b) kolejno: SSV Charlie (1), GCV Medusa (2), Vortex (3), LSV G500 (4), CV Sparus II (5) i C2V SeaCat (6) [39], [40].

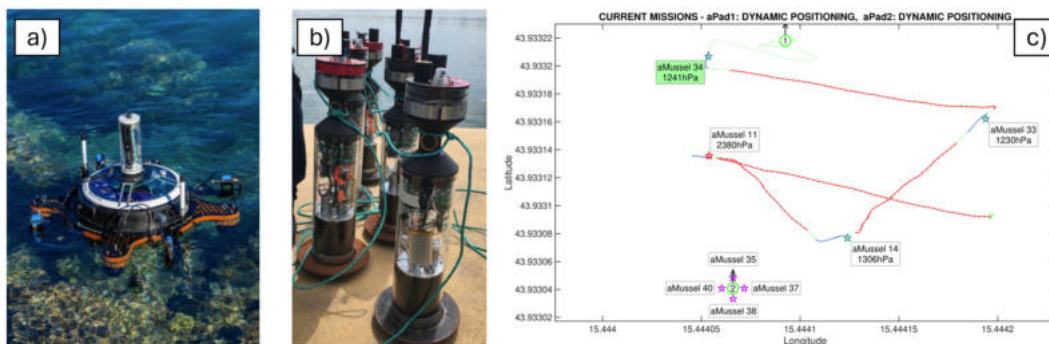
CoCoRo - (ang. *Collective Cognitive Robots*) (Rysunek 2.4) finansowany ze środków Unii Europejskiej w latach 2011 - 2014. Całkowita kwota projektu to 3,7 mln €. Głównym zadaniem łańcucha było przeszukiwanie obszaru podwodnego w celu hipotetycznego znajdowania np. wraków statków lub samolotów z wykorzystaniem sensorów magnetycznych i przekazywania informacji na powierzchnię o położeniu znalezisk. Roboty typu „Jeff” to poszukiwacze, które przeszukują dno zbiornika. W momencie wykrycia obiektu zbierają się nad nim w większej grupie i w tym momencie do akcji wkraczają roboty „Lili”, które mają za zadanie uformować łańcuch do przesyłania informacji między robotami „Jeff” a operatorem znajdującym się na powierzchni [42], [43].



Rysunek 2.4. Pojazd Lily (a), Jeff (b), koncepcja działania łańcucha (c) - tworzenie łańcucha łączności (Lily) między stacją bazową a pojazdami przydennymi (Jeff) [42], [43].

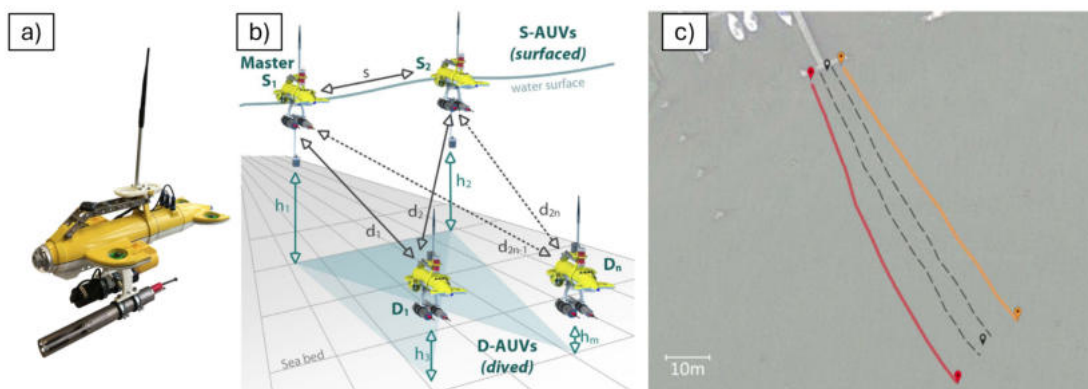
subCULTron - (ang. *Submarine Cultures Perform Long-Term Robotic Exploration Of Unconventional Environmental Niches*) (Rysunek 2.5) finansowany ze środków Unii Europejskiej w latach 2015 - 2019. Całkowita kwota projektu to 3,9 mln €. Projekt subCULTron był kontynuacją projektu CoCoRo. Składał się z trzech typów pojazdów. Pojazd aPad jest to ruchoma stacja nawodna wyposażona w GNSS i panele słoneczne oraz stacje dokujące, aby umożliwić robotom podwodnym uzupełnianie energii elektrycznej. Urządzenia aMussel to roboty, których głównym zadaniem było spoczywanie

na dnie w celu utworzenia punktów orientacyjnych dla pojazdów aFish. Urządzenie aMussel dzięki systemowi zmiany pływalności wynurzały się na powierzchnię tylko w celu uzupełnienia energii elektrycznej. Pojazd aFish to najbardziej aktywny robot przeznaczony do badania terenu i zbierania danych. Pojazdy aFish'e komunikowały się z pojazdami aPad'ami na powierzchni i urządzeniami aMussel'ami na dnie w celu określenia swojego położenia. Głównym zadaniem ławicy było gromadzenie dużych i długoterminowych danych środowiskowych. [44], [45], [46]. Prezentowane w literaturze wyniki eksperymentalne ograniczają się tylko do pojazdów aPad i urządzeń aMussel.



Rysunek 2.5. Pojazd aPad (a), urządzenie aMussel (b), weryfikacja eksperymentalna ruchu z rozstawiania aMussel's przez aPad w wybranych punktach GPS (c) [45].

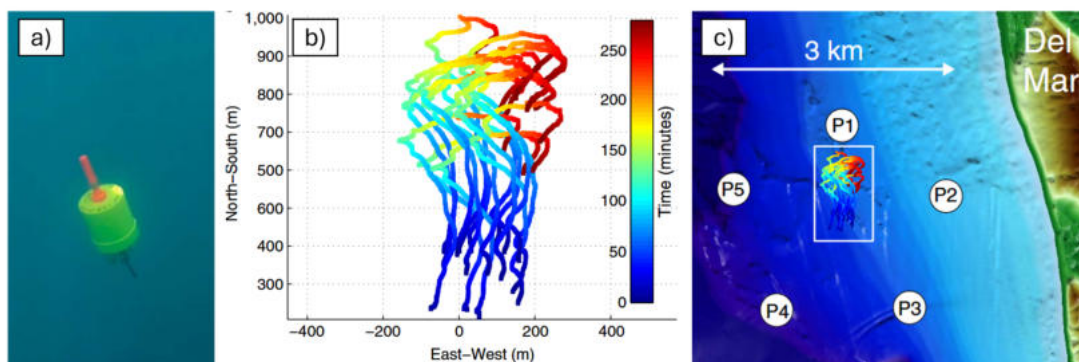
MONSUN - (Rysunek 2.6) Powstały na University of Lübeck Institute of Computer Engineering w latach 2014-2018. Projekt miał na celu budowę modułowego robota podwodnego zdolnego do pracy w ławicy, przeznaczonej do monitorowania środowiska podwodnego portów oraz zadań inspekcyjnych. Zbudowano ławicę składającą się z czterech pojazdów. Misja, którą roboty miały zrealizować polegała na przepłynięciu w formacji V po pewnej trasie. Dwa pojazdy pływały na powierzchni w celu precyzyjnego określenia położenia za pomocą systemu GPS i przekazywały drogą akustyczną sygnały do dwóch pojazdów płynących w zanurzeniu [47], [48], [49].



Rysunek 2.6. Pojazd MONSUN (a), formacja ruchu dwóch liderów i dwóch followerów (b), weryfikacja eksperymentalna ruchu w formacji (c) [47].

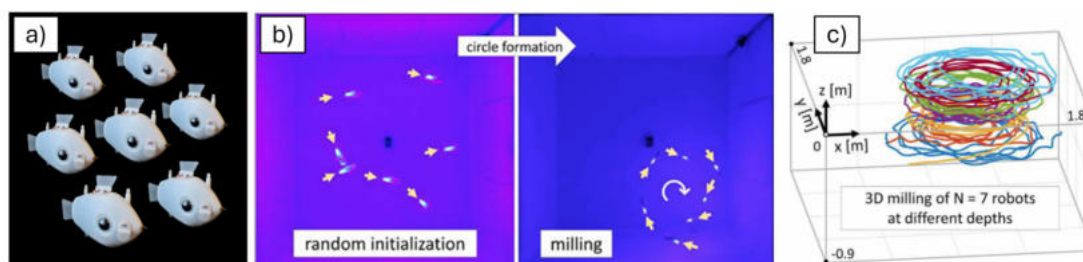
M-AUEs - Mini-Autonomous Underwater Explorer (Rysunek 2.7) - finansowany ze środków National Science Foundation USA. Całkowita kwota projektu 1 mln \$. Wykonany w Scripps Institution of Oceanography at the University of California San

Diego, 2009 r. Projekt ten, pomimo że nie jest ściśle związany z pojazdami, to wpisuje się w obszar naukowy ławic podwodnych. M-AUE (Mini-Autonomous Underwater Explorer) to małe urządzenie o objętości $1,5 dm^3$, którego zadaniem jest badanie ruchów poziomych fal przybrzeżnych. W ramach projektu zbudowanych zostało 16 takich Explorerów, które wspólnie wrzucone do wody zanurzały się na zadaną głębokość i poruszały wraz z falami tworząc poziomą mapę pływów [50].



Rysunek 2.7. Eksplorator M-AUE (a), trajektoria ruchu 16 Explorerów wynikająca z pływów przybrzeżnych (b) i przedstawienie trajektorii na mapie wybrzeża (c) [50].

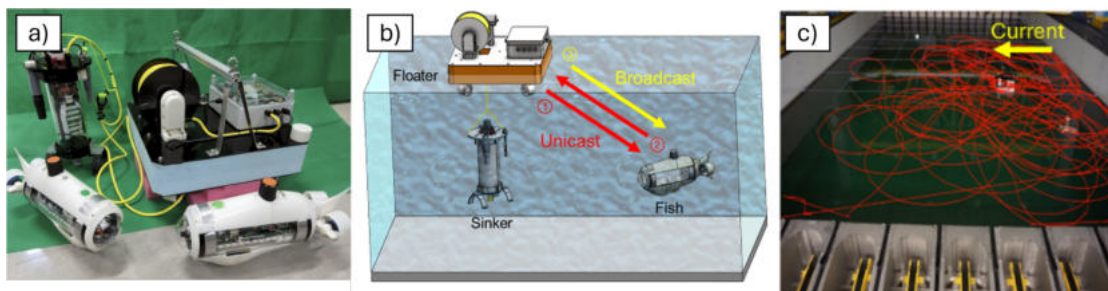
BLUEBOT SWARM - (3D Swarm of Biologically-inspired Little Underwater Explorers) (Rysunek 2.8) finansowany z ONR Science of Autonomy, Wyss Institute, Amazon ML Research Award. Realizowany na Harvard University od 2017 roku. Projekt zakłada wykorzystanie dużej, sięgającej 30 osobników ławicy BLUEBOTów w celu badania zachowań stadnych ryb. BLUEBOTY wyposażone są jedynie w system wizyjny do określania własnego położenia w stadzie. Aby określenie położenia było możliwe, każdy z robotów posiada trzy świecące niebieskie punkty. Bazując na analizie obrazu, losowo rozmieszczone w basenie roboty zaczynają formułować ławicę. Oprócz ruchu w formacji, prowadzone były również testy m.in. nad algorytmami przeszukiwania terenu [51], [52].



Rysunek 2.8. Ławica Bluebot'ów (a), nagrane kamerą formowanie ławicy bluebotów w basenie (b), analiza wyników formowania ławicy (c) [51].

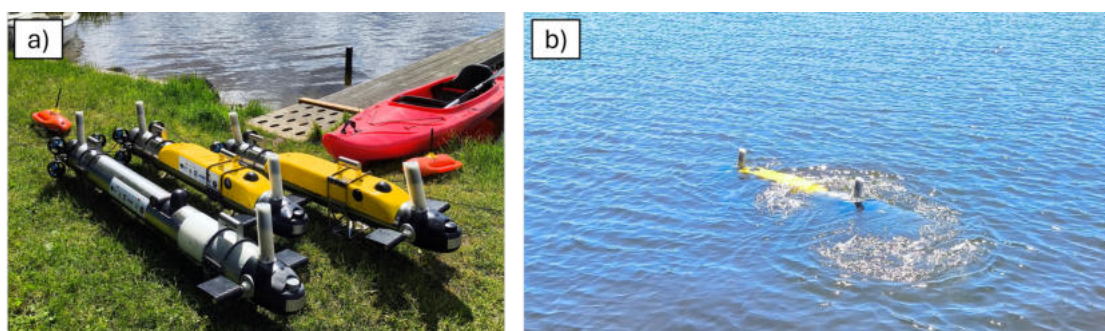
H-SURF - (Heterogeneous Swarm of Underwater Robotic Fish) (Rysunek 2.9) finansowany przez Technology Innovation Institute (Abu Dhabi), a zrealizowany na Khalifa University, projekt w skład którego wchodzi trzy typy pojazdów: platforma na powierzchni, platforma zanurzona i 30 pojazdów podwodnych. Głównymi systemami komunikacji są akustyka i optyka. Na obecnym etapie rozwoju tego projektu wykorzystywana jest akustyka, do sterowania w czasie rzeczywistym oraz do tworzenia

skoordynowanych ruchów pojazdów np. w zadaniu okrążania platformy podwodnej po okręgu z zadaniem promieniem [53], [54], [55], [56], [57].



Rysunek 2.9. Ławica H-SURF (a), schemat działania poszczególnych urządzeń w ławicy (b), badania eksperymentalne trajektorii ruchu pojazdu H-SURF (c) [54], [57].

SABUVIS II - (Swarm of Biomimetic Underwater Vehicle for Underwater ISR) (Rysunek 2.10) to międzynarodowy projekt badawczy realizowany w ramach Europejskiej Agencji Obrony (EDA), który ma na celu opracowanie technologii ławicy autonomicznych pojazdów podwodnych na VI poziomie gotowości technologicznej. Projekt jest realizowany przez konsorcjum w składzie: Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni (lider konsorcjum), Politechnika Krakowska, Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów w Warszawie Sieć Badawcza Łukasiewicz, we współpracy z partnerami z Niemiec, Słowenii i Portugalii.



Rysunek 2.10. Polska ławica w projekcie SABUVIS złożona z dwóch MAUV (z żółtymi obudowami) i LAUV (a), MAUV w trakcie strojenia układu sterowania (b).

Podsumowanie powyższej analizy istniejących ławic podwodnych przedstawia Tabela 2.1. Projekty te dotyczą różnych obszarów robotyki podwodnej i zestawień można je na wiele sposobów np.:

- W zależności od wielkości pojazdów i obszaru ich działania - począwszy od małych ławic takich jak CoCoRo, BLUEBOT SWARM czy H-SURF, przeznaczonych do badań w warunkach laboratoryjnych (basen – środowisko pracy w jednym kolorze) i na małym obszarze (małe rozmiary robotów) poprzez projekty takie jak subCULTron, w których celem były testy w zbiorniku wodnym w obszarze portowym kończąc, na projektach pokroju EC MORPH, MONSUN, SABUVIS2 czy M-AUEs, które dedykowane były do obszarów portowych lub wybrzeży o znacznie większej powierzchni,

- W zależności od metody komunikacji - najczęściej stosowana jest metoda akustyczna EC MORPH, MONSUN, subCULTron, H-SURF, SABUVIS2 następnie optyczna z wykorzystaniem światła o jednolitej barwie (niebieska lub zielona) i sensorów natężenia światła CoCoRo, subCULTron, BLUEBOT SWARM, H-SURF. Kończąc na ławicy M-AUEs korzystającej z komunikacji radiowej jednak jest to komunikacja, która jest wykorzystywana na powierzchni. Po zanurzeniu przez określony czas Explorery pozostają pod wodą bez możliwości wymiany danych z innymi Explorerami,
- Ze względu na stopień zaawansowania systemów komunikacji i nawigacji - najmniej wymagające są BLUEBOT SWARM, które posiadają jedyne kamery i jednobarwne diody LED. Następne są CoCoRo, M-AUEs i H-SURF wyposażone w dodatkowe sensory do pomiaru parametrów otaczającej wody i obiektów znajdujących się wokół. Kolejne są projekty korzystające z komunikacji akustycznej subCULTron i MONSUN, a najbardziej zaawansowane i kosztowne są projekty EC MORPH i SABUVIS2 wykorzystujące sensory typu DVL czy FOG do precyzyjnej nawigacji.

Tabela 2.1: Analiza wymienionych w pracy projektów ławic ze względu na liczbę pojazdów, typ zachowań zbiorowych, sposobów komunikacji wewnątrz ławicy i sensorów oraz urządzeń wykorzystywanych przez pojazdy.

Projekt	Pojazdy	Liczba pojazdów	Komunikacja	Sensory i urządzenia	Typ zachowań zbiorowych
EC MORPH	Charlie, Medusa, Vortex, G500, Sparus II, SeaCat	5	Akustyczna	Sonar, Kamera, IMU, GPS, DVL, AHRS	Ruch w formacji, Wspólna nawigacja
CoCoRo	Lily bot, Jeff bot	42	Niebieskie światło i sensory natężenia światła	ciśnienia, IMU, pola elektrycznego	Ruch w formacji, Wspólne poszukiwanie,
subCULTron	aMussel, aFish, aPad	120	Akustyczna, zielone światło i sensory natężenia światła, WiFi, Bluetooth	GPS, IMU, Kamera, ciśnienia, temperatury, natężenia światła, pola elektrycznego	Wspólne poszukiwanie i eksploracja
MONSUN	MONSUN	5	Akustyczna, WiFi	IMU, GPS, ciśnienia, temperatury, przewodności	Ruch w formacji
M-AUEs	M-AUE, pinger GPS,	21	Radiowa (RF)	GPS, ciśnienia, temperatury, hydrofon, akcelerometr, kompas	Wspólna eksploracja
BLUEBOT SWARM	BLUEBOT	30	Niebieskie światło i kamera		Ruch w formacji, Wspólna nawigacja
H-SURF	floater, sinker, fish	32	Akustyczna	IMU, GPS, temperatury, przewodności, kamera	Ruch w formacji, Wspólna nawigacja
SABUVIS	LAUV, MAUV	3	Akustyczna	IMU, GPS, ciśnienia, DVL, FOG, kamera	Ruch w formacji

2.4 Badania symulacyjne algorytmów ławicowych

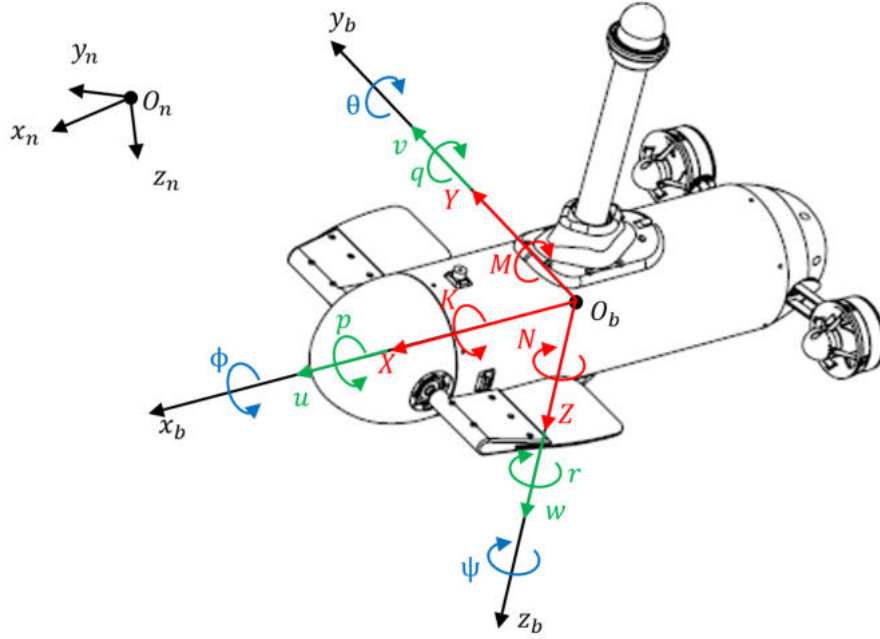
Badania algorytmów ławicowych w większości prowadzone są w środowiskach symulacyjnych ze względu na trudność w realizacji testów eksperymentalnych i brak dostępnych skutecznych metod pomiarowych. Woda uniemożliwia komunikację poprzez fale elektromagnetyczne, dlatego gdy pojazd zanurzy się pod powierzchnię wody traci łączność WiFi, Bluetooth i GPS, a fale radiowe o niskiej częstotliwości są wykorzystywane jedynie przez duże okręty podwodne i stacje naziemne [58], [59]. W związku z tym nie ma łatwego i taniego sposobu na określenie gdzie się w trakcie eksperymentu dany pojazd znajduje pod wodą. Szeroko stosowanym rozwiązaniem jest odometryczne wyznaczanie przemieszczenia względnego z wykorzystaniem DVL i FOG (INS), które może być transformowane do globalnego układu odniesienia (szerokości i długości geograficznej oraz głębokości zanurzenia). Drugim sposobem jest wykorzystanie systemów hydroakustycznych takich jak LBL (ang. *Long Baseline*), SBL (ang. *Short Baseline*) czy USBL (ang. *Ultra Short Baseline*). Oba podejścia (odometryczne i hydroakustyczne) są kosztowne. Dlatego głównym sposobem testów algorytmów ławicowych są badania symulacyjne. W większości dostępnej literatury anglojęzycznej, stosuje się modele pojazdów oparte o model Fossen’a [13], [14], [60], [61] lub uproszczone jedynie do kinematyki modele ruchu [12], [15], [21]. W pracy [38] model ruchu opiera się o proste równania łączące siłę generowaną przez napęd i opór hydrodynamiczny, bez uwzględnienia mas towarzyszących, sił Coriolisa i sił dośrodkowych, które opisane są w modelu Fossen’a. Podobne uproszczone podejście do modelowania ruchu pojazdu zastosowano w [42]. Często, aby możliwie maksymalnie uprościć model, przyjmowane są założenia, niemożliwe do spełnienia w warunkach rzeczywistych takie jak: szybka i niezawodna komunikacja akustyczna między pojazdami, czy niezakłócone działanie sensorów. To wszystko sprawia, że tylko nieliczne publikacje bazują na danych eksperymentalnych, a wyniki symulacji nie są weryfikowane w warunkach rzeczywistych.

Symulacje, badające algorytmy ławicowe, w większości literatury przeprowadzane są w programie Matlab [62], co prezentują publikacje [21], [22], [63], [64], [65], [66]. Istnieje możliwość wykorzystania dodatkowych specjalistycznych programów w połączeniu ze środowiskiem Matlab, takich jak UWSim (The UnderWater Simulator) [67] do wizualnego przedstawienia ruchu pojazdów w środowisku 3D, co zaprezentowano w [60]. W publikacji [68] symulator ruchu grupy pojazdów podwodnych został zrealizowany w programie Blender, w oparciu o Bullet Physics SDK [69] będący solverem równań dynamiki. W pracach [35] i [36] symulacje wykonano w oprogramowaniu MOOS-IvP [70] stosowanego w robotyce podwodnej z wykorzystaniem modułu uSimMarine [71]. W projekcie CoCoRo [42] do symulowania ruchu ławicy wykorzystane zostało środowisko NetLogo [72]. Ostatnim środowiskiem przedstawionym w ramach analizy literaturowej jest Gazebo [73], które zostało wykorzystane w publikacjach [16], i [74].

2.5 Model ruchu pojazdu podwodnego

Ruch pojazdu podwodnego jest ruchem o sześciu stopniach swobody (6DOF ang. *Degrees of Freedom*). Rysunek 2.11 prezentuje przyjętą notację SNAME1950 (ang. *The*

Society of Naval Architects and Marine Engineers) przez Amerykańskie Stowarzyszenie Inżynierów Techniki Morskiej w 1950 roku [75]. Układ (O_b, x_b, y_b, z_b) jest ruchomym układem współrzędnych kartezjańskich związanym z pojazdem, a indeks dolny pochodzi od przyjętego środka ciała (ang. *body*). Układ (O_n, x_n, y_n, z_n) jest nieruchomym globalnym układem współrzędnych kartezjańskich a indeks dolny pochodzi od NED (ang. *North-East-Down*), określającego orientację tego układu. Oś x_n jest skierowana na północ, oś y_n na wschód a oś z_n w dół, zgodnie z kierunkiem działania siły ciężenia.



Rysunek 2.11. Oznaczenia położenia i prędkości liniowych i kątowych oraz sił i momentów zgodnie z notacją SNAME1950 [75] na przykładzie pojazdu HUUV .

Bazując na pracy Fossen'a [31], aby opisać ruch pojazdu podwodnego w wodzie, należy zacząć od układu równań ruchu ciała sztywnego (2.1) zgodnie z notacją SNAME1950 [75].

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} \\
 + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
 + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
 + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

gdzie:

$[X, Y, Z, K, M, N]^T$ - siły i momenty sił działające na ciało względem przyjętego O_b ,

$[u, v, w, p, q, r]^T$ - prędkości liniowe i kątowe odpowiednio w osiach z_b, y_b, z_b i wokół tych osi,

$[x_G, y_G, z_G]^T$ - odległość między przyjętym środkiem O_b a środkiem ciężkości COG.

Równanie to przedstawia sytuację, w której osie przyjętego przez nas układu ciała sztywnego (O_b, x_b, y_b, z_b) nie pokrywają się z głównymi płaszczyznami symetrii ciała przez co w równaniach pojawiają się momenty dewiacyjne $I_{xy}, I_{xz}, I_{yx}, I_{yz}, I_{zx}, I_{zy}$ i środek O_b nie jest w środku ciężkości ciała COG co skutkuje odległościami x_G, y_G i z_G . Tak rozbudowane równanie można uprościć na dwa sposoby:

- przyjmując, że osie układu O_b są zgodnie zorientowane z głównymi osiami bezwładności jednak środek O_b nie jest w COG. W takiej sytuacji układ równań (2.1) sprowadza się do (2.2).

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

- przyjmując, że osie układu O_b są zgodne z głównymi osiami bezwładności i środek O_b jest w COG. W takiej sytuacji układ równań (2.1) sprowadza się do (2.3).

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - vr + wq) &= X \\
 m(\dot{v} - wp + ur) &= Y \\
 m(\dot{w} - uq + vp) &= Z \\
 I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr &= K \\
 I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp &= M \\
 I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq &= N
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Równanie (2.1) można przedstawić w uproszczonej macierzowej formie zapisu (2.4).

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = \tau_{RB} \tag{2.4}$$

gdzie:

$\tau_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ - uogólniony wektor sił i momentów zewnętrznych,

$\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$ - wektor prędkości liniowych i kątowych w układzie (O_b, x_b, y_b, z_b),

M_{RB} - macierz inercji ciała sztywnego,

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}$$

C_{RB} - macierz Coriolisa i sił dośrodkowych.

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_G q + z_G r) & -m(x_G q - w) & -m(x_G r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_G p + w) & m(z_G r + x_G p) & -m(y_G r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G p - v) & -m(z_G q + u) & m(x_G p + y_G q) \\ -m(y_G q + z_G r) & m(y_G p + w) & m(z_G p - v) & 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_z r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_y q \\ m(x_G q - w) & -m(z_G r + x_G p) & m(z_G q + u) & I_{yz} q + I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r - I_{zy} q + I_x p \\ m(x_G r + v) & m(y_G r - u) & -m(x_G p + y_G q) & -I_{yz} r - I_{xy} p + I_y q & I_{xz} r + I_{zy} q - I_x p & 0 \end{bmatrix}$$

Kolejnym etapem budowania równań ruchu pojazdu podwodnego jest analiza uogólnionego wektora sił i momentów τ_{RB} z równania (2.4). Wektor ten przedstawia wszystkie siły i momenty działające na ciało sztywne, a jego składowe w przypadku pojazdu poruszającego się w wodzie przedstawia równanie (2.5).

$$\tau_{RB} = \tau_H + \tau_E + \tau \quad (2.5)$$

gdzie:

τ_H - wektor sił i momentów hydrodynamicznych (masy towarzyszące, opory hydrodynamiczne, siły przywracające),

τ_E - wektor sił i momentów pochodzących ze środowiska (prądy, fale, wiatr),

τ - wektor sił i momentów pochodzących od napędów (pędniki, stery).

Siły i momenty pochodzące ze środowiska, którymi są m.in prądy, fale i wiatr w podstawowym modelu ruchu nie są konieczne i nie są uwzględniane gdy pojazd porusza się w spokojnej wodzie stojącej. Siły i momenty pochodzące od napędów definiuje się w formie wektora sił i momentów a generują go m.in pędniki śrubowe, stery czy napędy biomimetyczne. Kluczowy dla modelu ruchu pojazdu poruszającego się w wodzie jest wektor sił i momentów hydrodynamicznych τ_H . Opisuje go równanie (2.6).

$$\tau_H = -M_A \dot{\nu} - C_A(\nu) \nu - D(\nu) \nu - g(\eta) \quad (2.6)$$

gdzie:

M_A - macierz mas towarzyszących,

$C_A(\nu)$ - macierz sił Coriolisa mas towarzyszących,

$D(\nu)$ - macierz tłumienia hydrodynamicznego,

$g(\nu)$ - wektor sił przywracających (siły ciężkości i wyporu).

Masy towarzyszące M_A (2.7), a dokładniej masy i momenty bezwładności wody modeluje się jako stałe współczynniki których efekt pojawia się, gdy pojawia się przyspieszenie, także jest to liniowa zależność siły od przyspieszenia pojazdu.

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Hydrodynamiczne siły Coriolisa i siły dośrodkowe $C_A(\nu)$ (2.8) wynikają z ruchu ciała sztywnego w płynie.

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

gdzie współczynniki macierzy równają się:

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r$$

$$a_2 = Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r$$

$$a_3 = Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r$$

$$b_1 = K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r$$

$$b_2 = M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r$$

$$b_3 = N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r$$

Wektor sił przywracających $g(\eta)$ (2.9) zawiera siły hydrostatyczne, które wynikają z siły ciężkości W przyłożonej w punkcie COG o współrzędnych x_G, y_G, z_G i siły wyporu B przyłożonej w punkcie COB o współrzędnych x_B, y_B, z_B .

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)\sin(\theta) \\ -(W - B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ -(W - B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(y_G W - y_B B)\cos(\theta)\cos(\phi) + (z_G W - z_B B)\cos(\theta)\sin(\phi) \\ (z_G W - z_B B)\sin(\theta) + (x_G W - x_B B)\cos(\theta)\cos(\phi) \\ -(x_G W - x_B B)\cos(\theta)\sin(\phi) - (y_G W - y_B B)\sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Ostatnim składnikiem równania (2.6) jest $D(\nu)$ (2.10) czyli macierz tłumienia hydrodynamicznego.

$$D(\nu) = D_P(\nu) + D_S(\nu) + D_W(\nu) + D_M(\nu) \quad (2.10)$$

gdzie:

$D_P(\nu)$ - tłumienie drgań ciała sztywnego wywołanych oscylacjami wody (ang. *radiation-induced potential damping due to forced body oscillations*),

$D_S(\nu)$ - liniowe tarcie w wyniku poruszających się laminarnie przyściennych warstw wody i kwadratowe tarcie turbulentnie poruszających się warstw przyściennych wody,

$D_W(\nu)$ - tłumienie dryfu wywołanego falami (ang. *wave drift damping*),

$D_M(\nu)$ - tłumienie spowodowane odrywaniem wirów (ang. *vortex shedding - Morison's equation*).

Tłumienie hydrodynamiczne w przypadku opisu ruchu ciała sztywnego przedstawia się w formie dwóch macierzy liniowej $D_L(\nu)$ (2.11) i nieliniowej $D_N(\nu)$ (2.12), zgodnie

z rozwinięciem w szereg Taylora [76]. Tłumienie hydrodynamiczne można też modelować w postaci uciętego rozwinięcia szeregu Taylora gdzie wykorzystuje się pierwszy i trzeci rząd [77].

$$D_L(\nu) = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$D_N(\nu) = - \begin{bmatrix} X_{u|u}|u| & X_{u|v}|v| & X_{u|w}|w| & X_{u|p}|p| & X_{u|q}|q| & X_{u|r}|r| \\ Y_{v|u}|u| & Y_{v|v}|v| & Y_{v|w}|w| & Y_{v|p}|p| & Y_{v|q}|q| & Y_{v|r}|r| \\ Z_{w|u}|u| & Z_{w|v}|v| & Z_{w|w}|w| & Z_{w|p}|p| & Z_{w|q}|q| & Z_{w|r}|r| \\ K_{p|u}|u| & K_{p|v}|v| & K_{p|w}|w| & K_{p|p}|p| & K_{p|q}|q| & K_{p|r}|r| \\ M_{q|u}|u| & M_{q|v}|v| & M_{q|w}|w| & M_{q|p}|p| & M_{q|q}|q| & M_{q|r}|r| \\ N_{r|u}|u| & N_{r|v}|v| & N_{r|w}|w| & N_{r|p}|p| & N_{r|q}|q| & N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Mając już obie strony równania (2.4), gdzie lewa opisuje dynamikę ciała sztywnego a prawa wszystkie siły jakie działają na ciało, w skład których wchodzi siły wynikające z środowiska jakim jest woda, kompletne nieliniowe równanie ruchu w układzie pojazdu przedstawia (2.13):

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau_n + \tau_w + \tau_f \quad (2.13)$$

gdzie:

$$M = M_{RB} + M_A,$$

$$C(\nu) = C_{RB}(\nu) + C_A(\nu),$$

$$D(\nu) = D_L(\nu) + D_N(\nu),$$

τ_n - wektor sił i momentów generowanych przez napędy i stery pojazdu,

τ_w - wektor sił i momentów generowanych przez wiatr,

τ_f - wektor sił i momentów generowanych przez fale.

Ostatnim elementem, który należy przedstawić, jest równanie transformacji (2.14) wektora prędkości liniowych i kątowych pojazdu z układu odniesienia ruchomego (O_b, x_b, y_b, z_b) do układ nieruchomego (O_n, x_n, y_n, z_n) związanego z ziemią.

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (2.14)$$

gdzie:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta) \end{bmatrix}$$

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\psi)\cos(\phi) + \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) & \sin(\psi)\sin(\phi) + \cos(\psi)\cos(\phi)\sin(\theta) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \cos(\psi)\cos(\phi) + \sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) & -\cos(\psi)\sin(\phi) + \sin(\psi)\cos(\phi)\sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{bmatrix}$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)tg(\theta) & \cos(\phi)tg(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix}$$

2.6 Wnioski z analizy literatury

Pojazdy podwodne, aby móc skutecznie poruszać się w środowisku wodnym wymagają zaawansowanych i drogich sensorów w większości wykorzystujących fale akustyczne. Zaletą stosowania akustyki jest małe tłumienie, co umożliwia komunikację czy detekcję obiektów na stosunkowo dużych dystansach. Łączność między pojazdami z wykorzystaniem hydromodemów jest możliwa na odległości rzędu kilku kilometrów. Nawigacja globalna wykorzystuje DVL do szacowania prędkości liniowych ruchu, którego strefa działania to od kilkudziesięciu centymetrów do kilkudziesięciu metrów, co pozwala na działanie w płytkich wodach przybrzeżnych oraz na większych głębokościach, gdy fale akustyczne odbijają się od dna, lub od warstw wody o innej gęstości. Do wykrywania przeszkód wykorzystuje się sonary, które wysyłają fale akustyczne na odległość kilkudziesięciu metrów i nasłuchują odbić tych fal od przeszkód.

Obok akustyki możliwe jest stosowanie jako medium światła widzialnego, jednak woda znacznie bardziej tłumi fale elektromagnetyczne, co redukuje zasięg do kilkudziesięciu metrów przy przejrzystej wodzie, a w wodzie bardzo zabrudzonej całkowicie uniemożliwia łączność. Nie mniej jednak, wykorzystanie światła jako medium ma zalety. Jest niewrażliwe na hałas generowany przez inne obiekty znajdujące się w wodzie, na co podatne są urządzenia wykorzystujące fale akustyczne. Ograniczony zasięg może być korzystny w zastosowaniach militarnych, ponieważ dużo ciężiej jest zakłócać lokalizację i komunikację optyczną pojazdów na dużym obszarze. Istotną zaletą jest natomiast możliwość komunikacji i lokalizacji full-duplex. Dany pojazd może odbierać wiadomości od kilku pojazdów jednocześnie, jeżeli te pojazdy są widoczne w obrazie z kamery. Główną zaletą wykorzystania światła jest natomiast niska cena wymaganych urządzeń: kamer, czujników natężenia światła i diody LED, dzięki czemu możliwa jest znaczna redukcja kosztów budowy pojazdów. W ramach analizy projektów, w których podejmowana była tematyka ławicy pojazdów podwodnych przedstawione zostały dwa projekty CoCoRo i BLUEBOT SWARM, w których właśnie jako główne medium komunikacyjne i lokalizacyjne wykorzystane jest światło widzialne. Projekty te nie są jednak przeznaczone do testów na większych obszarach i wyższych prędkościach ruchu ze względu na bardzo mały zasięg detekcji i małą skalę pojazdów i ich dynamiki ruchu. Dlatego budowa ławicy pojazdów pływających w większej skali, zdolnych do wspólnego ruchu w oparciu tylko o lokalizację optyczną jest interesującym zagadnieniem. Nie jest to też temat szeroko poruszany w literaturze. Wynika to z faktu, że niewielki zasięg lokalizacji optycznej powoduje, że pojazdy muszą poruszać się blisko siebie w trakcie wspólnego ruchu. To sprawia, że ich układy sterowania nie mają zbyt wiele czasu na reakcję. Pociąga to za sobą konieczność posiadania dokładnych modeli ruchu tych pojazdów aby możliwe było opracowanie systemów sterowania, które będą w stanie sobie z tym poradzić.

Rozdział 3

Cel, zakres oraz metodyka badawcza

3.1 Cel pracy

Na podstawie przedstawionej w poprzednim rozdziale analizy literatury, określono lukę badawczo-rozwojową, którą stanowi brak rozwiązań umożliwiających ruch w formacji prostych w konstrukcji i tanich pod względem wymaganego wyposażenia pojazdów pływających, zdolnych do poruszania się w ławicy z prędkością 1 m/s i niewielkich, do kilku metrów, odległościach między sobą. Obecnie istniejące rozwiązania koncentrują się na dwóch skrajnych podejściach. Są to kosztowne i zaawansowane systemy zdolne do precyzyjnego poruszania się w formacji na dużym obszarze i z prędkościami do kilku m/s albo prostych prototypach testowanych w warunkach laboratoryjnych, gdzie cały ruch odbywa się na obszarze kilkudziesięciu metrów kwadratowych z prędkościami poniżej 0,3 m/s. W obszar ten wpisuje się podjęcie badań nad niskobudżetową ławicą HUUV wykorzystującą lokalizację i komunikację optyczną krótkiego zasięgu, zdolną do ruchu z prędkością do 1,2 m/s.

Jako tezę pracy założono, że **istnieje możliwość opracowania prostej i niedrożej metody sterowania pojazdami pływającymi w celu realizacji ruchu w ławicy przy wykorzystaniu ograniczonej informacji wizyjnej.**

Cel pracy sformułowano w następujący sposób: **opracowanie metody sterowania ławicą pojazdów pływających dla utrzymania ustalonej formacji ruchu grupy z wykorzystaniem wzajemnej lokalizacji optycznej.**

Jako cele szczegółowe pracy przyjęto:

- opracowanie podstaw teoretycznych i doświadczalnych dla modelu ruchu pojazdu HUUV wraz z identyfikacją parametrów modelu,
- opracowanie metody oraz podstaw teoretycznych i doświadczalnych sterowania ruchem ławicy.

3.2 Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje:

- analizę literatury,
- modyfikację mechaniczną pojazdów wchodzących w skład ławicy,
- zaprogramowanie i wykonanie systemu sterowania pojazdem,
- opracowanie modelu matematycznego ruchu pojazdu,
- identyfikację i wyznaczenie współczynników modelu opisujących ruch pojazdu rzeczywistego,
- opracowanie metody sterowania ruchem ławicy opartej na lokalizacji optycznej,
- opracowanie i wykonanie stanowiska badawczego i systemu pomiarowego Motion Capture,
- opracowanie systemu sterowania pojazdów umożliwiającego im ruch w ławicy,
- weryfikację eksperymentalną opracowanego systemu sterowania pojazdów w ławicy,
- weryfikację eksperymentalną opracowanej metody i przyjętego algorytmu ruchu ławicy.

3.3 Metodyka badawcza

Badania ruchu pojazdów pływających i ławic w większości literatury realizowane są w ramach symulacji komputerowych, a jedynie w niektórych przypadkach weryfikowane eksperymentalnie. Taka metodyka podyktowana jest ryzykiem utraty kosztownego pojazdu, które przy niewłaściwym systemie sterowania może ulec zniszczeniu poprzez kolizję z dnem, brzegiem zbiornika, innymi pojazdami lub obiektami znajdującymi się w wodzie. W przypadku ruchu w zanurzeniu może też dojść do zgubienia pojazdu. Określenie położenia pojazdu w trakcie badań eksperymentalnych to kolejny problem, który generuje dodatkowe koszty, ponieważ trzeba stosować zaawansowane systemy podwodnej lokalizacji akustycznej.

W oparciu o doświadczenia zebrane w trakcie analizy literatury oraz doświadczenia własne zdecydowano, aby równolegle do prac nad konstrukcją pojazdów HUUUV i oprogramowaniem sterującym, opracować model ruchu pojazdu, aby badania przeprowadzić bez dużego ryzyka finansowego. Aby taki model ruchu oddawał zachowanie rzeczywistego pojazdu, konieczne było określenie parametrów takich jak opory hydrodynamiczne czy masy towarzyszące. Zostało to wykonane m.in. w ramach symulacji CFD. W trakcie ruchu wektor prędkości pojazdu przez większość czasu nie pokrywa się z osiami układu współrzędnych pojazdu (występują niezerowe wartości kątów ataku i ślizgu bocznego). To sprawia, że koniecznym jest przeprowadzenie wielu symulacji

CFD, które wymagają indywidualnego modelowania siatki obliczeniowej. W pracy, aby ograniczyć liczbę niezbędnych symulacji CFD, numerycznie wyznaczone współczynniki opisujące zachowanie pojazdu zostały dostrojone w oparciu o kolejne przybliżenia, co pozwoliło dopasować parametry modelu do wyników eksperymentalnych.

W oparciu o model matematyczny i symulacyjny ruchu pojedynczego pojazdu zbudowany został model symulacyjny ruchu ławicy. Pierwszym krokiem do opracowania algorytmu ruchu ławicy było opracowanie systemu lokalizacji optycznej i określenie jej możliwości i ograniczeń. Znając maksymalny dystans detekcji, szerokość obszaru obserwacji kamery i częstotliwość pomiarową, opracowany został algorytm ruchu ławicy wykorzystujący metodę śledzenia lidera i metoda sterowania w linii wzroku (ang. *Line of Sight*). Wykorzystanie tych metod w algorytmie ruchu ławicy wynika z ograniczonej informacji, jaką pojazdy w ławicy mogą wykorzystać do wyznaczania swojej prędkości i kierunku ruchu, aby utrzymać się w formacji. Opracowany algorytm ruchu ławicy jest zdecentralizowany. Każdy pojazd na bazie własnych pomiarów podejmuje decyzje o własnym ruchu. System sterowania pojazdu został opracowany z wykorzystaniem regulatorów ślizgowych i PID w ramach symulacji ruchu ławicy. Na podstawie symulacji zachowania grupy zostały określone możliwości i ograniczenia ruchu pojazdów, dzięki którym możliwe jest utrzymanie się formacji. Ostatnim etapem prac była weryfikacja eksperymentalna opracowanego algorytmu ruchu na basenie pływackim.

W ramach pracy wykorzystane zostały następujące narzędzia badawcze:

- symulacja komputerowa ruchu pojazdu i ławicy w programie Matlab,
- symulacje CFD w programie SimScale do wyznaczenia współczynników modelu,
- eksperymentalne badania ruchu 2D pojedynczego pojazdu z wykorzystaniem narzędzi analizy obrazu w programie Tracker i systemu opartego o kamerę GoPro nagrywającą ruch,
- eksperymentalne badania ruchu 3D ławicy z wykorzystaniem samodzielnie zbudowanego systemu Motion Capture do określenia trajektorii ruchu pojazdów na większym obszarze.

Rozdział 4

Projekt i budowa Hybrydowego Bezzałogowego Pojazdu Podwodnego

4.1 Założenia do budowy

Pojazd hybrydowy, a dokładniej Hybrid Unmanned Underwater Vehicle, od którego pochodzi skrót HUUV, jest modułową platformą zaprojektowaną i zbudowaną na potrzeby badań eksperymentalnych algorytmów ławicowych w warunkach laboratoryjnych, na basenie pływackim lub spokojnej wodzie stojącej jeziora. Pojazdy są wynikiem pracy magisterskiej autora, a w ramach części inżynierskiej związanej z pracą dokorską dokonana została modyfikacja konstrukcji i budowa oprogramowania sterującego. Głównymi założeniami, przyjętymi na początku projektowania pojazdów HUUV były:

- napęd hybrydowy łączący konwencjonalny napęd w postaci pędników śrubowych i napęd biomimetyczny typu MPF (ang. *Median and/or Paired Fin propulsion*),
- system komunikacji i lokalizacji optycznej umożliwiający robotom prostą interakcję, składający się z masztów wyposażonych w programowalne światła LED RGB i kamery, których obraz poddawany jest analizie,
- system balastowy w postaci elastycznego zbiornika balastowego i pompy zębatej, aby możliwe były testy na powierzchni przy pływalności dodatniej i w pełnym zanurzeniu przy pływalności bliskiej neutralnej,
- pojazd ma mieć możliwość zanurzenia się na głębokość do 4 m i poruszania z prędkością do 1,2 m/s,
- pojazd ma być wyposażony w komunikację WiFi i radiomodem, aby możliwe było przesyłanie dużej ilości danych gdy znajduje się w zasięgu sieci WiFi i zdalne sterowanie poprzez radiomodem, gdy znajduje się poza zasięgiem sieci WiFi.

Przyjęte zostały też następujące założenia konstrukcyjne:

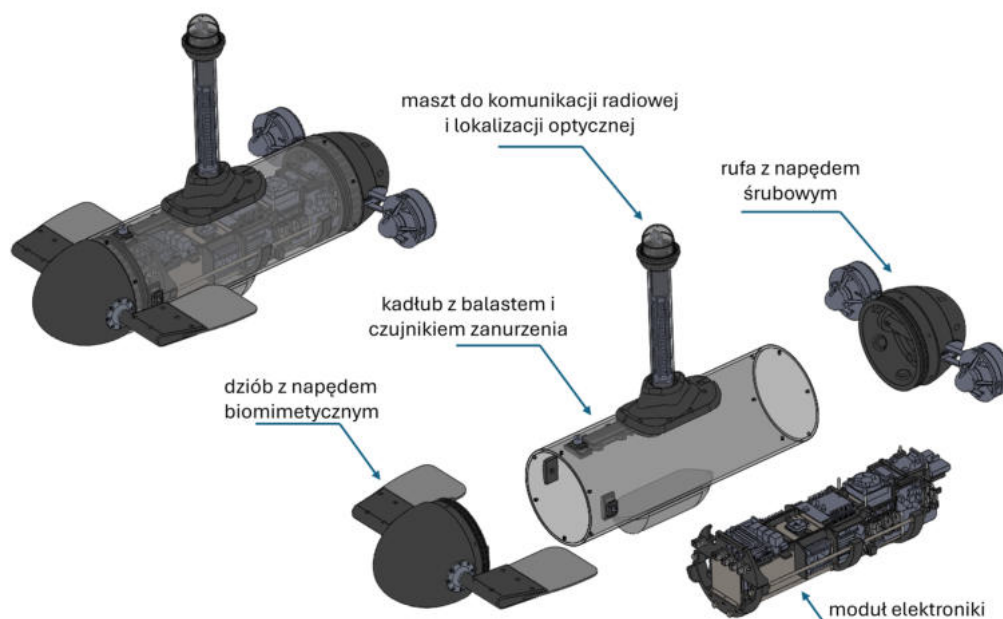
- pojazd ma składać się z modułów dziobu, rufy i kadłuba wraz z masztem komunikacyjnym, a do środka kadłuba wsuwany ma być moduł sterująco-zasilający,

co pozwoli szybko modyfikować oraz rozszerzać pojazd o dodatkowe moduły funkcjonalne,

- masa pojazdu nie może przekraczać 25 kg, aby wystarczyła jedna osoba do obsługi,

4.2 Część mechaniczna

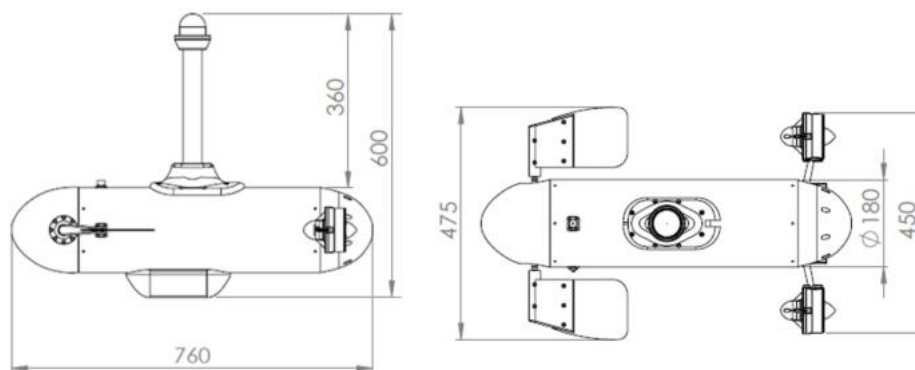
Na podstawie założeń powstał trójwymiarowy model CAD pojazdu w programie Solidworks (Rysunek 4.1) o wymiarach gabarytowych przedstawionych na Rysunku 4.2). Kadłub pojazdu, do którego zamontowane na stałe są: maszt na górze i balast od spodu, wykonany jest z rury poliwęglanowej o średnicy zewnętrznej 180 mm i grubości ścianki 5 mm. Poliwęglan został wybrany z powodu jego dużej uderzalności i dobrej obrabialności (wiercenia czy cięcia), bez obaw o pęknięcia czy rozwarstwienia. Kolejną zaletą poliwęglanu jest jego niska gęstość wynosząca $1,2 \text{ g/cm}^3$. Trzecią, równie istotną zaletą, braną pod uwagę jest przezroczystość poliwęglanowego kadłuba. Na etapie budowy prototypów i realizacji badań możliwość wizualnej inspekcji wnętrza pojazdów bardzo ułatwia i przyspiesza detekcję oraz eliminację wielu problemów sprzętowych i programowych. Z poliwęglanu został też wykonany maszt pojazdu. Rura masztu ma średnicę 40 mm i grubość 3 mm.



Rysunek 4.1. Projekt pojazdu HUUV wykonany w programie Solidworks.

Dziób, rufa, elementy masztu i wszystkie elementy łączące zostały z PLA w technologii druku FDM. Elementy takie jak mocowania pędników śrubowych do rufy, czy osie na których zamocowane są płetwy dziobu wykonane są ze stali nierdzewnej. Tuleje uszczelniające osie płetw wykonano z aluminium PA4. Tuleje osi i same osie są jedynymi elementami, które zostały wykonane obróbką skrawaniem, ale wynika to z konieczności możliwie jak największej wytrzymałości i wysokiej tolerancji wymiarowej, czego nie da się uzyskać w druku FDM. Rozwiązania zastosowane w pojeździe HUUV, w postaci

masztu z dwutorowym układem komunikacji pojazdów podwodnych [78] i biomimetycznego układu napędowego pojazdu pływającego [79], zostały opracowane i opatentowane na Politechnice Krakowskiej, a autor niniejszej pracy jest ich współtwórcą.



Rysunek 4.2. Podstawowe wymiary HUUV.



Rysunek 4.3. Dziób, rufa, kadłub oraz moduł elektroniki pojazdu HUUV.



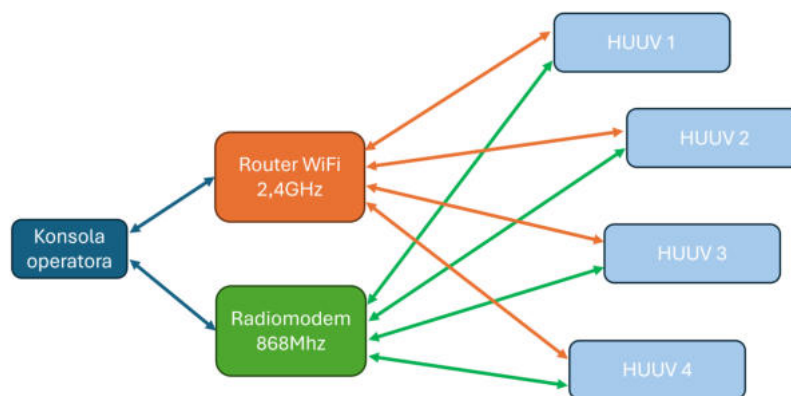
Rysunek 4.4. Ławica pojazdów HUUV w trakcie badań na basenie pływackim.

4.3 Część elektroniczna i oprogramowanie

Główny komputer pojazdu stanowi układ Nvidia Jetson Nano, który pełni rolę systemu sterowania wysokopoziomowego. Za sterowanie niskopoziomowe odpowiedzialny jest układ Nucleo z mikrokontrolerem STM32 L476RG. Pomiar zanurzenia pojazdu realizowany jest z wykorzystaniem sensora Bar02 firmy BlueRobotics, o zakresie pomiarowym do 4 metrów głębokości. Do określania orientacji pojazdu wykorzystywany jest sensor IMU VectorNav VN100. W przypadku ruchu na powierzchni wody możliwe jest określenie pozycji GNSS z wykorzystaniem modułu GNSS XA1110 opartego na chipsecie MediaTek MT3333. Maszt komunikacyjny wyposażony został w sześć pasków LED RGB WS2813, ułożonych po obwodzie co tworzy świecący obszar o wymiarach 4 na 15 cm. Dodatkowo maszt wyposażony jest w antenę WiFi (2,4 GHz, standard IEEE 802.11n), GNSS (pasmo L1, pasywna) i radiomodemu o częstotliwości 868 MHz. Na szczycie masztu na serwomechanizmie MG90D-270 zainstalowana jest kamera Arducam z sensorem Sony IMX219.

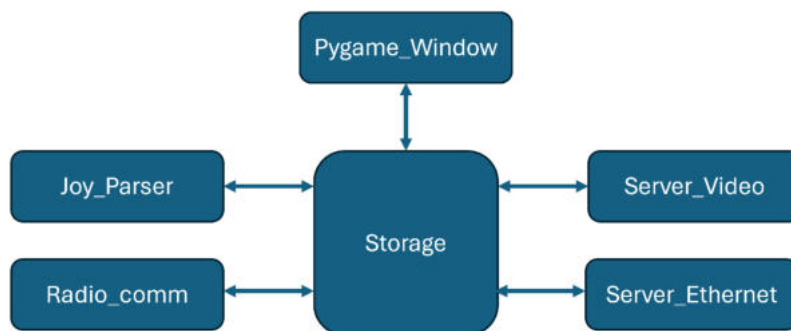
Wysokopoziomowa część systemu sterowania pojazdu HUUV oraz konsola operatorska zostały napisane w języku Python. Schemat komunikacji pojazdów z konsolą operatorską przedstawia Rysunek 4.5. Dostępne są dwa kanały komunikacji radiowej: poprzez WiFi z częstotliwością 2,4 GHz i RF o częstotliwości 868 MHz, pod warunkiem, że maszty pojazdów są wynurzone nad powierzchnię. Komunikacja WiFi dzięki dużej przepustowości umożliwia przesyłanie obrazu oraz dużej ilości parametrów z pojazdów do konsoli. Pozwala to na podgląd obrazu z pojazdów w czasie rzeczywistym i strojenie parametrów pojazdu tj. czas ekspozycji kamery. W przypadku badań na większym obszarze np. jeziora jest możliwość przełączenia pojazdów na komunikację RF 868 MHz. W tym przypadku przesył obrazu z kamer jest już niemożliwy, a ilość przesyłanych parametrów znacznie ograniczona, jednak łączność jest możliwa na dystansie do 2 km.

Konsola operatorska w przypadku łączności WiFi jest serwerem, do którego łączą się wszystkie pojazdy-klienci. Lista dostępnych pojazdów jest na żywo aktualizowana, a jak któryś z nich straci zasięg, co dzieje się gdy wchodzi pod wodę, to jest z listy



Rysunek 4.5. Schemat łączności WiFi i RF pojazdów HUUV z konsolą operatorską.

usuwany. Jeżeli łączność zostanie ponownie nawiązana, bo pojazd się wynurzył, to jest znów dodawany do listy. Program konsoli operatorskiej składa się z sześciu wątków co przedstawia Rysunek 4.6.

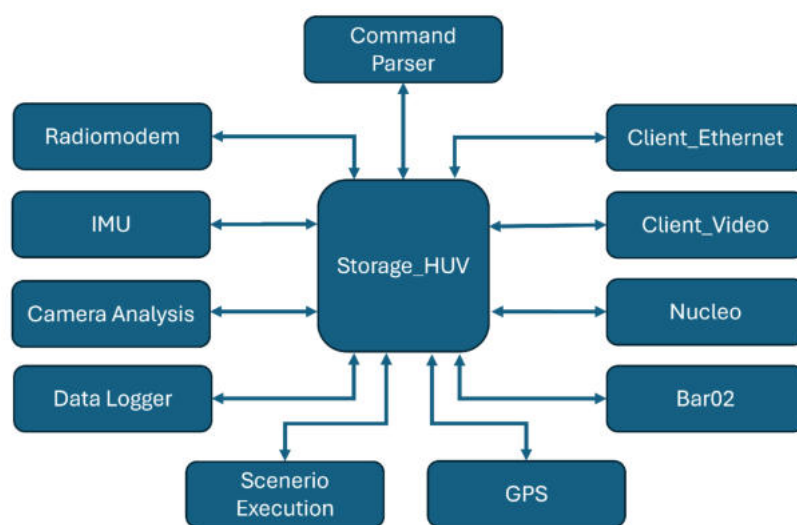


Rysunek 4.6. Schemat blokowy modułów programowych konsoli operatorskiej pojazdów HUUV.

Wymiana wszystkich danych odbywa się przez wątek *Storage*. Konsola operatorska, która pozwala na wysyłanie poleceń do pojazdów i wyświetlanie przysyłanych przez pojazdy parametrów znajduje się w wątku *Pygame_Window*. Wątek *Joy_Parser* służy do obsługi joysticka, co umożliwi zdalne sterowanie pojazdami. Wątek *Radio_comm* jest odpowiedzialny za łączność radiową 868 MHz. Łączność WiFi z pojazdami została natomiast podzielona na dwa wątki *Server_Video* i *Server_Ethernet*. Pierwszy z nich służy tylko i wyłącznie do przyjmowania ramek obrazu z kamer pojazdów, aby można było w konsoli zobaczyć obraz z kamery na żywo. Drugi służy do przesyłania wszystkich parametrów sterujących z konsoli do pojazdu i informujących o stanie pojazdu do konsoli.

Strukturę programu sterowania wysokopoziomowego pojazdu przedstawia schemat blokowy z Rysunku 4.7. Podobnie jak w przypadku konsoli cała wymiana danych odbywa się przez wątek *Storage_HUV*. Do komunikacji radiowej 868 MHz służy wątek *Radiomodem*. Wątek *Command_Parser* ma za zadanie parsowanie przyjętego polecenia z konsoli operatorskiej i przesłanie go do odpowiedniego wątku. Wątki *Client_Ethernet* i *Client_Video* służą do łączności WiFi z odpowiadającymi im

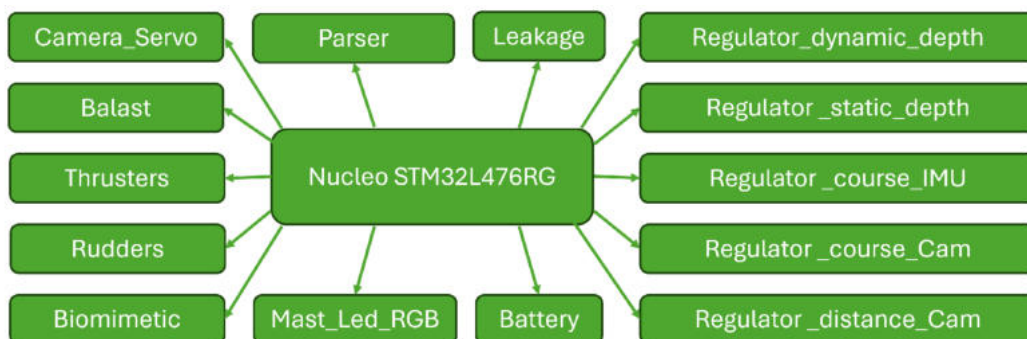
Server_Ethernet i *Server_Video* w konsoli operatorskiej. Wątek *Nucleo* odpowiada za komunikację z mikrokontrolerem STM32, który jest odpowiedzialny za sterowanie niskopoziomowe. Część sensorów takich jak GPS, IMU czy czujnik zanurzenia Bar02 zostały podłączone bezpośrednio do komputera Jetson, ponieważ informacje z nich są w większej mierze wykorzystywane w sterowaniu wysokopoziomowym. Stąd wątki *Bar02*, *GPS* i *IMU*. Wątek *Scenerio_Execution* służy do realizacji scenariuszy sterowania. Dzięki temu możliwe jest zlecanie prostych misji. Wątek *Data_Logger* ma za zadanie logowanie wybranych z *Storage_HUV* parametrów działania pojazdu do plików tekstowych. Ostatnim wątkiem programu wysokopoziomowego HUV jest *Camera_Analysis*. Realizuje on całą procedurę analizy obrazu od konfiguracji kamery, poprzez przyjęcie z niej obrazu, kończąc na detekcji i określeniu dystansu i namiaru do wykrytego masztu innego pojazdu.



Rysunek 4.7. Schemat blokowy programu wysokopoziomowego HUV.

Program do sterowania niskopoziomowego pojazdu został napisany w języku C i jest realizowany przez mikrokontroler STM32 L476RG Nucleo. Za łączność z mikrokontrolerem w programie wysokopoziomowym odpowiedzialny jest wątek *Nucleo*, który odpowiednio parsuje dane i przesyła poprzez USB do mikrokontrolera. Zadania jakie realizuje mikrokontroler zostały przedstawione na Rysunku 4.8. Wiadomości przyjęte przez mikrokontroler są w pierwszej kolejności interpretowane w *Parser*. *Camera_Servo* służy do sterowania serwomechanizmem obrotu kamery, co umożliwia śledzenie wykrytego w kadrze obrazu masztu innego pojazdu bez konieczności obrotu całego pojazdu HUV. W tym wypadku regulator obrotu kamery, aby utrzymać śledzony pojazd w kadrze, znajduje się w wątku *Camera_Analysis* systemu wysokopoziomowego, a tylko sygnał sterujący jest przesyłany do mikrokontrolera. *Balast* odpowiada za kontrolę pompy zębatej systemu balastowego, dzięki czemu pojazd może utrzymywać się na powierzchni z pływalnością dodatnią, co pozwala na łączność WiFi, radiową czy określenie pozycji GPS lub zmianę pływalności na ujemną i zejście pod powierzchnię wody. *Thrusters* i *Rudders* odpowiadają kolejno za kontrolę pędników śrubowych T200 i sterów zanurzenia poprzez serwomechanizmy 9imod BLS-HV70MG-270. *Biomimetic* pełni kontrolę

nad napędem biomimetycznym, gdzie silnik krokowy wprawia w oscylacje w tym przypadku płetwy boczne z elastycznymi końcówkami, dzięki czemu generowany jest napór. *Leakage* odpowiedzialny jest za detekcję przecieków w kadłubie pojazdu. *Battery* służy do pomiaru napięcia baterii. *Mast_Led_RGB* poprzez SPI steruje kolorem i sekwencją świecenia ledów RGB w maszcie pojazdu. Wszystkie wyżej wymienione funkcje można kontrolować z konsoli operatorskiej poprzez komendy i przyciski. W przypadku realizacji misji, kontrolę przejmują regulatory: *Regulator_dynamic_depth* do zanurzenia dynamicznego z wykorzystaniem *Elevators*, *Regulator_static_depth* do sterowania zanurzeniem statycznym poprzez *Balast*, *Regulator_course_IMU* do sterowania kursem w oparciu o IMU VN100 z wykorzystaniem *Thrusters*, *Regulator_course_Cam* w oparciu o namiar względny do wykrytego lidera z wykorzystaniem *Thrusters* i *Regulator_distance_Cam* do sterowania dystansem do wykrytego lidera również z wykorzystaniem *Thrusters*.



Rysunek 4.8. Schemat blokowy programu niskopoziomowego HUUV.

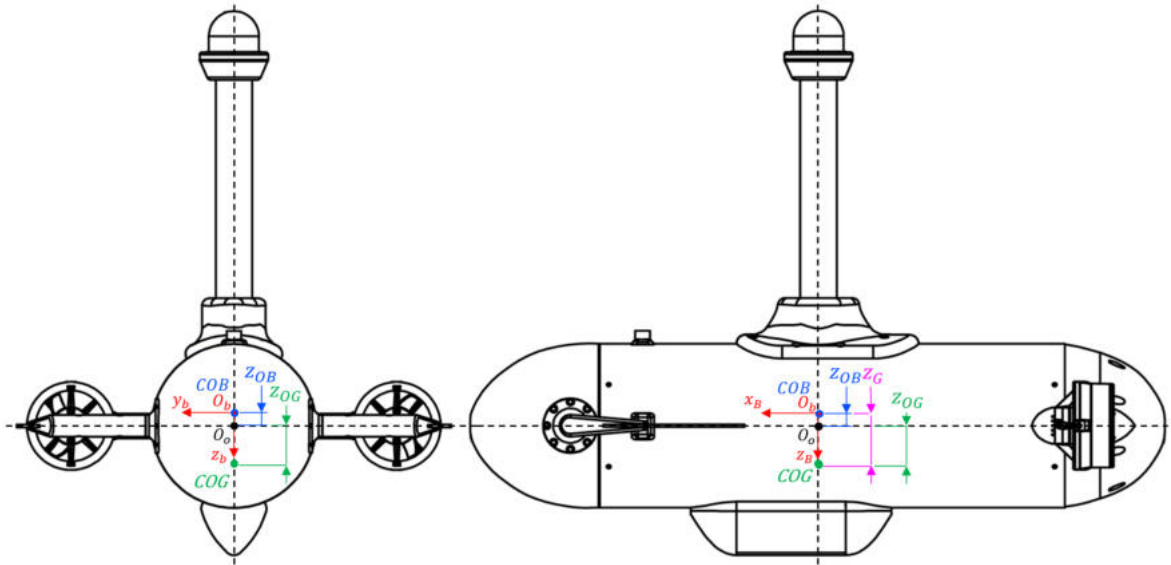
W ramach części inżynierskiej pracy, zmodyfikowana została konstrukcja czterech pojazdów HUUV, oraz wykonane oprogramowanie sterujące pojazdami i oprogramowanie konsoli operatorskiej. Pojazdy wykorzystane zostały w eksperymentalnych testach ławicy na basenie pływackim, które opisane zostały w dalszej części pracy.

Rozdział 5

Model ruchu pojazdu

5.1 Model matematyczny

Pierwszym etapem wyprowadzania modelu matematycznego ruchu pojazdu HUUV było określenie położenia środka wyporu COB i środka ciężkości COG . Położenie środków, dla pojazdu w pełnym zanurzeniu, prezentuje Rysunek 5.1. Przerywanymi liniami zostały oznaczone płaszczyzny symetrii kadłuba, a w punkcie ich przecięcia przyjęty został środek O_o . Względem tego środka w programie Solidworks, na bazie modelu 3D pojazdu, wyznaczone zostały położenia środków ciężkości COG i wyporu COB .

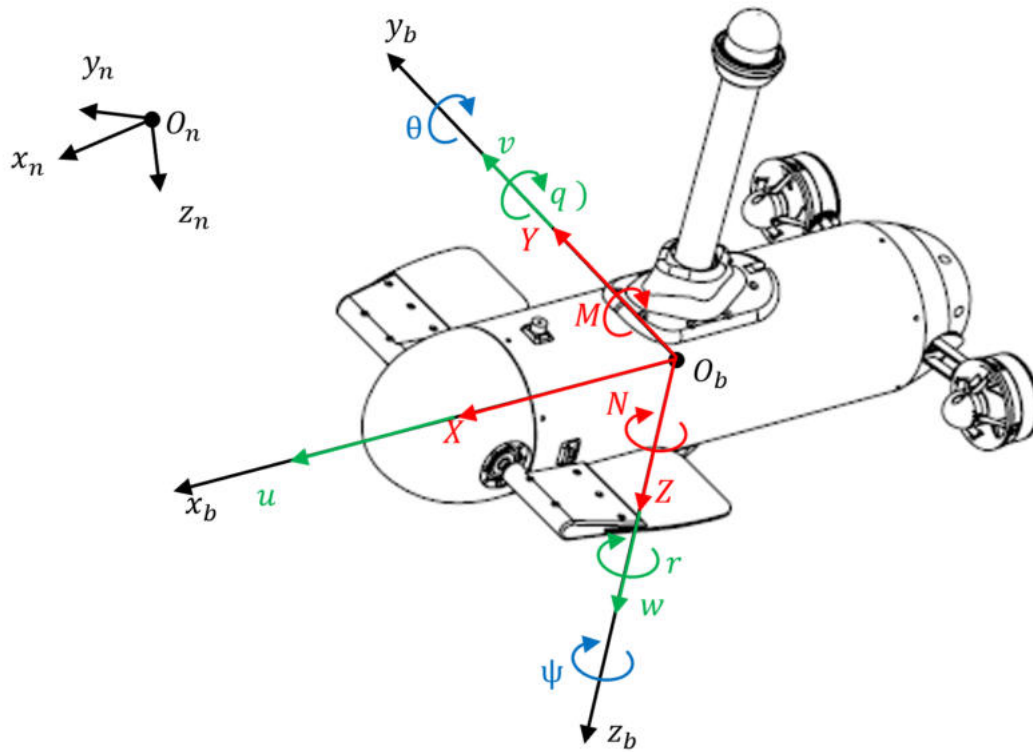


Rysunek 5.1. Położenie środków COB i COG względem przyjętego środka O_o na przecięciu płaszczyzn symetrii kadłuba pojazdu.

Pojazd HUUV posiada nisko położony środek ciężkości COG ($x_{OG} = 0, y_{OG} = 0, z_{OG} = 0,028$ m), dzięki balastowi zamontowanemu na spodzie kadłuba. Generuje to momenty prostujące, stabilizujące pojazd w przypadku wychylania go wokół osi x_b oraz y_b . W pełnym zanurzeniu maszt daje dodatkowy pozytywny efekt i przesuwa środek wyporu COB w górę ($x_{OB} = 0, y_{OB} = 0, z_{OB} = 0,008$ m). W przypadku ciał zanurzonych w wodzie opory hydrodynamiczne działają względem środka wyporu COB ,

dlatego w dalszej części pracy w środku COB przyjęty został środek układu pojazdu O_b . W związku z tym, dystans między przyjętym środkiem O_b , a COG wzrósł do $z_G = z_{OG} + z_{OB} = 0,036$ m.

Głównym uproszczeniem modelu symulacyjnego jest redukcja modelu z 6DoF do 5DoF poprzez usunięcie równania obrotu wokół osi x_b . Pojazd generuje jedynie niewielkie momenty działające wokół osi x_b z napędów gdy realizowany jest manewr skrótu a pojawiające się siły i momenty sprzężone są na tyle małe, że wystarcza stabilizacja wynikająca z momentu prostującego. Wychylenia wokół osi x_b choć są obecne, to nie osiągają znacznych wartości i zostały pominięte w modelu ruchu pojazdu, który przedstawia równanie (5.1). Na Rysunku 5.2 przedstawiono siły i momenty działające na pojazd oraz prędkości liniowe i kątowe uwzględnione w modelu. Aby uprościć opis modelu ruchu przedstawionego w dalszej części pracy, ruchomy układ współrzędnych kartezjańskich (O_b, x_b, y_b, z_b) będzie nazywany układem pojazdu, a nieruchomy układ współrzędnych (O_n, x_n, y_n, z_n) układem globalnym.



Rysunek 5.2. Prędkości liniowe i kątowe oraz siły i momenty działające na pojazd, które zostały uwzględnione w modelu matematycznym HUUV.

Uwzględniając uproszczenia, ogólne równanie ruchu HUUV można zapisać:

$$M_{RB}\dot{\nu} + C_{RB}(\nu)\nu = -M_A\dot{\nu} - C_A(\nu)\nu - D(\nu)\nu - g(\eta) + \tau \quad (5.1)$$

gdzie:

$\tau = [X, Y, Z, M, N]^T$ - siły i momenty napędowe,

$\nu = [u, v, w, q, r]^T$ - prędkości pojazdu w układzie pojazdu,

$\eta = [x, y, z, \theta, \psi]^T$ - pozycja i orientacja pojazdu w układzie pojazdu.

Macierz inercji M_{RB} dla ciała sztywnego w 6DoF (równanie (2.4) z podrozdziału 2.5) została uproszczona poprzez pominięcie kolumny i wiersza odpowiadającego za obrót wokół osi x_b i przedstawia ją równanie (5.2). Oprócz składników na przekątnej głównej znajdują się w niej składniki wynikające z dystansu między środkiem ciężkości COG a środkiem obrotu pojazdu COB .

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & mz_G & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 \\ mz_G & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Podobnie uproszczona została macierz sił Coriolisa i sił dośrodkowych C_{RB} . W macierzy tej oprócz pominięcia wiersza i kolumny odpowiadającego za obrót wokół osi x_b pominięte zostały też wszystkie współczynniki zawierające prędkość kątową p .

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & mz_G r & mu \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_G q + u) & 0 \\ -mw & -mz_G r & m(z_G q + u) & 0 & 0 \\ mv & -mu & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Prawa strona równania (5.1) przedstawia siły i momenty wynikające z ruchu pojazdu w wodzie. Macierz M_A zawiera masy towarzyszące działające na smukły pojazd (ang. slender body) [80]. Składniki m_{yr} , m_{zq} , J_{yw} , J_{zv} to efekty sprzężone. Współczynnik m_{yr} to wynikająca z obrotu wokół osi z_b pojazdu masa towarzysząca działająca w osi y_b , m_{zq} to wynikająca z obrotu wokół osi y_b masa towarzysząca w osi z_b , J_{yw} to wynikający z prędkości wzdłuż osi z_b moment towarzyszący wokół osi y_b natomiast J_{zv} to wynikający z prędkości wzdłuż osi y_b moment towarzyszący wokół osi z_b .

$$M_A = - \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 & -m_z z_G & 0 \\ 0 & m_y & 0 & 0 & m_{yr} \\ 0 & 0 & m_z & m_{zq} & 0 \\ -m_z z_G & 0 & J_{yw} & J_y & 0 \\ 0 & J_{zv} & 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Macierz $C_A(\nu)$ przedstawia hydrodynamiczny wpływ sił Coriolisa i sił dośrodkowych. Została wyprowadzona na podstawie metody przedstawionej w modelu Fossen'a [31]. Ogólną postać macierzy $C_A(\nu)$ dla modelu 5DoF prezentuje równanie (5.5). Współczynniki a_1 , a_2 , a_3 oraz b_1 zostały wyznaczone na podstawie macierzy M_A z równania (5.4).

$$C_A(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & a_1 & 0 \\ a_3 & 0 & -a_1 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

gdzie:

$$a_1 = m_x u - m_z z_G q$$

$$a_2 = m_y v + m_{yr} r$$

$$a_3 = m_z w + m_{zq} q$$

$$b_1 = m_z z_G v$$

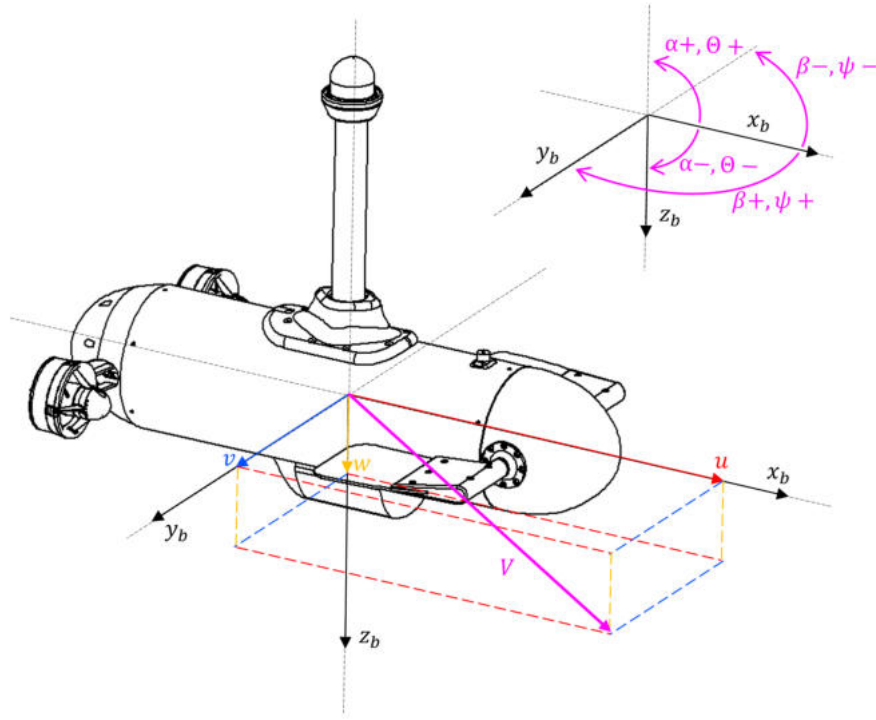
Składnik $g(\eta)$ (równanie (5.6)) prezentuje efekty hydrostatyczne związane z siłami ciężkości F_W działającymi na pojazd w środku ciężkości COG i siłami wyporu F_B działającymi w środku wyporu COB .

$$g(\eta) = - \begin{bmatrix} -(F_W - F_B) \sin(\theta) \\ 0 \\ (F_W - F_B) \cos(\theta) \\ z_G F_W \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Wyznaczenie oporów hydrodynamicznych $D(\nu)$ pojazdu HUUV zostało wykonane z wykorzystaniem symulacji CFD w stanie ustalonym zgodnie z podstawowymi zasadami hydrodynamiki, gdzie siły hydrodynamiczne przedstawia się w formie sił drag, lift i side. Bliższe omówienie zastosowanej metody opartej na symulacjach CFD zostanie przedstawione w kolejnym rozdziale. Wektor $D(\nu)$ opisujący opory pojazdu HUUV przedstawiony został w równaniu (5.7).

$$D(\nu) = - \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Do wyznaczenia składników wektora $D(\nu)$ konieczne jest uwzględnienie wektora prędkości pojazdu V (Rysunek 5.3). Jego orientację względem układu współrzędnych pojazdu określają kąty ataku α i ślizgu β , a wzory na V , α i β przedstawione zostały w równaniach (5.8) - (5.10). W przyjętej konwencji kąty α i β są zgodnie z regułą prawej ręki i najpierw wektor prędkości V jest poprzez β rzutowany na płaszczyznę $x_b - z_b$ a następnie otrzymany wektor w płaszczyźnie $x_b - z_b$ poprzez kąt α rzutowany na oś x_b pojazdu.



Rysunek 5.3. Wektor prędkości V oraz kąty α i β określające orientację wektora V względem głównych osi pojazdu x_b, y_b, z_b .

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (5.8)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{v}{V}\right) \quad (5.9)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{w}{u}\right) \quad (5.10)$$

Bazując na kątach ataku α i ślizgu β wyznaczone zostały współczynniki oporów hydrodynamicznych $C_{D_{\alpha\beta}}, C_{S_{\beta}}, C_{L_{\alpha}}, C_{m_{\alpha}}$ i $C_{m_{\beta}}$ w symulacjach CFD w stanie ustalonym w programie Simscale, które wchodzi w skład równań sił i momentów oporów hydrodynamicznych (5.11) - (5.15). W równaniach (5.14) i (5.15) występują dodatkowo składniki M_{mq} i M_{mr} , które przedstawiają momenty oporu hydrodynamicznego wynikające tylko z rotacji pojazdu wokół osi y_b (prędkość kątowa q) i wokół osi z_b (prędkość kątowa r).

$$F_{D_b}(V, \alpha, \beta) = \frac{1}{2}\rho V^2 A_b C_{D_{\alpha\beta}} \quad (5.11)$$

$$F_{S_b}(V, \beta) = \frac{1}{2}\rho V^2 A_b C_{S_{\beta}} \quad (5.12)$$

$$F_{L_b}(V, \alpha) = \frac{1}{2}\rho V^2 A_b C_{L_{\alpha}} \quad (5.13)$$

$$M_{q_b}(V, \alpha, q) = \frac{1}{2}\rho V^2 A_b L C_{m_{\alpha}} + M_{mq} \quad (5.14)$$

$$M_{r_b}(V, \beta, r) = \frac{1}{2}\rho V^2 A_b L C_{m_{\beta}} + M_{mr} \quad (5.15)$$

gdzie:

$C_{D_{\alpha\beta}}$, C_{S_β} i C_{L_α} - współczynniki oporu odpowiednio Drag, Side i Lift Force Coefficient uwzględniające kąty ataku α i ślizgu β , między układem współrzędnych pojazdu a wektorem prędkości V ,

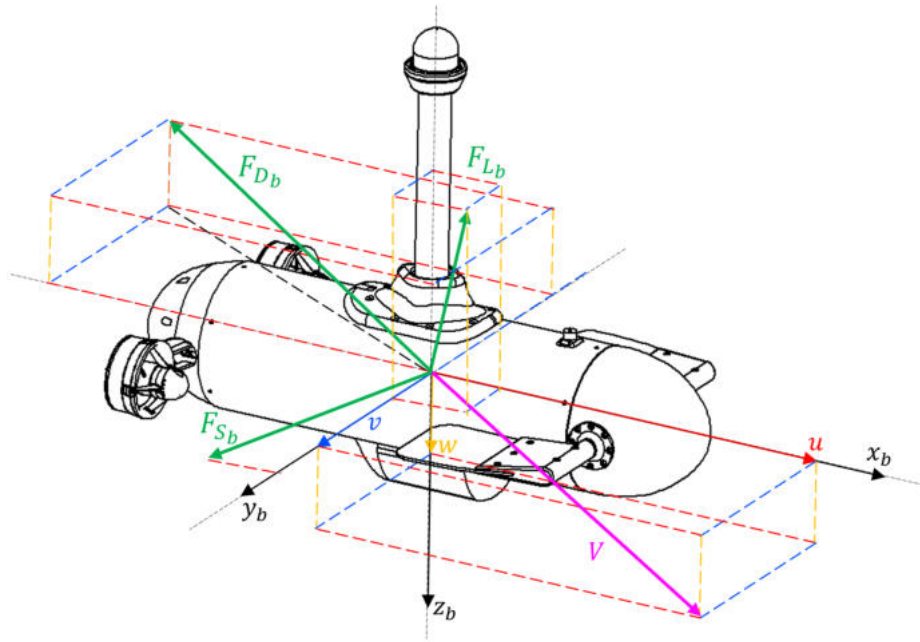
C_{m_α} i C_{m_β} - współczynniki momentu oporu hydrodynamicznego odpowiednio wokół osi y_b , z_b opisujące momenty działające na pojazd uwzględniające kąty ataku α i ślizgu β między układem współrzędnych pojazdu a wektorem prędkości V .

Bazując na notacji SNAME1950 [75] równania (5.16) - (5.18) i Rysunek 5.4 przedstawiają efekt rzutowania wyżej opisanych oporów hydrodynamicznych pojazdu na układ współrzędnych pojazdu (x_b, y_b, z_b) . W równaniach pominięte zostały niektóre składniki, ze względu na ich niewielki efekt w danych kierunkach przy niskich wartościach kątów α i β .

$$F_{D_{bx_b}} = \cos(\alpha)\cos(\beta)F_{D_b} - \sin(\beta)F_{S_b} + \sin(\alpha)\cos(\beta)F_{L_b} \quad (5.16)$$

$$F_{D_{by_b}} = \sin(\beta)F_{D_b} + \cos(\beta)F_{S_b} \quad (5.17)$$

$$F_{D_{bz_b}} = \sin(\alpha)\cos(\beta)F_{D_b} + \cos(\alpha)F_{L_b} \quad (5.18)$$



Rysunek 5.4. Wektor prędkości V pojazdu oraz siły oporów działające na pojazd.

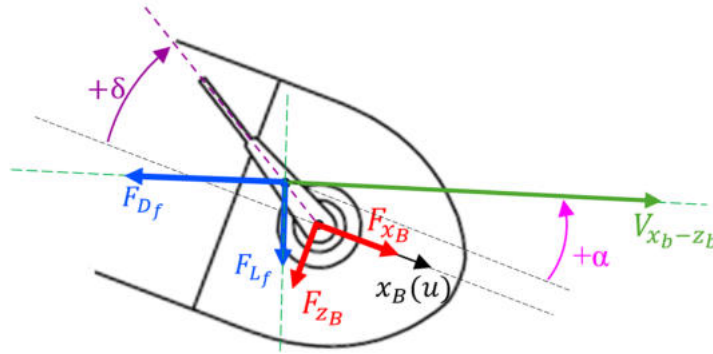
Ta sama procedura symulacyjna CFD typu steady-state przeprowadzona została dla płetw bocznych, pełniących rolę sterów zanurzenia (Rysunek 5.5). Wyznaczone zostały w ten sposób współczynniki oporu sterów C_{D_δ} , C_{L_δ} i M_{M_δ} wchodzące w skład równań (5.19) - (5.21). Ponieważ w trakcie ruchu pojazdu opory hydrodynamiczne sterów wynikają z wektora prędkości wody opływającej stery, to w równaniach tych kąt wychylenia sterów zanurzenia jest pomniejszany o wartość kąta ataku α , co zostało przedstawione na Rysunku 5.5. W symulacjach i opracowanym modelu sterów zanurzenia

uwzględniany jest tylko kąt ataku α . Widoczny na Rysunku 5.5 wektor prędkości $V_{x_b-z_b}$ jest rzutem wektora prędkości V z Rysunku 5.4 na płaszczyznę x_b-z_b .

$$F_{D_f}(V_{x_b-z_b}, \alpha, \delta) = \frac{1}{2} \rho V_{x_b-z_b}^2 A_f C_{D\delta} (\delta - \alpha) \quad (5.19)$$

$$F_{L_f}(V_{x_b-z_b}, \alpha, \delta) = \frac{1}{2} \rho V_{x_b-z_b}^2 A_f C_{L\delta} (\delta - \alpha) \quad (5.20)$$

$$M_{m_f}(V_{x_b-z_b}, \alpha, \delta) = \frac{1}{2} \rho V_{x_b-z_b}^2 A_f C_{M\delta} (\delta - \alpha) \quad (5.21)$$



Rysunek 5.5. Wektor prędkości $V_{x_b-z_b}$ pojazdu rzutowany na płaszczyznę (x_b-z_b) oraz siły oporów F_{D_f} i F_{L_f} działające na stery zgodnie z wektorem prędkości.

Podobnie do procedury przeprowadzonej dla całego pojazdu, siły oporów sterów zostały rzutowane na oś z_b pojazdu, a moment działający wokół osi y_b stanowi sumę momentu M_{m_f} generowanego przez płetwę w wyniku wychylenia jej w strudze opływającej ją wody oraz momentu F_{L_f} generowanego przez siłę unoszenia płetwy, której punkt działania jest odsunięty od środka obrotu pojazdu o dystans x_f .

$$F_{D_{fz_b}} = \sin(\alpha) F_{D_f} + \cos(\alpha) F_{L_f} \quad (5.22)$$

$$M_{m_{fy_b}} = M_{m_f} + x_f F_{L_f} \quad (5.23)$$

Łącząc równania (5.8) - (5.23) składniki wektora oporów hydrodynamicznych z równania (5.7) można zapisać następująco:

$$F_x = F_{D_{bx_b}} \quad (5.24)$$

$$F_y = F_{D_{by_b}} \quad (5.25)$$

$$F_z = F_{D_{bz_b}} + F_{D_{fz_b}} \quad (5.26)$$

$$M_y = M_{q_b} + M_{m_{fy_b}} \quad (5.27)$$

$$M_z = M_{r_b} \quad (5.28)$$

5.2 Identyfikacja parametrów modelu

Model matematyczny ruchu pojazdu HUUW wymaga wyznaczenia parametrów znajdujących się po obu stronach równania (5.1). Lewa strona tego równania przedstawia siły i momenty działające na pojazd będący ciałem sztywnym. Prawa strona prezentuje siły i momenty pochodzące od wody, w której ten pojazd się porusza.

Jako pierwsze wyznaczone zostały składniki lewej strony równania (5.1) czyli macierzy inercji ciała sztywnego M_{RB} oraz macierzy sił Coriolisa i sił dośrodkowych C_{RB} . Analiza została wykonana w programie Solidworks, na modelu 3D pojazdu. W tym celu wszystkim podzespołom wchodzącym w skład pojazdu została nadana masa. Na tej podstawie program wyznaczył całkowitą masę pojazdu oraz momenty bezwładności wokół osi układu umieszczonego w COB , których wartości przedstawia Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parametry masowe pojazdu HUUW.

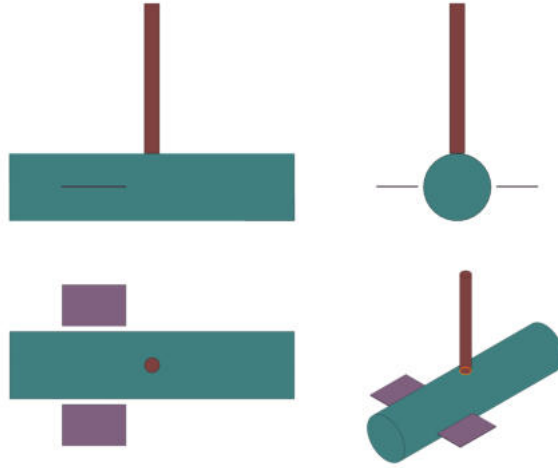
m [kg]	I_x [kgm ²]	I_y [kgm ²]	I_z [kgm ²]
19	0,1974	0,7126	0,6509

Prawa strona równania (5.1) zawiera efekty hydrodynamiczne w postaci macierzy M_A , $C_A(\nu)$ oraz $D(\nu)$. W modelu ogólnym z rozdziału 2.5 macierz oporów hydrodynamicznych $D(\nu)$ jest sumą składników liniowych (równanie (2.11)) i nieliniowych (równanie (2.12)). Jest to metoda przedstawienia oporów wykorzystująca rozwinięcie szeregu Taylora, gdzie współczynniki liniowe i nieliniowe szacuje się na podstawie testów eksperymentalnych takich jak: CMT (ang. *Circular Motion Test*) [81], czy PMM (ang. *Planar Motion Mechanism*) [82], [83], [84] w basenach holowniczych. Alternatywnym sposobem, jednak o mniejszej dokładności są symulacje CFD [85], [86], [87]. Symulacje te dzieli się na dwa typy: w stanie ustalonym i w stanie nieustalonym. Symulacje CFD w stanie ustalonym pozwalają wyznaczyć tylko opory hydrodynamiczne. Zakładają stałe warunki tj. prędkości, ciśnienia i temperatury wody oraz nieruchomo ustawiony model ciała, który ta woda opływa. Symulacje CFD w stanie nieustalonym umożliwiają wyznaczenie mas towarzyszących. W trakcie takich symulacji model porusza się w wodzie lub zmienia się prędkość strugi wody. Są to jednak znacznie bardziej wymagające symulacje pod kątem mocy obliczeniowej niż symulacje w stanie ustalonym. Trzecią metodą, która jest najszybsza jednak o najmniejszej dokładności jest analityczne wyznaczenie oporów hydrodynamicznych i mas towarzyszących na bazie przyjętych uproszczeń kształtu pojazdu.

W ramach identyfikacji parametrów modelu, opory hydrodynamiczne $D(\nu)$ pojazdu HUUW zostały wyznaczone w ramach symulacji CFD w stanie ustalonym, natomiast masy towarzyszące z M_A i $C_A(\nu)$ zostały wyznaczone metodą analityczną.

Wzory analityczne na wyznaczenie mas towarzyszących prostych kształtów typu sfera lub walec można znaleźć w podręcznikach [88] lub materiałach dydaktycznych [89]. Aby możliwe było proste wyznaczenie mas pojazdu HUUW przyjęte zostało uproszczenie, traktujące bryłę pojazdu jako dwa oddzielne walce (kadłub i maszt) oraz stery zanurzenia jako dwie płaskie płyty, co prezentuje Rysunek 5.6.

Wzory prezentujące masy towarzyszące generowane przez płytę zostały zaczerpnięte



Rysunek 5.6. Kształt pojazdu uproszczony do kadłuba i masztu w formie walca i sterów zanurzenia w formie płaskich płyt.

z [90]. W ten sposób wyznaczone zostały wzory (5.29) - (5.33) na masy towarzyszące m_x , m_z , m_z , J_y i J_z z przekątnej głównej macierzy M_A z równania (5.4). We wzorach przyjęto oznaczenia: k - kadłub, m - maszt i s - stery.

$$m_x = m_{x_k} + m_{x_m} + m_{x_s} = \frac{1}{10} \rho \pi r_k^2 L_k + \rho \pi r_m^2 L_m + 0 \quad (5.29)$$

$$m_y = m_{y_k} + m_{y_m} + m_{y_s} = \rho \pi r_k^2 L_k + \rho \pi r_m^2 L_m + 0 \quad (5.30)$$

$$m_z = m_{z_k} + m_{z_m} + m_{z_s} = \rho \pi r_k^2 L_k + 0 + 2k \frac{\pi \rho c^2 b^3}{4} \quad (5.31)$$

$$J_y = J_{y_k} + J_{y_m} + J_{y_s} = \frac{1}{12} \rho \pi r_k^2 L_k^3 + \frac{1}{3} \rho \pi r_m^2 L_m^3 + 2x_B^2 k' \frac{\pi \rho c^2 b}{4} \quad (5.32)$$

$$J_z = J_{z_k} + J_{z_m} + J_{z_s} = \frac{1}{12} \rho \pi r_k^2 L_k^3 + 0 + 0 \quad (5.33)$$

gdzie:

r_k, L_k - promień i długość kadłuba,

r_m, L_m - promień i długość masztu,

c - długość steru zanurzenia,

b - szerokość steru zanurzenia,

k - współczynnik masy towarzyszącej dla prostokątnej płyty,

k' - współczynnik momentu towarzyszącego dla prostokątnej płyty,

x_{SB} - odległość środka steru od środka wyporu pojazdu COB ,

Pozostałe składniki macierzy M_A mają w porównaniu ze składnikami z przekątnej głównej znacznie mniejszy wpływ na dynamikę ruchu pojazdu i dopuszcza się ich pominięcie. Jednak aby jak najlepiej oddać zachowanie rzeczywistego pojazdu HUUV w modelu, zostały uwzględnione. Ich wartości zostały oszacowane w oparciu o analizę mas towarzyszących innym podobnym pojazdom podwodnym dostępnych w literaturze (Rysunek 5.7). Podstawowe parametry takie jak masa, gabaryty i stosunek długości do średnicy pojazdów przedstawia Tabela 5.2.



Rysunek 5.7. Górny rząd od lewej Minesniper [91], REMUS [92]. Dolny rząd od lewej SNUUV-I [93], Lillen [94].

Tabela 5.2: Parametry pojazdów oraz stosunek ich długości L do średnicy D .

	Minesniper [80]	REMUS [92]	Lillen [94]	SNUUV-I [93]	HUUV
m [kg]	40	30,5	13,5	42,8	19
D [m]	0,17	0,19	0,125	0,25	0,18
L [m]	1,93	1,38	1,3	1,35	0,76
L/D	11,35	7,29	10,4	5,4	4,22

Największy wpływ na masę towarzyszącą pojazdowi HUUV ma kadłub, dlatego tylko on został wzięty pod uwagę w porównaniu. Pominięty został maszt i stery zanurzenia. Jako współczynnik podobieństwa przyjęto stosunek długości do średnicy kadłuba pojazdu. Zgodnie z tabelą 5.2 pojazd HUUV najbardziej przypomina SNUUV-I oraz REMUS, dlatego w kolejnym kroku w tabeli 5.3 przedstawiony został procentowy stosunek masy towarzyszącej do całkowitej masy suchej dla tych trzech pojazdów. Odniesienie do całkowitej masy wynika z faktu, że analityczne wzory (5.29) - (5.33) opierają się na masie wody wypartej przez pojazd. Masa towarzysząca kadłuba w osi x jest równa $m_{x_k} = \frac{1}{10}\rho\pi r_k^2 L_k = \frac{1}{10}m$, gdzie m to całkowita masa pojazdu HUUV. Na tej podstawie w równaniu (5.34) wyznaczone zostały masy towarzyszące z poza głównej przekątnej.

Tabela 5.3: Procentowy stosunek masy towarzyszącej do całkowitej masy suchej pojazdu.

	m_x/m	m_y/m	m_z/m	J_y/m	J_z/m	m_{yr}/m	m_{zq}/m
SNUUV-I	13	130	160	45	31	1	2
REMUS	3	116	116	16	16	6	6
HUUV	13	105	102	6	5	-	-

$$m_{yr} = m_{zq} = J_{yw} = J_{zv} = \frac{1}{20}m = 1,14 \quad (5.34)$$

Opory hydrodynamiczne $D(\nu)$ pojazdu HUUV przedstawione w formie wektora (5.7) wyznaczone zostały za pomocą symulacji CFD w stanie ustalonym, w oparciu

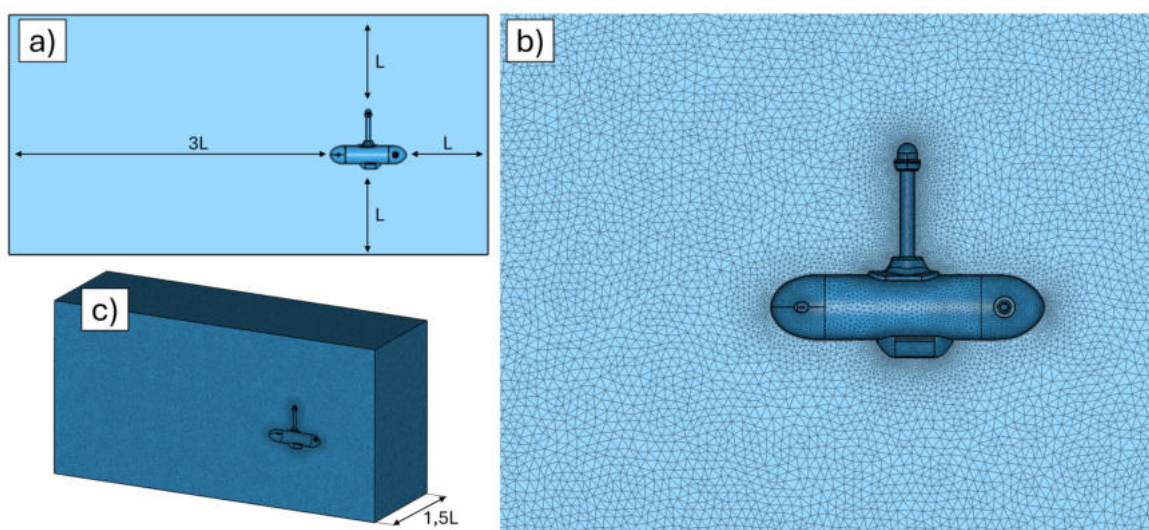
o literaturę [95], [96], [97]. W symulacjach tych, pojazd ustawiany był pod różnymi kątami ataku α i ślizgu β do opływającej go strugi wody. W ten sposób szacowane były siły *drag*, *lift* oraz momenty działające na pojeździe. Przyjęty został zakres ± 25 deg dla kąta α i zakres od 0 do 25 deg dla kąta β . Symulację CFD w płaszczyźnie (x - z) dla kąta ataku α przeprowadzono z parametrami z Tabeli 5.4 i domeną symulacyjną przedstawioną na Rysunku 5.8. Ponieważ pojazd jest symetryczny względem płaszczyzny (x - z), symulowana była reakcja tylko połowy kadłuba, aby zmniejszyć całkowity czas symulacji. Symulację CFD w płaszczyźnie (x - y) dla kąta ślizgu β przeprowadzono z parametrami z Tabeli 5.5. W tym przypadku symulacje były realizowane na pojeździe w pełni znajdującym się w domenie symulacyjnej, której szerokość przyjęta została równa $3L$. Rozkłady prędkości wody opływającej pojazd, dla obu symulacji prezentują Rysunki 5.9 i 5.10.

Tabela 5.4: Parametry symulacji CFD w płaszczyźnie (x - z).

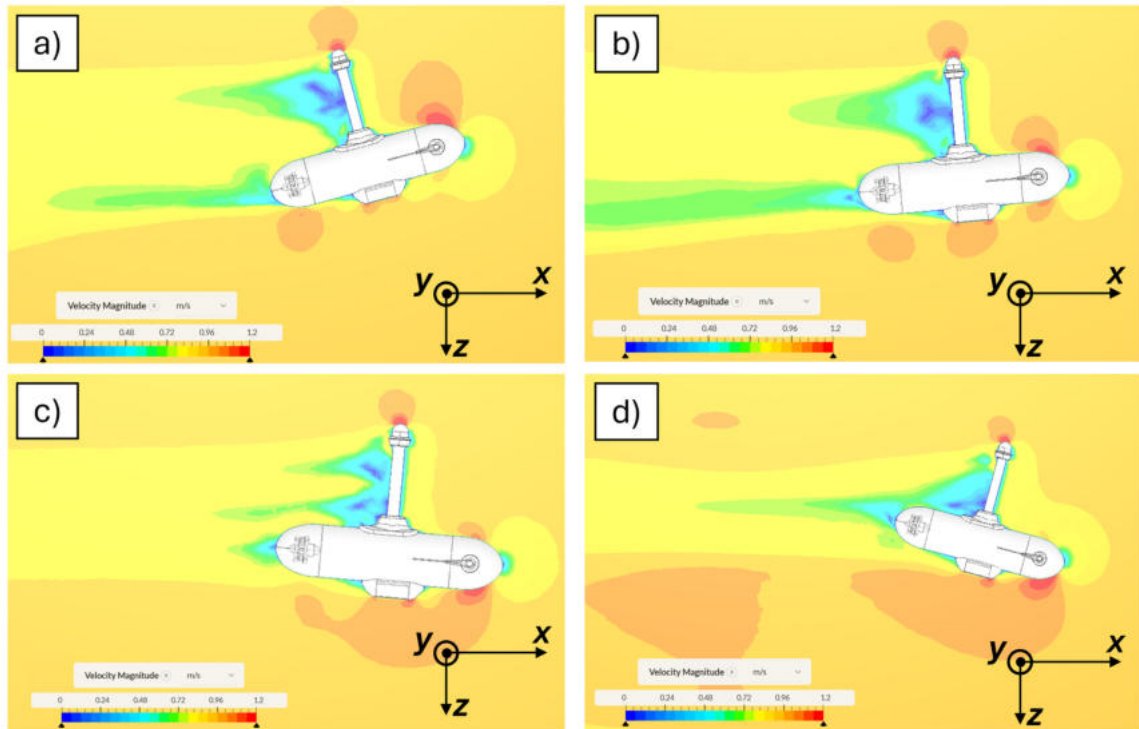
Liczba komórek siatki CFD	1,5M
Model turbulencji	k- ω SST
Typ symulacji	Steady-state
Algorytm	SIMPLE
długość L	0,75 m

Tabela 5.5: Parametry symulacji CFD w płaszczyźnie (x - y).

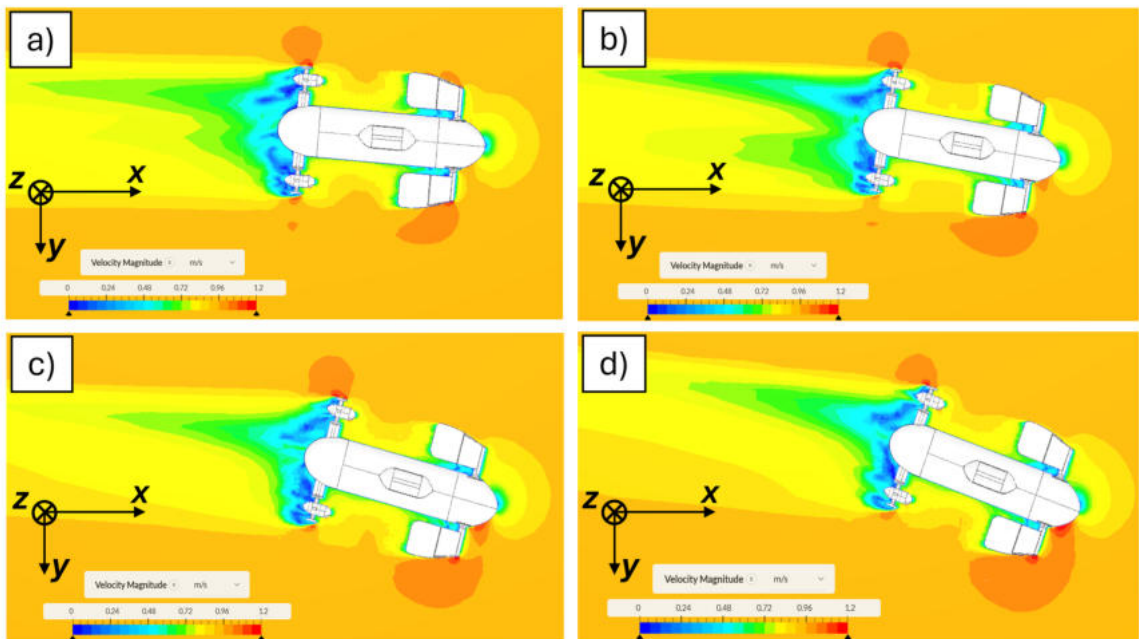
Liczba komórek siatki CFD	5,3M
Model turbulencji	k- ω SST
Typ symulacji	Steady-state
Algorytm	SIMPLE
długość L	0,75 m



Rysunek 5.8. Symulacja w płaszczyźnie (x - z). Domena symulacyjna (a), zagęszczenie siatki obliczeniowej wokół pojazdu (b), widok domeny symulacyjnej z nałożoną siatką obliczeniową (c).



Rysunek 5.9. Rozkład prędkości wody opływającej pojazd HUUV. $\alpha = 15$ deg (a), $\alpha = 5$ deg (b), $\alpha = -5$ deg (c), $\alpha = -15$ deg (d).

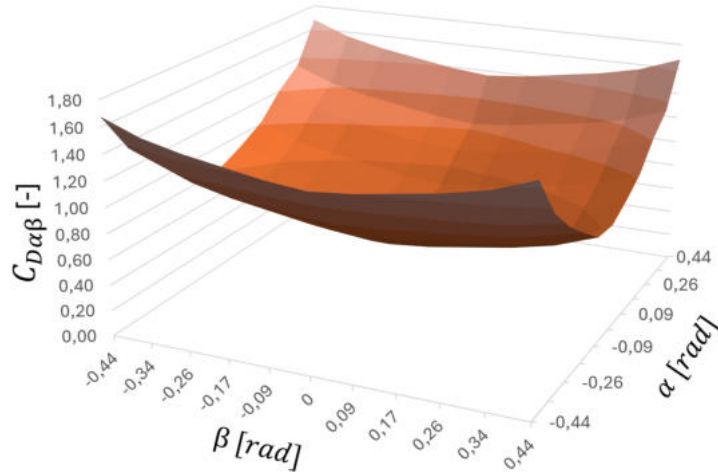


Rysunek 5.10. Rozkład prędkości wody opływającej pojazd HUUV. $\beta = 5$ deg (a), $\beta = 10$ deg (b), $\beta = 15$ deg (c), $\beta = 20$ deg (d).

Współczynnik oporu $C_{D\alpha\beta}$ w rzeczywistości jest zależny od obu kątów α i β jednocześnie. Aby uniknąć przeprowadzania dużej ilości symulacji CFD dla różnych wartości tych kątów zastosowano uproszczenie. Przyjęta została liniowa superpozycja wpływów kątów α i β przedstawiona równaniem 5.35. Efekt superpozycji przedstawia Rysunek

5.11, który wizualizuje dane z Tabeli 5.6. Jest to uproszczenie w wyznaczaniu $C_{D\alpha\beta}$ i przy wyższych wartościach kątów α i β prowadziłyby do bardzo dużych niedokładności, jednak w opracowywanym modelu zostało to przyjęte jako wystarczające.

$$C_{D\alpha\beta} \approx C_{D\alpha 0} + C_{D0\beta} \quad (5.35)$$

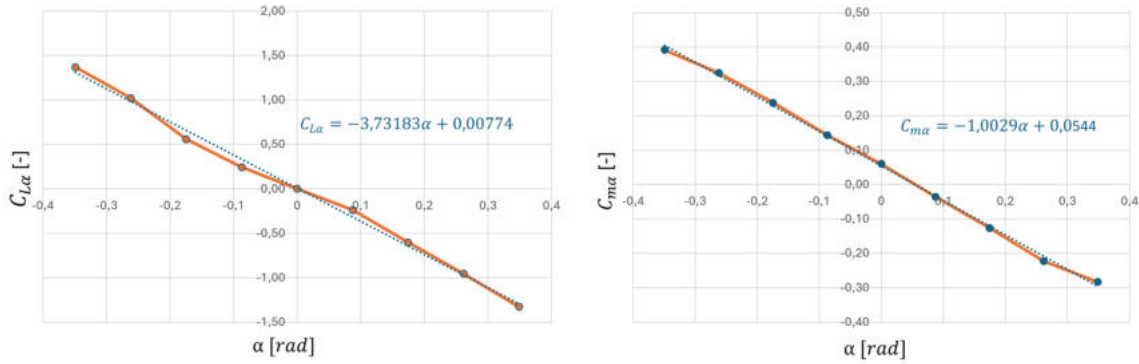
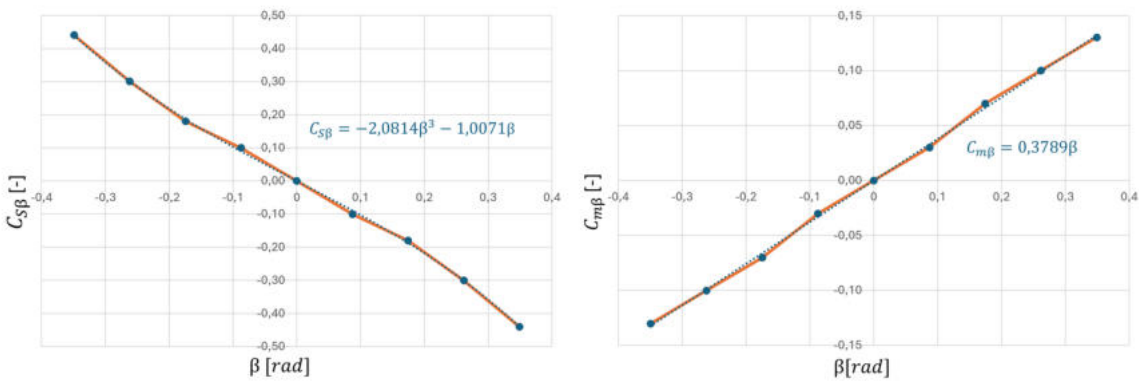


Rysunek 5.11. Współczynnik $C_{D\alpha\beta}$ zależny od kątów α i β .

Tabela 5.6: Wartość współczynnika oporu $C_{D\alpha\beta}$ w zależności od kątów α i β .

$\alpha \backslash \beta$	-0,44	-0,34	-0,26	-0,17	-0,09	0,00	0,09	0,17	0,26	0,34	0,44
-0,44	1,68	1,56	1,49	1,44	1,39	1,36	1,39	1,44	1,49	1,56	1,68
-0,34	1,35	1,23	1,16	1,11	1,06	1,03	1,06	1,11	1,16	1,23	1,35
-0,26	1,14	1,03	0,96	0,91	0,86	0,83	0,86	0,91	0,96	1,03	1,14
-0,17	0,99	0,87	0,80	0,75	0,70	0,67	0,70	0,75	0,80	0,87	0,99
-0,09	0,85	0,73	0,66	0,61	0,56	0,53	0,56	0,61	0,66	0,73	0,85
0,00	0,83	0,71	0,64	0,59	0,54	0,51	0,54	0,59	0,64	0,71	0,83
0,09	0,91	0,80	0,73	0,68	0,63	0,60	0,63	0,68	0,73	0,80	0,91
0,17	1,02	0,90	0,83	0,78	0,73	0,70	0,73	0,78	0,83	0,90	1,02
0,26	1,21	1,09	1,02	0,97	0,92	0,89	0,92	0,97	1,02	1,09	1,21
0,34	1,34	1,23	1,16	1,11	1,06	1,03	1,06	1,11	1,16	1,23	1,34
0,44	1,68	1,56	1,49	1,44	1,39	1,36	1,39	1,44	1,49	1,56	1,68

Wraz z współczynnikiem $C_{D\alpha\beta}$ wyznaczone zostały zależne od kąta α współczynniki $C_{L\alpha}$ oraz $C_{m\alpha}$ (Rysunek 5.12) i zależne od kąta β współczynniki $C_{S\beta}$ oraz $C_{m\beta}$ (Rysunek 5.13).

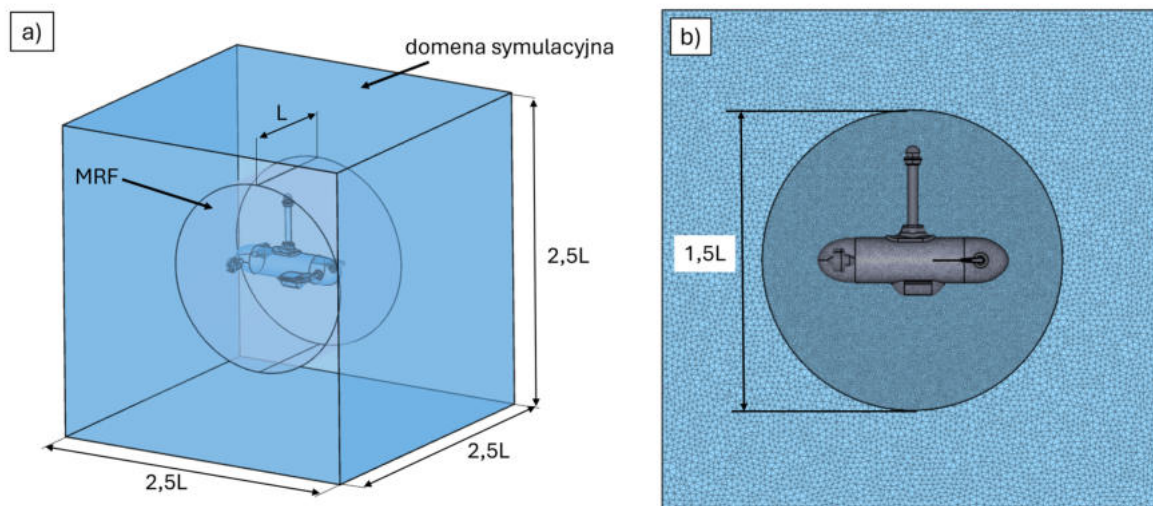
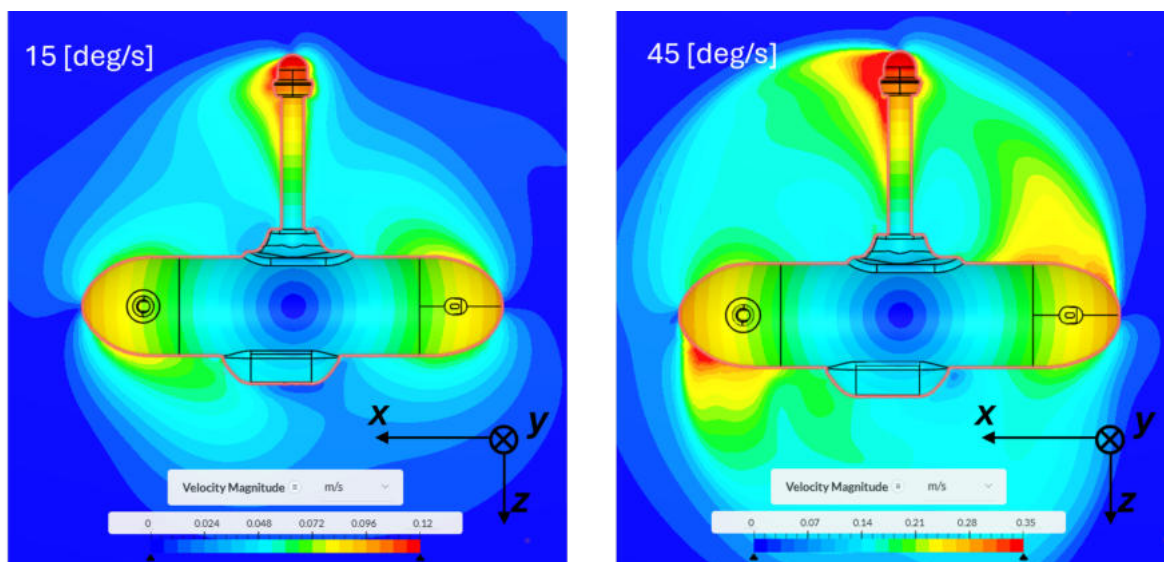
Rysunek 5.12. Współczynniki $C_{L\alpha}$ i $C_{m\alpha}$ zależne od kąta α .Rysunek 5.13. Współczynniki $C_{S\beta}$ oraz $C_{m\beta}$ zależne od kąta β .

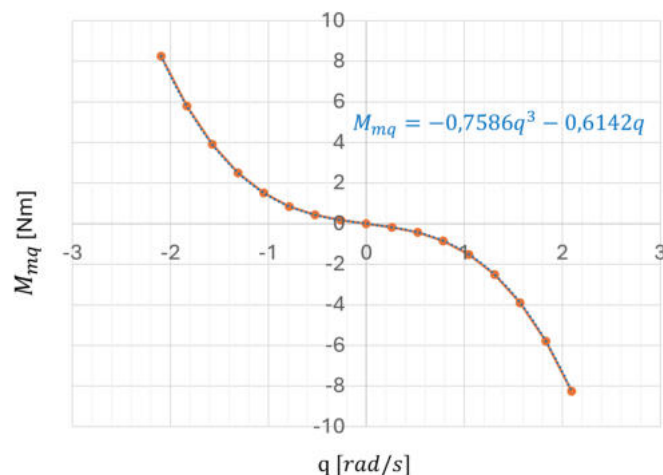
Interpretując powyższe współczynniki zauważyć można, że symulacje CFD prawidłowo oddały asymetrię kadłuba pojazdu HUUUV. Analizując kształt pojazdu przyjęta została symetria w płaszczyznach (y_b-z_b) i (x_b-z_b) . Maszt komunikacyjny i balast powodują brak symetrii w płaszczyźnie (x_b-y_b) . Efekt ten widoczny jest na wykresie współczynnika $C_{m\alpha}$ z rysunku (5.12). Krzywa nie przechodzi przez punkt zero, tylko jest uniesiona o 0,0544. Powoduje to obecność masztu, który w trakcie ruchu pojazdu w przód generuje opór. Krzywe pozostałych współczynników $C_{L\alpha}$, $C_{S\beta}$ i $C_{m\beta}$ przechodzą przez zero co świadczy o symetrii oporów niezależnie od znaku kątów α i β .

Drugi typ symulacji CFD w stanie ustalonym wykorzystujący MRF (ang. *Moving Reference Frame*) posłużył do oszacowania momentów oporu, jakie stawia pojazd podczas obrotu wokół środka wyporu. W symulacjach tych założona została niska prędkość liniowa wody, a opór wynika głównie z rotacji wody wokół środka wyporu pojazdu. W pierwszej kolejności przeprowadzono symulację obrotu wokół osi y_b . Parametry z jakimi przeprowadzona była symulacja przedstawia Tabela 5.7. Przyjęta została domena symulacyjna i siatka obliczeniowa widoczna na Rysunku 5.14. Rozkład prędkości wody dla obrotu z prędkościami kątowymi 15 deg/s i 45 deg/s prezentuje Rysunek 5.15. Wynik symulacji w postaci wykresu momentu oporu M_{mq} przedstawia Rysunek 5.16.

Tabela 5.7: Parametry symulacji CFD MRF wokół osi y_b .

Liczba komórek siatki CFD	5,5M
Model turbulencji	k- ω SST
Typ symulacji	Steady-state
Algorytm	SIMPLE
długość L	0,75 m

Rysunek 5.14. Domena symulacyjna z MRF (a), siatka obliczeniowa (b), dla symulacji CFD MRF wokół osi y_b .Rysunek 5.15. Rozkład prędkości wody opływającej HUUV w symulacji CFD MRF wokół osi y_b dla dwóch różnych prędkości kątowych.

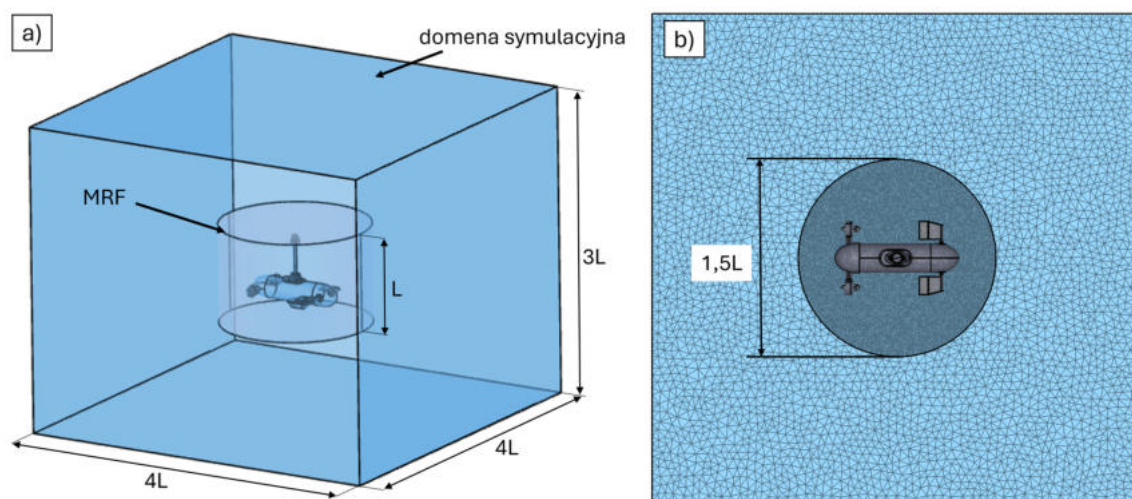


Rysunek 5.16. Wykres momentu oporu M_{mq} z symulacji CFD MRD wokół osi y_b .

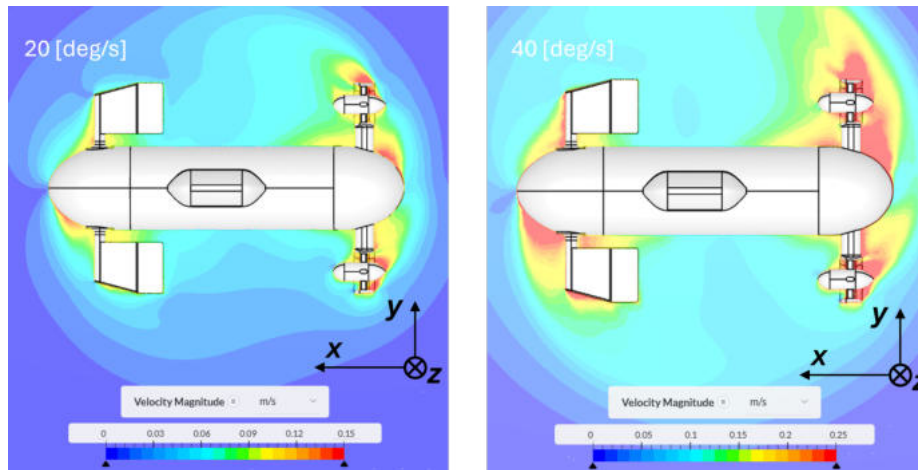
Ta sama procedura symulacyjna została przeprowadzona dla obrotu wokół osi z_b . Parametry symulacji przedstawia Tabela 5.8. Przyjęta została domena symulacyjna i siatka obliczeniowa widoczna na Rysunku 5.17. Rozkład prędkości wody dla obrotu z prędkościami kątowymi 20 deg/s i 40 deg/s prezentuje Rysunek 5.18. Wynik symulacji w postaci wykresu momentu oporu M_{mr} przedstawia Rysunek 5.19.

Tabela 5.8: Parametry symulacji CFD MRF wokół osi z_b .

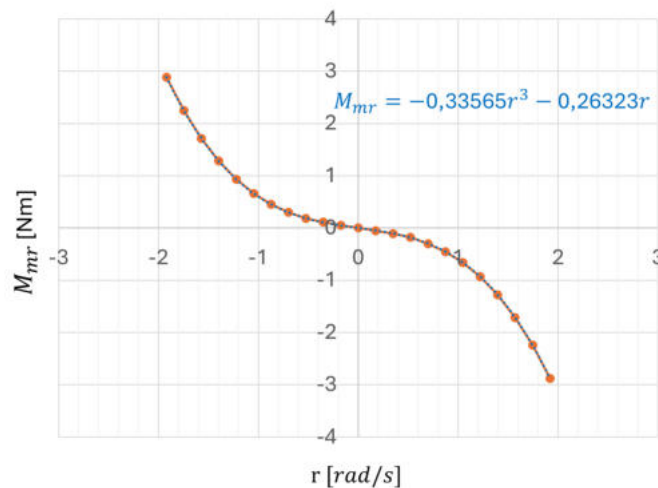
Liczba komórek siatki CFD	5,1M
Model turbulencji	k- ω SST
Typ symulacji	Steady-state
Algorytm	SIMPLE
długość L	0,75 m



Rysunek 5.17. Domena symulacyjna z MRF (a), siatka obliczeniowa (b), dla symulacji CFD MRF wokół osi z_b .



Rysunek 5.18. Rozkład prędkości wody opływającej HUUV w symulacji CFD MRF wokół osi z_b dla dwóch różnych prędkości kątowych.

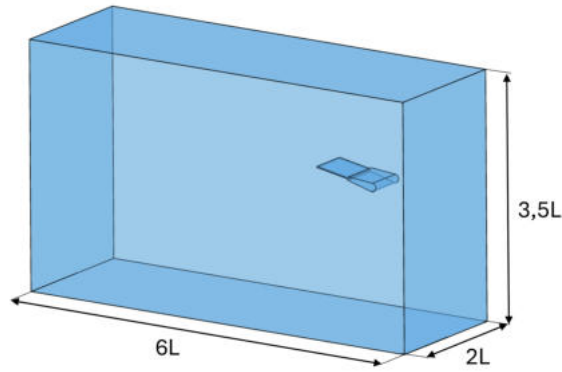


Rysunek 5.19. Wykres momentu oporu M_{mr} z symulacji CFD MRF wokół osi z_b .

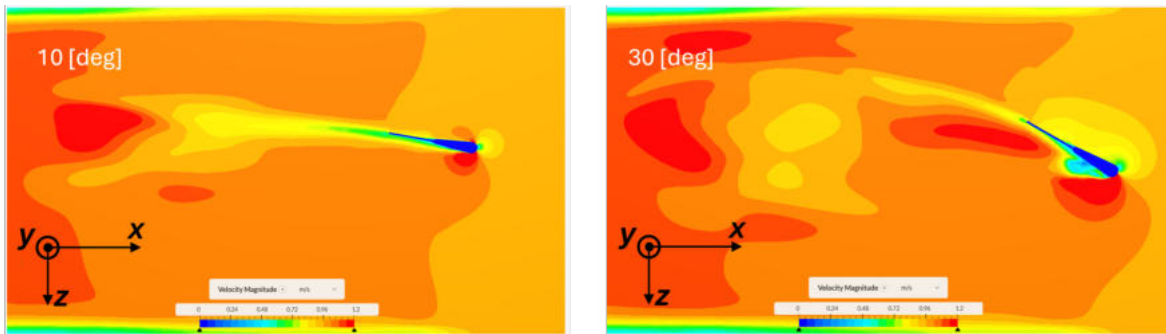
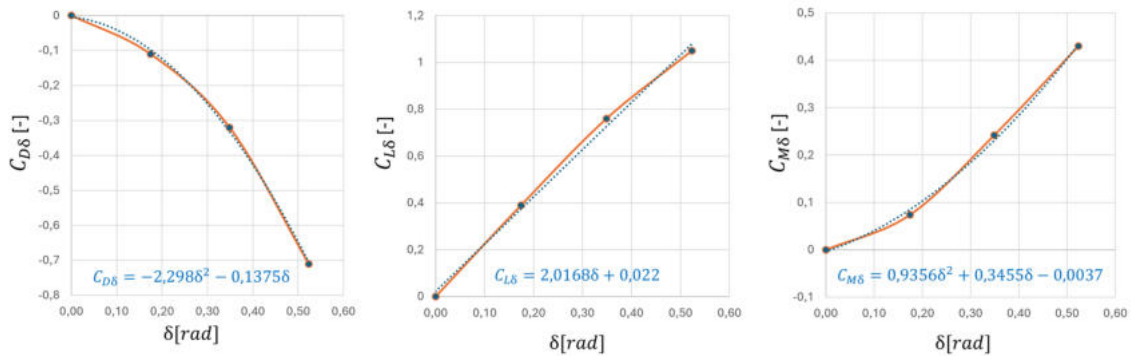
Ostatnia seria symulacji przeprowadzona została dla samych sterów zanurzenia. Wychylenie steru w strudze opływającej wody oznaczone jako δ zostało ustalone na wartości 0, 10, 20 i 30 deg. Symulacje przeprowadzono z parametrami z Tabeli 5.9. Domenę symulacyjną prezentuje Rysunek 5.21. Rozkład prędkości wody wokół steru dla dwóch różnych kątów wychylenia przedstawia Rysunek 5.21 a uzyskane współczynniki hydrodynamiczne Rysunek 5.22.

Tabela 5.9: Parametry symulacji CFD sterów zanurzenia.

Liczba komórek siatki CFD	4,7M
Model turbulencji	k- ω SST
Typ symulacji	Steady-state
Algorytm	SIMPLE
długość L	0,2 m

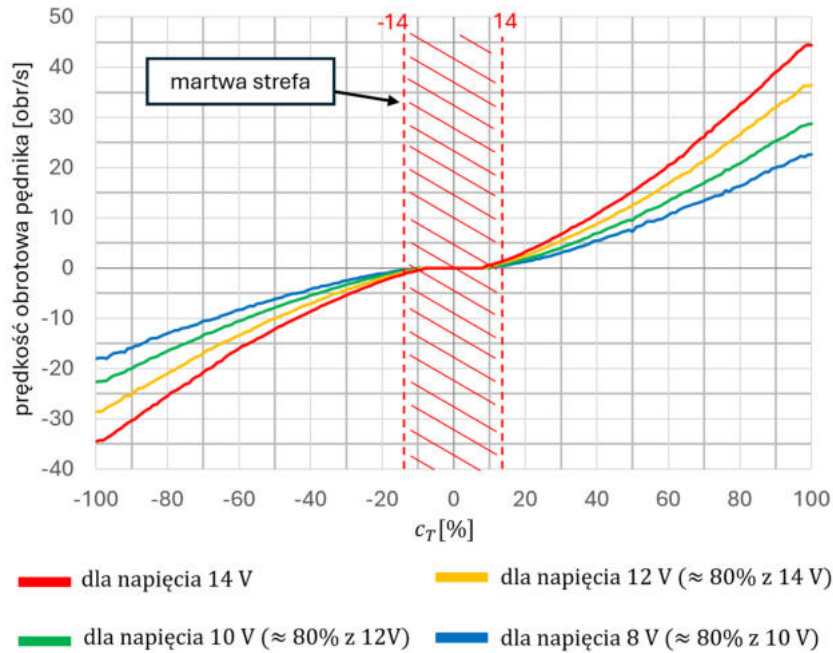


Rysunek 5.20. Domena symulacyjna dla sterów zanurzenia.

Rysunek 5.21. Rozkład prędkości wody wokół steru. Z lewej $\delta = 10$ deg, z prawej dla $\delta = 30$ deg.Rysunek 5.22. Współczynniki hydrodynamiczne dla steru zanurzenia $C_{D\delta}$, $C_{L\delta}$, $C_{M\delta}$ w zależności od kąta wychylenia steru δ [rad].

Ostatnimi dwoma parametrami modelu ruchu pojazdu, które wymagają wyznaczenia, są siła naporu X wzdłuż osi x_b wprawiającą pojazd w ruch postępowy i moment obrotowy N obracający pojazd wokół osi z_b . Pojazd HUUUV wyposażony jest w pędniki śrubowe T200 firmy Bluerobotics. Producent dostarcza charakterystyki działania pędników (Rysunek 5.23) w postaci prędkości obrotowej śruby w zależności od procentowego sygnału sterującego pędnikiem c_T dla różnych wartości napięć zasilających. Niezależnie od napięcia zasilającego, pędniki T200 posiadają martwą strefę, która przyjęta została na $\pm 14\%$ c_T . Z wykresu można zauważyć, że schodząc z napięciem zasilającym

w dół, każdy kolejny przebieg stanowi około 80% wartości przebiegu poprzedniego. W ten sposób wyznaczony został przebieg prędkości obrotowej pędnika dla napięcia zasilającego 8 V. Przebieg ten, stanowi punkt odniesienia dla pojazdu HUUV, ponieważ bateria pojazdu nie daje stabilnego napięcia zasilającego. Wraz z wzrostem poboru prądu napięcie z pakietu bateryjnego spada. Poziom 8 V przyjęty został ze względu na fakt, że badania eksperymentalne w większości są realizowane przy napięciu baterii pomiędzy 10 a 11 V, a w trakcie badań z pędnikami śrubowymi sterowanymi wyższymi wartościami c_T zaobserwowano spadki napięcia właśnie do poziomu około 8 V.



Rysunek 5.23. Prędkość obrotowa pędnika śrubowego w funkcji sygnału sterującego c_T .

Przebiegi z Rysunku 5.23 są wynikami badań w wodzie stojącej, gdzie pędnik na stałe zamontowany jest do uchwytu i w trakcie badania nie porusza się w wodzie. W modelu napędu pojazdu HUUV konieczne jest uwzględnienie spadku generowanego naporu wraz z wzrostem prędkości ruchu pojazdu. Zostało to wykonane w oparciu o [98] i badanie pędnika T200 przedstawione w materiałach konferencyjnych [99]. Śruba pędnika T200 Bluerobotis posiada łopatki ustawione pod kątem $\chi = 22,5$ deg w odległości 75% promienia od osi pędnika oraz średnicę $D = 0,076$ m. W pierwszej kolejności wyznaczony został skok śruby P (5.36) oraz współczynnik skoku geometrycznego P/D (5.36).

$$P = \pi D \tan \chi = \pi \cdot 0,076 \cdot 0,75 \cdot \tan(22,5) = 0,0704 \quad (5.36)$$

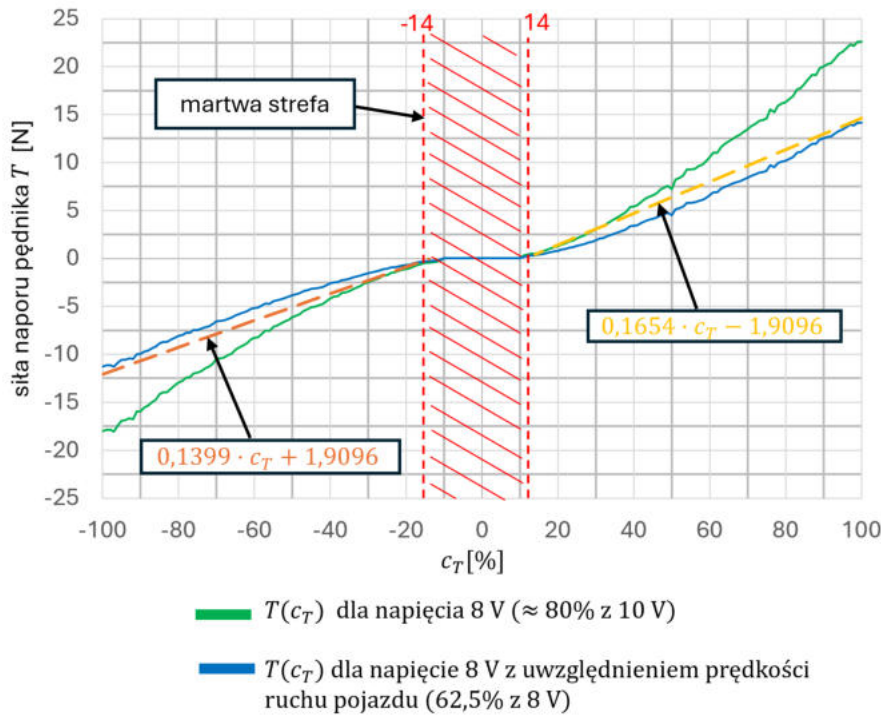
$$P/D = \frac{P}{D} = \frac{0,0704}{0,076} = 0,97 \quad (5.37)$$

Pędnik T200 dla napięcia 8 V i 100% c_T osiąga prędkość obrotową około $n = 42$ obr/s. Rozpędza to pojazd w pełnym zanurzeniu do prędkości około $V = 1,2$ m/s. Na tej podstawie w równaniu 5.38 wyznaczony został współczynnik posuwu J . Wynika z niego, że dla 100% c_T pędniki śrubowe rozpędzają pojazd do prędkości 1,2 m/s, co

powoduje obniżenie generowanego naporu przez pędniki o $1 - 0,375 = 0,625$ czyli 62,5%.

$$J = \frac{V}{n \cdot D} = \frac{1,2}{42 \cdot 0,076} = 0,375 \quad (5.38)$$

Wykres siły generowanej przez pędnik śrubowy dla napięcia zasilania 8 V oraz napięcia zasilania 8 V z uwzględnieniem ruchu wody przedstawia Rysunek 5.24. Przebieg niebieski dla napięcia 8 V z uwzględnieniem ruchu wody został aproksymowany dwoma funkcjami liniowymi, które wykorzystane zostały w modelu pędnika śrubowego przedstawionego w równaniu 5.39.



Rysunek 5.24. Siła naporu pędnika pojazdu HUUV w funkcji sygnału sterującego c_T .

$$T = \begin{cases} 0,1654 \cdot c_T - 1,9096 & \text{gdy } c_T > 14\% \\ 0,1399 \cdot c_T + 1,9096 & \text{gdy } c_T < -14\% \end{cases} \quad (5.39)$$

Następnie wyznaczone zostały sygnały sterujące lewym c_{TL} (5.40) i prawym c_{TR} (5.41) pędnikiem śrubowym, w zależności od sygnału sterującego naporem wzdłużnym $c_{T\Sigma}$ i różnicą naporu $c_{T\Delta}$ pojazdu.

$$c_{TL} = c_{T\Sigma} - c_{T\Delta} \quad (5.40)$$

$$c_{TR} = c_{T\Sigma} + c_{T\Delta} \quad (5.41)$$

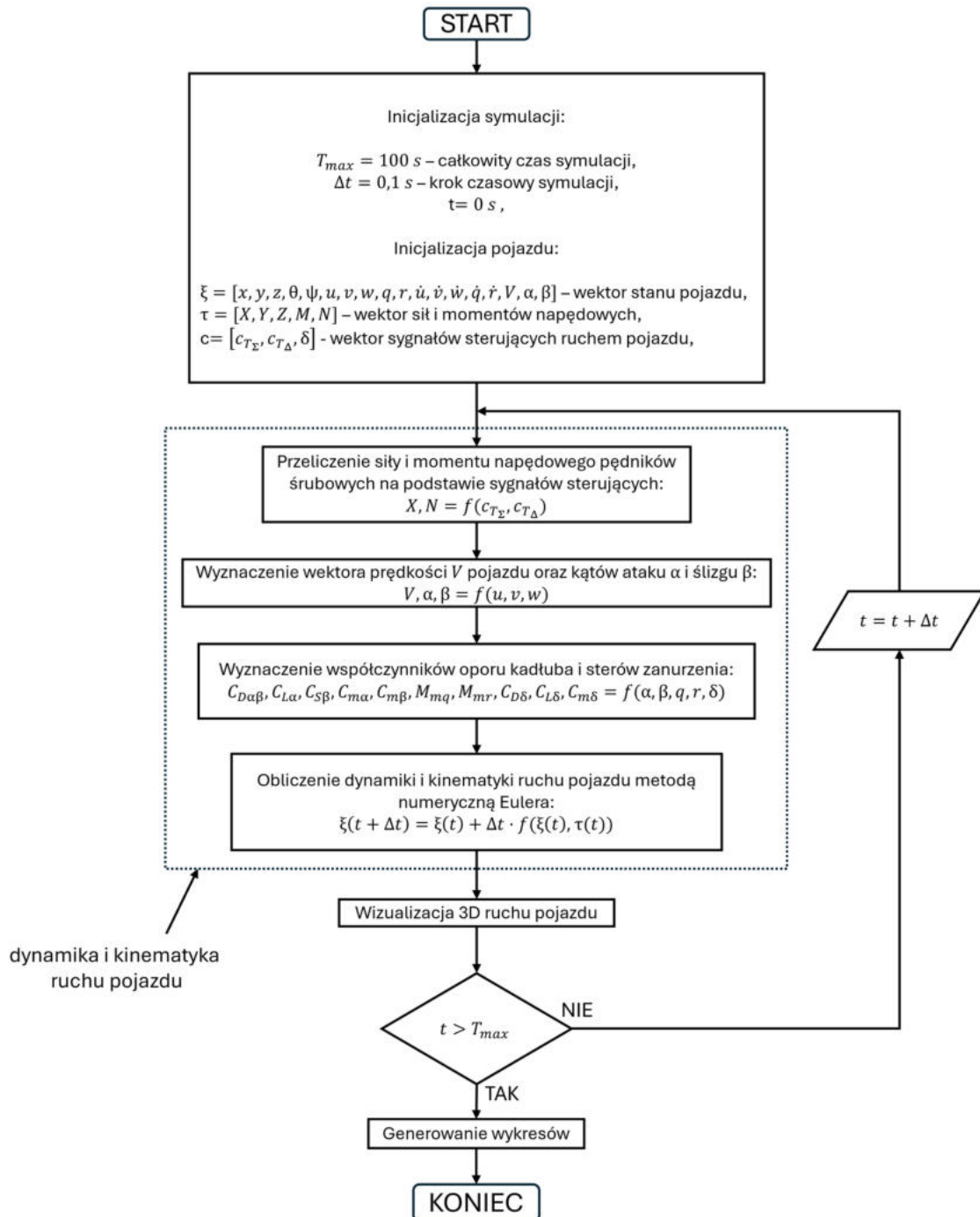
Ostatnie dwa równania prezentują siłę naporu X wzdłuż osi x_b (5.42) wprawiającą pojazd w ruch postępowy i moment obrotowy N (5.43) obracający pojazd wokół osi z_b .

$$X = T_R(c_{TR}) + T_L(c_{TL}) \quad (5.42)$$

$$N = T_R(c_{TR}) \cdot y_{thr} - T_L(c_{TL}) \cdot y_{thr} \quad (5.43)$$

5.3 Model ruchu pojazdu w programie Matlab

Model matematyczny ruchu opracowany w podrozdziale 5.1 wraz z parametrami modelu zidentyfikowanymi w podrozdziale 5.2 posłużyły do opracowania symulacji ruchu w programie Matlab. Schemat blokowy symulacji przedstawia Rysunek 5.25.



Rysunek 5.25. Schemat blokowy symulacji ruchu pojazdu HUUV w programie Matlab.

Symulacja ruchu rozpoczyna się od kroku inicjalizacyjnego. W jego skład wchodzi inicjalizacja symulacji, gdzie ustalone zostają: całkowity czas trwania, czas startu i krok czasowy oraz inicjalizacja pojazdu, w trakcie której tworzone zostają wektory: stanu po-

jazdu, sił i momentów napędowych oraz sygnałów sterujących. W każdej kolejnej iteracji, wektory te są aktualizowane nowo wyznaczonymi wartościami. Główną część stanowi symulacja dynamiki i kinematyki ruchu pojazdu. W pierwszej kolejności, na podstawie wektora sygnałów sterujących, wyznaczone zostają: siła w osi x_b pojazdu powodująca jego ruch postępowy i moment wokół osi z_b powodujący obrót pojazdu. Wykorzystywany jest do tego opracowany wcześniej model pędnika śrubowego. W następnym kroku, korzystając z wartości prędkości pojazdu u , v i w , pochodzących z poprzedniej iteracji, wyznaczone są: długość wektora prędkości V , kąt ataku α i kąt ślizgu bocznego β . Kąty te, wraz z prędkościami kątowymi q wokół osi y_b i r wokół osi z_b oraz kątem wychylenia sterów zanurzenia służą do wyznaczenia współczynników oporów hydrodynamicznych kadłuba i sterów. W kolejnym kroku wykorzystując prędkość pojazdu V współczynniki te przeliczane są na konkretne siły i momenty oporu. Następnie siły i momenty oporu rzutowane są na układ współrzędnych pojazdu $(0_b, x_b, y_b, z_b)$. W ten sposób wyliczane są składowe wektora $D(\nu)$ wchodzącego w skład równań dynamiki ruchu pojazdu. Do rozwiązywania równań dynamiki wykorzystana została numeryczna metoda Eulera. W każdej kolejnej iteracji działania symulacji aktualizowane są: wektory stanu pojazdu, wektor sił i momentów napędowych oraz wektor sygnałów sterujących. Ostatni krok, realizowany w pętli głównej symulacji, to wizualizacja 3D ruchu pojazdu. Wykorzystane zostały w tym celu moduły Matlaba: Graphics i GUI. Gdy upłynie całkowity czas symulacji, w ostatnim kroku generowane są wykresy prezentujące zmianę wybranych parametrów w czasie symulacji.

Schemat blokowy z Rysunku 5.25 koncentruje się na procedurze symulacji dynamiki i kinematyki ruchu pojazdu. Sygnały sterujące napędami są odgórne ustawianie w trakcie symulacji.

5.4 Eksperymentalna weryfikacja modelu ruchu pojazdu

Opracowanie modelu ruchu pojazdu oddającego dynamikę ruchu rzeczywistego obiektu jest niezwykle trudnym zadaniem. Dla pojazdów o smukłym kształcie np. torpedy, ze śrubą na rufie oraz sterami zanurzenia i kursu, możliwe jest wyznaczenie współczynników hydrodynamicznych z dobrą precyzją poprzez metody eksperymentalne takie jak PMM [82]. Polegają one na pomiarze rzeczywistych wartości sił działających na fizyczny model pojazdu w trakcie poruszania nim w wodzie. Są to jednak kosztowne metody, które wymagają dużych i wyspecjalizowanych laboratoriów. W związku z tym stosuje się je w przypadku komercyjnych pojazdów podwodnych i nawodnych.

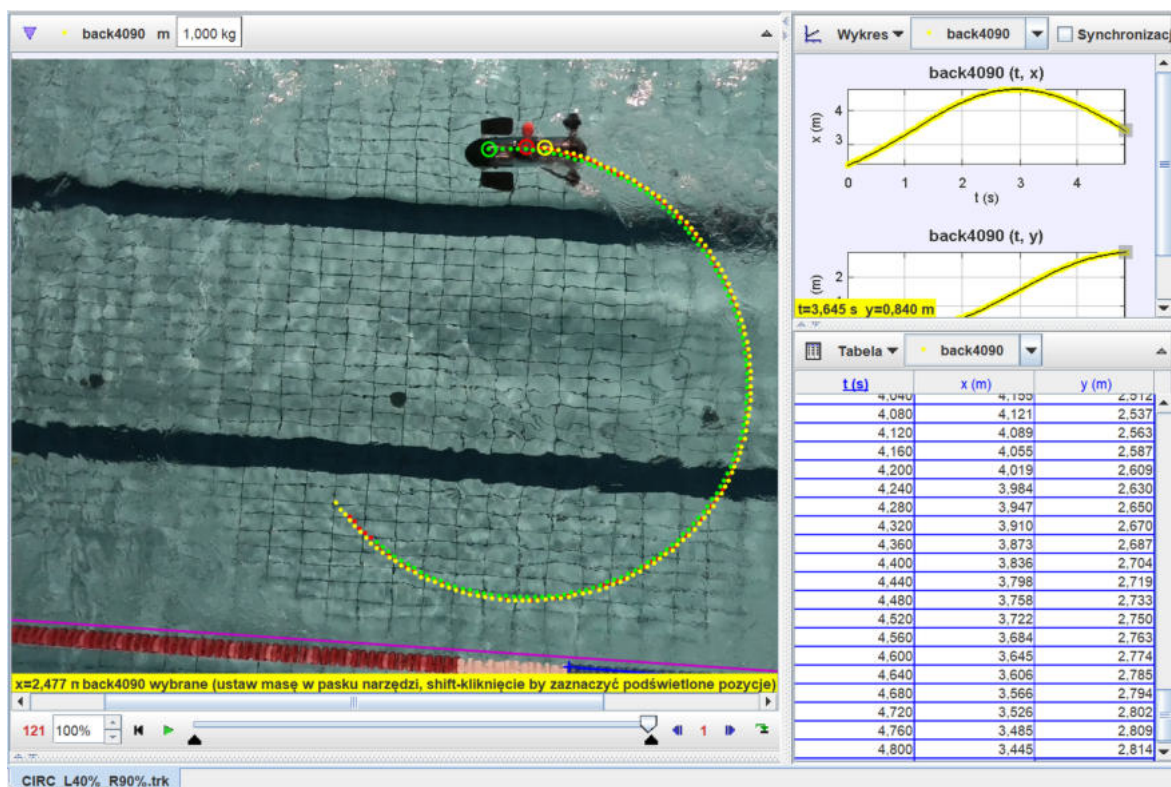
Pojazdy HUUV są niskobudżetowymi konstrukcjami, które przeznaczone są do badań laboratoryjnych, w związku z tym wyznaczenie współczynników hydrodynamicznych zostało wykonane w oparciu o symulacje CFD w programie Simscale a następnie uzyskane wyniki zostały dostrojone na podstawie parametrów ruchu pojazdu uzyskanych eksperymentalnie. Taka metodyka podyktowana jest stosunkowo skomplikowanym kształtem pojazdu HUUV. Duży, w stosunku do rozmiarów kadłuba maszt, pędniki śrubowe zamontowane po bokach kadłuba i duże stery zanurzenia sprawiają, że wyzna-

czenie współczynników oporu jest niezwykle trudne. Symulacje CFD przeprowadzone były na modelu HUUV kadłuba ze sterami i pędnikami śrubowymi, jednak stery były nieruchome, a pędniki nie generowały żadnego naporu. W rzeczywistości elementy te pracują, przez co generują dodatkowe zawirowania wody, których symulacja CFD nie uwzględnia. Te dodatkowe efekty wynikające z pracy pędników śrubowych i sterów zanurzenia mają ogromne znaczenie podczas manewrów skręcania i zanurzania, w których pojazd porusza się z niezerowymi kątami ataku i ślizgu. Weryfikacja eksperymentalna modelu symulacyjnego została przeprowadzona dla ruchu osobno w płaszczyźnie poziomej (x_n-y_n) i pionowej (x_n-z_n). Ze względu na brak odpowiedniej aparatury pomiarowej umożliwiającej rejestrację ruchu pojazdu w przestrzeni podwodnej, połączenie ruchu w obu płaszczyznach, podczas którego pojazd jednocześnie zmieniałby zanurzenie i kurs nie zostało zweryfikowane.

Aby uzyskać parametry ruchu rzeczywistych pojazdów, wykonane zostały badania eksperymentalne na basenie pływackim, w trakcie których mierzone były prędkości pływania, promienie cyrkulacji oraz zanurzanie pojazdu HUUV. Pomiary parametrów ruchu wykonano z wykorzystaniem kamery GoPro umieszczonej nad basenem na wysokości 4 m oraz późniejszej analizy obrazu za pomocą programu Tracker, który umożliwia śledzenie wybranego obiektu na kolejnych klatkach nagrania wideo. Kamera GoPro ustawiona została w tryb linear, aby ograniczyć wpływ zniekształceń obiektywu. Filmy nagrywane były z szybkością 25 kl/s z rozdzielczością 1920 na 1080 px. Stanowisko pomiarowe prezentujące miejsce usytuowania kamery GoPro na wahadle prostym przedstawia Rysunek 5.26, a analizę nagrań w programie Tracker Rysunek 5.27. Zastosowanie wahadła prostego w systemie mocowania kamery nad basenem pozwala na uzyskanie prostopadłego do powierzchni wody nagrania z kamery.

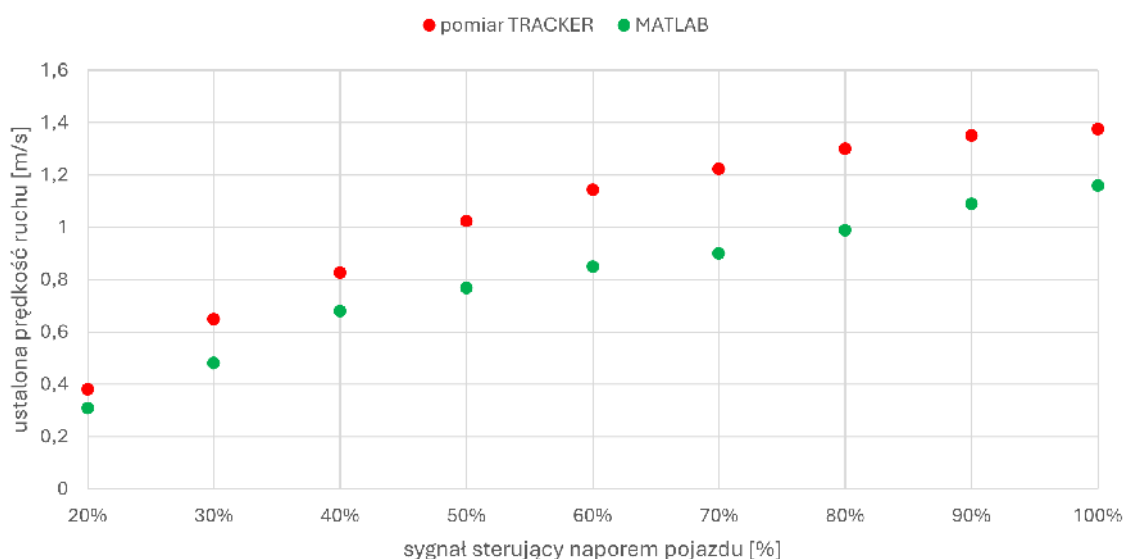


Rysunek 5.26. Stanowisko do badania trajektorii ruchu.



Rysunek 5.27. Analiza cyrkulacji pojazdu dla 40 % wartości sygnału sterującego pędnika lewego i 90 % wartości sygnału sterującego pędnika prawego.

Uzyskane prędkości ruchu, podobnie jak cyrkulacje, zostały porównane z wartościami pochodzącymi z symulacji. Rysunek 5.28. przedstawia ustaloną prędkość ruchu pojazdu. Różnica w wartościach wynika z faktu, że pojazd rzeczywisty poruszał się po powierzchni, natomiast pojazd symulowany w Matlabie w pełnym zanurzeniu, gdzie dodatkowy opór generuje maszt komunikacyjny.



Rysunek 5.28. Porównanie ustalonej prędkości ruchu dla różnych procentowych wartości maksymalnego naporu pędników pojazdu.

Drugim zweryfikowanym eksperymentalnie elementem jest cyrkulacja pojazdu. Weryfikacji poddane zostały trzy parametry: kąt ślizgu bocznego β , prędkość liniowa oraz promień cyrkulacji. Dla przejrzystości wyniki eksperymentalne i symulacyjne badania cyrkulacji zostały zestawione na Rysunku 5.29. Tabele (a),(c) i (e) prezentują wyniki eksperymentalne uzyskane z programu Tracker, natomiast tabele (b),(d) i (f) przedstawiają wyniki symulacji w programie Matlab, po dostrojeniu współczynników oporu.

a) kąt ślizgu β [deg] TRACKER					
c_{TR} \ c_{TL}	0%	20%	30%	40%	
20%	13,46				
30%	15	7,18			
40%	14,78	9,65			
50%	15,38	9,98	5,9		
60%	16,06	11,85	4,13	1,94	
70%	16,98	12,47	8,29	5,72	
80%	16,07	13,28	9,06	7,15	
90%	16,39	13,09	9,89	7,07	
100%	16,53	13,72	9,7	9,61	

b) kąt ślizgu β [deg] SYMULACJA					
c_{TR} \ c_{TL}	0%	20%	30%	40%	
20%	21				
30%	21,76	11,5			
40%	21,4	15			
50%	21,05	16,4	10		
60%	20,7	17,1	12	7,4	
70%	20,4	17,5	13,3	9,5	
80%	20,1	17,7	14,2	11	
90%	19,9	17,8	14,8	12	
100%	19,7	17,9	15,2	12,7	

c) prędkość liniowa V [m/s] TRACKER					
c_{TR} \ c_{TL}	0%	20%	30%	40%	
20%	0,19				
30%	0,19	0,36			
40%	0,29	0,57			
50%	0,33	0,62	0,79		
60%	0,39	0,65	0,77	1,11	
70%	0,45	0,70	0,80	0,99	
80%	0,52	0,77	0,88	1,02	
90%	0,53	0,78	0,94	1,11	
100%	0,61	0,80	0,99	0,93	

d) prędkość liniowa V [m/s] SYMULACJA					
c_{TR} \ c_{TL}	0%	20%	30%	40%	
20%	0,17				
30%	0,27	0,39			
40%	0,35	0,45			
50%	0,42	0,49	0,62		
60%	0,48	0,54	0,64	0,74	
70%	0,53	0,59	0,68	0,77	
80%	0,58	0,63	0,71	0,79	
90%	0,62	0,667	0,75	0,82	
100%	0,66	0,71	0,79	0,85	

e) promień cyrkulacji [m] TRACKER					
c_{TR} \ c_{TL}	0%	20%	30%	40%	
20%	0,53				
30%	0,49	1,25			
40%	0,54	0,97			
50%	0,48	0,84	1,64		
60%	0,47	0,74	1,63	1,68	
70%	0,47	0,74	1,49	1,33	
80%	0,48	0,72	1,24	1,31	
90%	0,48	0,61	1,08	1,37	
100%	0,48	0,57	1,04	0,79	

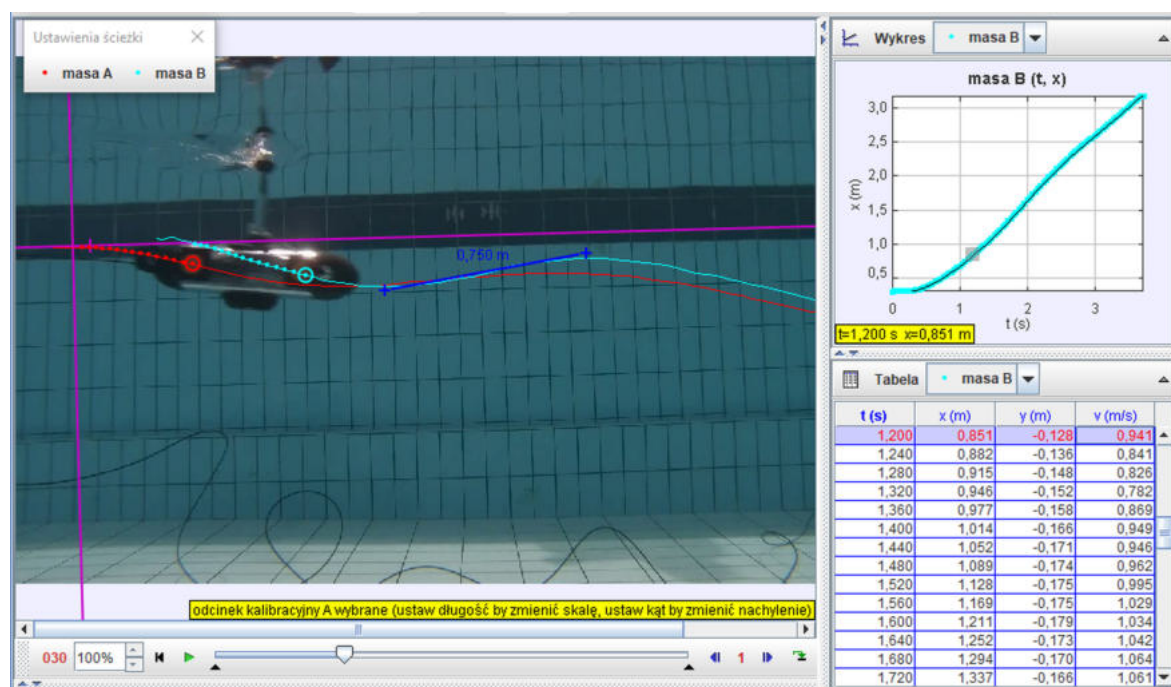
f) promień cyrkulacji [m] SYMULACJA					
c_{TR} \ c_{TL}	0%	20%	30%	40%	
20%	0,57				
30%	0,55	1,3			
40%	0,55	0,95			
50%	0,55	0,86	1,58		
60%	0,59	0,82	1,25	2,1	
70%	0,6	0,8	1,1	1,6	
80%	0,62	0,77	1,05	1,38	
90%	0,65	0,75	0,97	1,25	
100%	0,66	0,75	0,92	1,15	

Rysunek 5.29. Porównanie cyrkulacji ruchu dla różnych wartości sygnału sterującego pednników.

Przeprowadzonych zostało 28 testów eksperymentalnych, dla różnych wartości sygnałów sterujących lewym c_{TL} i prawym c_{TR} pednikiem śrubowym. Wyniki ekspe-

rymentalne pokazują, że przy cyrkulacji z jednym pędnikiem śrubowym wyłączonym ($c_{T_L} = 0\%$) wzrost sygnału sterującego drugim pędnikiem c_{T_R} tylko nieznacznie zmienia wartość kąta ślizgu bocznego, który utrzymuje się na poziomie między 13 a 16 deg, oraz promienia cyrkulacji, którego wartość utrzymuje się w pobliżu 0,5 m. Jeżeli na lewy pędnik jest podana niewielka wartość sygnału sterującego c_{T_L} 20, 30 lub 40% a prawy pędnik zawsze przyjmuje wartość sygnału wyższą o minimum 10% aby występowała różnica naporu pędników, to wzrost sygnału sterującego c_{T_R} powoduje wzrost kąta ślizgu bocznego i spadek promienia cyrkulacji. Na podstawie wyników eksperymentalnych dokonano strojenia metodą kolejnych przybliżeń współczynników oporu związanych z kątem ślizgu β oraz prędkością kątową r wokół osi z_B . Strojenie zostało zrealizowane poprzez odpowiednie przeskalowanie wartości współczynników: $C_{S\beta}$, $C_{N\beta}$ oraz N_r uzyskanych z analizy CFD o czynnik 2. Dla tak zmodyfikowanych wartości współczynników, przeprowadzono 28 symulacji odpowiadających 28 testom eksperymentalnym, których wyniki przedstawione są w zestawieniu z wynikami eksperymentalnymi na Rysunku 5.29. Aby ułatwić porównanie zastosowano gradientowe tło komórek gdzie zielony kolor odpowiada najniższym wartościom w danej tabeli a czerwony najwyższym.

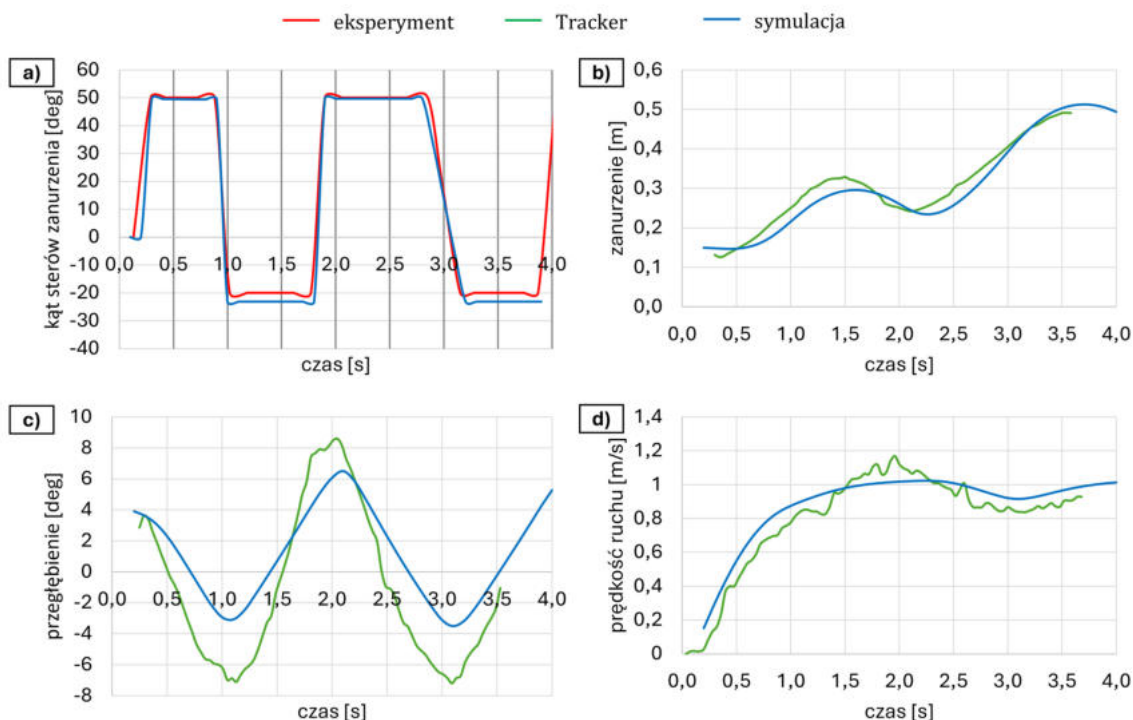
Następnie, weryfikacji poddany został ruch pojazdu w płaszczyźnie pionowej. Opracowany model zanurzania dynamicznego pojazdu HUUV został szczegółowo przedstawiony w publikacji autora [100]. W ramach pomiarów eksperymentalnych, kamera GoPro ustawiona została na statywie pod powierzchnią wody i nagrywała przepływający przed nią pojazd. Analizę ruchu w programie tracker przedstawia Rysunek 5.30. Ze względu na ograniczony rozmiar kadru kamery, nagrany został czterosekundowy ruch pojazdu.



Rysunek 5.30. Analiza dynamicznego zanurzania pojazdu w programie Tracker.

Uzyskane wyniki prędkości ruchu, przegłębienia, zanurzenia pojazdu oraz kąta sterów zanurzenia zestawione zostały na Rysunku 5.31 z wynikami symulacji z dostrojonymi współczynnikami hydrodynamicznymi. W trakcie eksperymentu, kąt sterów zanurzenia

był skokowo zmieniany, zgodnie z przebiegiem w kolorze czerwonym (Rysunek 5.31a). Kolorem zielonym oznaczone są przebiegi wyznaczone na podstawie analizy nagrania w programie Tracker, natomiast niebieski kolor to symulowane przebiegi dla tych samych zadanych wartości kąta sterów i naporu pędników pojazdu, z którymi poruszał się pojazd w trakcie eksperymentu. Strojeniu poddane zostały współczynniki związane z kątem ataku α oraz prędkością kątową wokół osi y_B . Podobnie jak w przypadku promieni cyrkulacji strojenie zostało zrealizowane metodą kolejnych przybliżeń przez przeskalowanie współczynników: $C_{L\alpha}$, $C_{M\alpha}$ o czynnik 1,5 oraz M_q o czynnik 4.



Rysunek 5.31. Porównanie dynamiki ruchu pojazdu w płaszczyźnie pionowej.

W ramach eksperymentalnej weryfikacji modelu symulacyjnego dokonano analizy ruchu rzeczywistego pojazdu HUUV w płaszczyznach (x_n-y_n) i (x_n-z_n) . Następnie przeprowadzono strojenie odpowiednich współczynników w oparciu o wiedzę ekspercką i metodę kolejnych przybliżeń, a uzyskane wyniki symulacji zestawiono z wynikami eksperymentalnymi. Zastosowana metoda pozwoliła na opracowanie modelu symulacyjnego, który w dobrym stopniu oddaje zachowanie rzeczywistego pojazdu poprzez uwzględnienie niesymetrii kadłuba, stosunkowo dużego metacentrum oraz niedostrojenia pojazdu, który może wpływać tylko na ruch w osi x_b i z_b , oraz obrót wokół osi z_b . Efekty działania tych czynników widoczne są w postaci niezerowych wartości kątów ślizgu β i ataku α pomiędzy wektorem prędkości pojazdu a układem współrzędnych pojazdu. W dalszej części pracy model ten został wykorzystany do opracowania systemu sterowania pojazdów, który umożliwi im ruch w ławicy.

Rozdział 6

Badania symulacyjne i eksperymentalne ławicy

6.1 Założenia do algorytmu śledzenia lidera

Bazując na wnioskach z analizy literatury z rozdziału 2, opracowany został algorytm ruchu ławicy pojazdów podwodnych na bazie metody śledzenia lidera i LOS z wykorzystaniem jedynie ograniczonej informacji o wzajemnym położeniu pojazdów w ławicy (dystans i namiar względny), bez znajomości pozycji i orientacji innych pojazdów, własnej prędkości i prędkości innych HUUUV. Jedynym systemem dostarczającym informacji o innych pojazdach w ławicy jest optyczny system lokalizacji w postaci masztu z paskami LED RGB i ruchomą kamerą. Każdy z pojazdów bazując tylko na dystansie i namiarze względnym do śledzonego pojazdu, wykorzystując dodatkowo informacje o własnym chwilowym sygnale sterującym naporem pędników, posiada algorytm sterowania, który umożliwia mu podążanie za śledzonym pojazdem. Model symulacyjny i weryfikacja eksperymentalna zakłada ruch ławicy w formacji linii o strukturze kaskadowej (jeden za drugim). Lider formacji prowadzi tylko jeden pojazd śledzący. Każdy kolejny pojazd śledzący podąża za poprzednikiem. Algorytm sterowania zakłada możliwość hamowania naporem wstecznym pędników oraz ruch pojazdu w tył, co okazało się konieczne z powodu braku informacji o własnej chwilowej prędkości ruchu. Ze względu na problematyczność eksperymentalnej weryfikacji ruchu ławicy w zanurzeniu, opracowany algorytm zakłada tylko ruch w płaszczyźnie poziomej. W symulacji pojazdy poruszają się w pełnym zanurzeniu, dlatego opracowany został regulator zanurzania dynamicznego, którego zadaniem jest utrzymanie określonego zanurzenia przez cały czas trwania symulacji, natomiast weryfikacja eksperymentalna została zrealizowana na powierzchni. W algorytmie nie uwzględniono możliwości unikania kolizji z przeszkodami oraz innymi pojazdami śledzącymi. Każdy pojazd śledzący unika jedynie kolizji ze śledzonym przez niego pojazdem.

6.2 Lokalizacja optyczna pojazdów w ławicy

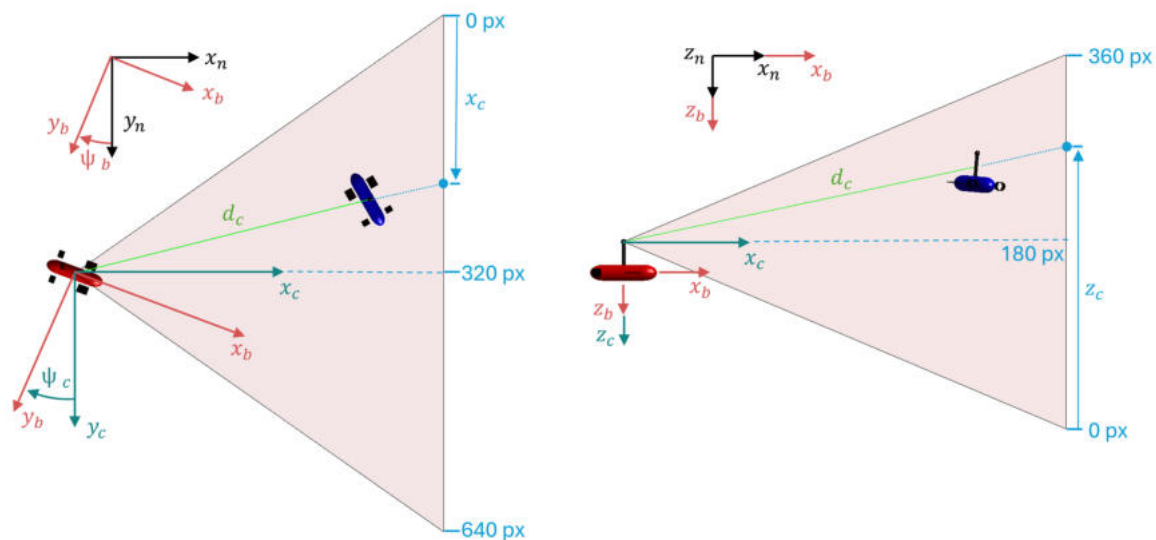
6.2.1 Koncepcja lokalizacji

Światło jako medium komunikacyjne zostało wybrane nie tylko ze względu na prostotę i niski koszt budowy systemu. Pozwala ono na stworzenie unikalnych kodów kolorów, w oparciu o które można identyfikować pojazdy. Do generowania światła wykorzystane zostały diody LED WS2812B, które emitują światło o długościach fal odpowiadających kolorom czerwonym (620 nm - 625 nm), zielonym (522 nm - 525 nm) i niebieskim (465 nm - 467 nm) i jasności świecenia odpowiednio 390 mcd - 420 mcd dla koloru czerwonego, 660 mcd - 720 mcd dla koloru zielonego i 180 mcd - 200 mcd dla koloru niebieskiego. Ustawianie konkretnego koloru odbywa się poprzez komunikację z każdą diodą z osobna. Wysyłane jest 24-bitowe słowo (po 8 bitów na intensywność każdego koloru). W ten sposób podświetlany jest maszt, który widoczny jest jako prostokąt o wysokości 15 cm i szerokości 4 cm. Jeżeli podświetlana część zostanie podzielona na s sekcji, a każda z nich może świecić jednym z k różnych kolorów, to maksymalna liczba możliwych unikalnych identyfikatorów (a więc pojazdów w ławicy) wynosi k^s . W pojazdach HUUV wybrano zestaw $k = 6$ kolorów (czerwony, zielony, niebieski, cyjan, magenta, żółty), a ponieważ ławica składa się z 4 pojazdów, to maszt stanowi jeden segment $s = 1$, co pozwala na identyfikację 6 pojazdów. Jeżeli maszt podzielony zostanie na dwa segmenty $s = 2$, to pozwoli to na identyfikację 36 pojazdów.

Każdy z pojazdów obok LED RGB wyposażony jest w obrotową kamerę, która ma za zadanie obserwować otoczenie. W tym celu wykorzystana została kamera firmy Arducam z sensorem Sony IMX219 B0179 o matrycy 1/4" i rozdzielczości 8 Mpx. Do kamery dołączony jest obiektyw szerokokątny o kątach widzenia 155 deg w poziomie i 115 deg w pionie i przysłonie F2.0. Maksymalna rozdzielczość obrazu z kamery wynosi 3280 na 2464 px przy 21 fps, jednak została ona ograniczona do 640 na 360 px aby zmniejszyć wymaganą moc obliczeniową, która przy takiej rozdzielczości pozwala na analizę 10 fps.

6.2.2 Obszar widzenia kamery pojazdu

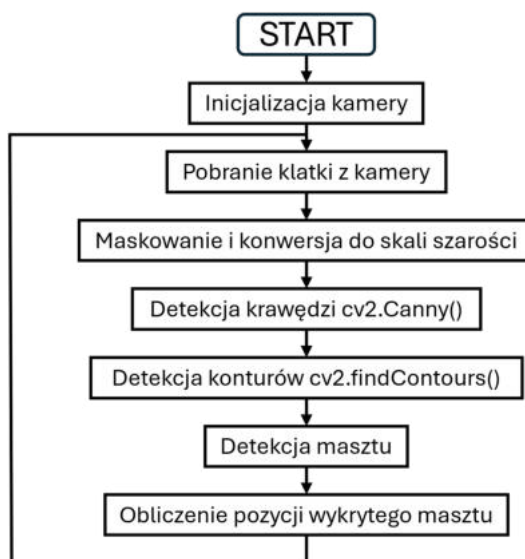
Rysunek 6.1 przedstawia pole widzenia kamery FoV (ang. *Field of View*) zamontowanej na szczycie masztu. Kolorem czerwonym oznaczony został układ (O_b, x_b, y_b, z_b) związany z pojazdem, kolorem czarnym układ globalny (O_n, x_n, y_n, z_n) a kolorem zielonym układ (O_c, x_c, y_c, z_c) związany z kamerą. Kamera może być obracana przez serwomechanizm wokół osi z_c , która jest równoległa do osi z_b pojazdu. W ten sposób kamera może obracać się w zakresie ± 90 deg. Kąt ten został oznaczony jako ψ_c . Maszt innego pojazdu, który został wykryty w obszarze widzenia kamery posiada trzy parametry - współrzędne x_c i z_c oraz dystans d_c . Pierwsze dwa parametry to pozycja na obrazie w pixelach a trzecia jest dystansem do widzianego pojazdu w metrach. Ponieważ maszt tego pojazdu widoczny jest jako obszar pikseli, to nie jest możliwe określenie orientacji tego pojazdu.



Rysunek 6.1. Obszar widzenia kamery. Z lewej w płaszczyźnie (x_b-y_b) , z prawej (x_b-z_b) .

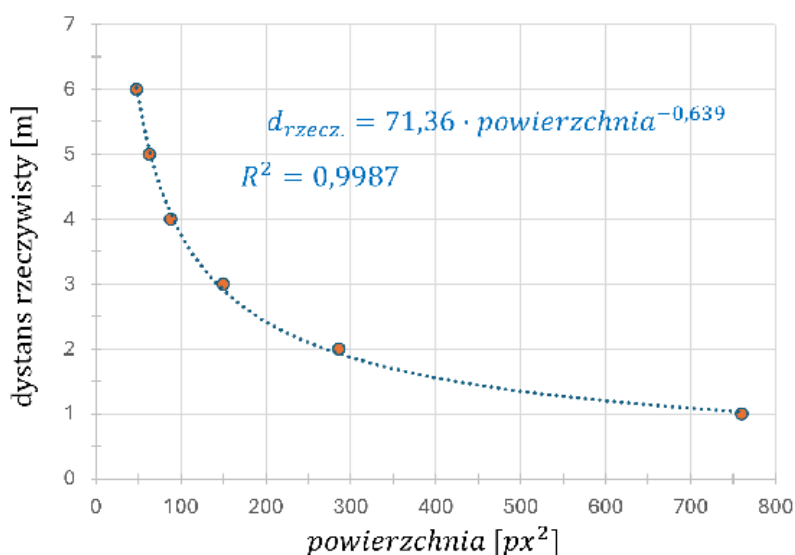
6.2.3 Algorytm detekcji masztu

W rzeczywistym pojeździe algorytm wykrywania masztu na obrazie z kamery wykorzystuje bibliotekę OpenCV i został napisany w języku Python. Procedura wykrywania, przedstawiona na Rysunku 6.2, rozpoczyna się od inicjalizacji kamery, w trakcie której ustalane są parametry m.in. takie jak: czas ekspozycji, cyfrowe i analogowe wzmocnienie jasności obrazu czy balans bieli. Detekcja masztów oparta jest o funkcje `cv2.Canny()` do wykrycia krawędzi na klatce obrazu i `cv2.findContours()` do wyciągnięcia z tych krawędzi konturów obiektów. Obie te funkcje wchodzi w skład biblioteki OpenCV. Następnie w kroku *Detekcja masztu* przeprowadzana jest analiza wykrytych konturów, w wyniku której pozostają te, których kształt zbliżony jest do kształtu masztu pojazdu. W ostatnim kroku następuje obliczenie pozycji na obrazie wykrytego konturu masztu i dystansu do niego na podstawie jego pola powierzchni.



Rysunek 6.2. Procedura detekcji masztów na obrazie z kamery.

Funkcja przeliczająca pole powierzchni wykrytego konturu na dystans została wyznaczona eksperymentalnie. Świecący maszt ustawiany był z dokładnością do 2 cm przed pojazdem w odległościach kolejno od 1 m do 6 m z krokiem co 1 m i rejestrowane były wartości wysokości (h) i szerokości (w) w pikselach prostokąta reprezentującego wykryty maszt w klatce obrazu z kamery, którego algorytm analizy obrazu dopasowywał do rozmiaru wykrytego masztu. Aby poprawnie wykrywać świecący maszt czas ekspozycji kamery został ustawiony na 1,5 ms. Uzyskane w eksperymencie wyniki przedstawia Tabela 6.1. Do danych z Tabeli 6.1 dopasowany został model regresji potęgowej. Wyniki tego dopasowania, wraz z równaniem regresji oraz współczynnikiem determinacji R^2 przedstawia Rysunek 6.3. Otrzymana w ten sposób funkcja potęgowa, szacująca dystans na podstawie powierzchni wykrytego konturu masztu, wykorzystana została w algorytmie analizy obrazu.



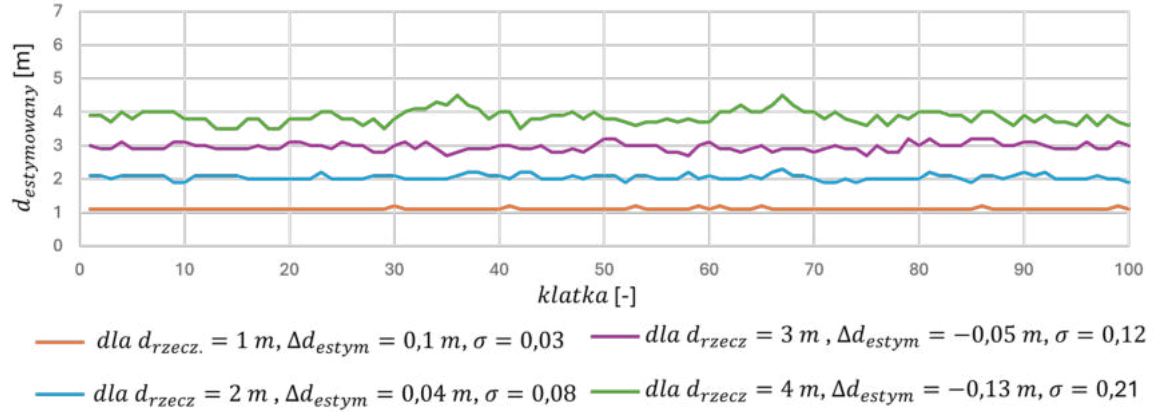
Rysunek 6.3. Dopasowanie modelu regresji potęgowej do danych z Tabeli 6.1.

Tabela 6.1: Wyniki eksperymentalne detekcji masztu z wykorzystaniem algorytmu analizy obrazu.

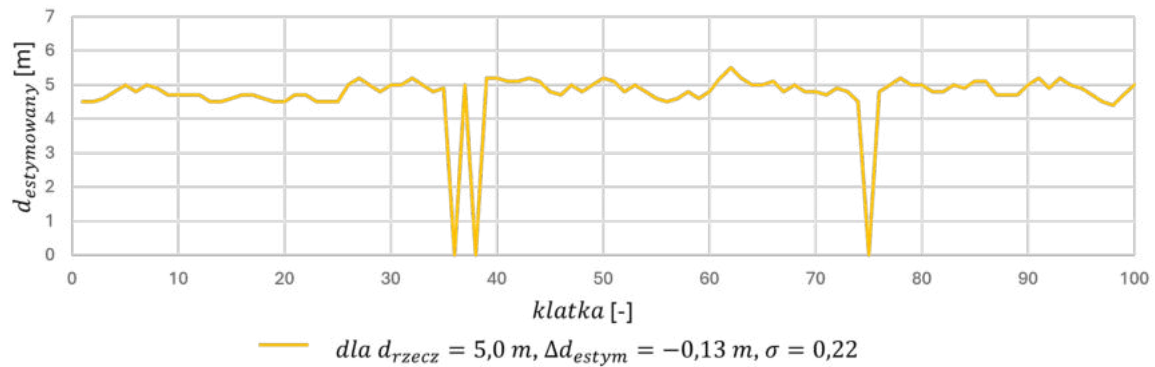
$d_{rzeczywisty}$ [m]	h [px]	w [px]	powierzchnia [px^2]
1	40	19	760
2	22	13	286
3	15	10	150
4	11	8	88
5	9	7	63
6	8	6	48

Aby zweryfikować poprawność szacowania dystansu przeprowadzony został drugi eksperyment. Tym razem dystans estymowany na podstawie powierzchni konturu był określany na 100 kolejnych klatkach analizowanego obrazu co przedstawiają Rysunki 6.4 - 6.6. Podobnie jak poprzednio świecący maszt ustawiany był w odległościach

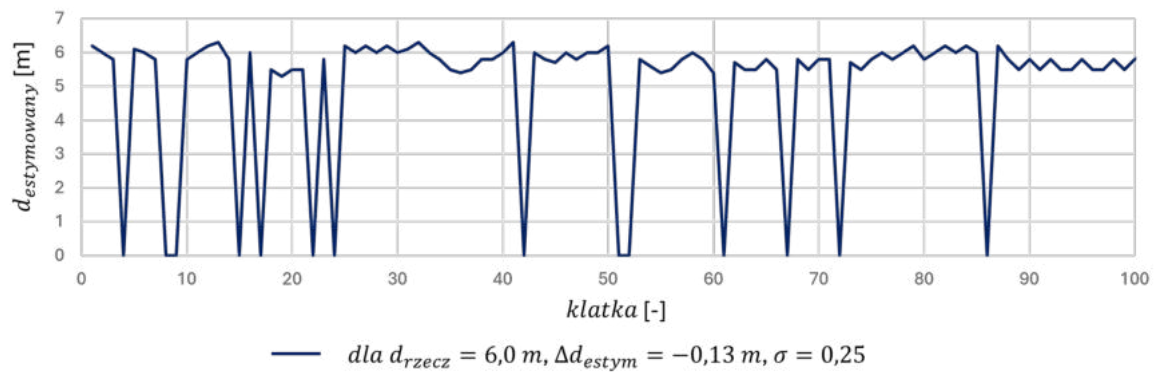
od 1 do 6 m z krokiem 1 m. Pierwsze cztery pomiary dla dystansów 1, 2, 3 i 4 m zostały przedstawione na jednym wykresie. Kolejne dla dystansów 5 i 6 m na osobnych wykresach, ponieważ pojawiają się w nich obserwacje odstające (outliery, związane z brakiem wykrycia masztu w klatce obrazu).



Rysunek 6.4. Dystans estymowany na bazie analizy 100 kolejnych klatek z kamery dla dystansów rzeczywistych od 1 do 4 m.



Rysunek 6.5. Dystans estymowany na bazie analizy 100 kolejnych klatek z kamery dla dystansu rzeczywistego 5 m.



Rysunek 6.6. Dystans estymowany na bazie analizy 100 kolejnych klatek z kamery dla dystansu rzeczywistego 6 m.

6.2.4 Wnioski do lokalizacji optycznej

Zgodnie z powyższym, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem dystansu rośnie niepewność pomiarowa, co widać na wykresach dla dystansów rzeczywistych 5 i 6 m. Nagłe spadki dystansu estymowanego do zera oznaczają że na danej klatce algorytm analizy nie wykrył konturu masztu, który spełniałby kryteria i w efekcie dystans estymowany został uznany jako równy zeru (brak wykrytego masztu). Drugim problemem związanym z rosnącym dystansem jest precyzja estymowania. Im większy dystans, tym wartości estymowane dla kolejnych klatek bardziej oscylują. Dzieje się tak, z powodu maksymalnej rozdzielczości kamery równej 640 px na 360 px, przy której maszt na dystansie 6 m ma rozmiar 8 px na 6 px i zmiana szerokości albo wysokości widzianego konturu o jeden pixel ma duży wpływ na zmianę pola powierzchni. Zgodnie z powyższymi wynikami eksperymentalnymi maksymalny zasięg wykrywania został ustalony na 6 m. Choć skuteczność wykrycia konturu masztu na tak dużym dystansie spada do wartości 86%, to pozwala to pojazdowi wykryć inny pojazd i podjąć próbę minimalizacji dystansu. Istotny jest tu fakt, że tylko na pojedynczych klatkach nie udaje się wykryć konturu masztu. Gdyby utrzymywało się to przez kilka klatek, miało by to już istotny wpływ na działanie algorytmu śledzenia.

Opracowany algorytm lokalizacji optycznej wymaga kalibracji do danych warunków oświetleniowych. Kluczowym parametrem jest czas ekspozycji kamery, który musi być ustawiony tak, aby świecący maszt nie był prześwietlony na klatce. Niski czas ekspozycji sprawia, że niewielka ilość światła trafia na matrycę kamery i możliwe jest wykrycie koloru świecącego masztu, który przy standardowych wartościach czasu ekspozycji jest prześwietlony. Algorytm analizy obrazu oparty został o standardowe funkcje i wszystkie obiekty, które są wystarczająco jasne zostaną wykryte. Dlatego system analizy obrazu przed każdym badaniem eksperymentalnym musi zostać dostrojony do warunków oświetleniowych.

6.3 Badania symulacyjne

6.3.1 Koncepcja algorytmu ruchu ławicy

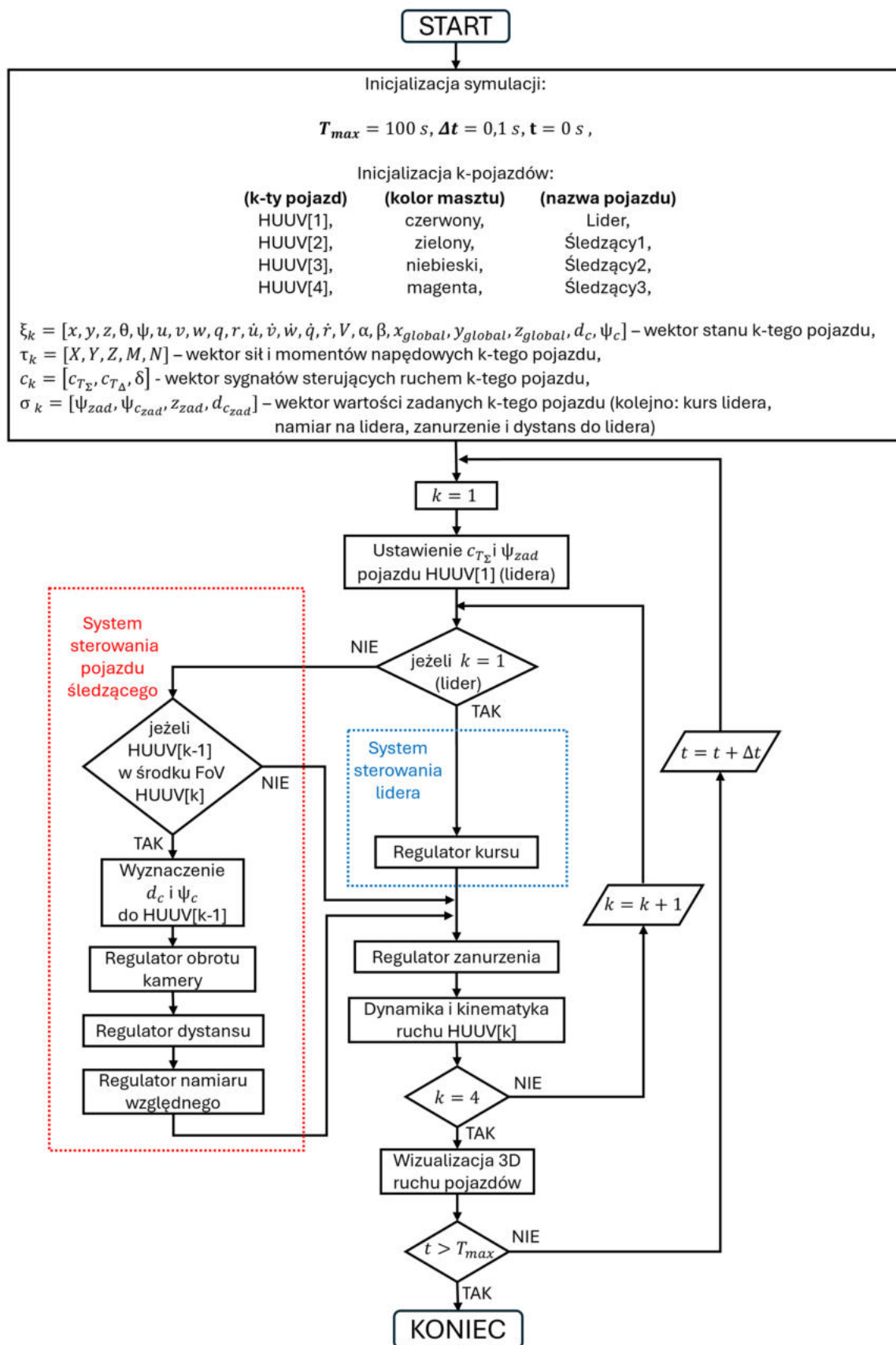
Opracowywany algorytm ruchu ławicy oparty o metody śledzenia lidera i LOS zakłada, że pojazdy nie wymieniają się informacją o własnym ruchu z innymi pojazdami. Każdy z robotów wszystkie decyzje podejmuje samodzielnie na bazie własnej obserwacji otoczenia. Dodatkowo przyjęto, że ruch odbywa się w płaszczyźnie poziomej - wszystkie pojazdy utrzymują konkretne zadane odgórnie zanurzenie, które nie jest zmieniane w trakcie ruchu ławicy. Zgodnie z metodą śledzenia lidera, jest jeden lider, który prowadzi ławicę za sobą. W badaniach symulacyjnych lider sterowany jest poprzez sygnał sterujący naporem wzdłużnym i prosty regulator kursu, a w badaniach eksperymentalnych, ze względu na mały obszar po którym pojazdy mogą się poruszać, lider sterowany jest zdalnie przez operatora. Cały problem algorytmu ruchu ławicy sprowadza się do opracowania systemów sterowania pojazdów śledzących, aby były one w stanie utrzymać bezkolizyjny ruch, bazując na ograniczonej do minimum informacji o innych

pojazdach. Ten system sterowania pojazdów śledzących został opracowany na bazie badań symulacyjnych i składa się z czterech regulatorów, które przedstawione zostaną bliżej w kolejnych podrozdziałach pracy, a są to:

- regulator obrotu kamery,
- regulator dystansu do wykrytego pojazdu,
- regulator namiaru względnego na wykryty pojazd,
- regulator zanurzenia dynamicznego.

6.3.2 Model ruchu ławicy w programie Matlab

W podrozdziale 5.3 przedstawiony został model symulacji ruchu pojedynczego pojazdu HUUUV. W ramach niniejszego rozdziału model ten został rozbudowany do postaci, którą przedstawia Rysunek 6.7. Na początku symulacji definiowana jest liczba pojazdów, nadawane role (lider, pojazd śledzący) oraz kolory. Żeby uprościć opis procedury symulacyjnej, pojazd o numerze 1 jest liderem ławicy, a kolejny numer śledzi poprzedni. Symulacja daje możliwość dowolnego ustalania liderów i kolejności śledzenia pojazdów oraz zmianę tych ustawień w trakcie. Każdy z k -pojazdów posiada swój wektor stanu ξ_k , wektor sił i momentów napędowych τ_k , wektor sygnałów sterujących ruchem c_k i wektor wartości zadanych σ_k . Symulacja składa się z dwóch pętli zagnieżdżonych. Pętla główna inkrementuje czas symulacji t . W każdej kolejnej iteracji pętli głównej, pętla zagnieżdżona oblicza stan wszystkich k -pojazdów wchodzących w skład ławicy. Pętla zagnieżdżona inkrementuje zmienną k . W trakcie działania symulacji zmieniane są sygnały sterujące liderem c_{T_Σ} i ψ_{zad} aby realizował on wybrany scenariusz ruchu. W pierwszej iteracji pętli zagnieżdżonej wyznaczane są sygnały sterujące ruchem lidera (niebieski blok). Kolejne iteracje wyznaczają sygnały sterujące kolejnych pojazdów śledzących (czerwony blok).

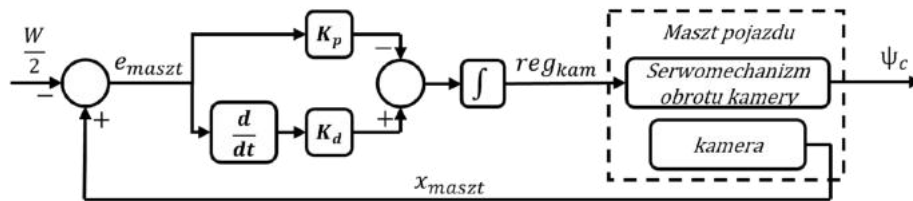


Rysunek 6.7. Schemat blokowy symulacji ruchu ławicy HUUV w programie Matlab.

System sterowania pojazdu śledzącego w pierwszej kolejności sprawdza czy pojazd śledzony HUUV[k-1] znajduje się w obszarze widzenia. Jeżeli nie, to sygnały sterujące pojazdu HUUV[k] pozostają niezmienione i symulacja przechodzi do kolejnego pojazdu śledzącego HUUV[k+1]. Jeżeli tak, to pojazd HUUV[k] wyznacza dystans i namiar na pojazd śledzony HUUV[k-1] a trzy regulatory: obrotu kamery, dystansu i namiaru względnego wyznaczają sygnały sterujące pojazdem aby utrzymać go na zadanym dystansie i z zadanym namiarem na pojazd śledzony HUUV[k-1]. Regulator zanurzenia, który wchodzi w skład systemów sterowania pojazdów stanowi osobny krok, ponieważ zadane zanurzenie jest ustawiane odgórnie na początku symulacji, a wszystkie pojazdy w trakcie ruchu tylko je utrzymują. Po wyznaczeniu sygnałów sterujących pojazdem, następuje przeliczenie jego stanu dynamiki i kinematyki ruchu. Krok ten zawiera procedurę z symulacji jednego pojazdu HUUV (Rysunek 5.25 z podrozdziału 5.3). Po wykonaniu pętli zagnieżdżonej następuje aktualizacja położenia i orientacji pojazdów w wizualizacji 3D ruchu i przejście do kolejnej iteracji pętli głównej.

6.3.3 Regulator obrotu kamery

Regulator obrotu kamery ma za zadanie śledzenie innego HUUV w ławicy, bez konieczności obrotu całego pojazdu. W ten sposób pojazd uzyskuje namiar względny ψ_{rel} na wykrywany maszt innego HUUV. Dzięki regulatorowi obrotu kamery, który dąży do utrzymania wykrytego masztu w środku klatki z kamery, namiar względny jest równoważny kątowi obrotu kamery ψ_c . Do śledzenia wykrytego masztu wykorzystany został regulator kaskadowy proporcjonalno-różniczkująco-całkujący PD-I. Kaskada regulatora polega na całkowaniu wyniku działania regulatora PD. Schemat blokowy regulatora przedstawia Rysunek 6.8.



Rysunek 6.8. Schemat blokowy regulatora PD z całkowaniem, do sterowania obrotem kamery.

Uchyb oraz równanie regulatora przedstawiają równania (6.1) - (6.2). Nastawy K_p i K_d dobrane zostały eksperymentalnie na bazie wiedzy eksperckiej poprzez iteracyjne dostrajanie w kolejnych symulacjach, a ich wartości wynoszą $K_p = \frac{1}{6}$, $K_d = \frac{1}{2}$. Aby umożliwić kamerze obserwację 360 deg wokół osi, sygnał sterujący obrotem serwomechanizmu wyznaczany przez regulator został ograniczony do ± 90 deg.

$$e_{maszt} = x_{maszt} - \frac{W}{2} \quad (6.1)$$

$$reg_{kam} = reg_{kam} - K_p e_{maszt} + K_d \frac{d}{dt} e_{maszt} \quad (6.2)$$

gdzie:

x_{maszt} - pozycja masztu na klatce obrazu w pikselach,

e_{maszt} - uchyb,

W - szerokość klatki obrazu (640 px),

ψ_c - namiar na wykryty maszt,

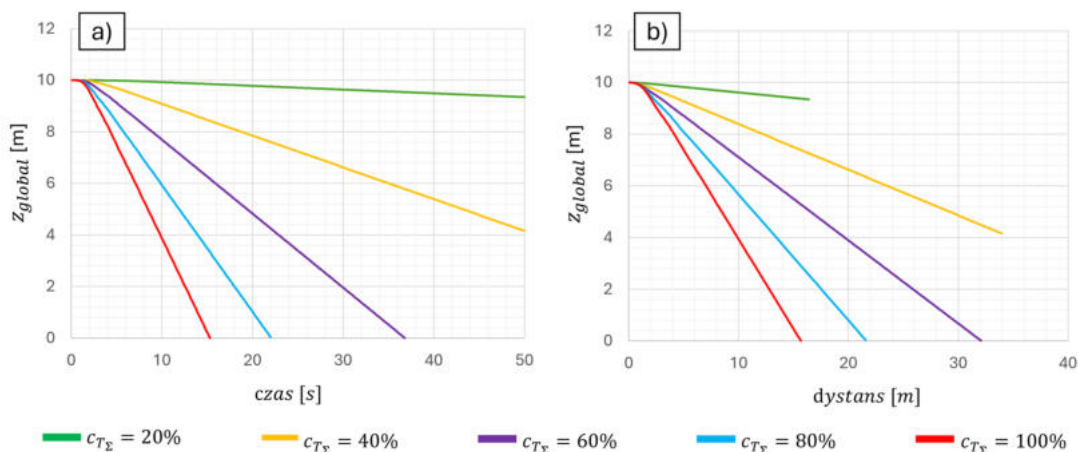
reg_{kam} - pozycja kątowa kamery wyznaczona przez regulator (-90, 90 deg),

6.3.4 Regulator zanurzenia dynamicznego

Regulator zanurzenia dynamicznego odpowiedzialny jest za utrzymanie zadanego zanurzenia w trakcie ruchu ławicy. Do jego opracowania przyjęte zostały założenia:

- regulator działa tylko przy dodatniej wartości c_{T_Σ} . Jeżeli w trakcie ruchu pojawi się ujemna wartość c_{T_Σ} , regulator zanurzania dynamicznego jest na ten czas wyłączany a płetwy ustawiane w położeniu zero ($\delta = 0$) (wzdłuż osi x_b). Wyłączenie regulatora wynika z tego, że przy ruchu wstecznym stery zanurzenia generują przeciwne siły unoszenia a maszt przeciwnie skierowane opory, co wymagało by opracowania osobnego regulatora zanurzania dynamicznego. Ponieważ ruch wsteczny pojazdu jest tylko chwilowy a algorytm nie przewiduje ruchu wstecznego formacji, to regulator zanurzania jest wyłączany a płetwy ustawiane w położeniu zero,
- regulator adaptuje się do wartości c_{T_Σ} , aby skutecznie realizować swoje zadanie w pełnym zakresie prędkości ruchu pojazdu,
- maksymalny kąt wychylenia sterów zanurzenia δ przyjmuje wartość ± 30 deg od położenia zero.

Pierwszym krokiem do opracowania regulatora zanurzania dynamicznego było oszacowanie jak asymetria pojazdu HUUV w płaszczyźnie (x_b, y_b) , powodowana przez maszt, wpływa na zmianę zanurzenia w trakcie ruchu pojazdu ze sterami zanurzenia ustawionymi pod kątem 0 deg oraz przy różnych wartościach c_{T_Σ} pojazdu. Wyniki symulacji przedstawia Rysunek 6.9. Ponieważ opory generowane przez maszt powodują wynurzanie pojazdu, to na starcie symulacji pojazd ustawiany był na głębokości 10 m. Na Rysunku 6.9a przedstawiona jest zmiana zanurzenia w czasie, natomiast Rysunek 6.9b przedstawia drogę pokonaną przez symulowany pojazd. Całkowity czas trwania symulowanego ruchu wynosił 50 s, jednak tylko przypadki dla c_{T_Σ} równego 20% i 40% wykonały się w całości. Przebiegi dla 60%, 80% i 100% były przerywane po osiągnięciu przez pojazd zanurzenia równego zero.



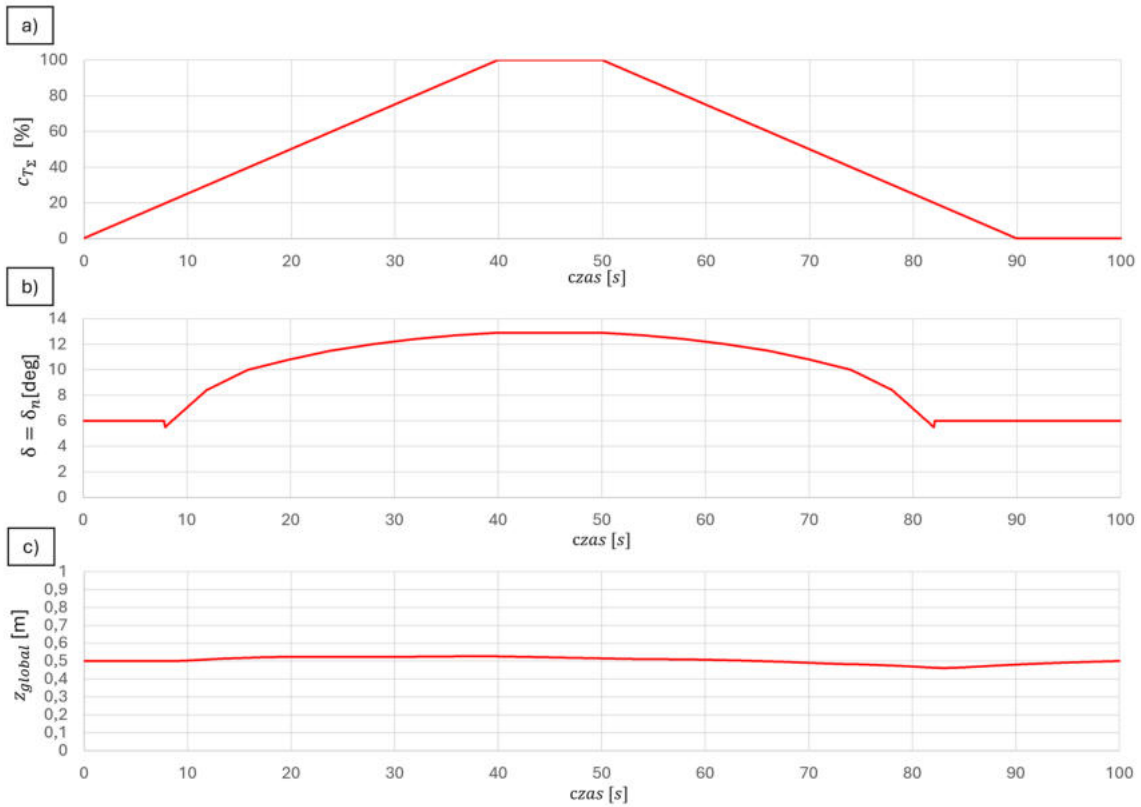
Rysunek 6.9. Ruch pojazdu w płaszczyźnie pionowej, dla zerowej ($\delta = 0$) wartości kąta sterów zanurzenia.

Następnie przeprowadzony został kolejny szereg symulacji, który pozwolił na wyznaczenie kątów δ_n położenia neutralnego sterów zanurzenia, które umożliwiają pojazdowi utrzymanie danego zanurzenia przy różnych wartościach c_{T_Σ} . Wyniki zebrane zostały w Tabeli 6.2.

Tabela 6.2: Kąt wychylenia sterów zanurzenia (δ_n) dla różnych wartości c_{T_Σ} , umożliwiające utrzymanie przez pojazd zanurzenia.

c_{T_Σ} [%]	20	30	40	50	60	70	80	90	100
δ_n [deg]	5,5	8,4	10	10,8	11,5	12	12,4	12,7	12,9

Wyniki z powyższej tabeli zostały zaimplementowane do modelu symulacyjnego. Między kolejnymi punktami z tabeli zastosowana została interpolacja liniowa, aby zapewnić odpowiedni kąt wychylenia sterów zanurzenia dla pełnego zakresu sygnału sterującego naporem wzdłużnym pędników. Sprawdzenie działania zostało wykonane w oparciu o symulację, dla której sygnał sterujący, kąt ataku sterów oraz wynikowe zanurzenie pojazdu przedstawia Rysunek 6.10. Czas trwania symulowanego ruchu został ustawiony na 100 s. W jej trakcie nastąpiło rozpędzanie pojazdu między 0 a 40 s, następnie przez 10 s utrzymana była maksymalna wartość sygnału sterującego naporem pędników po czym pojazd hamował aż do 90 s ruchu. Ostatnie 10 s zostało przeznaczone na swobodne dryfowanie pojazdu. Zmiany sygnału sterującego naporem pędników przedstawia Rysunek 6.10a. W trakcie symulacji w zależności od chwilowej wartości sygnału sterującego naporem pędników ustawiane były stery zanurzenia zgodnie z danymi z powyższej tabeli, co przedstawia Rysunek 6.10b. W efekcie pojazd, który na początku symulacji znajdował się na głębokości 0,5 m, mimo niewielkich odchyłeń utrzymał to zanurzenie do końca, co przedstawia Rysunek 6.10c.



Rysunek 6.10. Zanurzenie pojazdu w trakcie ruchu z zmiennym sygnałem sterującym naporem wzdłużnym i adaptującym się do niego neutralnym wychyleniem sterów zanurzenia.

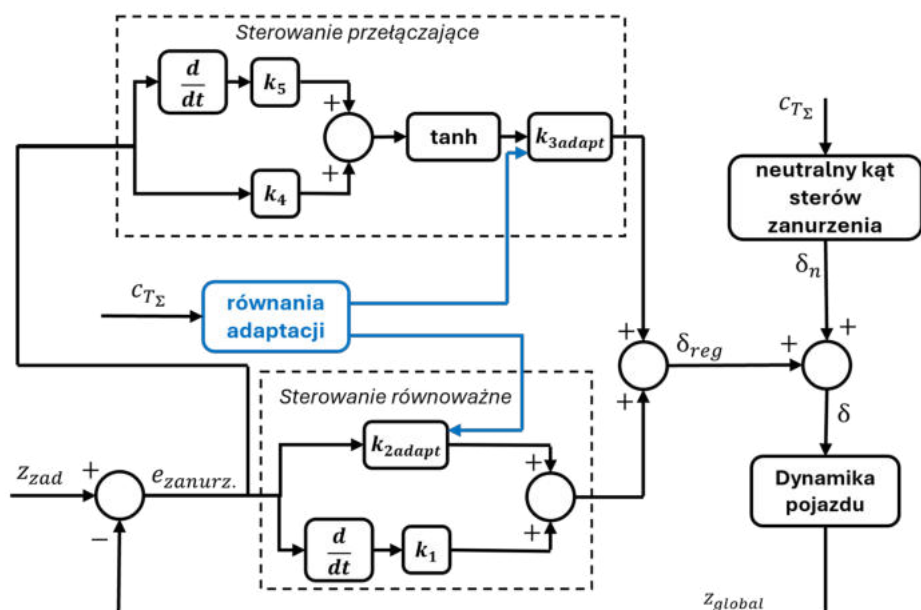
W przypadku sterowania zanurzeniem dynamicznym pojazdu, do kąta wychylenia sterów zanurzenia δ_{reg} ustalano przez regulator w każdej kolejnej jego pętli działania dodawaną jest wartość kąta neutralnego δ_n korygująca asymetrię wynikającą z masztu. Do sterowania zanurzeniem dynamicznym wybrany został adaptacyjny regulator ślizgowy, którego schemat wraz z członem korygującym asymetrię przedstawia Rysunek 6.11. Płaszczyznę ślizgu regulatora prezentuje równanie (6.3) a prawo sterowania regulatora równanie (6.4). Do strojenia regulatora przyjęte zostały kryteria: minimalne przeregulowanie i uchyb ustalony bliski zeru. Z tymi założeniami dobrane zostały na bazie wiedzy eksperckiej, poprzez iteracyjne dostrajanie w kolejnych symulacjach, współczynniki: $k_1 = 30$, $k_2 = 30$, $k_3 = 30$, $k_4 = 1$, $k_5 = 1$. Aby umożliwić skuteczną regulację zanurzenia przy różnych prędkościach ruchu pojazdu, adaptacji podlegają współczynniki $k_{2_{adapt}}$ oraz $k_{3_{adapt}}$ zgodnie z (6.5) i (6.6). Wraz z wzrostem sygnału sterującego naporem wzdłużnym pędników c_{T_Σ} liniowo spadają wartości współczynników $k_{2_{adapt}}$ i $k_{3_{adapt}}$, czego efektem są mniejsze wychylenia sterów zanurzenia δ_{reg} .

$$\sigma = k_4 e_{zanurz} + k_5 \frac{d}{dt} e_{zanurz} \quad (6.3)$$

$$reg_{depth} = k_1 \frac{d}{dt} e_{zanurz} + k_{2_{adapt}} e_{zanurz} + k_{3_{adapt}} \tanh(\sigma) \quad (6.4)$$

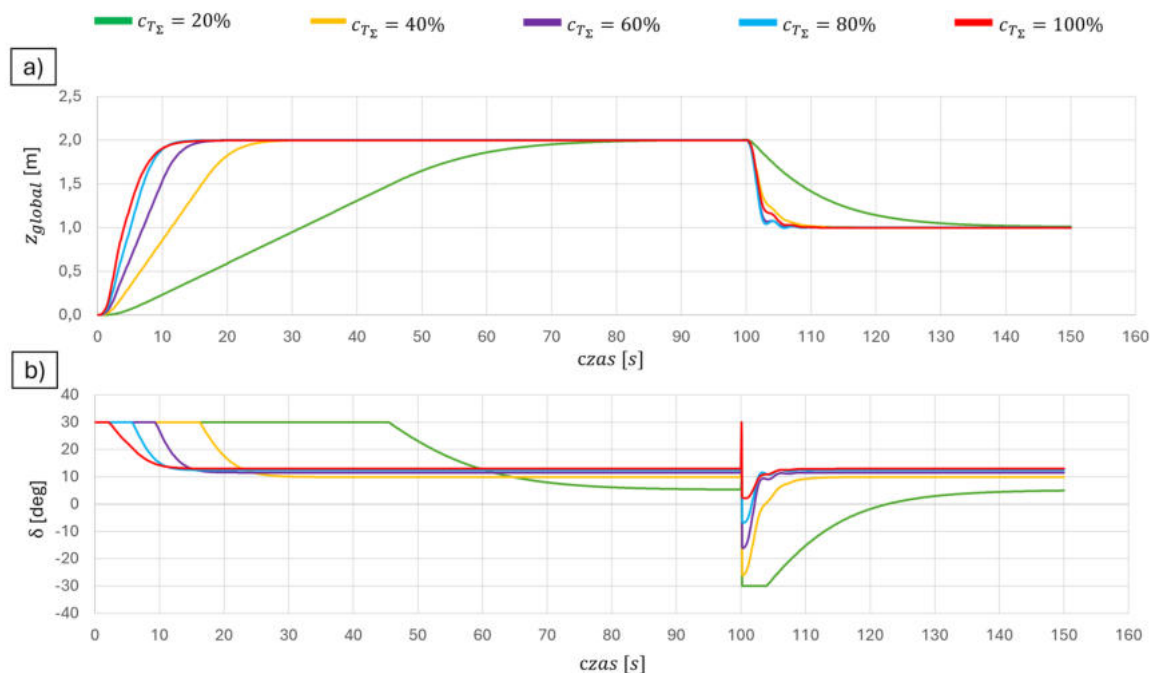
$$k_{2_{adapt}} = k_2 (-0,008 \cdot c_{T_\Sigma} + 1) \quad (6.5)$$

$$k_{3_{adapt}} = k_3 (-0,008 \cdot c_{T_\Sigma} + 1) \quad (6.6)$$



Rysunek 6.11. Schemat blokowy adaptacyjnego regulatora ślizgowego zanurzenia dynamicznego.

Efekt działania opracowanego regulatora przedstawia Rysunek 6.12. Symulacja prezentuje reakcję na skokowe wymuszenie zanurzenia zadanego równe 2 m a następnie 1 m dla różnych sygnałów sterujących naporem wzdłużnym pędników śrubowych c_{T_Σ} . Aby pokazać działanie regulatora w pełnym zakresie zmian c_{T_Σ} , czas trwania symulowanego ruchu ustawiony został na 150 s, gdzie pierwsze 100 s przeznaczone jest na zanurzenie a końcowe 50 s na wynurzenie.



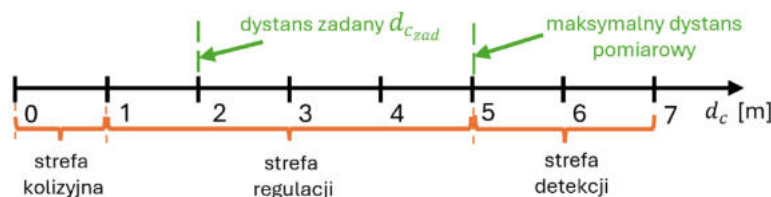
Rysunek 6.12. Działanie regulatora zanurzenia dynamicznego dla różnych wartości sygnału sterującego naporem pędników.

Dla c_{T_Σ} równego 20% występuje bardzo długi czas regulacji. Pojazd bardzo wolno osiąga zanurzenie zadane równe 2 m, bo dopiero po około 75 s. Wynika to z faktu, że przy tak niskiej wartości c_{T_Σ} , prędkość pojazdu jest niewielka i stery zanurzenia generują niewielką siłę. Potwierdza to wykres przedstawiający zmianę kąta wychylenia sterów w czasie, na którym przebieg zielony utrzymuje wartość maksymalną (30 deg) aż do 45 s ruchu. Przy wyższych wartościach c_{T_Σ} proces zanurzania przebiega sprawnie bez pojawiania się typowych problemów związanych z regulacją, którymi są przeregulowanie, czy shattering. Pewne oscylacje pojawiają się natomiast przy wynurzaniu, gdy pojazd zbliża się do zadanej głębokości zanurzenia. Ponownie dla c_{T_Σ} równego 20% siła sterów jest niska i osiągnięcie zanurzenia zadanego zajmuje 40 s. Jednak dla wyższych wartości sygnału sterującego naporem pędników pojawiają się drgania w pobliżu położenia zadanego, co widać pomiędzy 100 a 110 s symulowanego ruchu. Są to jednak drobne oscylacje, które nie powodują przeregulowania i są po chwili skutecznie tłumione. Ostatnim istotnym elementem, na który warto zwrócić uwagę, jest nachylenie krzywych w trakcie dążenia do położenia zadanego. Zanurzanie przebiega wolniej niż wynurzanie. Są to efekty, które wynikają z asymetrii oporów pojazdu względem płaszczyzny (x_B - y_B) powodowanych oporami masztu komunikacyjnego.

Przeprowadzone symulacje dowodzą, że opracowany regulator zanurzania dynamicznego spełnia postawione mu wymagania. Jest to możliwe dzięki połączeniu regulatora ślizgowego z adaptacyjną zmianą wzmocnień, oraz z adaptacyjną zmianą kąta neutralnego sterów.

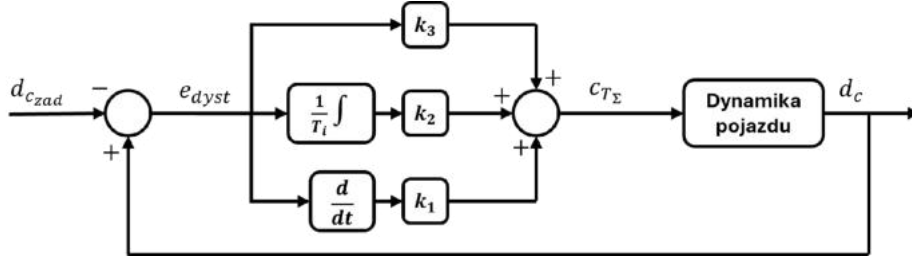
6.3.5 Regulator dystansu

Pojazd HUUV, ze względu na założenie niskich kosztów budowy, nie jest wyposażony w system pomiaru własnej prędkości ruchu. Sensory wykorzystywane do tego typu pomiarów są albo bardzo drogie (DVL) albo niedokładne przy tak niskich prędkościach ruchu (Electromagnetic Log). Dlatego algorytm sterujący opracowany został tak, aby radził sobie z brakiem tej informacji, która jest kluczowym elementem standardowych algorytmów sterowania ruchem pojazdów podwodnych. Biorąc pod uwagę fakt, że system wizyjny pozwala na określenie dystansu do około 5 m, wyznaczone zostały trzy strefy, które prezentuje Rysunek 6.13. Jeżeli wykryty maszt jest w odległości mniejszej niż 1 m to jest to strefa kolizyjna. Pomiedzy 1 a 5 m jest to strefa regulacji, w której system wizyjny określa dystans. Powyżej 5 m precyzja wyznaczania dystansu diametralnie spada i dostępna jest tylko informacja o namiarze względnym.



Rysunek 6.13. Strefa regulacji, kolizyjna i detekcyjna.

Do sterowania dystansem wykorzystany został regulator PID ze zmiennym czasem całkowania w zależności od uchybu $e_{dyst.}$. Bazując na pomiarach dystansu z kamery, dystans zadany ustalony został na poziomie 2 m. Jest to podyktowane rosnącymi niedokładnościami w wyznaczaniu dystansu przy większych odległościach. Schemat blokowy regulatora przedstawia Rysunek 6.14. Wzmocnienia $k_1 - k_3$ zostały dobrane na bazie wiedzy eksperckiej, poprzez iteracyjne dostrajanie w kolejnych symulacjach i wynoszą: $k_1 = 60$, $k_2 = 1$, $k_3 = 100$. W zależności od znaku uchybu $e_{dyst.}$, zmienia się czas całkowania T_i , zgodnie z równaniem (6.7).

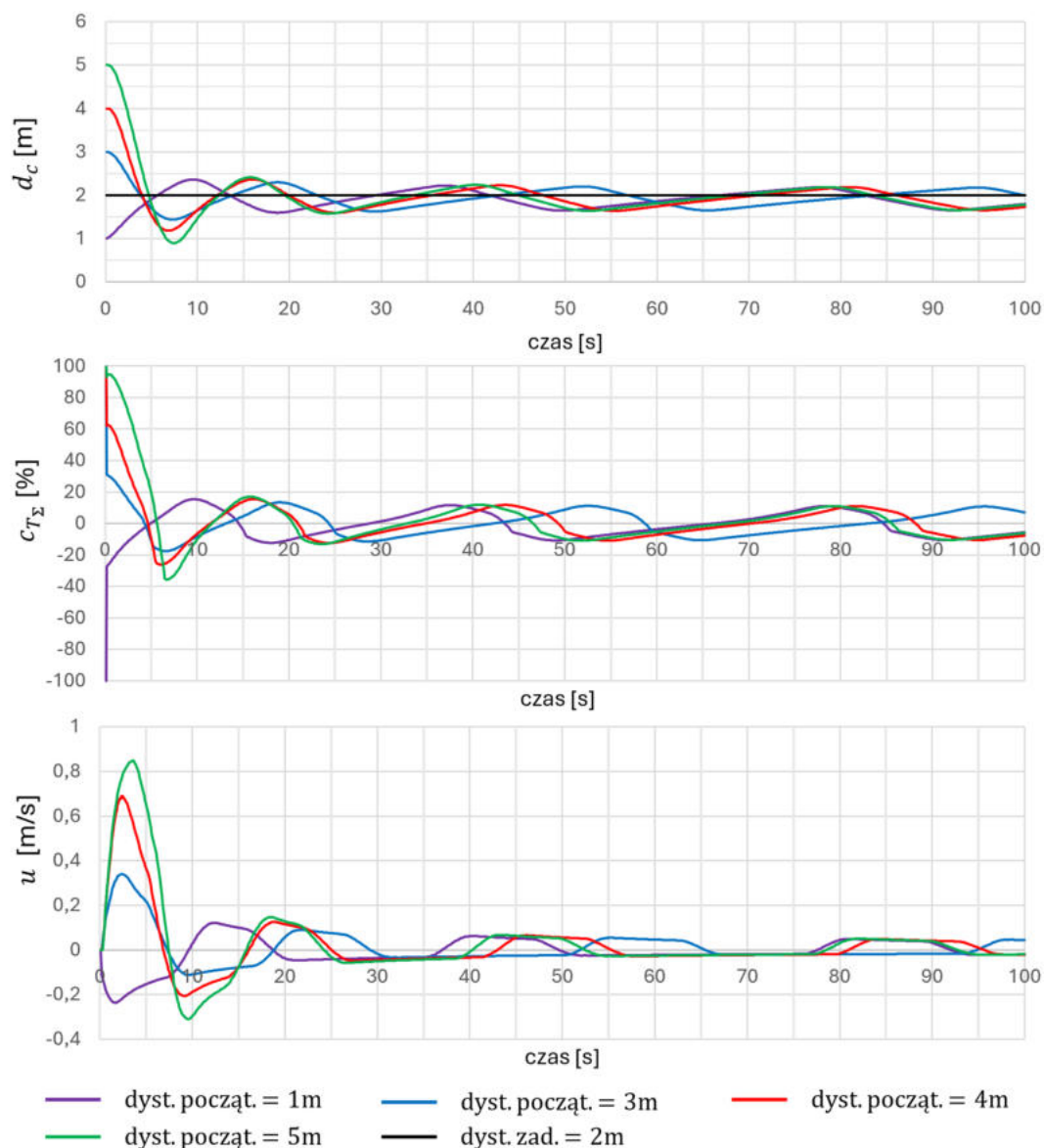


Rysunek 6.14. Regulator PID dystansu z zmiennym czasem całkowania.

$$T_i(t) = \begin{cases} T_i = 2, & \text{gdy } e_{dyst}(t) > 0 \\ T_i = \frac{1}{4}, & \text{gdy } e_{dyst}(t) < 0 \end{cases} \quad (6.7)$$

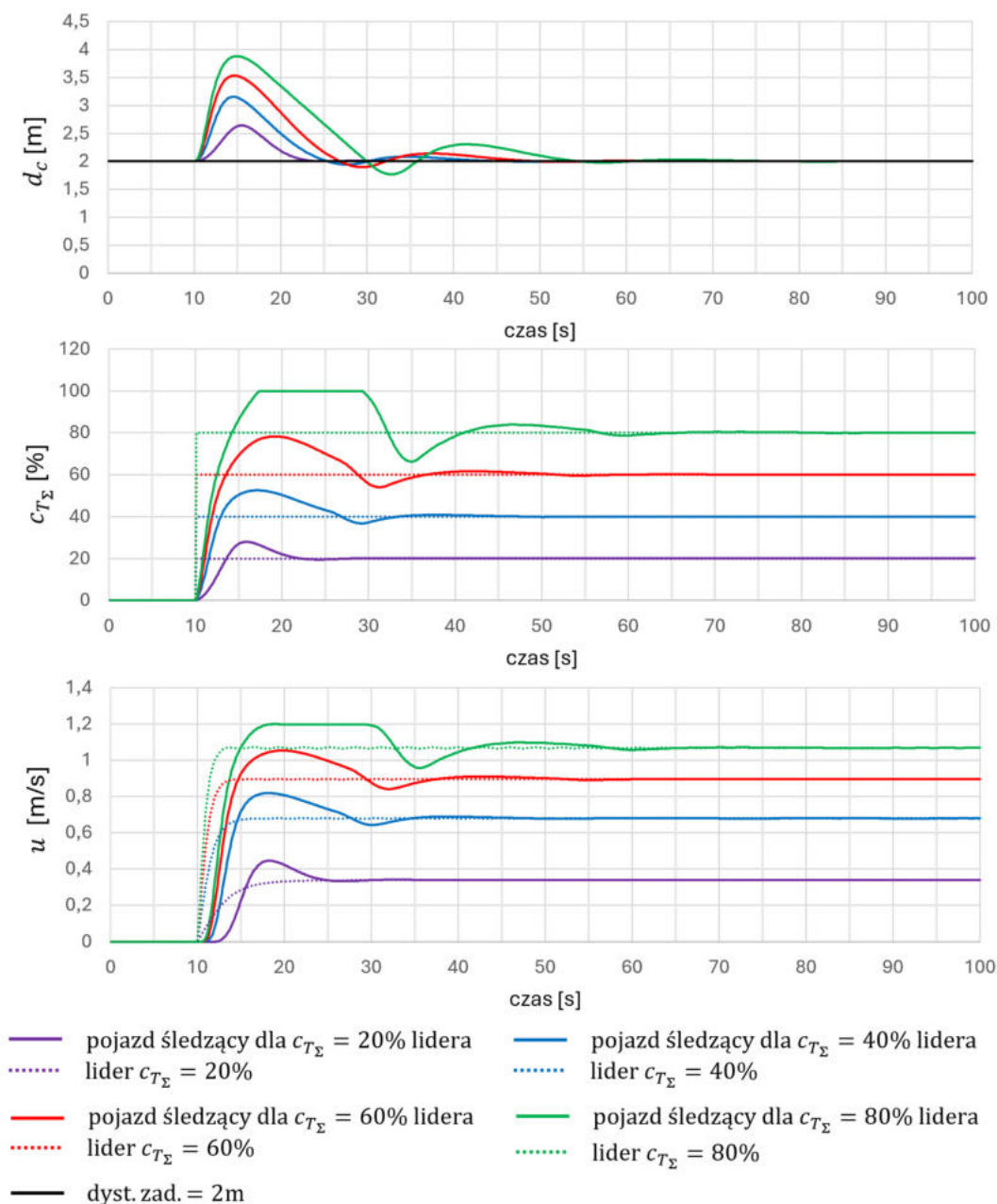
Zmienny czas całkowania w zależności od znaku uchybu sprawia, że regulator jest niesymetryczny. Jeżeli dystans do wykrywanego masztu jest większy niż zadane 2 m, to czas całkowania równy jest 2. Gdy pojazd zminimalizuje dystans do zadanych 2 m, człon całkujący pełni funkcję utrzymania osiągniętej prędkości ruchu. Jeżeli w trakcie ruchu pojazd śledzony zacznie skręcać lub zwalniać, zmniejsza się dystans między nim a pojazdem śledzącym. Ponieważ pojazd śledzący ma tylko 1 m dystansu do strefy kolizyjnej, musi hamować z większą intensywnością. To właśnie powoduje zmienny czas całkowania, który przy uchybie mniejszym od zera zgodnie z równaniem (6.7) czterokrotnie szybciej zmniejsza wartość członu.

Weryfikacja działania regulatora wykonana została w kilku testach. Na początek przeprowadzono symulacje przy nieruchomym liderze, dla różnych dystansów początkowych pojazdu śledzącego. Wyniki symulacji przedstawia Rysunek 6.15. Przyjęto całkowity czas symulowanego ruchu równy 100 s. Wyniki pokazują, że im większy dystans początkowy do śledzonego lidera tym bardziej intensywna reakcja regulatora, aby nie dopuścić do oddalenia się lidera na dystans ponad 6 m, co jest maksymalnym zasięgiem działania systemu wizyjnego. Większy dystans początkowy skutkuje też większym przeregulowaniem, które dla przypadku dystansu początkowego 5 m powoduje zbliżenie się pojazdu śledzącego do lidera na odległość 1 m. W przypadku, gdy dystans początkowy jest mniejszy niż 2 m, pojazd śledzący cofa się, aby osiągnąć zadane 2 m. Negatywnym efektem działania regulatora dystansu jest słabe tłumienie oscylacji uchybu w pobliżu dystansu zadanego, który w żadnej z serii badań (dystansy 2, 3, 4 i 5 m) nie ustabilizował się w czasie 100 s symulowanego ruchu. Jest to spowodowane dużą dynamiką działania regulatora oraz faktem, że przy bardzo niskich wartościach prędkości ruchu pojazdu śledzącego opory hydrodynamiczne są bardzo małe.



Rysunek 6.15. Reakcja regulatora dystansu pojazdu śledzącego, przy nieruchomym liderze, dla różnych dystansów początkowych.

Kolejna seria symulacji przeprowadzona została w celu weryfikacji poprawności działania regulatora przy starcie lidera i ruchu z prędkością ustaloną. W tym celu pojazd śledzący był ustawiany w odległości 2 m od lidera. W dziesiątej sekundzie symulowanego ruchu skokowo zmieniana była wartość c_{T_Σ} , co powodowało jego rozpędzenie do prędkości ustalonej i utrzymanie tej prędkości do końca symulowanego ruchu. Wyniki symulacji przedstawia Rysunek 6.16.

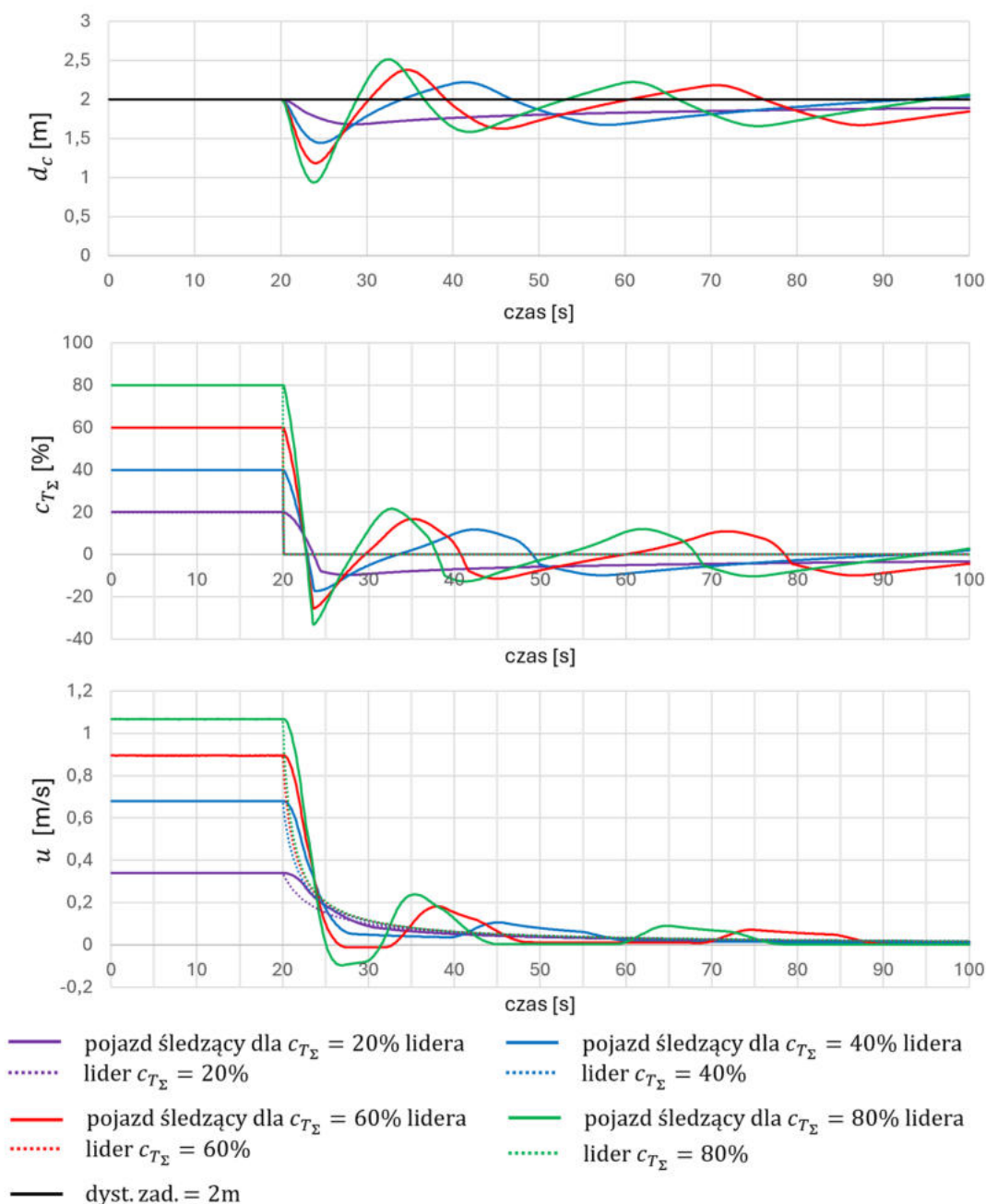


Rysunek 6.16. Reakcja regulatora dystansu pojazdu śledzącego, przy skokowej zmianie sygnału sterującego naporem pędników lidera - rozpędzanie.

Im wyższa wartość naporu pędników lidera tym większy chwilowy dystans do pojazdu śledzącego, którego regulator dystansu po około 5 s sprowadza do wartości zadanej 2 m. W przypadku ruchu lidera ze stałą prędkością nie dochodzi do znacznego przeregulowania dystansu. W porównaniu z symulacją ze stojącym liderem (6.15) widać dobrą stabilizację uchybu, ponieważ pojazd śledzący musi osiągnąć niezerową wartość prędkości a to generuje opory ruchu, które pomagają w stabilizacji.

Ostatnim badaniem weryfikującym działanie regulatora dystansu jest reakcja pojazdu śledzącego na hamowanie lidera wybiegiem, czyli przy skokowej redukcji c_{T_Σ} do zera. W tym celu lider rozpędzany był do prędkości ustalonej. Gdy pojazd śledzący ustabilizował dystans do lidera na poziomie 2 m (co odpowiada pierwszym 10 s sy-

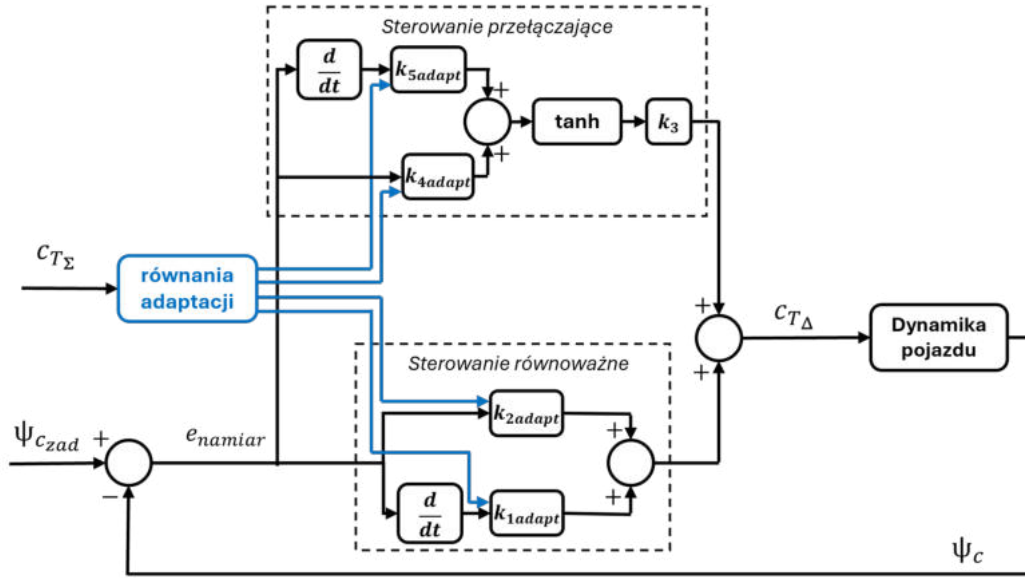
mulowanego ruchu) następował skokowy spadek do zera c_{T_Σ} lidera. Wyniki symulacji przedstawia Rysunek 6.17. Pojazd śledzący minimalizuje dystans do lidera przy jego jednostajnym ruchu dzięki członowi całkującemu. W momencie hamowania wybiegiem lidera ten człon całkujący w regulatorze pojazdu śledzącego spowalnia jego reakcję, co powoduje zagrożenie kolizji. Dobrze dobrane czasy całkowania regulatora i współczynniki wzmocnień pozwalają jednak na uniknięcie kolizji w przypadku hamowania lidera wybiegiem co przedstawia niniejsza symulacja.



Rysunek 6.17. Reakcja regulatora dystansu pojazdu śledzącego, przy skokowej zmianie sygnału sterującego naporem pędników lidera - hamowanie wybiegiem.

6.3.6 Regulator namiaru względnego

Obok regulatora dystansu kluczową rolę w sterowaniu ruchem pojazdu śledzącego w płaszczyźnie poziomej odgrywa regulator namiaru względnego. Sterowanie nia-rem względnym podobnie jak zanurzeniem, przy zmieniającej się prędkości ruchu jest zadaniem nieliniowym, które wymaga adaptacji regulatora do danej sytuacji. Dlatego wykorzystany został adaptacyjny regulator ślizgowy, którego schemat blokowy przedstawia Rysunek 6.18. Równania 6.8 i 6.9 prezentują płaszczyznę ślizgu i równanie regulatora. Współczynniki $k_1 - k_5$ zostały dobrane na bazie wiedzy eksperckiej poprzez iteracyjne dostrajanie w kolejnych symulacjach i przyjmują wartości: $k_1 = 10$, $k_2 = 0,25$, $k_3 = 5$, $k_4 = 1$, $k_5 = 10$.



Rysunek 6.18. Schemat blokowy adaptacyjnego regulatora ślizgowego namiaru względnego.

$$\sigma = k_{4adapt} e_{namiar} + k_{5adapt} \frac{d}{dt} e_{namiar} \quad (6.8)$$

$$c_{T\Delta} = k_{1adapt} \frac{d}{dt} e_{namiar} + k_{2adapt} e_{namiar} + k_3 \tanh(\sigma) \quad (6.9)$$

Nieliniowość wynikająca z szerokiego zakresu osiąganych prędkości ruchu sprawia, że współczynniki muszą zmieniać swoje wartości. Adaptacyjna zmiana tych wartości bazuje na sygnale sterującym naporem pędników $c_{T\Sigma}$ zgodnie z równaniami (6.10)-(6.13).

$$k_{1adapt} = 0,2 \cdot |c_{T\Sigma}| \cdot k_1 \quad (6.10)$$

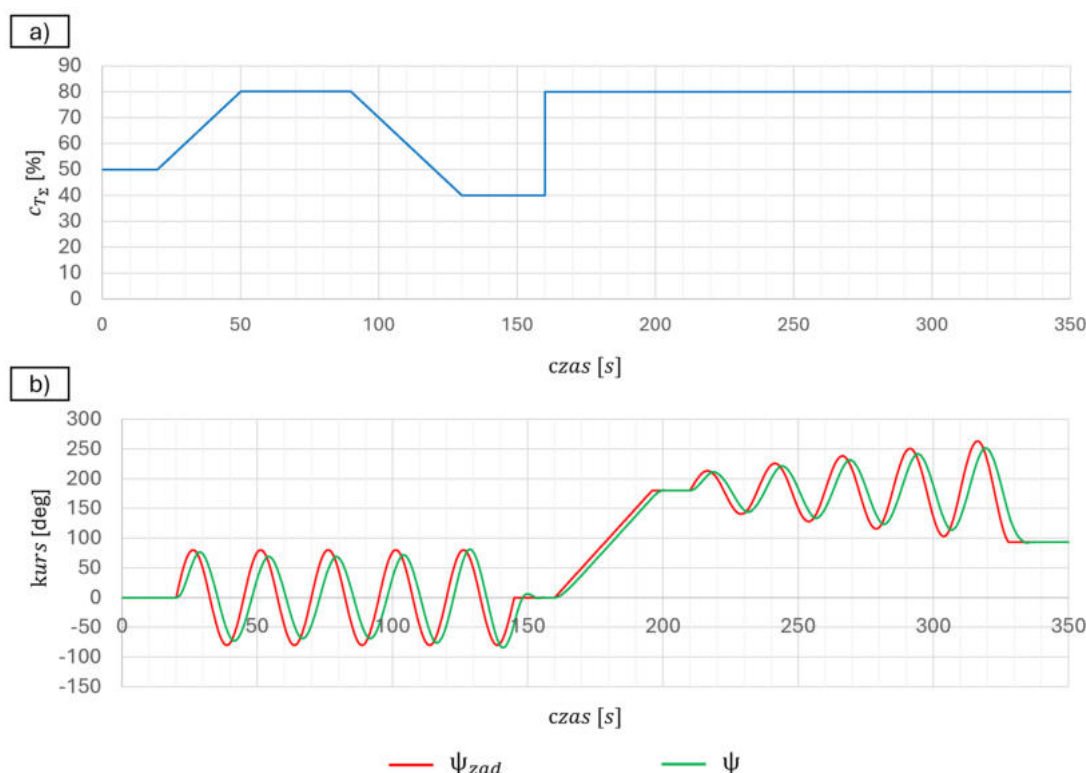
$$k_{2adapt} = 0,2 \cdot |c_{T\Sigma}| \cdot k_2 \quad (6.11)$$

$$k_{4adapt} = 0,2 \cdot |c_{T\Sigma}| \cdot k_4 \quad (6.12)$$

$$k_{5adapt} = 0,2 \cdot |c_{T\Sigma}| \cdot k_5 \quad (6.13)$$

Tak opracowany regulator namiaru względnego poddany został weryfikacji najpierw symulacyjnej a następnie eksperymentalnej. Test symulacyjny został wykonany w celu

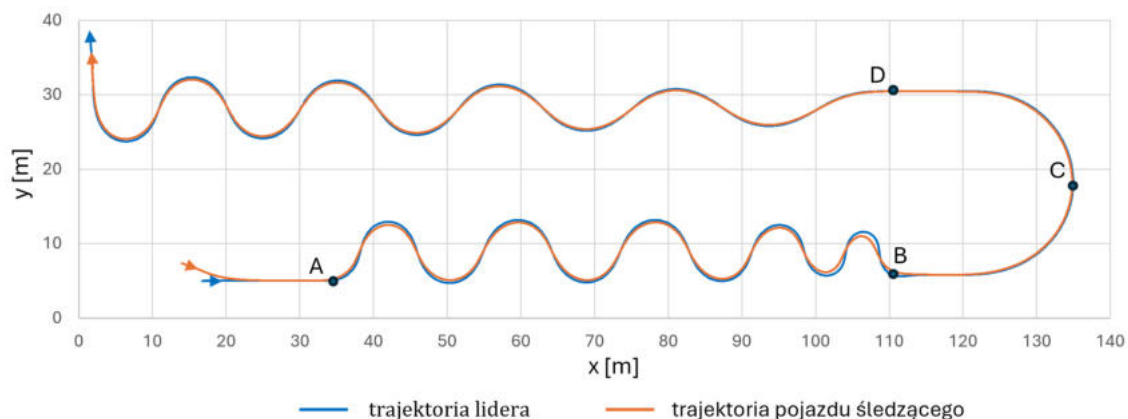
pokazania działania algorytmu śledzenia lidera w większej skali, gdzie pojazdy mogą osiągnąć wyższe prędkości ruchu, a ciągły ruch lidera pozwala na stabilizację ruchu pojazdu śledzącego. W tym celu przeprowadzono symulację ruchu trwającego 350 s, w trakcie której pojazd śledzący miał za zadanie podążać za liderem w odległości 2 m z namiarem względnym 0 deg. Lider natomiast poruszał się zgodnie z sygnałem sterującym naporem pędników i kursem zadany widocznym na Rysunku 6.19. Aby lider mógł poruszać się zgodnie z kursem zadany, został opracowany prosty regulator kursu, jednak nie jest on kluczowym elementem algorytmu, a jedynie umożliwia kontrolowany ruch lidera. Zachowanie lidera w symulacji zostało ustalone w taki sposób, aby sprawdzić jak pojazd śledzący reaguje na: ruch jednostajny lidera (0 - 20 s), oscylacje ze stałą prędkością kątową ale narastającą i opadającą prędkością liniową (20 - 130 s), ruch po okręgu (160 - 200 s) i oscylacje z stałą prędkością a rosnącą amplitudą (210 - 330 s).



Rysunek 6.19. Sygnał sterujący naporem wzdłużnym lidera a), kurs zadany i regulowany z jakim poruszał się lider b).

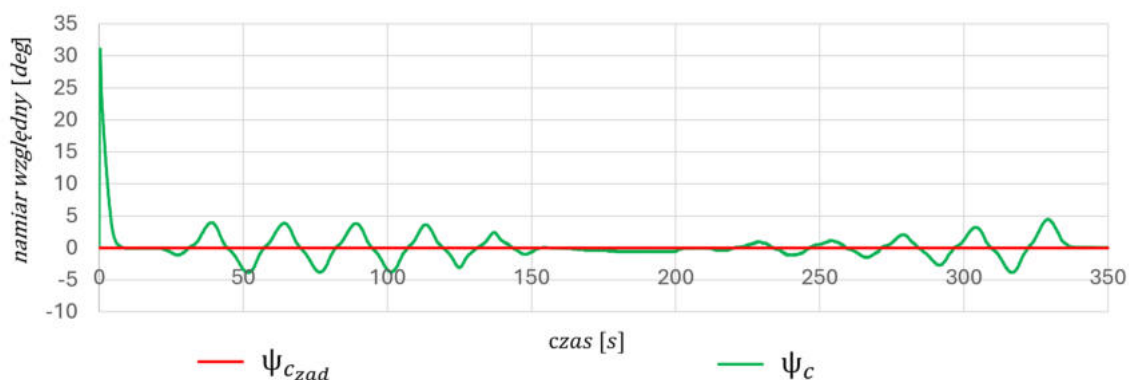
Z tak przyjętymi sygnałami sterującymi naporem pędników i kursem zadany lidera wykonana została symulacja, której wyniki, czyli trajektorie ruchu lidera i śledzącego go pojazdu przedstawia Rysunek 6.20. Pozycje i orientacje, w których znajdowały się pojazdy w chwili początkowej i końcowej symulacji przedstawiają strzałki. W pierwszej połowie symulowanego ruchu, lider poruszał się wzdłuż osi x (w prawo). Początkowo po linii prostej, aby w punkcie A ($x = 35$ m, $y = 5$ m) rozpocząć oscylacje ze stałą amplitudą i zmieniającą się prędkością postępową. W pobliżu punktu B ($x = 110$ m, $y = 5$ m), kończy oscylacje i rozpoczyna manewr zawracania. Na wysokości punktu C ($x = 135$ m, $y = 20$ m) mija 150 s symulowanego ruchu. Po nawrocie w punkcie D ($x = 110$ m, $y = 30$ m) lider rozpoczyna oscylacje ze stałą prędkością postępową ale

narastającą amplitudą. Oscylacje te trwają do 325 s symulowanego ruchu, gdy lider znajduje się w pobliżu $x = 2$ m, $y = 30$ m. Ostatnie 25 s symulowanego ruchu lider porusza się jednostajnie stałym kursem w okolicy 100 deg. W trakcie całej symulacji trajektoria pojazdu śledzącego tylko nieznacznie odbiega od trajektorii lidera. Jedyne znaczne odstępstwo występuje w okolicy 150 s symulowanego ruchu, gdy lider kończy oscylacje z stałą amplitudą i zmienną prędkością.

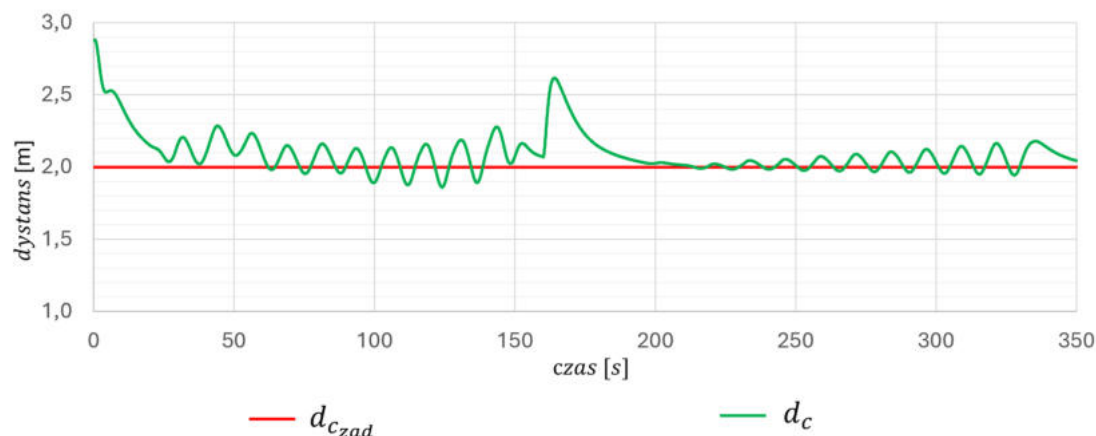


Rysunek 6.20. Trajektorie ruchu lidera i pojazdu śledzącego.

Dwa kluczowe parametry, czyli namiar względny i dystans, które ma za zadanie utrzymać pojazd śledzący, prezentują Rysunki 6.21 i 6.22. Patrząc na przebieg namiaru względnego w czasie, widać, że w chwili startu pojazd śledzący ustawiony był do lidera pod kątem 30 deg i znajdował się w odległości 2,9 m. W pierwszych chwilach symulacji regulatory sprowadziły oba te parametry do wartości zadanej, ponieważ lider poruszał się jednostajnie ze stałym kursem. Następnie lider przeszedł do oscylacji ze stałą amplitudą i zmienną prędkością postępową. W trakcie tych oscylacji aktualny namiar względny oscylował w zakresie ± 5 deg, a dystans w przedziale od 1,8 do 2,3 m. W 160 s symulowanego ruchu lider skokowo podniósł sygnał sterujący naporem pędników z 40% do 80%, co spowodowało chwilowy wzrost dystansu do około 2,6 m, który ponownie sprowadzony został do zadanych 2 m.



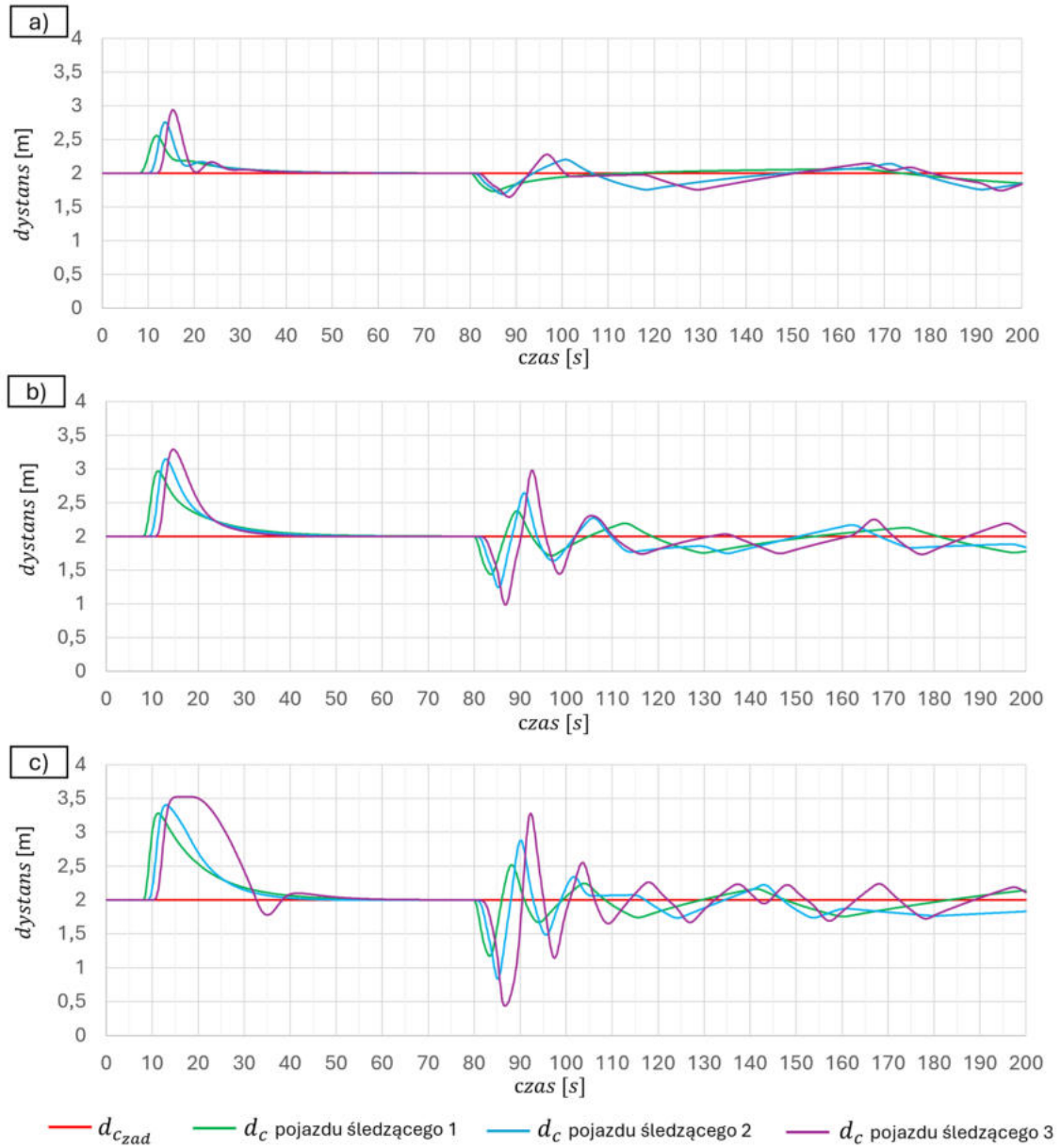
Rysunek 6.21. Namiar względny pojazdu śledzącego do lidera w trakcie symulacji ruchu po trajektorii z Rysunku 6.20.



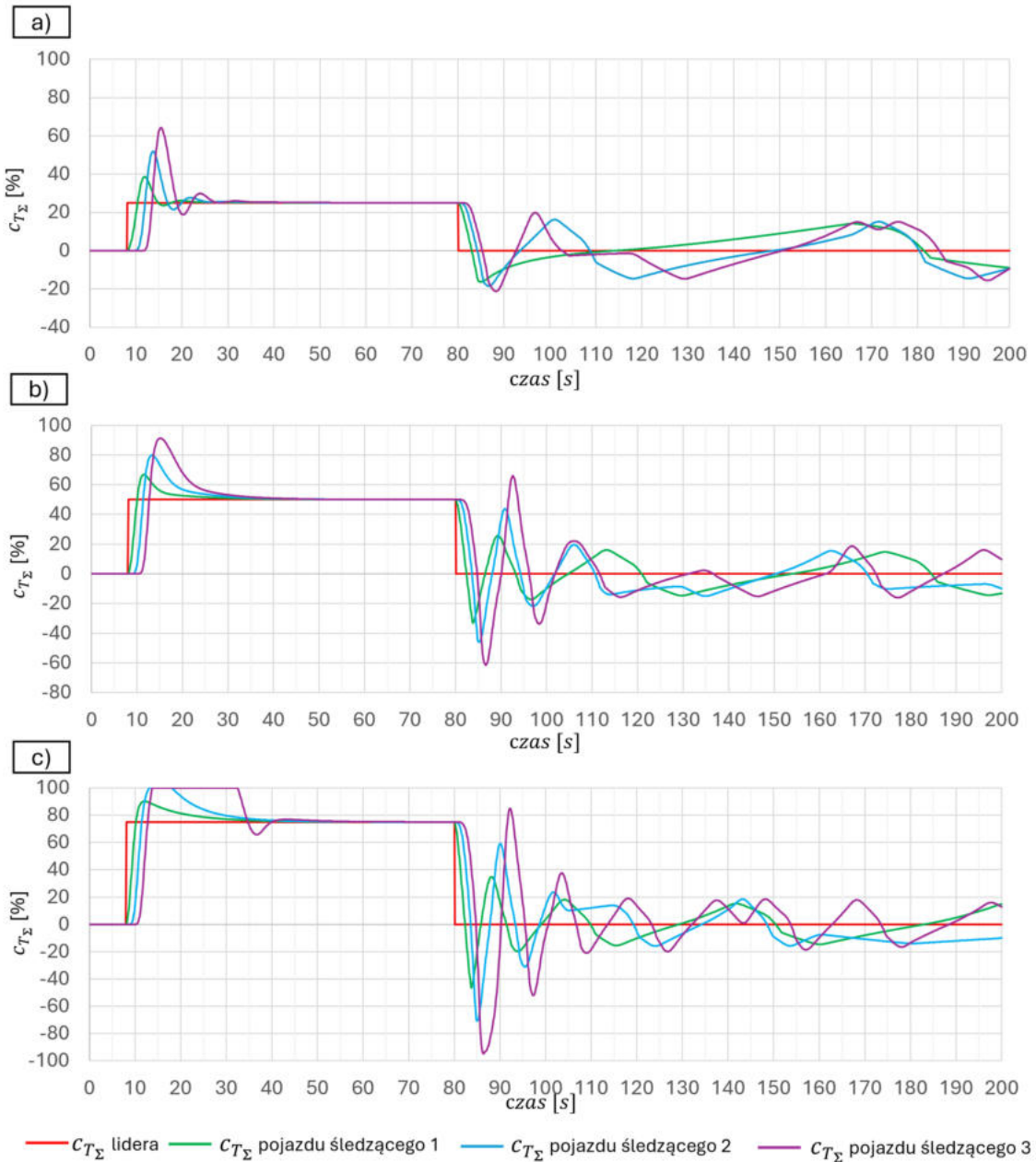
Rysunek 6.22. Dystans pojazdu śledzącego do lidera w trakcie symulacji ruchu po trajektorii z Rysunku 6.20.

6.3.7 Ruch ławicy złożonej z czterech pojazdów

Kolejnym krokiem były symulacje zachowania ławicy złożonej z jednego lidera i trzech pojazdów śledzących. Celem tych symulacji było sprawdzenie, z ilu maksymalnie pojazdów może się składać ławica, aby nie dochodziło do kolizji między pojazdami w trakcie hamowania i aby nie doprowadzić do zgubienia któregoś z nich. Najpierw weryfikacji poddany został regulator dystansu. Całkowity czas symulowanego ruchu został ustalony na 200 s. W tym czasie lider rozpędzał się zgodnie ze skokowo ustawianym c_{T_Σ} (w 8 s) a następnie sygnał był skokowo zerowany (w 80 s) co powodowało hamowanie wybiegiem. Wyniki dla skoków c_{T_Σ} równych 25%, 50% i 75% lidera prezentują Rysunki 6.23 i 6.24. Symulacje pokazują, że możliwe jest utrzymanie trzech pojazdów śledzących, dla skokowej zmiany naporu pędników lidera nie większej niż 50%. Powyżej tej wartości, podczas hamowania ławicy dochodzi do kolizji trzeciego pojazdu śledzącego z drugim. Gdy skok naporu pędników wynosi 75% wartości, to dochodzi też do wkroczenia drugiego pojazdu śledzącego w strefę kolizyjną z pierwszym. W przypadku symulacji ze skokiem 75% pojawia się dodatkowo ryzyko zgubienia ostatniego pojazdu śledzącego, ponieważ dochodzi do nasycenia regulatora dystansu drugiego i trzeciego pojazdu śledzącego. Trzeci pojazd śledzący utrzymuje maksymalną wartość c_{T_Σ} przez prawie 30 s w początkowej fazie symulacji, co w warunkach rzeczywistych, gdzie występują dodatkowe zakłócenia środowiska i niepewności, których model symulacyjny nie uwzględnia, stwarza ryzyko odłączenia od formacji.



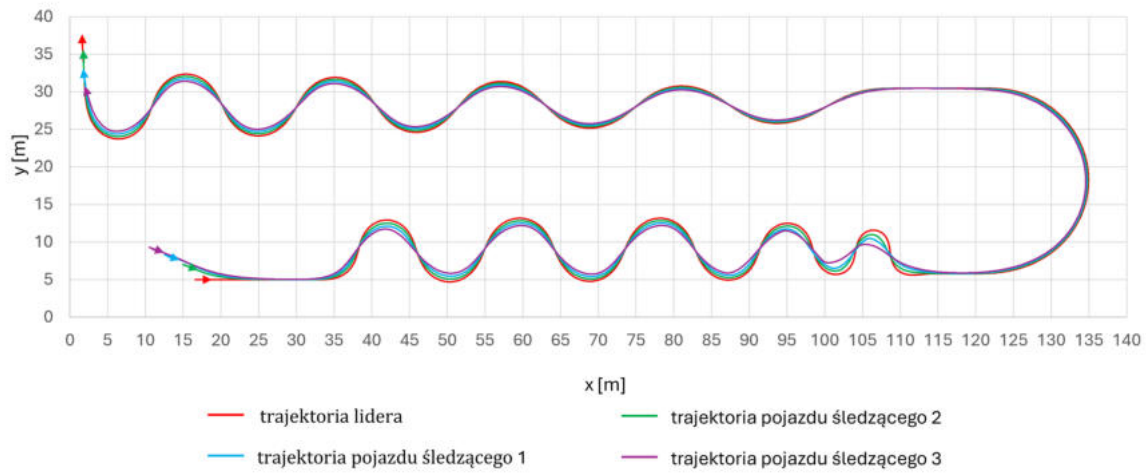
Rysunek 6.23. Dystans między pojazdem śledzącym a śledzonym dla wartości $c_{T\Sigma}$ lidera odpowiednio: (a) 25%, (b) 50% i (c) 75%.



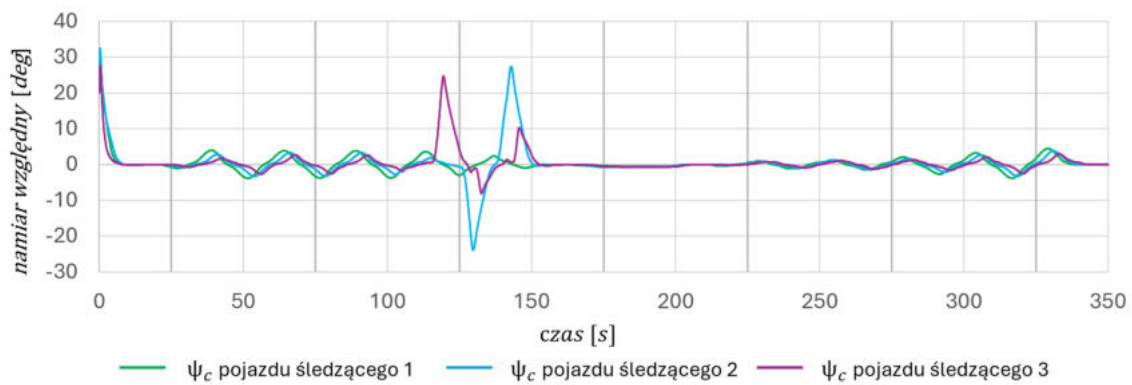
Rysunek 6.24. Sygnały sterujące naporem pędników pojazdów dla wartości $c_{T_{\Sigma}}$ lidera odpowiednio: (a) 25%, (b) 50% i (c) 75%.

Ostatnim badaniem symulacyjnym było sprawdzenie ruchu formacji złożonej z 4 pojazdów na trasie z Rysunku 6.20. Wyniki symulacji w postaci trajektorii ruchów pojazdów, chwilowego namiaru pojazdu śledzącego na śledzonego lidera i dystansu pojazdu śledzącego do śledzonego lidera przedstawiają rysunki 6.25, 6.26 i 6.27. Wszystkie trzy pojazdy śledzące skutecznie realizują zadania minimalizacji uchybów dystansu i kursu. Występujące na Rysunku 6.26 skoki namiaru względnego drugiego i trzeciego pojazdu śledzącego pomiędzy 110 s a 150 s symulowanego ruchu przypadają na okolice $x = 110$ m, $y = 7,5$ m na Rysunku trajektorii 6.20, gdzie lider wykonuje gwałtowne manewry skrętu, a rozpędzone pojazdy śledzące muszą wyhamować i ustabilizować dystans. Jest to też moment największej oscylacji dystansu drugiego pojazdu śledzącego do pierwszego oraz trzeciego do drugiego. Nie mniej jednak, utrzymują się one dystans między 1,5 a 3 m,

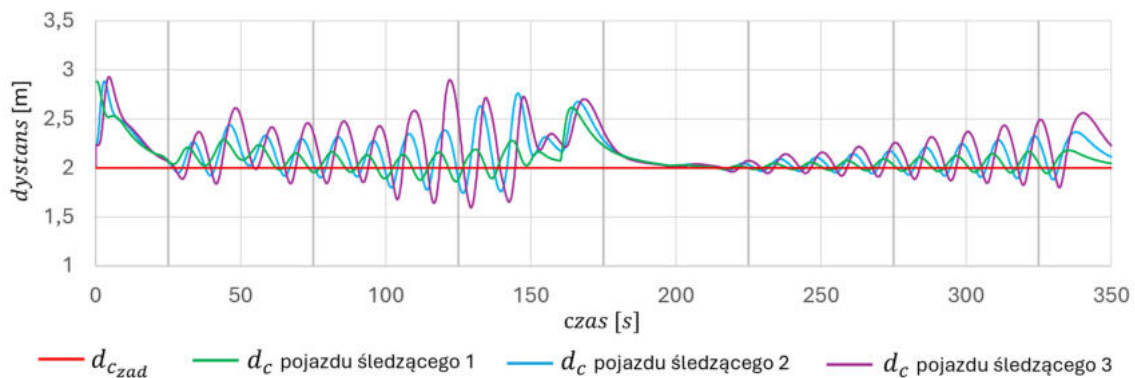
co świadczy o dużym zapasie. Dzięki ciągłemu ruchowi lidera, w stabilizacji ruchu kolejnych pojazdów śledzących pomagają opory hydrodynamiczne.



Rysunek 6.25. Trajektorie ruchu pojazdów.



Rysunek 6.26. Namiar względny między pojazdem śledzącym a śledzonym w trakcie symulacji ruchu po trajektorii z Rysunku 6.25.



Rysunek 6.27. Dystans między pojazdem śledzącym a śledzonym w trakcie symulacji ruchu po trajektorii z Rysunku 6.25.

6.4 Badania eksperymentalne

6.4.1 Koncepcja badań

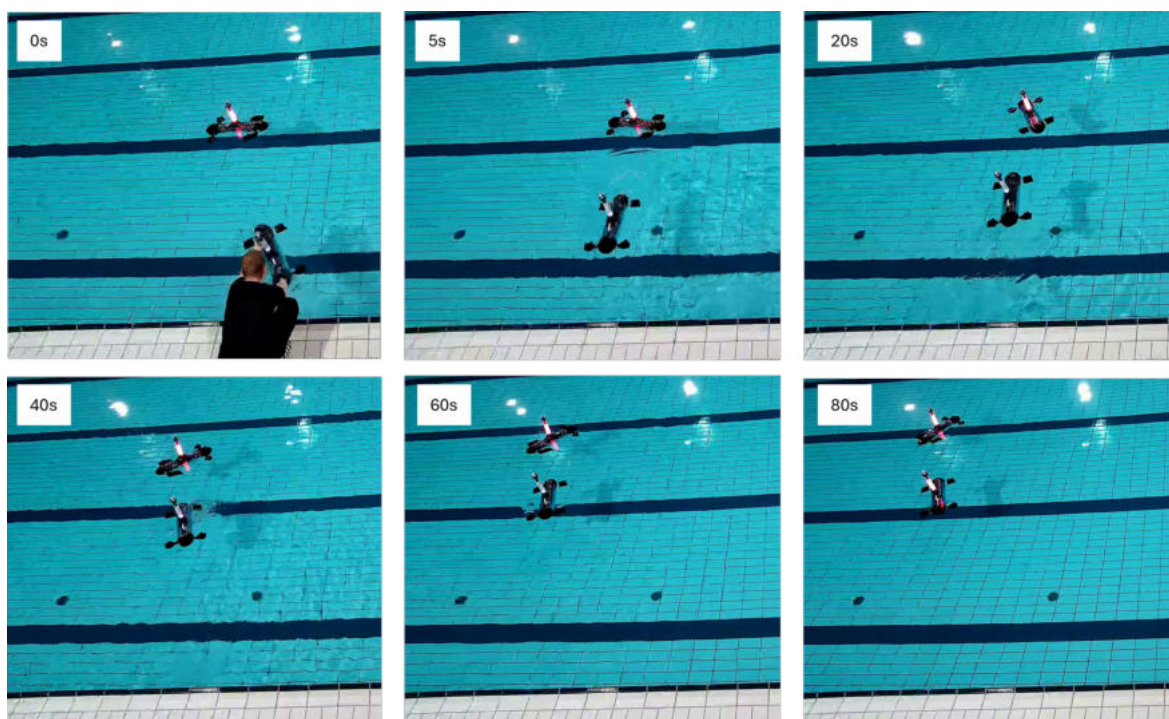
Kolejnym krokiem weryfikacji algorytmu śledzenia lidera w oparciu o metodę LOS, była weryfikacja eksperymentalna. Przeprowadzona została ona na basenie pływackim o rozmiarze 25 m na 12,5 m z wykorzystaniem systemu pomiarowego opartego o technologię śledzenia ruchu MoCap (ang. *Motion Capture*) złożonego z czterech kamer IP oraz rejestratora. Procedura kalibracji i analizy ruchu pojazdu z nagrań została opisana w załączniku 1. Ponieważ zastosowano cztery kamery IP, których kąt widzenia po redukcji zniekształceń wynosi 90 deg, to rzeczywisty obszar pomiarowy ograniczony został do powierzchni basenu o wymiarach: 13 m na 7 m. Przy tak małym dostępnym obszarze analiza dłuższych trwających eksperymentów jest utrudniona, ponieważ trajektorie nakładają się na siebie co zmniejsza czytelność wykresów. Dlatego analiza eksperymentalna przeprowadzona została w formie czterech krótkich testów. Pierwsze trzy testy przeprowadzone zostały z jednym pojazdem śledzącym, aby nie zmniejszać czytelności prezentowanych wyników. Miały one na celu sprawdzenie, jak system sterowania pojazdu śledzącego radzi sobie w różnych sytuacjach. Pierwszym testem była minimalizacja uchybu namiaru i dystansu do stojącego lidera (6.4.2). Kolejne dwa testy zaprezentowały reakcję na ruch lidera z dużym promieniem i wyższą prędkością postępową (6.4.3) a następnie małym promieniem i niższą prędkością postępową (6.4.4). Czwarty test przedstawia zachowanie pojazdów w ławicy złożonej z lidera i dwóch pojazdów śledzących (6.4.5). Ruch ławicy składającej się z lidera i trzech pojazdów śledzących nie był weryfikowany eksperymentalnie, ponieważ badania symulacyjne dowiodły, że stabilny ruch trzeciego pojazdu śledzącego jest niezwykle trudny do osiągnięcia przy ograniczonej do minimum informacji o innych pojazdach.

Na początku badań, została przeprowadzona kalibracja systemu analizy obrazu w pojazdach, poprzez odpowiednie ustawienia czasu ekspozycji kamer i natężenia światła generowanego przez maszty pojazdów. Ponieważ system nie koryguje automatycznie tych parametrów na bieżąco, to w niektórych testach rzeczywista odległość między pojazdami wyznaczona z systemu MoCap może się różnić od wartości, które wyznaczone zostały przez kamery pojazdów.

6.4.2 Minimalizacja dystansu i namiaru do nieporuszającego się lidera

Pierwszym przeprowadzonym testem, było sprawdzenie skuteczności działania systemu sterowania pojazdu śledzącego w zadaniu minimalizacji dystansu i namiaru do nieruchomego lidera. Głównym problemem, z jakim musi sobie radzić układ sterowania pojazdu śledzącego jest brak informacji o własnej prędkości ruchu. Pojazd śledzący w trakcie ruchu posiada jedynie względny parametr jakim jest dystans do lidera. Nie wie jednak czy sam porusza się w przód, w tył czy jest w spoczynku. Dlatego w pierwszej kolejności weryfikacji poddana została zdolność pojazdu śledzącego do sprowadzania uchybu dystansu do zera i jego stabilizacja. Realizacja tego zadania pozwoli pojazdowi

śledzącemu na całkowite zatrzymanie się w trakcie skoordynowanego ruchu i jedynie lekkie korekty, bez konieczności nadmiernego zużycia energii. Całkowity czas testu nr. 1 wyniósł 85 s. Położenia pojazdów w kolejnych chwilach testu pochodzące z kamery systemu MoCap przedstawia Rysunek 6.28. Trajektorie ruchu lidera i pojazdu śledzącego wyznaczone z MoCap prezentuje Rysunek 6.29. Dystans między liderem a pojazdem śledzącym wyznaczony z systemu MoCap oraz pochodzący z kamery pojazdu przedstawiono na Rysunku 6.30. Sygnał sterujący naporem pędników i sterem kierunku pojazdu śledzącego generowany przez jego system sterowania przedstawia Rysunek 6.31 a chwilowy namiar względny z jakim pojazd śledzący był ustawiony do lidera prezentuje Rysunek 6.32.

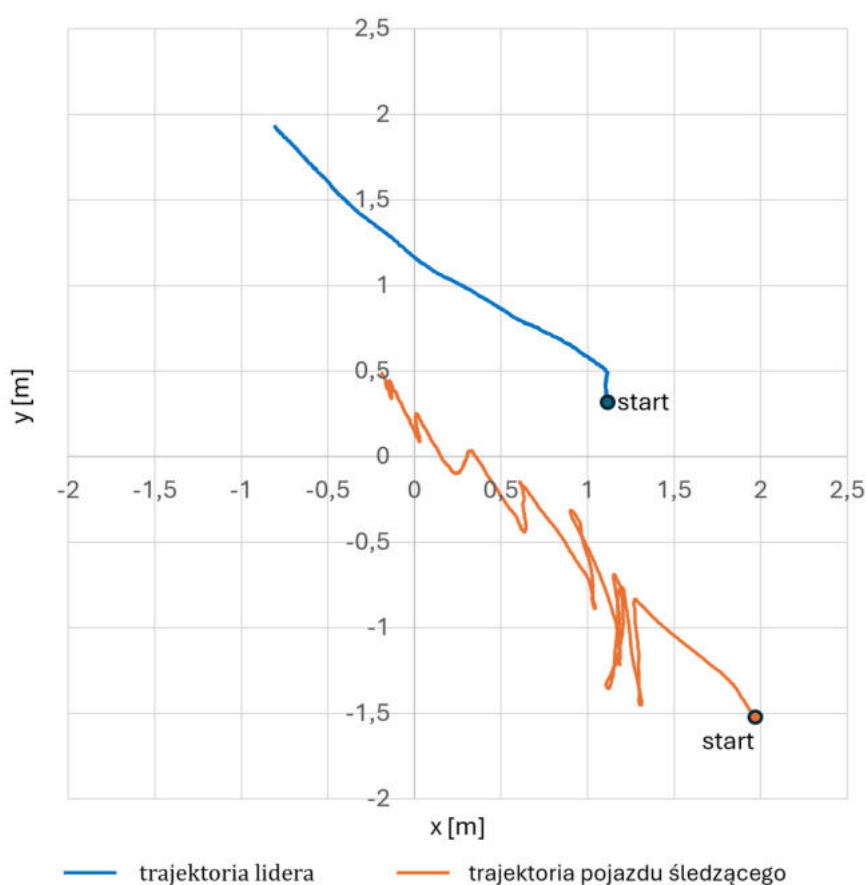


Rysunek 6.28. Test nr. 1 - regulacja dystansu do lidera w kolejnych chwilach czasu.

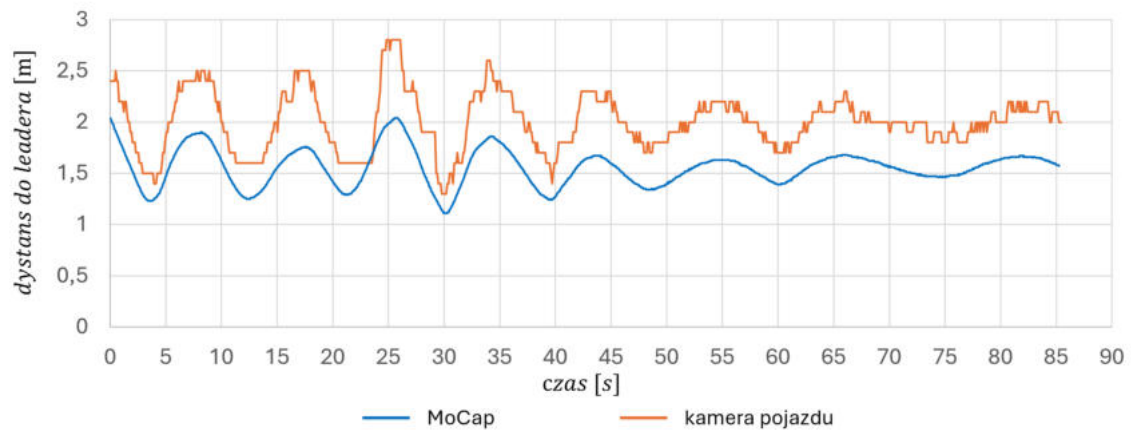
W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na różnice w dystansie do lidera na Rysunku 6.30. Wyznaczone z systemu MoCap wartości są wyższe o około 0,5 m niż te pochodzące z systemu sterowania pojazdu śledzącego. Rozbieżność ta wynika z oświetlenia zewnętrznego, jasności świecenia masztów i ustawienia czasu ekspozycji kamery pojazdu śledzącego. Rzeczywisty dystans między pojazdami w chwili początkowej testu wynosił około 2 m, natomiast kamera pojazdu śledzącego wskazywała 2,5 m, dlatego pojazd ten rozpoczął minimalizację uchybu dystansu do zadanych 2 m. W związku z tym, test omówiony został w odniesieniu do dystansu obliczonego przez system sterowania pojazdu śledzącego, ponieważ ten dystans wraz z namiarem względnym były wykorzystywane przez jego system sterowania do minimalizacji uchybów. Stabilizacja dystansu między pojazdami zajęła około 60 s (Rysunek 6.30). W tym czasie pojazd śledzący wykonał 7 cykli zbliżania i oddalania z amplitudą pomiędzy 1,5 m a 2,5 m i częstotliwością około 0,1 Hz. Po ostatnim 7 cyklu, który wystąpił w okolicy 60 s następuje spadek częstotliwości oscylacji do około 0,05 Hz. W trakcie tych oscylacji,

jednakowa wartość sygnału sterującego naporem pędników była podawana na oba pędniki śrubowe przez regulator dystansu. Poprzez ciągłą zmianę kierunku obrotu silników, co przedstawia przebieg sygnału sterującego naporem pędników z Rysunku 6.31, pojawiały się chwilowe różnice w naporach, które powodowały lekkie zmiany kursu pojazdu śledzącego, (Rysunek 6.32). W okolicach 2,5 s i 25 s testu te odchylenia namiaru dochodziły do 30 deg, ale regulator namiaru skutecznie je korygował poprzez sygnał sterujący naporem pędników, co widać na Rysunku 6.31. Amplituda oscylacji namiaru ustabilizowała się po około 45 s eksperymentu na poziomie 5 deg.

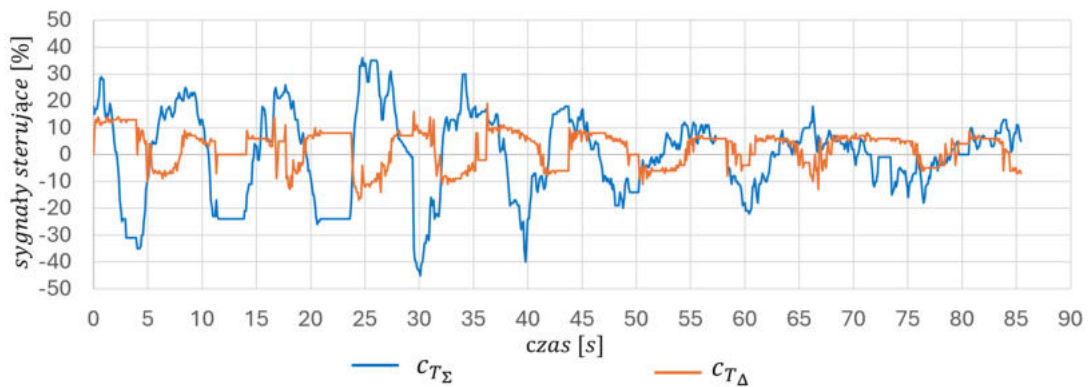
Pojawiające się w eksperymencie oscylacje dystansu i namiaru wynikają z niskich wartości oporów hydrodynamicznych w stosunku do sił napędowych przy prędkościach ruchu bliskich zeru. System sterowania pojazdu śledzącego został zaprojektowany tak, aby umożliwić mu utrzymanie się na dystansie maksymalnie 5 m za liderem. Aby zapewnić wystarczająco szybką reakcję pojazdu śledzącego, regulatory zostały ustawione na działanie bardziej intensywne. Negatywnym tego aspektem jest to, że przy bliskich zeru prędkościach ruchu dochodzi do przeregulowania i dłuższych czasów tłumienia oscylacji. Obok niskich oporów wody przy bliskich zeru prędkościach, kolejnym niekorzystnym efektem jest dryf lidera co widać po jego trajektorii (Rysunek 6.29). Pojazd śledzący w trakcie minimalizacji dystansu wprawia w ruch wodę, która powoduje przesuwanie się lidera w trakcie całego testu z okolicy punktu $x = 1$ m, $y = 0,5$ m w pobliże punktu $x = 2$ m, $y = -1$ m (Rysunek 6.29).



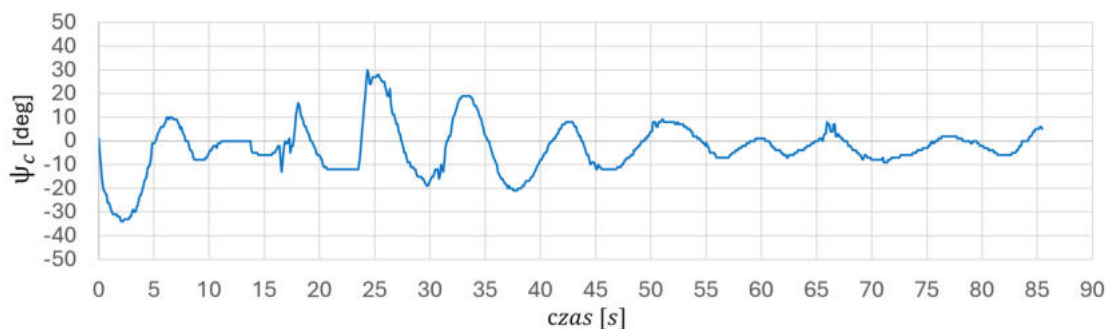
Rysunek 6.29. Test nr. 1 - trajektorie ruchu pojazdów.



Rysunek 6.30. Test nr. 1 - dystans wyznaczony z systemu MoCap oraz z kamery pojazdu śledzącego.



Rysunek 6.31. Test nr. 1 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników pojazdu śledzącego.



Rysunek 6.32. Test nr. 1 - aktualny namiar na lidera wyznaczony przez pojazd śledzący.

Test nr. 1 pokazuje, że opracowany algorytm śledzenia lidera umożliwia rozpoczęcie misji ruchu w formacji, gdzie pojazd śledzący musi w chwili otrzymania polecenia minimalizacji uchybów dystansu i namiaru zareagować wystarczająco szybko, aby

wykryty maszt lidera nie oddalił się na dystans większy niż 5 m ale też odpowiednio szybko wyhamować, aby nie doprowadzić do kolizji z liderem. Jest to istotny element, ponieważ w chwili początkowej pojazdy znajdują się w różnej odległości od siebie. Jeżeli w chwili przesłania do pojazdu śledzącego polecenia podążania za liderem, dystans między nimi nie przekracza 5 m i lider nie porusza się, to pojazd jest w stanie się ustawić w zadanej odległości i z zadanyam namiarem.

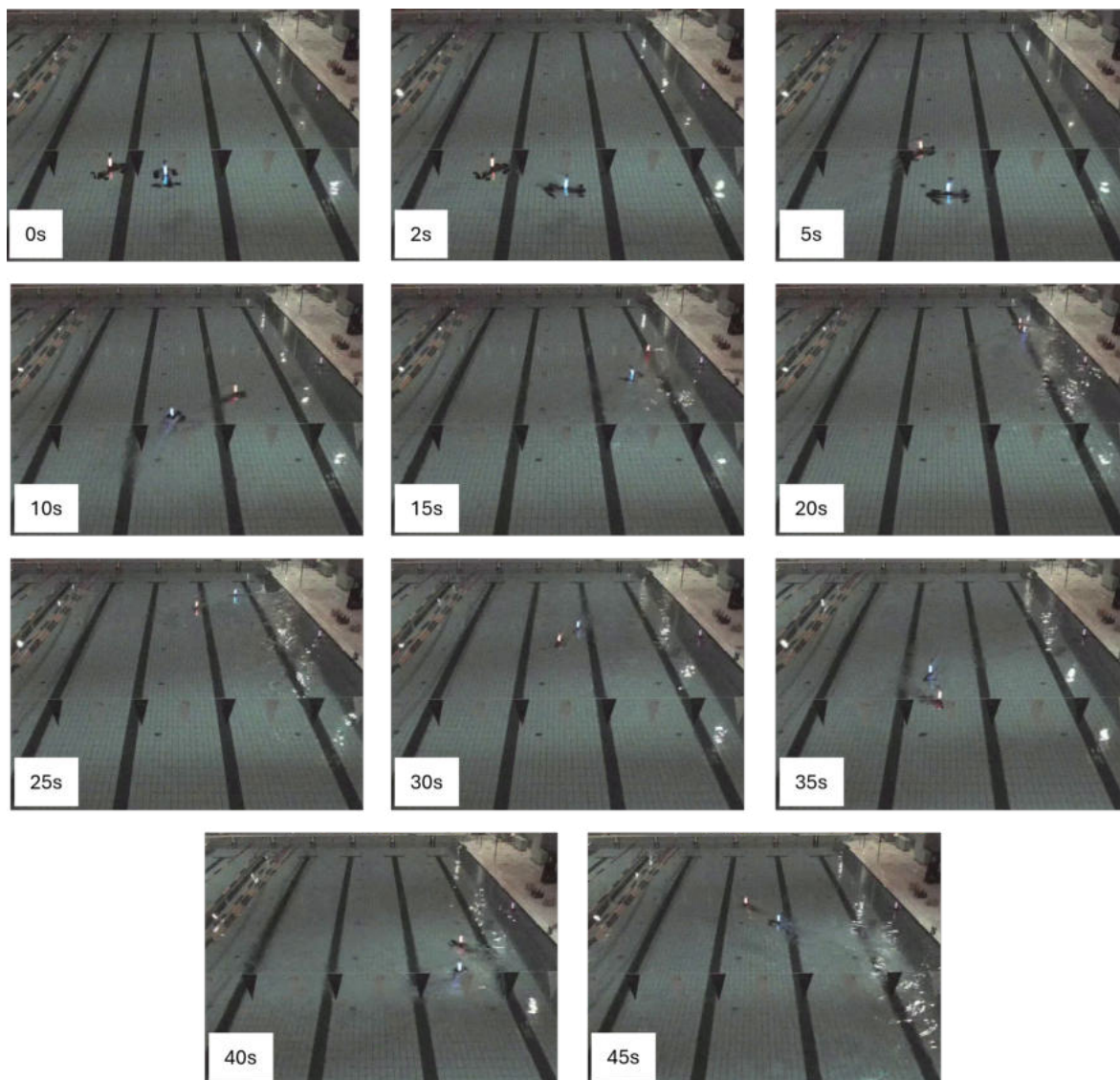
6.4.3 Podążanie za liderem wykonującym spokojne manwery

W teście nr. 2 weryfikacji poddane zostało podążanie pojazdu śledzącego za liderem wykonującym spokojne manwery w postaci cyrkulacji z promieniami pomiędzy 1 a 1,5 m i stałą prędkością postępową. W tym celu lider kontrolowany był zdalnie przez sieć WiFi. Czas trwania testu wyniósł 45 s. Zdjęcia kolejnych chwil eksperymentu przedstawia Rysunek 6.33. Sygnały sterujące naporem pędników lidera prezentuje Rysunek 6.36. Wynikiem testu jest trajektoria ruchu lidera i pojazdu śledzącego widoczna na Rysunku 6.34. Kolejne chwile zaprezentowane na zdjęciach zostały dodatkowo zaznaczone w postaci punktów na trajektoriach ruchu pojazdów, aby pokazać w jakich odległościach od siebie w danych chwilach były pojazdy. Kolejne wykresy prezentują dystans między liderem a pojazdem śledzącym wyznaczony z systemu MoCap oraz pochodzący z kamery pojazdu (Rysunek 6.35), sygnał sterujący naporem pędników i sterem kierunku pojazdu śledzącego wyznaczony przez jego system sterowania (Rysunek 6.37) i chwilowy namiar względny z jakim pojazd śledzący był ustawiony do lidera (Rysunek 6.38).

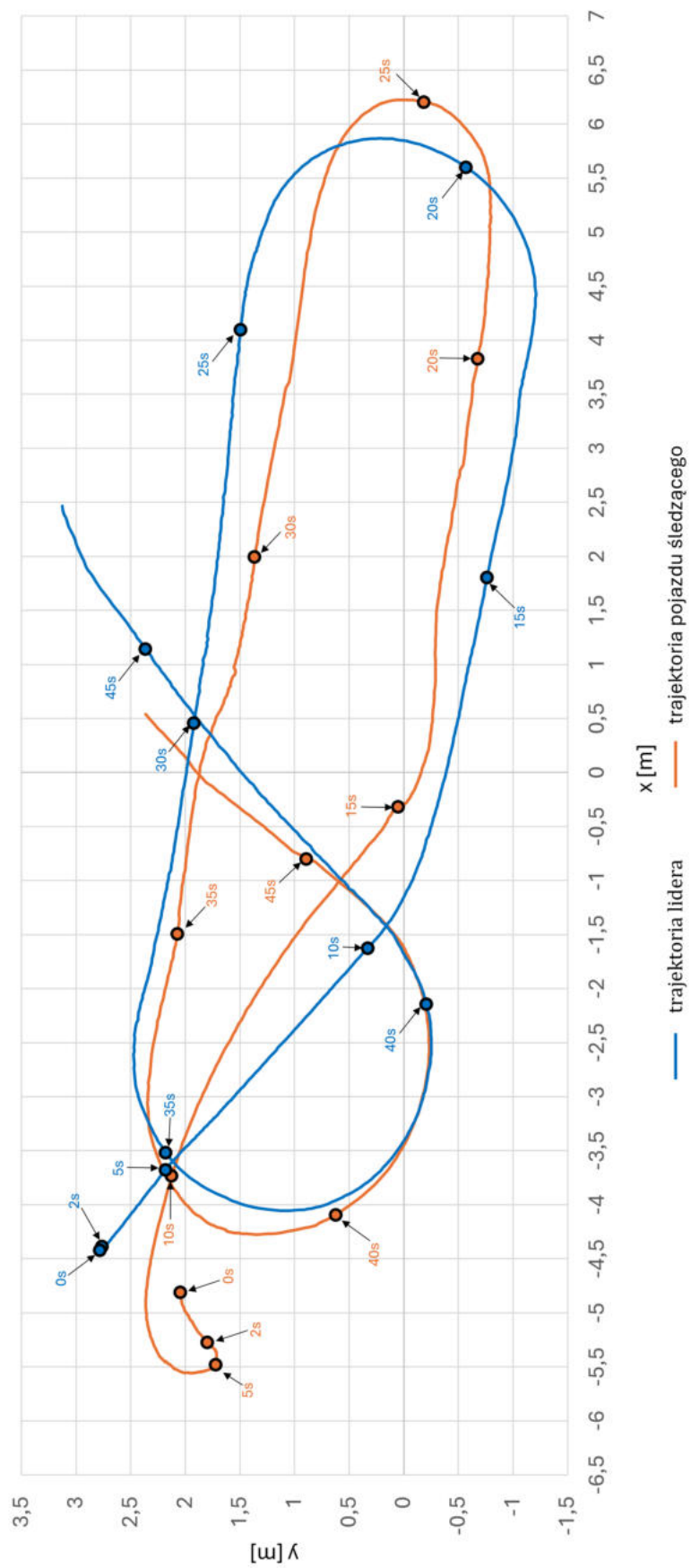
W teście nr. 1, pojazd śledzący, obserwując lidera obejmował swoim obszarem widzenia kamery tylko jedną stronę basenu. W trakcie przeprowadzania testu nr. 2 okazało się, że przeciwległa strona basenu generuje dużo intensywniejsze odbicia światła pochodzącego z oświetlenia basenu, co zakłóca detekcję masztu. Dlatego jasność oświetlenia zewnętrznego na czas kolejnych badań została zmniejszona. Przyniosło to pozytywny efekt w postaci dużo lepszej zgodności przebiegów na Rysunku 6.35.

W chwili startu testu, dystans między liderem a pojazdem śledzącym wynosił około 1,4 m. Dlatego w pierwszych 5 s, pojazd śledzący cofnął się na dystans około 2,5 m, ale w okolicach 2,5 s lider wystartował z naporem pędników 40% co spowodowało wzrost dystansu do około 3 m. Pomiedzy 10 a 20 s eksperymentu nastąpiła jedna oscylacja dystansu pojazdu śledzącego do lidera. Najpierw dystans spadł do 1,5 m żeby następnie wzrosnąć do około 4 m. To wahnięcie spowodowane było tym, że lider rozpoczął ruch w momencie gdy pojazd śledzący lekko się cofał, co kamera i system sterowania pojazdu zinterpretowały jako wyższą prędkość ucieczki lidera. Dlatego nastąpiła reakcja w postaci wyższej wartości naporu pędników pojazdu śledzącego, aby do tej ucieczki nie dopuścić. lider jednak ustabilizował swoją prędkość, przez co pojazd śledzący, który rozpedził się znacznie bardziej musiał teraz wyhamować. Ten moment hamowania wypada w okolicy 13 s. To wyhamowanie było jednak na tyle duże, że lider w kolejnych chwilach zdążył zwiększyć dystans ponownie do ponad 3 m, co spowodowało kolejną oscylację, jednak już mniejszą. Nadmierna akumulacja prędkości pojazdu śledzącego w pierwszych 10 s i następująca po niej duża oscylacja dystansu była dodatkowo spowodowana dużymi wartościami namiaru względnego, który w okolicy 5 s osiągnął

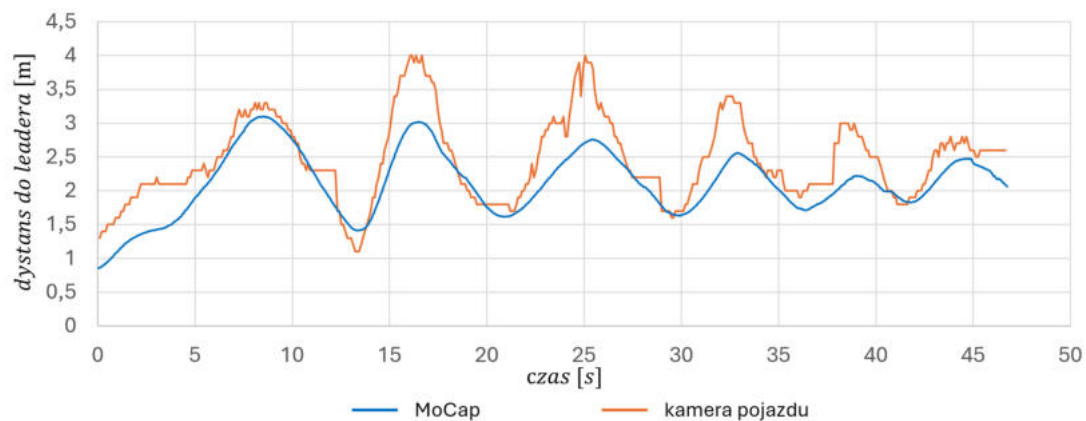
aż -70 deg (Rysunek 6.38), a którą regulator kursu musiał zminimalizować wpływając w ten sposób na nadmierną prędkość postępową pojazdu śledzącego. Pomiędzy 20 s a około 27 s testu następuje zwrot lidera o około 180 deg. W trakcie którego dochodzi do ponownego wzrostu namiaru względnego do około 80 deg. Kolejna cyrkulacja lidera o około 225 deg nastąpiła między około 32 a 40 s eksperymentu. W trakcie tego manewru lider utrzymywał stabilną i niewysoką prędkość postępową, dzięki czemu pojazd śledzący dużo lepiej wykonał manewr, co widać po namiarze względnym, który w najwyższym punkcie (około 37 s) osiągnął około 35 deg.



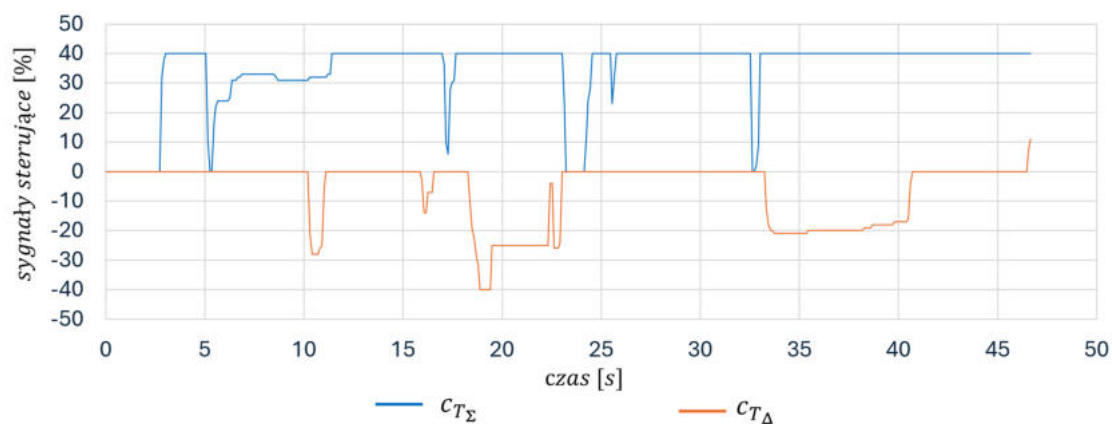
Rysunek 6.33. Test nr. 2 - regulacja dystansu do lidera w kolejnych chwilach czasu.



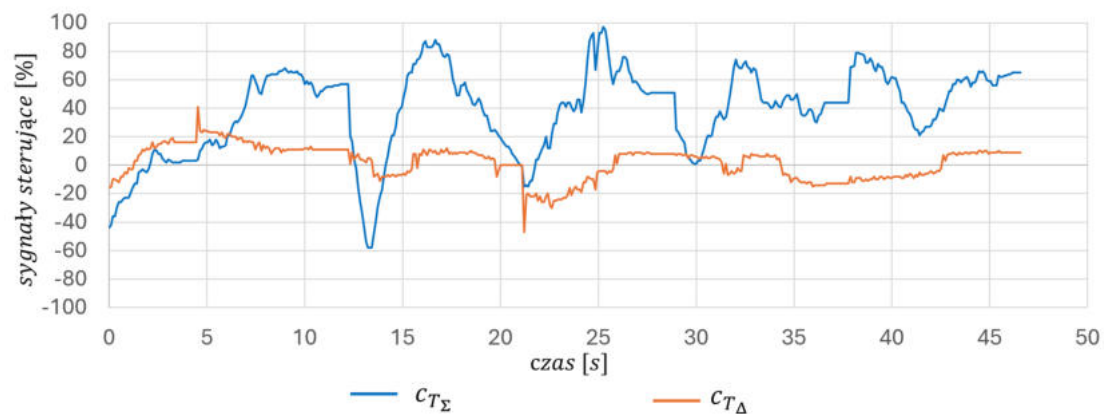
Rysunek 6.34. Test nr. 2 — trajektorie ruchu pojazdów.



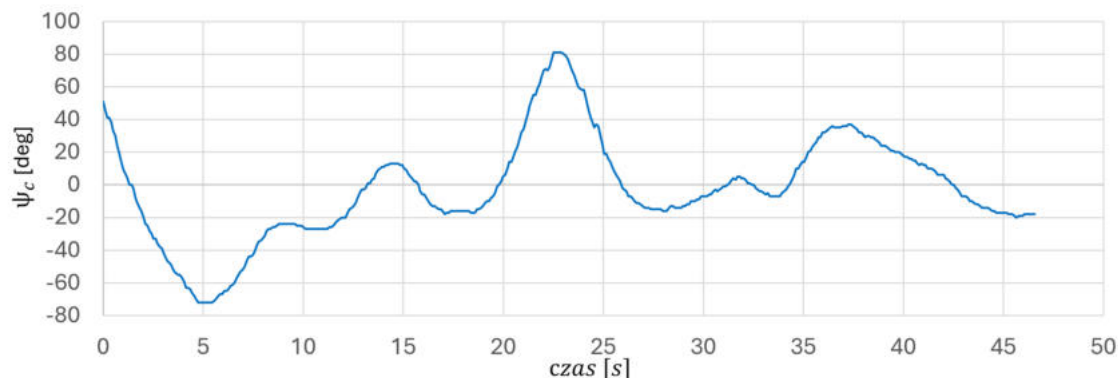
Rysunek 6.35. Test nr. 2 - dystans wyznaczony z systemu MoCap oraz z kamery pojazdu śledzącego.



Rysunek 6.36. Test nr. 2 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników lidera.



Rysunek 6.37. Test nr. 2 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników pojazdu śledzącego.

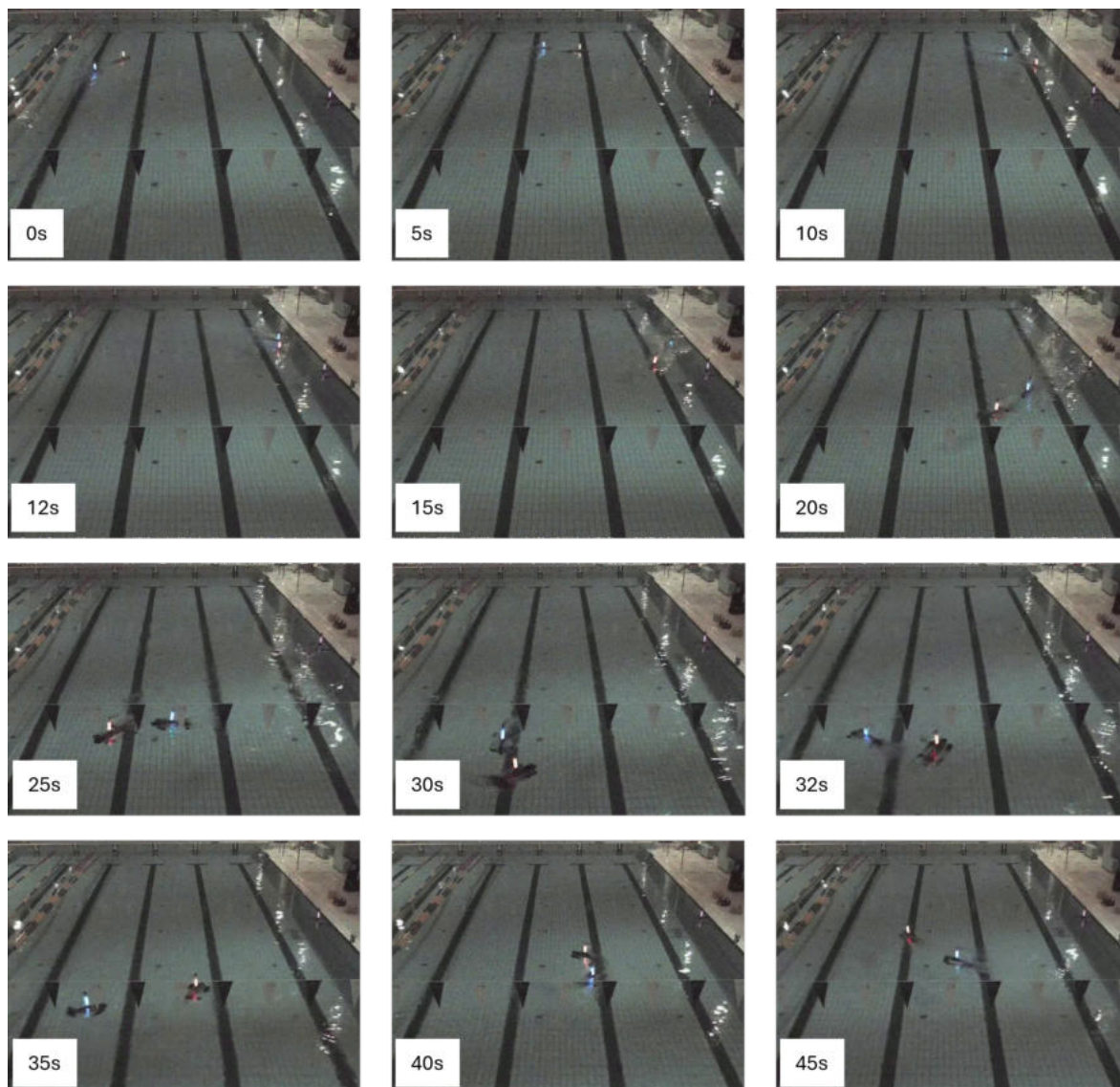


Rysunek 6.38. Test nr. 2 - aktualny namiar na lidera wyznaczony przez pojazd śledzący.

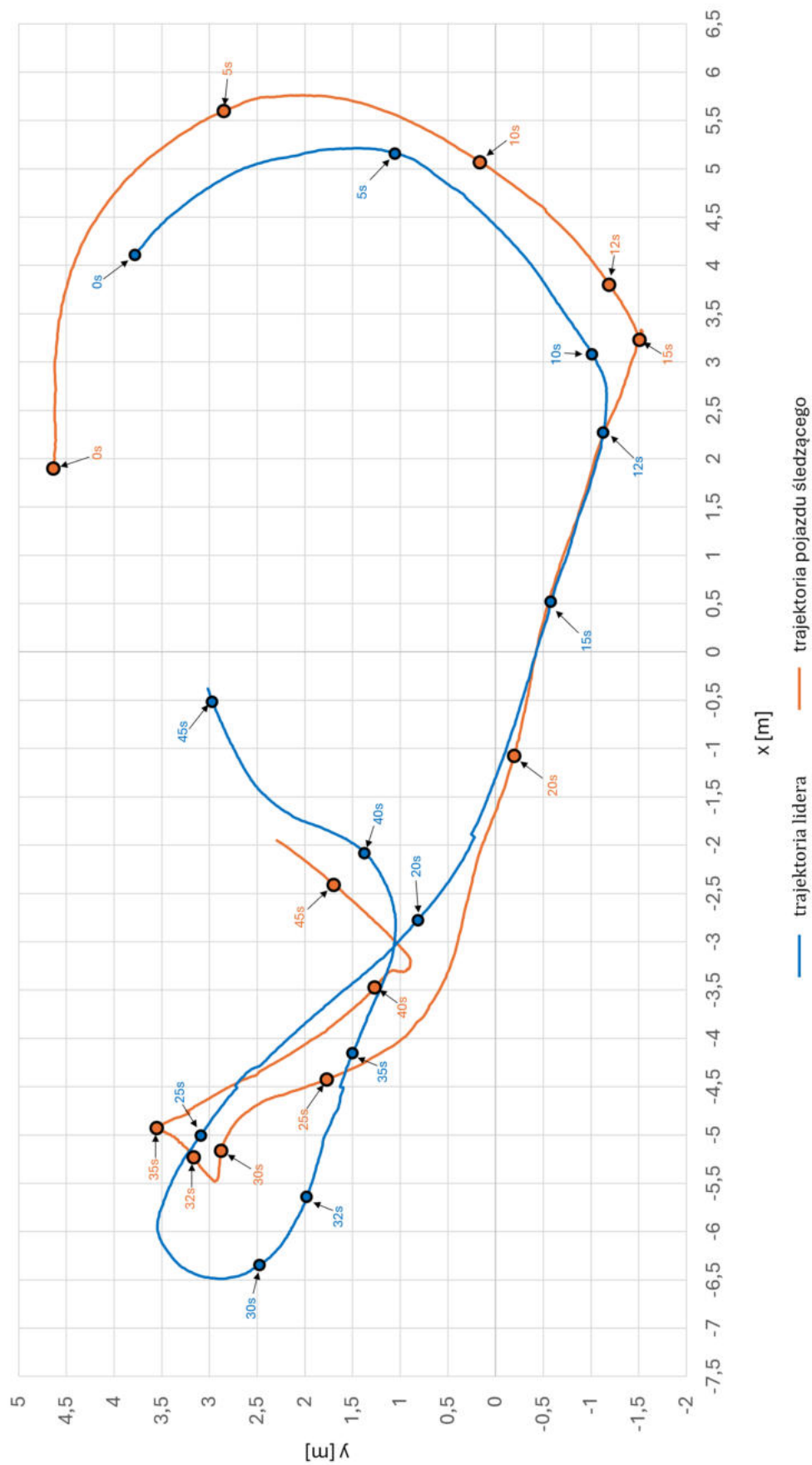
6.4.4 Podążanie za liderem wykonującym dynamiczne manewry

Test nr. 3 miał na celu sprawdzenie reakcji pojazdu śledzącego na dynamiczny manewr zawracania lidera, który w trakcie manewru zwalnia, aby wykonać manewry na jak najmniejszym promieniu. Czas trwania eksperymentu wyniósł 45 s. Zdjęcia kolejnych chwil eksperymentu przedstawia Rysunek 6.39. Sygnały sterujące naporem pędników lidera prezentuje Rysunek 6.42, w wyniku czego lider i pojazd śledzący poruszali się z trajektoriami przedstawionymi na Rysunku 6.40. Kolejne wykresy prezentują dystans między liderem a pojazdem śledzącym wyznaczony z systemu MoCap oraz pochodzący z kamery pojazdu (Rysunek 6.41), sygnał sterujący naporem pędników pojazdu śledzącego wyznaczony przez jego system sterowania (Rysunek 6.43) i chwilowy namiar względny z jakim pojazd śledzący był ustawiony do lidera (Rysunek 6.44). Po rozpoczęciu testu oba pojazdy poruszały się, co widać po przebytej drodze, między startem a 5 s eksperymentu. W okolicy 10 s lider zwolnił żeby wykonać manewr skrętu i chwilę po 12 s znów rozpoczął ruch postępowy. Pojazd śledzący w tym czasie zdążył zminimalizować dystans do około 1,5 m. Ponieważ lider nie miał w tej chwili dużej prędkości postępowej to pojazd śledzący w okolicy 15 s zaczął się lekko cofać, aby zminimalizować uchyb dystansu. Ten ruch w tył spowodował, że gdy lider rozpoczął ruch postępowy, to dystans między pojazdami wzrósł do ponad 3 m. Najważniejsza część eksperymentu rozpoczyna się w 25 s. W tym momencie lider zwalnia, żeby wykonać manewr zawracania i w 32 s znów rozpoczyna ruch postępowy. W tym czasie pojazd śledzący, który musiał najpierw zminimalizować dystans zbliża się na odległość około 1 m do lidera w okolicy 30 s i podobnie jak poprzednio zaczyna się cofać. W tym momencie lider już porusza się z prędkością postępową (około 35 s) co powoduje wzrost dystansu do ponad 3 m i kolejny pościg pojazdu śledzącego, który kończy się chwilę po 40 s zbliżeniem na odległość 1,5 m. Podobnie jak poprzednio, pojazd śledzący zaczyna się cofać, aby osiągnąć zadane 2 m dystansu ale ruch postępowy lidera w tym czasie sprawia, że dystans między pojazdami wzrasta do około 3 m. W trakcie całego eksperymentu namiar względny na lidera z jakim poruszał się pojazd śledzący nie przekroczył 50 deg a napór wsteczny pędników pojazd śledzący wykorzystał czterokrotnie, w okolicy 13, 25, 30 i 40 s. W 13, 30 i 40 s napór wsteczny pędników miał na celu całkowite wyhamowanie

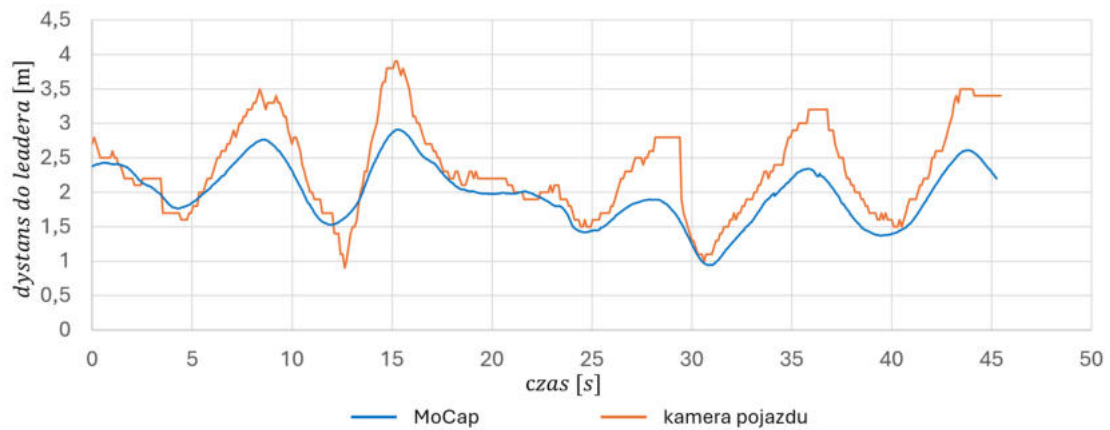
pojazdu i ruch wsteczny. W 25 s pojazd śledzący poruszał się z dużą prędkością postępową i napór wsteczny pędników miał jedynie na celu lekkie zwolnienie.



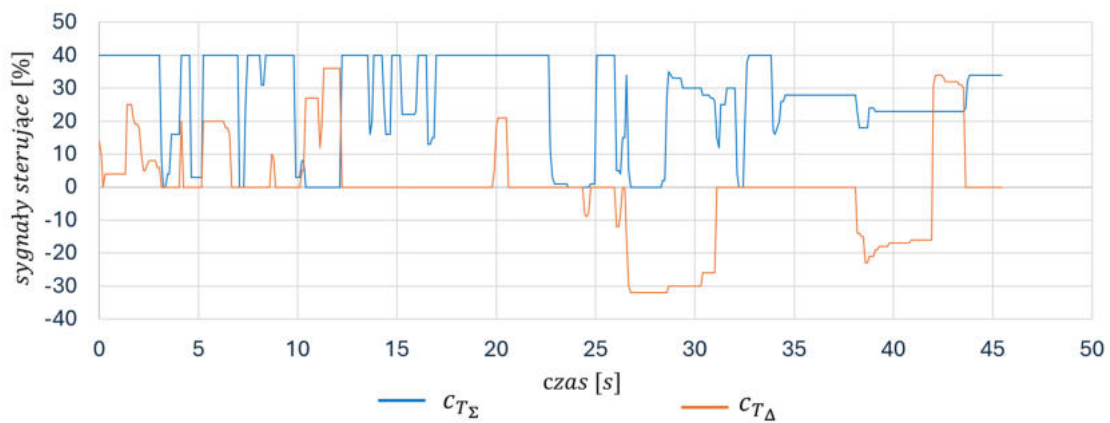
Rysunek 6.39. Test nr. 3 - regulacja dystansu do lidera w kolejnych chwilach czasu.



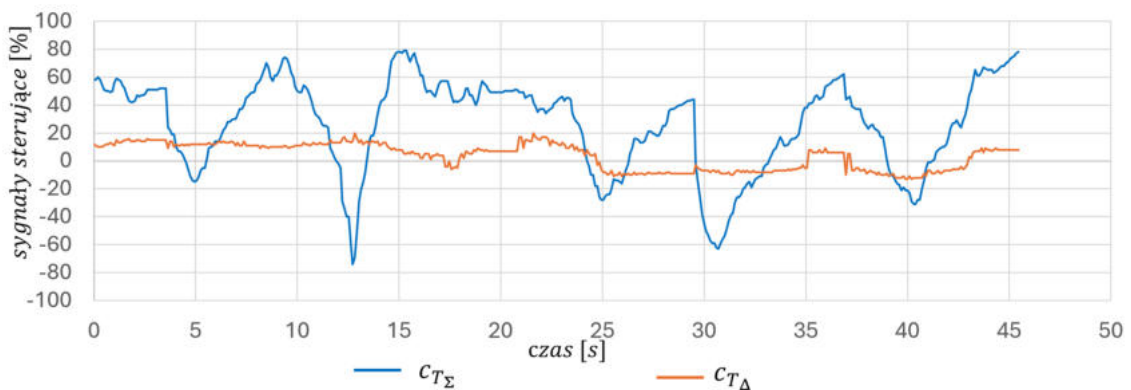
Rysunek 6.40. Test nr. 3 — trajektorie ruchu pojazdów.



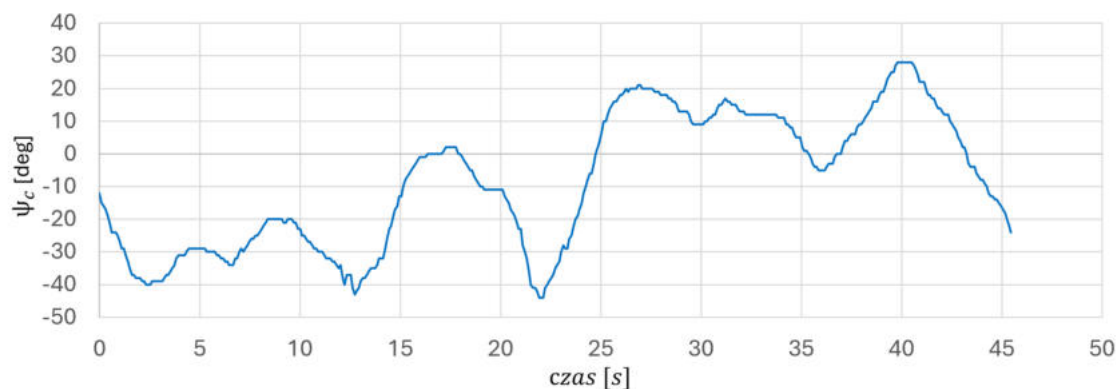
Rysunek 6.41. Test nr. 3 - dystans wyznaczony z systemu MoCap oraz z kamery pojazdu śledzącego.



Rysunek 6.42. Test nr. 3 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników lidera.



Rysunek 6.43. Test nr. 3 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników pojazdu śledzącego.

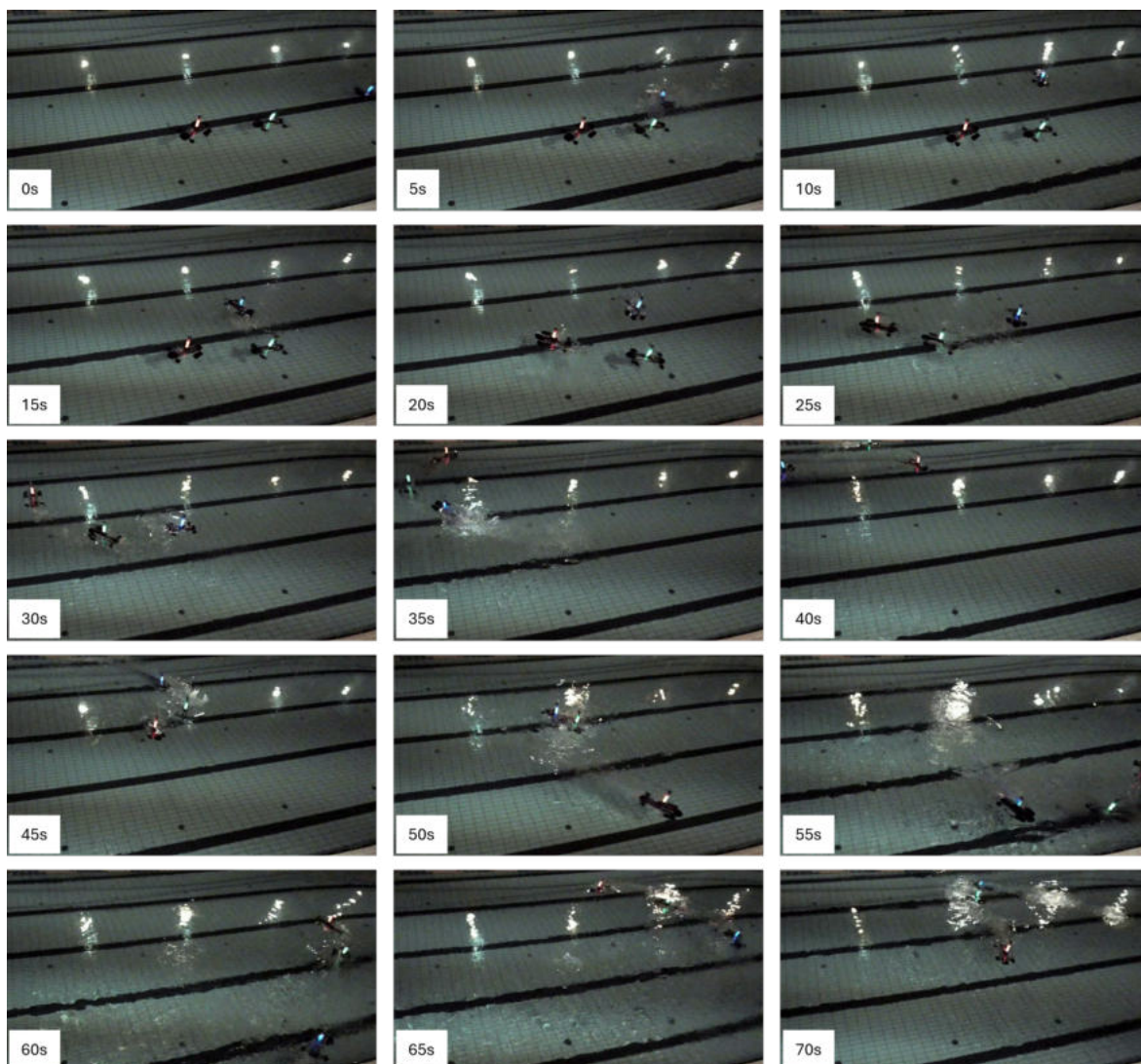


Rysunek 6.44. Test nr. 3 - aktualny namiar na lidera wyznaczony przez pojazd śledzący.

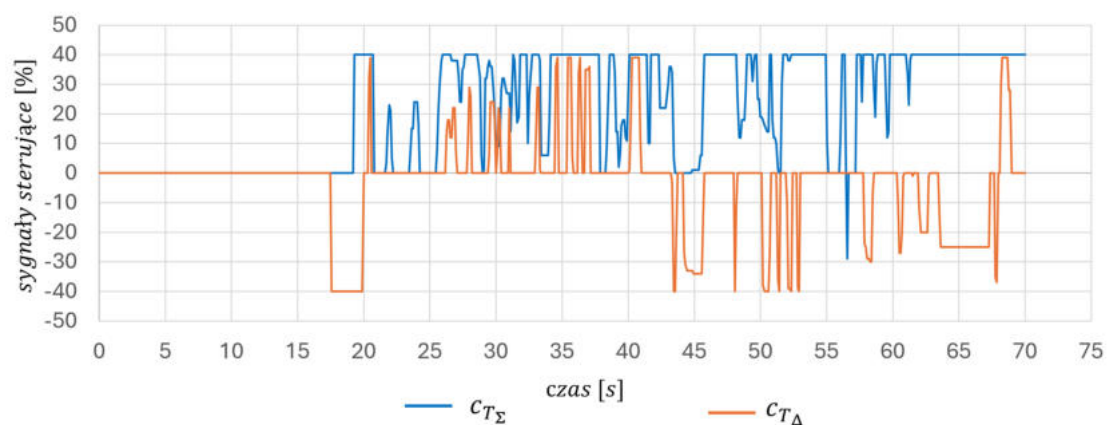
6.4.5 Test ławicy złożonej z lidera i dwóch pojazdów śledzących

W teście nr.4 do ławicy dodany został drugi pojazd śledzący, którego zadaniem było podążanie za pierwszym pojazdem śledzącym. Czas trwania eksperymentu wyniósł 70 s. Zdjęcia kolejnych chwil eksperymentu przedstawia Rysunek 6.45. Sygnały sterujące naporem pędników lidera prezentuje Rysunek 6.46. W wyniku czego lider, pierwszy i drugi pojazd śledzący poruszali się z trajektoriami pokazanymi na Rysunku 6.47. Dystans między liderem i pierwszym pojazdem śledzącym prezentuje Rysunek 6.48, a między pierwszym i drugim pojazdem śledzącym Rysunek 6.49. Sygnały sterujące naporem pędników pierwszego pojazdu śledzącego przedstawia Rysunek 6.50, a drugiego pojazdu śledzącego Rysunek 6.51. Chwilowe namiary względne z jakimi pierwszy pojazd śledzący był ustawiony do lidera (Rysunek 6.52), a drugi pojazd śledzący do pierwszego (Rysunek 6.53). W chwili startu eksperymentu lider znajdował się w spoczynku, pierwszy pojazd śledzący w odległości około 2 m od lidera utrzymując dystans i namiar do lidera natomiast drugi pojazd śledzący w odległości około 4 m do pierwszego pojazdu śledzącego. Dlatego pierwsze 18 s eksperymentu zostały przeznaczone na minimalizację uchybów drugiego pojazdu śledzącego do pierwszego. W 18 s lider najpierw w miejscu wykonał obrót a następnie ruch w przód rozpoczynając ruch całej ławicy. Rozpoczęcie ruchu lidera spowodowało ruch pierwszego pojazdu śledzącego. Drugi pojazd śledzący natomiast między 18 a 25 s wciąż był w odległości bliskiej 2 m od pierwszego, dlatego na jego trajektorii ruchu widać wciąż oscylacje. W 25 s lider rozpoczyna cyrkulację o promieniu między 1,5 a 2,5 m w wyniku czego zatacza okrąg. W tym czasie pierwszy i drugi pojazd śledzący skutecznie realizują swoje zadania minimalizacji uchybów dystansu i namiaru. Pomiędzy 45 a 50 s lider chwilowo zwalnia. W tym czasie pierwszy pojazd śledzący, który rozpędził się do wyższej prędkości hamuje co przez chwilę powoduje jego ruch wsteczny i w 50 s znów wraca do ruchu w przód. To hamowanie pierwszego pojazdu śledzącego naporem wstecznym pędników jest dużym wyzwaniem dla drugiego, który rozpędził się do nieco wyższej prędkości niż pierwszy. Pełne zahamowanie drugiego pojazdu śledzącego przypada w okolicy 50 s w odległości poniżej 1 m do pierwszego. Jest to moment, w którym dochodzi do kolizji obu pojazdów. Ruch ławicy jest jednak kontynuowany, ponieważ lider w 50 s

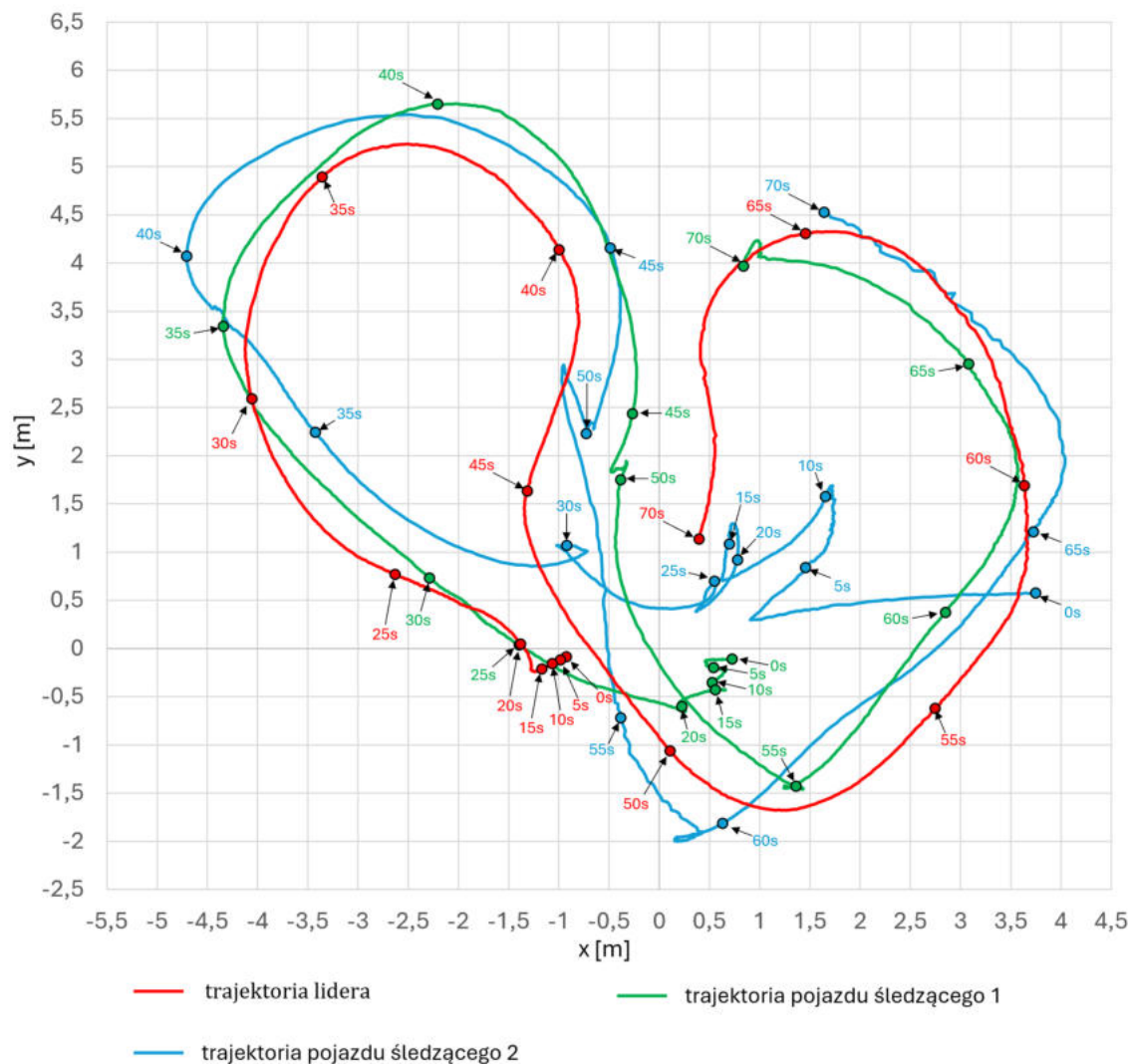
zaczyna powolną cyrkulację z dużą prędkością postępową aż do końca eksperymentu, co widać po odległościach między kolejnymi punktami na trajektorii lidera. W tym czasie dochodzi do jeszcze jednego zatrzymania pojazdów śledzących między 54 a 60 s. W 54 s hamuje pierwszy pojazd śledzący, ponieważ dogonił on lidera i zbliżył się na dystans 1 m. To z kolei przeniosło się na hamowanie drugiego pojazdu śledzącego w okolicy 56 s, który w efekcie zbliżył się do pierwszego również na odległość 1 m. W tej sytuacji nie dochodzi jednak do kolizji między pojazdami śledzącymi. Eksperyment kończy się w 70 s, pomimo, że pojazdy były wciąż w ruchu. Drugi pojazd śledzący w 70 s nie rozpoczął jeszcze manewru skręcania za pierwszym. Eksperyment został jednak ograniczony do tej konkretnej sekundy, aby dalsza trajektoria lidera nie przecięła się z trajektoriami innych pojazdów, co znacznie pogorszyłoby czytelność wykresu i analizę wyników testu. Podobnie jak w poprzednich testach, widać tu niską efektywność regulatora namiaru przy wyższych prędkościach postępowych pojazdów. Trajektoria pierwszego pojazdu śledzącego przy pierwszej cyrkulacji lidera wykracza poza trajektorię lidera, a trajektoria drugiego pojazdu śledzącego za trajektorię pierwszego. Pokazuje to jednak wciąż wystarczającą skuteczność regulatora namiaru w zadaniu śledzenia, ponieważ każdy kolejny pojazd w formacji, aby dogonić śledzonego lidera, musi utrzymywać prędkości postępowe wyższe niż śledzony lider.



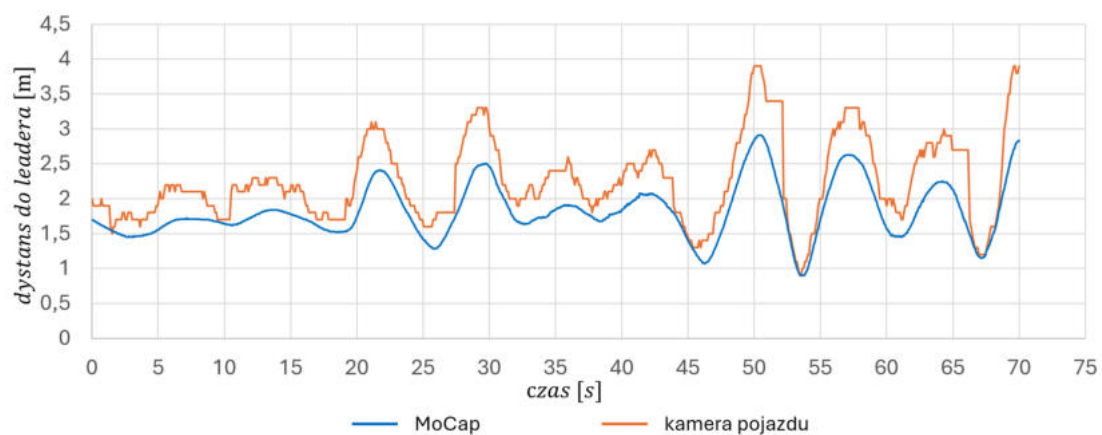
Rysunek 6.45. Test nr. 4 - regulacja dystansu do lidera w kolejnych chwilach czasu.



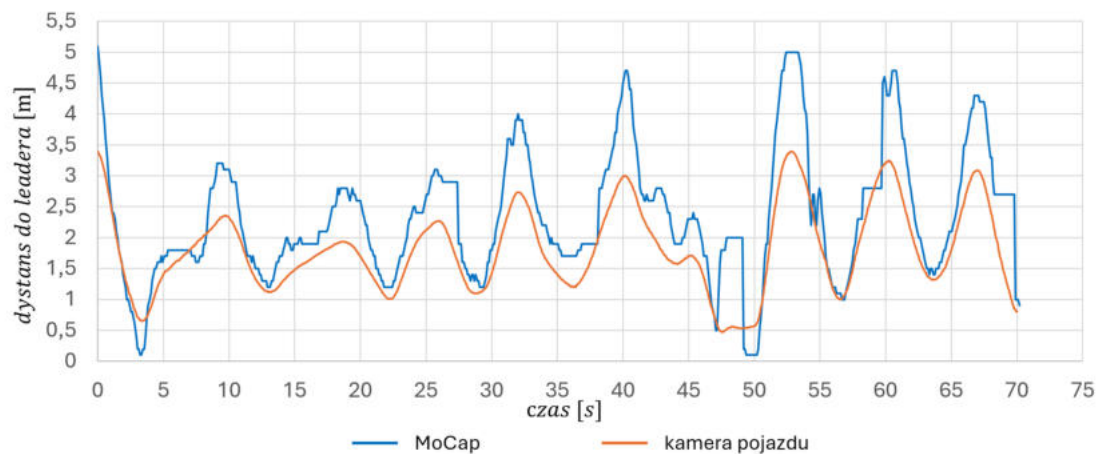
Rysunek 6.46. Test nr. 4 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników lidera.



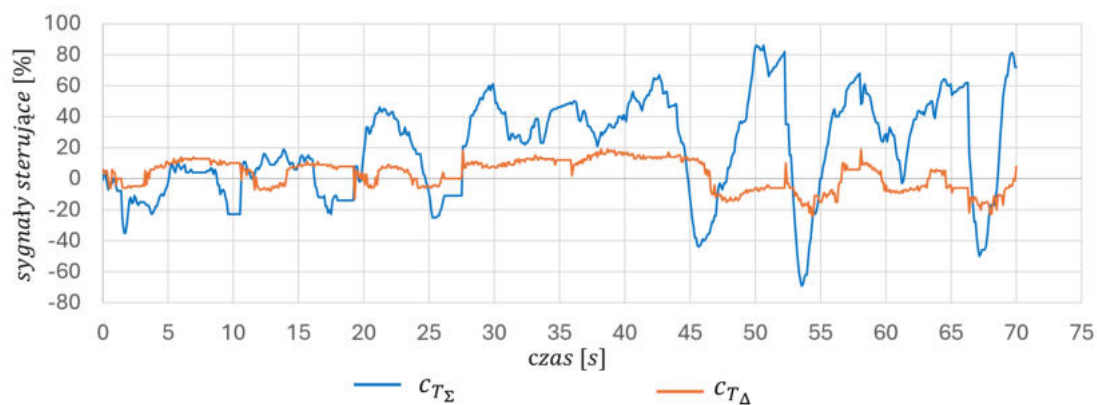
Rysunek 6.47. Test nr. 4 — trajektorie ruchu pojazdów.



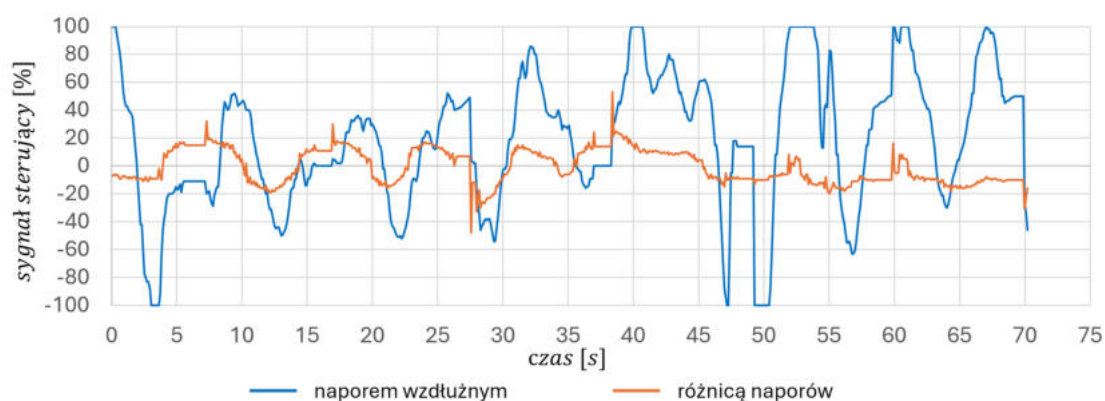
Rysunek 6.48. Test nr. 4 - dystans wyznaczony z systemu MoCap oraz z kamery pierwszego pojazdu śledzącego do lidera.



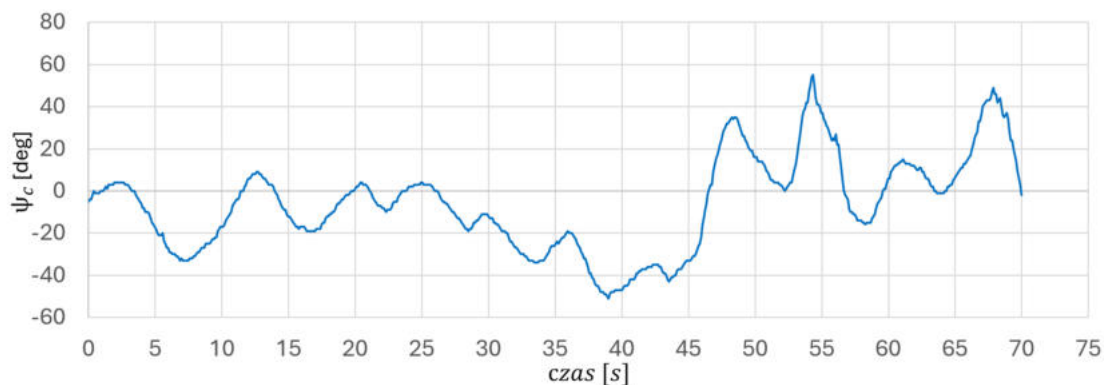
Rysunek 6.49. Test nr. 4 - dystans wyznaczony z systemu MoCap oraz z kamery drugiego pojazdu śledzącego do pierwszego.



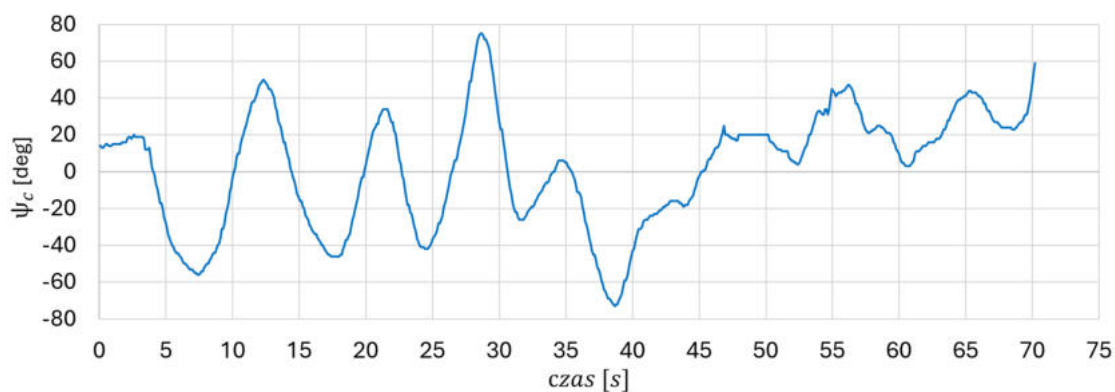
Rysunek 6.50. Test nr. 4 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników pierwszego pojazdu śledzącego.



Rysunek 6.51. Test nr. 4 - wartości sygnałów sterujących naporem wzdłużnym i różnicą naporów pędników drugiego pojazdu śledzącego.



Rysunek 6.52. Test nr. 4 - aktualny namiar na lidera wyznaczony przez pierwszy pojazd śledzący.



Rysunek 6.53. Test nr. 4 - aktualny namiar na pierwszy pojazd śledzący wyznaczony przez drugi pojazd śledzący.

6.4.6 Podsumowanie i wnioski do badań eksperymentalnych

Algorytm ruchu ławicy z wykorzystaniem metody śledzenia lidera i LOS, opracowany w ramach badań symulacyjnych i zweryfikowany eksperymentalnie, skutecznie realizuje zadania minimalizacji uchybu dystansu i namiaru, co pozwala na utrzymanie luźnej formacji linii (z zerowym namiarem na śledzonego lidera) w kaskadzie ("jeden za drugim"). Największym problemem, z jakim musi sobie radzić algorytm sterowania pojazdami jest ograniczona jedynie do trzech parametrów: dystansu, namiaru i własnego sygnału sterującego naporem wzdłużnym, informacja, którą wykorzystuje algorytm. Jest to jednocześnie główna zaleta algorytmu ruchu ławicy, ponieważ znacznie ogranicza to koszty wymaganych sensorów. Brak informacji o własnej prędkości ruchu oraz o prędkości i kursie lidera sprawia jednak, że system sterowania nie jest w stanie przewidywać jego położenia i zachowania, więc nie jest w stanie precyzyjnie śledzić lidera. Uniemożliwia to ruch pojazdów w ścisłej formacji. System sterowania pojazdu śledzącego musi być opracowany i dostrojony tak, aby w każdej chwili był przygotowany na nieoczekiwane manewry lidera. W pierwszej części badań symulacyjnych opracowany został regulator dystansu pojazdu śledzącego. Trzy pierwsze testy: minimalizacji uchybu do nieruchomego lidera, rozpędzania i hamowania wybiegiem pokazały, że niezależnie od tego z jaką

prędkością będzie się poruszał lider w przedziale od 0% do 75% sygnału sterującego naporem wzdłużnym, pojazd śledzący jest w stanie nadażyć i co istotne, zminimalizować uchyb dystansu. Problemem, który pojawił się w tej części badań, była słaba stabilizacja uchybu dystansu spowodowana niskimi oporami wody, a w konsekwencji niskim tłumieniem ruchu pojazdu. Kolejnemu badaniu poddane zostało współdziałanie regulatorów dystansu i namiaru względnego. W tym celu zaplanowany został ruch lidera, tak aby w trakcie zmieniała się prędkość postępową albo promień cyrkulacji. To zadanie opracowany system sterowania pojazdu śledzącego skutecznie zrealizował utrzymując zdolność do minimalizacji uchybów dystansu i namiaru bez nasycenia regulatorów. W kolejnym badaniu zweryfikowany został ruch kilku pojazdów w formacji linii w kaskadzie (jeden za drugim). Kluczem do bezkolizyjnego ruchu pojazdów, jest wykonywanie przez każdy kolejny pojazd spokojnych, nieagresywnych manewrów. Ponieważ formacja zakłada ruch "jeden za drugim", to kolejny pojazd śledzący jest śledzony przez następnego. To sprawia, że niestabilność ruchu pierwszego pojazdu śledzącego jest propagowana na kolejne pojazdy śledzące. Efekt jest tym większy im dalej w ławicy znajduje się pojazd. Dlatego kolejne dwa badania rozpędzania i hamowania oraz ruchu po trajektorii miały na celu sprawdzenie, ile pojazdów może poruszać się w formacji, oraz jakie mogą być maksymalne zmiany sygnału sterującego naporem wzdłużnym lidera, aby bezkolizyjnie prowadzić ławicę. Badanie pokazało, że o ile lider może rozpędzać się z dużymi skokami sygnału sterującego naporem wzdłużnym, to już hamowanie wybiegiem z 50% sygnału sterującego naporem wzdłużnym do zera powoduje, że w idealnych warunkach symulacji trzeci pojazd śledzący wchodzi w strefę kolizyjną z drugim. Jeżeli lider nie hamuje, tylko porusza się cały czas, to wszystkie pojazdy śledzące są w stanie utrzymać bezkolizyjny ruch w formacji. Należy mieć jednak na uwadze, że są to testy symulacyjne, których odwzorowanie w rzeczywistych pojazdach jest uproszczone. Dlatego opracowany w symulacji algorytm ruchu ławicy został zweryfikowany eksperymentalnie. W tym celu przeprowadzone zostały cztery testy: minimalizacji uchybów do nieruchomego lidera, śledzenie lidera wykonującego spokojne manewry z dużą prędkością, śledzenie lidera wykonującego agresywne manewry, ruch ławicy trzech pojazdów (leader, pierwszy pojazd śledzący, drugi pojazd śledzący). W ostatnim badaniu eksperymentalnym w formacji poruszały się tylko dwa pojazdy śledzące, ponieważ badania symulacyjne dowiodły, że utrzymanie trzeciego pojazdu jest możliwe tylko przy spokojnym ruchu lidera. Basen pływacki, w którym realizowane były eksperymenty jest zbyt małym obszarem, aby można było ustabilizować ruch lidera.

Opracowany algorytm ruchu pojazdów śledzących zakłada znajomość tylko dystansu, namiaru i własnego sygnału sterującego naporem wzdłużnym. Tak ograniczona informacja, pozwoliła na utrzymanie tylko dwóch pojazdów śledzących. Aby możliwe było zwiększenie ich liczby, konieczne jest dołożenie do algorytmu pomiaru własnej prędkości ruchu. Badanie symulacyjne ruchu czterech pojazdów z Rysunku 6.25 pokazało, że kolejne pojazdy śledzące w formacji muszą minimalizować dystans do poprzednich, które hamują naporem wstecznym. Regulator dystansu nie jest w stanie tak szybko reagować, przez co dochodzi do wejścia w strefę kolizyjną a nawet do kolizji pojazdów. Dołożenie informacji o własnej prędkości pojazdu, pozwoliłoby na hamowanie do prędkości równej zero, bez ruchu wstecznego, co ograniczyłoby agresję hamowania i umożliwiłoby spokojne

zatrzymanie większej liczby pojazdów śledzących.

Algorytm ruchu pojazdów śledzących opiera się o adaptacyjne regulatory ślizgowe i adaptacyjne regulatory PID, których zadaniem jest minimalizacja uchybów dystansu i namiaru. W sytuacjach ostrego hamowania często reakcja regulatorów jest zbyt późna i dochodzi do kolizji pojazdów. Jednym z pomysłów, które mogłoby pozwolić na unikanie takich kolizji jest chwilowa zmiana namiaru zadanego. W sytuacji zagrożenia kolizji pojazd mógłby zejść z namiaru zerowego na wartość niezerową. Dzięki temu pojazd śledzący zamiast hamować, mógłby zejść na namiar np. 30 stopni i zrównać się z liderem unikając w ten sposób kolizji.

Rozdział 7

Podsumowanie i wnioski

W ramach pracy doktorskiej podjęty został problem skoordynowanego ruchu ławicy pojazdów podwodnych. Celem było opracowanie algorytmu ruchu ławicy z wykorzystaniem metody śledzenia lidera, który umożliwiłby pojazdom wspólny ruch w oparciu tylko o dystans i namiar na śledzonego lidera i własny sygnał sterujący naporem wzdłużnym. Algorytm opracowany został w oparciu o model matematyczny ruchu pojazdu HUUV i symulacje a następnie zweryfikowany eksperymentalnie na basenie pływackim z wykorzystaniem czterech pojazdów HUUV. W pierwszej części pracy przeprowadzona została analiza literatury. Najpierw zachowania zbiorowe systemów wielorobotowych zostały sklasyfikowane na obszary takie jak: agregacja, wspólna nawigacja, czy wspólne podejmowanie decyzji. Następnie szerszej analizie poddany został kolektywny ruch będący zachowaniem zbiorowym z obszaru wspólnej nawigacji. W ramach analizy wyszczególnione zostały różne metody, które określają strukturę ławicy, takie jak metody: śledzenia lidera, oparta na zachowaniach czy wirtualnej struktury, oraz narzędzia wykorzystywane przez pojazdy do utrzymania swoich pozycji w ławicy, do których należą między innymi: regulatory ślizgowe, predykcyjne, sieci neuronowe, teoria grafów i inne. W kolejnym podrozdziale wykonany został przegląd ławic pojazdów podwodnych, zbudowanych w przeciągu ostatnich 15 lat. Zostały one zestawione ze względu na rodzaj komunikacji, sensorów czy obszaru działania. Ławice budowane w ramach projektów badawczych albo składają się z zaawansowanych i drogich pojazdów, których testy wykonywane są w środowisku rzeczywistym, albo ograniczają się do małych pojazdów, prędkości ruchu kilkudziesięciu centymetrów na sekundę i bardzo krótkich dystansów komunikacji.

Aby możliwe było opracowanie algorytmu ruchu, w pierwszej kolejności wyprowadzony został model matematyczny ruchu pojazdu HUUV bazujący na modelu Fossena [31]. Pojazd HUUV ze względu na duże metacentrum, brak symetrii w płaszczyźnie poziomej i napęd złożony z dwóch pędników śrubowych wymagał zastosowania równań ruchu uwzględniających kąty ślizgu i ataku między wektorem prędkości pojazdu a układem współrzędnych związanym z pojazdem. Identyfikacja wartości mas towarzyszących została przeprowadzona analitycznie, a współczynników hydrodynamicznych poprzez symulacje CFD. W ten sposób określone zostały charakterystyki oporów, jakie działają na pojazd ustawiony pod różnymi kątami ataku i ślizgu do opływającej go wody. Ponieważ symulacje CFD nie były ukierunkowane na precyzyjne określenie współczynników

oporu, a tylko na oddanie kształtu charakterystyk oporów, konieczne było ich dostrojenie na podstawie danych eksperymentalnych. W tym celu przeprowadzony został szereg badań prędkości ruchu i cyrkulacji pojazdu, które posłużyły jako punkt odniesienia. Na bazie wiedzy eksperckiej zostały określone wartości proporcjonalnie zwiększające współczynniki oporów hydrodynamicznych, aby zbliżyć symulacyjne odwzorowanie ruchu pojazdu do rzeczywistego. Opracowany w ten sposób model ruchu pojazdu HUUV został zaimplementowany do modelu ruchu ławicy. Jedyne parametry wykorzystywane przez algorytm ruchu ławicy to dystans do lidera, namiar na lidera i własna wartość sygnału sterującego naporem wzdłużnym. Dlatego w pierwszej kolejności opracowany został model lokalizacji optycznej oraz algorytm detekcji obrazu zaimplementowany w systemach sterowania pojazdów. Wyniki działania algorytmu zostały przedstawione eksperymentalnie. Model ruchu pojazdu i lokalizacji optycznej wykorzystany został do opracowania algorytmu sterowania pojazdu śledzącego w oparciu o adaptacyjne regulatory ślizgowe i adaptacyjne regulatory PID. Następnie przeprowadzony został szereg badań symulacyjnych, na podstawie którego określona została maksymalna liczba pojazdów, która może poruszać się w formacji bez ryzyka zgubienia i kolizji z innymi pojazdami. Dodatkowo określone zostały ograniczenia w postaci zakresu przyspieszeń i prędkości ruchu lidera, które pozwalają na utrzymanie się formacji. Finalnym etapem prac była weryfikacja eksperymentalna opracowanego algorytmu na ławicy HUUV w basenie pływackim. Analizie poddana została dynamika ruchu pojazdu śledzącego w czterech kolejnych badaniach. Pierwsze pokazało zdolność do minimalizacji i stabilizacji uchybów dystansu i namiaru do nieporuszającego się lidera. Drugie badanie przedstawiło działanie algorytmu pojazdu śledzącego przy spokojnych manewrach lidera. W trzecim badaniu sprawdzona została reakcja pojazdu śledzącego na agresywne manewry lidera. Ostatnie czwarte badanie pokazało działanie ławicy złożonej z jednego lidera i dwóch pojazdów śledzących.

Wnioski szczegółowe przedstawione zostały na bieżąco w pracy. Poniżej natomiast wypisane zostały wnioski ogólne.

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski poznawcze:

- badanie wspólnego ruchu pojazdów pływających poruszających się w niewielkiej odległości od siebie wymaga wykorzystania nieliniowych modeli ruchu. W większości dostępnej literatury wykorzystywane są zlinearyzowane równania ruchu, aby uprościć modele symulacyjne i obniżyć wymaganą moc obliczeniową. Modele te pomijają większość nieliniowych efektów, które w przypadku ruchu pojazdów w bliskim sąsiedztwie są niezwykle istotne,
- opracowanie algorytmu ruchu bazującego na informacji ograniczonej tylko do dystansu, namiaru i własnego naporu wzdłużnego, wymusza dodatkowe założenia i ograniczenia aby osiągnąć stabilność ruchu pojazdów w ławicy. Pomimo nałożenia tych ograniczeń i tak nie jest możliwe utrzymanie dużej liczby pojazdów śledzących w formacji, ponieważ agresywne manewry kolejnych pojazdów są propagowane na następne, które dodatkowo je wzmacniają.

Wnioski utylitarne wynikające z przeprowadzonych badań prezentują się następująco:

- możliwy jest wspólny ruch pojazdów podwodnych metodą śledzenia lidera w oparciu tylko o dystans i namiar na lidera oraz informacje o własnej wartości sygnału sterującego naporem wzdłużnym. Wykorzystanie tylko tych trzech parametrów pozwala na maksymalną redukcję kosztów sensorów, które muszą znaleźć się na pokładzie pojazdów. Pomimo braku IMU, FOG, DVL i sonaru, proste i tanie pojazdy są w stanie utrzymać się za liderem i przemieszczać się z punktu A do B,
- opracowany algorytm ruchu w formacji umożliwia rozpoczęcie ruchu formacji ze stanu spoczynku i zahamowanie ruchu całej ławicy w punkcie docelowym lub na dowolnym etapie realizacji misji, dzięki czemu w danym miejscu możliwa jest realizacja dodatkowych zadań np. monitoringu czy pomiaru parametrów wody. Wyposażenie pojazdów w system zmiennej wyporności pozwala na minimalne zużycie energii elektrycznej w trakcie oczekiwania w spoczynku na zadanej głębokości,
- lokalizacja pojazdów krótkiego zasięgu (do kilku metrów) w oparciu o światło widzialne stanowi tanią i dobrą alternatywę dla zaawansowanych i kosztownych systemów lokalizacji typu SBL, USBL. Zaletą wykorzystania światła jest odporność na zakłócenia zewnętrzne ze względu na krótki dystans rozchodzenia się światła widzialnego w wodzie. Drugą istotną zaletą jest możliwość realizacji komunikacji optycznej full-duplex, co nie jest możliwe w przypadku komunikacji akustycznej.

Przeprowadzone badania stanowią pierwszy krok w badaniu wspólnego ruchu ławicy pojazdów podwodnych. Ograniczając się tylko do rozwoju opracowanego algorytmu ruchu można wskazać następujące kierunki rozwoju:

- aby poprawić działanie ławicy i umożliwić ruch w formacji większej liczbie pojazdów śledzących, koniecznym jest wyposażenie pojazdów w sensory do pomiaru własnej prędkości ruchu. Ta dodatkowa informacja umożliwiłaby kolejnym pojazdom hamowanie do pełnego zatrzymania, bez ruchu wstecznego, co nie jest obecnie możliwe. Ruch wsteczny pojazdu śledzącego sprawia, że kolejny pojazd śledzący w formacji, ma jeszcze mniej czasu na reakcję, a to ogranicza ilość pojazdów śledzących jaka może podążać w formacji.
- drugą rzeczą, która pozwoliłaby poprawić działanie ławicy w obszarze unikania kolizji ze śledzonym liderem jest umożliwienie pojazdowi zejścia na niezerowy namiar, gdy jego prędkość jest duża a dystans do lidera mały. Dzięki temu nawet przy bardziej agresywnych manewrach lidera, pojazd śledzący mógłby uniknąć kolizji. Takie podjęcie może być jednak trudne do realizacji z wykorzystaniem regulatorów ślizgowych i PID, gdzie koniecznym byłoby opracowanie dodatkowego modułu decydującego o chwilowym namiarze zadanym z jakim ma się poruszać pojazd śledzący w oparciu o dystans, namiar do śledzonego lidera i prędkość własną ruchu,
- kolejnym etapem badań, jaki nasuwa się w oparciu o wyniki niniejszej pracy, jest umożliwienie pojazdom śledzącym na określanie kursu śledzonego pojazdu. Obecnie maszty stanowią jedynie obszar w przestrzeni i nie dają możliwości wykrycia ich orientacji. Znajomość chwilowego kursu lidera pozwoliłaby pojazdom śledzącym

na lepsze przewidywanie zachowania lidera i planowanie własnego ruchu, czego w obecnej konfiguracji nie ma. Znajomość kursu innych pojazdów w ławicy daje możliwość ruchu w innych formacjach, gdzie konieczne jest stosowanie metod unikania kolizji z innymi pojazdami śledzącymi.

Postawiony na początku pracy cel został w pełni osiągnięty. Opracowano model symulacyjny ruchu pojedynczego pojazdu. W oparciu o niego opracowany został algorytm ruchu ławicy, system lokalizacji optycznej i systemy sterowania pojazdów umożliwiające im ruch w ławicy. Wyniki uzyskane w ramach symulacji zostały zweryfikowane w testach eksperymentalnych ławicy HUUV na basenie pływackim.

Literatura

- [1] Katzschnmann Robert, Delpreto Joseph, Maccurdy Robert, and Rus Daniela. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Science Robotics*, Vol. 3(16), 2018. doi: 10.1126/scirobotics.aar3449.
- [2] Yoshiki Sato, Toshihiro Maki, Takumi Matsuda, and Takashi Sakamaki. Detailed 3D seafloor imaging of Kagoshima Bay by AUV Tri-TON2. *IEEE Underwater Technology*, Chennai, India, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/UT.2015.7108314.
- [3] Elgar Desa, R Madhan, Pramod Maurya, Gajanan Navelkar, A.A.M.Q. Mascarenhas, Shivanand Prabhudesai, Sanjeev Afzulpurkar, and S N Bandodkar. The small Maya AUV - Initial field results. *International Ocean Systems*, Vol. 11(1), pp. 6-8, 2007.
- [4] B Allotta, R Costanzi, A Ridolfi, O Salvetti, M Reggiannini, M Kruusmaa, T Salumae, D M Lane, G Frost, N Tsiogkas, M Cocco, L Gualdesi, G Lacava, D Roig, H T Gundogdu, M I C Dede, S Baines, S Tusa, P Latti, and D Scaradozzi. The ARROWS Project: robotic technologies for underwater archaeology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 364(1), pp. 12088, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/364/1/012088.
- [5] Mingxue Cai, Yu Wang, Shuo Wang, Rui Wang, Yong Ren, and M Tan. Grasping Marine Products With Hybrid-Driven Underwater Vehicle-Manipulator System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 17(3), pp. 1-12, 2020. doi: 10.1109/TASE.2019.2957782.
- [6] Naomi Kato, Mahdi Choyekh, Ryan Dewantara, Hidetaka Senga, Hajime Chiba, Eiichi Kobayashi, Muneo Yoshie, Toshinari Tanaka, and Timothy Short. An autonomous underwater robot for tracking and monitoring of subsea plumes after oil spills and gas leaks from seafloor. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 50(2), pp. 386-396, 2017. doi: 10.1016/j.jlp.2017.03.006.
- [7] Marco Jacobi. Autonomous inspection of underwater structures. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 67, pp. 80-86, 2015. doi: 10.1016/j.robot.2014.10.006.
- [8] Giacomo Marani, Song K Choi, and Junku Yuh. Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. *Ocean Engineering*, Vol. 36(1), pp. 15-23, 2009. doi: 10.1016/j.oceaneng.2008.08.007. Autonomous Underwater Vehicles.

- [9] G. Dudek, M. Jenkin, E. Milios, and D. Wilkes. A taxonomy for swarm robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93)*, Yokohama, Japan, 1993, pp. 441-447. doi: 10.1109/iros.1993.583135.
- [10] Manuele Brambilla, Eliseo Ferrante, Mauro Birattari, and Marco Dorigo. Swarm robotics: A review from the swarm engineering perspective. *Swarm Intelligence*, Vol. 7(1), pp. 1-41, 2013. doi: 10.1007/s11721-012-0075-2.
- [11] Melanie Schranz, Martina Umlauf, Micha Sende, and Wilfried Elmenreich. Swarm Robotic Behaviors and Current Applications. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 7, 2020. doi: 10.3389/frobt.2020.00036.
- [12] Jaydev P Desai. A Graph Theoretic Approach for Modeling Mobile Robot Team Formations. *Journal of field robotics*, Vol. 19(11), 2002. doi: 10.1002/rob.10057.
- [13] Farbod Fahimi. Sliding-mode formation control for underactuated surface vessels. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23(3), pp. 617-622, 2007. doi: 10.1109/TRO.2007.898961.
- [14] Bo Xu, Zhaoyang Wang, and Hao Shen. Distributed predictive formation control for autonomous underwater vehicles under dynamic switching topology. *Ocean Engineering*, Vol. 262, pp. 112240, 2022. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112240.
- [15] Jian Yang, Xin Wang, and Peter Bauer. V-Shaped Formation Control for Robotic Swarms Constrained by Field of View. *Applied Sciences*, Vol. 8(11), 2018. doi: 10.3390/app8112120.
- [16] Zheng Fang, Dong Jiang, Jie Huang, Chunxi Cheng, Qixin Sha, Bo He, and Guangliang Li. Autonomous underwater vehicle formation control and obstacle avoidance using multi-agent generative adversarial imitation learning. *Ocean Engineering*, Vol. 262, pp. 112182, 2022. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112182.
- [17] Xue Feng Yan, Feng Gu, Chen Song, Xiao Lin Hu, and Yi Pan. Dynamic formation control for autonomous underwater vehicles. *Journal of Central South University*, Vol. 21(1), pp. 113-123, 2014. doi: 10.1007/s11771-014-1922-7.
- [18] Sarada Prasanna Sahoo, Bikramaditya Das, and Bibhuti Bhusan Pati. Path Planning of Bio-inspired Swarm of AUVs using Distributed Path Consensus algorithm. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, Vol. 14(5), pp. 173-179, 2021. doi: 10.25103/jestr.145.20.
- [19] Zheping Yan, Chao Zhang, Weida Tian, and Mingyao Zhang. Formation trajectory tracking control of discrete-time multi-AUV in a weak communication environment. *Ocean Engineering*, Vol. 245, pp. 110495, 2022. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110495.
- [20] Xin Li and Daqi Zhu. Formation control of a group of AUVs using adaptive high order sliding mode controller. *OCEANS - Shanghai*, Shanghai, China, 2016. doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485632.

- [21] Yi Liu, Junyao Gao, Xuanyang Shi, and Chunyu Jiang. Decentralization of Virtual Linkage in Formation Control of Multi-Agents via Consensus Strategies. *Applied Sciences*, Vol. 8(11), 2018. doi: 10.3390/app8112020.
- [22] Chun cheng Meng and Xiao yu Zhang. Distributed leaderless formation control for multiple autonomous underwater vehicles based on adaptive nonsingular terminal sliding mode. *Applied Ocean Research*, Vol. 115, pp. 102781, 2021. doi: 10.1016/j.apor.2021.102781. virtual-structure (leaderless), sliding mode control with adaptive law.
- [23] Giroung Lee and Dongkyoung Chwa. Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance. *Intelligent Service Robotics*, Vol. 11(1), pp. 127-138, 2018. doi: 10.1007/s11370-017-0240-y.
- [24] Praczyk Tomasz and Szymak Piotr. High-Level Control System for Biomimetic Autonomous Under-water Vehicle. *21st International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers*, Vol. 125 2017, pp. 2017. doi: 10.1051/mateconf/201712502017.
- [25] Marcin Morawski, Adam Slota, Jerzy Zajac, Marcin Malec, and Krzysztof Krupa. Hardware and low-level control of biomimetic underwater vehicle designed to perform ISR tasks. *Journal of Marine Engineering and Technology*, Vol. 16(4), 2017. doi: 10.1080/20464177.2017.1387089.
- [26] Xuejing Lan, Yiwen Liu, and Zhijia Zhao. Cooperative control for swarming systems based on reinforcement learning in unknown dynamic environment. *Neurocomputing*, Vol. 410, pp. 410-418, 2020. doi: 10.1016/j.neucom.2020.06.038.
- [27] Jaydev P Desai, Jim Ostrowski, and Vijay Kumar. Controlling formations of multiple mobile robots. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, Leuven, Belgium, 1998. doi: 10.1109/ROBOT.1998.680621.
- [28] Luca Consolini, Fabio Morbidi, Domenico Prattichizzo, and Mario Tosques. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints. *Automatica*, Vol. 44(5), pp. 1343-1349, 2008. doi: 10.1016/j.automatica.2007.09.019.
- [29] Xiaohan Chen and Yingmin Jia. Adaptive leader-follower formation control of non-holonomic mobile robots using active vision. *IET Control Theory and Applications*, Vol. 9(8), pp. 1302-1311, 2015. doi: 10.1049/iet-cta.2014.0019.
- [30] Zhou hua Peng, Dan Wang, Wei yao Lan, and Gang Sun. Robust leader-follower formation tracking control of multiple underactuated surface vessels. *China Ocean Engineering*, Vol. 26(3), pp. 521-534, 2012. doi: 10.1007/s13344-012-0039-8.
- [31] Thor Inge Fossen. *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley and Sons, Ltd, New York, USA, 1994.

- [32] Yu lei Liao, Ming jun Zhang, Lei Wan, and Ye Li. Trajectory tracking control for underactuated unmanned surface vehicles with dynamic uncertainties. *Journal of Central South University*, Vol. 23(2), pp. 370-378, 2016. doi: 10.1007/s11771-016-3082-4.
- [33] Jingxiang Feng, Yang Cao, Xueman Fan, Guang Yang, and Jingwei Dong. A Cooperative Motion Control Using Leader-follower Approach for Unmanned Underwater Vehicle. *IEEE Access*, Vol. 13, pp. 90844-90861, 2025. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3571978.
- [34] Zhenyu Gao and Ge Guo. Velocity free leader-follower formation control for autonomous underwater vehicles with line-of-sight range and angle constraints. *Information Sciences*, Vol. 486, pp. 359-378, 2019. doi: 10.1016/j.ins.2019.02.050.
- [35] Tomasz Praczyk. Using Hill Climb Assembler Encoding neural networks to control swarm of autonomous underwater vehicles. *Applied Soft Computing*, Vol. 160, pp. 1647, 2022. doi: 10.1016/j.asoc.2024.111647.
- [36] Tomasz Praczyk. Neural control system for a swarm of autonomous underwater vehicles. *Knowledge-Based Systems*, Vol. 276, pp. 110783, 2023. doi: 10.1016/j.knosys.2023.110783.
- [37] Jack Connor, Benjamin Champion, and Matthew A Joordens. Current Algorithms, Communication Methods and Designs for Underwater Swarm Robotics: A Review. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21(1), pp. 153-169, 2021. doi: 10.1109/JSEN.2020.3013265.
- [38] Florian Berlinger. Blueswarm: 3D Self-organization in a Fish-inspired Robot Swarm. Phd thesis. Harvard University, 2021.
- [39] Jörg Kalwa, Marina Carreiro-Silva, Fernando Tempera, Jorge Fontes, Ricardo Santos, Fabri Marie-claire, Lorenzo Brignone, Pere Ridao, Andreas Birk, Thomas Glotzbach, Massimo Caccia, Joao Alves, and Antonio Pascoal. The MORPH Concept and Its Application in Marine Research. *OCEANS MTS/IEEE Bergen: The Challenges of the Northern Dimension*, Bergen, Norway, 2013. doi: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607988.
- [40] Jörg Kalwa, Marina Carreiro-Silva, Jorge Fontes, Lorenzo Brignone, Pere Ridao, Andreas Birk, Thomas Glotzbach, Massimo Caccia, Joao Alves, and Antonio Pascoal. The MORPH project: Actual results. *Conference OCEANS Genova*, Genova, Italia, 2015, pp. 1-8. doi: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271714.
- [41] Jörg Kalwa, Daniel Tietjen, Marina Carreiro-Silva, Jorge Fontes, Lorenzo Brignone, Nuno Gracias, Pere Ridao, Max Pfingsthorn, Andreas Birk, Thomas Glotzbach, Sebastian Eckstein, Massimo Caccia, Joao Alves, Thomas Furfaro, Jorge Ribeiro, and Antonio Pascoal. The european project MORPH: Distributed UUV systems for multimodal, 3D underwater surveys. *Marine Technology Society Journal*, Vol. 50(4), pp. 26-41, 2016. doi: 10.4031/MTSJ.50.4.10.

- [42] Mark Read, Christoph Möslinger, Tobias Dipper, Daniela Kengyel, James Hilder, Ronald Thenius, Andy Tyrrell, Jon Timmis, and Thomas Schmickl. Profiling underwater swarm robotic shoaling performance using simulation. *Towards Autonomous Robotic Systems*, Vol. 8069 LNAI 2014, pp. 404-416. doi: 10.1007/978-3-662-43645-5.
- [43] Thomas Schmickl, Ronald Thenius, Christoph Moslinger, Jon Timmis, Andy Tyrrell, Mark Read, James Hilder, José Halloy, Alexandre Campo, Cesare Stefanini, Luigi Manfredi, Stefano Orofino, Serge Kernbach, Tobias Dipper, and Donny Sutantyo. CoCoRo - The self-aware underwater swarm. *Fifth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, Ann Arbor, MI, USA, 2011, pp. 120-126. doi: 10.1109/SASOW.2011.11.
- [44] Vincent, Boyer Frédéric Bazeille Stéphane, and Lebastard. Underwater Robots Equipped with Artificial Electric Sense for the Exploration of Unconventional Aquatic Niches. Rozdział 3 w książce: *Marine Robotics and Applications*. Springer. Cham, Switzerland, Vol. 10 2018, pp. 29-50. doi: 10.1007/978-3-319-70724-2.
- [45] Anja Babić, Ivan Lončar, Barbara Arbanas Ferreira, Goran Vasiljevic, Tamara Petrovic, Stjepan Bogdan, and Nikola Miskovic. A Novel Paradigm for Underwater Monitoring Using Mobile Sensor Networks. *Sensors*, Vol. 20(16), pp. 4615, 2020. doi: 10.3390/s20164615.
- [46] Ronald Thenius, Daniel Moser, Joshua Cherian Varughese, Serge Kernbach, Igor Kuksin, Olga Kernbach, Elena Kuksina, Nikola Miskovic, Stjepan Bogdan, Tamara Petrovic, Anja Babić, Frédéric Boyer, Vincent Lebastard, Stéphane Bazeille, Graziano Ferrari, Elisa Donati, Riccardo Pelliccia, Donato Romano, Godfried van Vuuren, and Thomas Schmickl. subCULTron - Cultural Development as a Tool in Underwater Robotics. *Artificial Life and Intelligent Agents*. Cham, Switzerland, 2018, pp. 27-41. doi: 10.1007/978-3-319-90418-4.
- [47] Ulrich Behrje, Cedric Isokeit, Benjamin Meyer, and Erik Maehle. A Robust Acoustic-Based Communication Principle for the Navigation of an Underwater Robot Swarm. *OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*, Kobe, Japan, 2018. doi: 10.1109/OCEANSKOBE.2018.8558871.
- [48] Benjamin Meyer, Cedric Isokeit, Erik Maehle, and Burkard Baschek. Using Small Swarm-Capable AUVs for Submesoscale Eddy Measurements in the Baltic Sea. *OCEANS - Anchorage*, Anchorage, AK, USA, 2017.
- [49] Benjamin Meyer, Kristian Ehlers, Cedric Isokeit, and Erik Maehle. The development of the modular Hard-and Software Architecture of the Autonomous Underwater Vehicle MONSUN. *ISR/Robotik 2014; 41st International Symposium on Robotics*, Munich, Germany, 2014.
- [50] Jules Jaffe, Peter Franks, Paul Roberts, Diba Mirza, Curt Schurgers, Ryan Kastner, and Adrien Boch. A swarm of autonomous miniature underwater robot

- drifters for exploring submesoscale ocean dynamics. *Nature Communications*, Vol. 8, pp. 14189, 2017. doi: 10.1038/ncomms14189.
- [51] Florian Berlinger, Melvin Gauci, and Radhika Nagpal. Implicit coordination for 3D underwater collective behaviors in a fish-inspired robot swarm. *Science Robotics*, Vol. 6(50), 2021. doi: 10.1126/scirobotics.abd8668.
- [52] Florian Berlinger, Paula Wulkop, and Radhika Nagpal. Self-Organized Evasive Fountain Maneuvers with a Bioinspired Underwater Robot Collective. *EEE International Conference on Robotics and Automation*, Xi'an, China, Vol. 2021-May 2021, pp. 9204-9211. doi: 10.1109/ICRA48506.2021.9561407.
- [53] Saverio Iacoponi, Godfried Jansen Van Vuuren, Gaspare Santaera, Nikita Mankovskii, Igor Zhilin, Federico Renda, Cesare Stefanini, and Giulia De Masi. H-SURF: Heterogeneous Swarm of Underwater Robotic Fish. *Oceans Conference Record (IEEE)*, Hampton Roads, VA, USA, Vol. 2022-October 2022. doi: 10.1109/OCEANS47191.2022.9977253.
- [54] S. Iacoponi, M. Hanbaly, A. Infanti, B. Andonovski, N. Mankovskii, I. Zhilin, F. Renda, C. Stefanini, and G. De Masi. Heterogeneous Underwater Swarm of Robotic Fish. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1292 2023, pp. 012008. doi: 10.1088/1757-899x/1292/1/012008.
- [55] Saverio Iacoponi, Nikita Mankovskii, Mohammed El Hanbaly, Andrea Infanti, Shamma Alhajer, Federico Renda, Cesare Stefanini, and Giulia De Masi. Wireless teleoperation of HSURF artificial fish in complex paths. *OCEANS*, Limerick, 2023. doi: 10.1109/OCEANSLimerick52467.2023.10244729.
- [56] Mohamed EL Hanbaly, Saverio Iacoponi, Andrea Infanti, Cesare Stefanini, Giulia DE Masi, Senior Member, and Federico Renda. Inverse Dynamics Modelling as a State Estimation Aid for Underwater Robots Navigation. *IEEE Acces*, Vol. 12, pp. 159214-159225, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3487495.
- [57] Mohammed Tarnini, Saverio Iacoponi, Andrea Infanti, Cesare Stefanini, Giulia De Masi, and Federico Renda. Boundary Control Behaviors of Multiple Low-cost AUVs Using Acoustic Communication. *IEEE Access*, Vol. 11, 2025. doi: 10.1109/ACCESS.2025.3564077.
- [58] Marco Lanzagorta. *Underwater Communications. Synthesis Lectures on Communications*. Springer Cham, Cham, Switzerland, 2012.
- [59] Zihan Qu and Mengqin Lai. A Review on Electromagnetic, Acoustic, and New Emerging Technologies for Submarine Communication. *IEEE Access*, Vol. 12, pp. 12110-12125, 2024. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3353623.
- [60] Qirong Tang, Jiang Li, Daopeng Jin, Thao Ngogia, Minghao Liu, and Yinghao Li. Three-dimension Visual Simulation for Formation Tracing Control of Multiple Underwater Vehicles. *IEEE International Conference on Unmanned Systems*, Beijing, China, 2021, pp. 878-883. doi: 10.1109/ICUS52573.2021.9641116.

- [61] Thor I. Fossen. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley and Sons, Ltd, New Jersey, USA, 2011.
- [62] The MatWorks Inc. MATLAB version: 24.1 (R2024a). dostep: 12.08.2025, <https://www.mathworks.com>.
- [63] Weihua Gao, Jing Yan, and Xiaoyuan Luo. Modeling and Analysis for the Target Detection via Multiple Autonomous Underwater Vehicles. *OES China Ocean Acoustics (COA)*, Harbin, China, 2021, pp. 309-314. doi: 10.1109/COA50123.2021.9520040.
- [64] Sarada Prasanna Sahoo, Bikramaditya Das, and Bibhuti Bhusan Pati. Path Planning of AUV Swarms Using a Bio-inspired Multi-Agent System. *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, Vol. 20(3), pp. 315-328, 2022. doi: 10.37936/ecti-eec.2022203.247509.
- [65] Bikramaditya Das, Bidyadhar Subudhi, and Bibhuti Bhusan Pati. Adaptive sliding mode formation control of multiple underwater robots. *Archives of Control Sciences*, Vol. 24(4), pp. 515-543, 2014. doi: 10.2478/acsc-2014-0028.
- [66] Sheikh Izzal Azid, Utkal Mehta, Adarsh Kuar, and Zahid Ali. Dynamic Modeling of Unmanned Underwater Vehicles with Online Disturbance Compensation Scheme. *Journal of Robotics*, Vol. 2024(1), 2024. doi: 10.1155/2024/1996159.
- [67] M Prats, J Perez, and J.J Fernandez. An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2012, pp. 2577-2582. <https://www.irs.uji.es/uwsim/>.
- [68] S Ben Saad, B Zerr, I Probst, and F Dambreville. Hybrid Coordination Strategy of a Group of Cooperating Autonomous Underwater Vehicles. *International Federation of Automatic Control*, Vol. 48(5), pp. 47-52, 2015. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.462. 3rd IFAC Workshop on Multivehicle Systems.
- [69] Erwin Coumans and Yunfei Bai. Bullet Physics SDK:real-time collision detection and multi-physics simulation for VR, games, visual effects, robotics, machine learning. 2021, dostep: 12.08.2025, <http://pybullet.org>.
- [70] MOOS-IVP. Mission Oriented Operating Suite-Interdisciplinary Vehicle Protocol. dostep: 12.08.2025, <https://oceanai.mit.edu/moos-ivp/pmwiki/pmwiki.php>.
- [71] Michael Benjamin. uSimMarine: Basic Vehicle Simulation. Department of Mechanical Engineering MIT, 2018, dostep: 12.08.2025, https://oceanai.mit.edu/ivpman/pdfs/app_usimmarine.pdf.
- [72] NetLogo. Multi-agent programmable modeling environment. dostep: 12.08.2025, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

- [73] Gazebo. Open-source 2D/3D robotics simulator. dostęp: 12.08.2025, <https://gazebo.org/home>.
- [74] Yifeng He, Kanzhong Yao, Barry Lennox, and Farshad Arvin. Exploration of Underwater Environments with a Swarm of Heterogeneous Surface Robots. *Advances in Swarm Intelligence*, Cham, Switzerland, Vol. 13969 LNCS 2023. doi: 10.1007/978-3-031-36625-3.
- [75] The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. Report of the American Towing Tank Conference, New York, 1950.
- [76] K. K. Fedyaevsky and G. V. Sobolev. *Control and Stability in Ship Design*. Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, Joint Publications Research Service, Leningrad, USSR, 1963.
- [77] Abkowitz M.A. Lectures on Ship Hydrodynamics - Steering and Maneuverability. Technical Report Hy-5. Hydro- and Aerodynamics Laboratory, Lyngby, Denmark, 1964.
- [78] Marcin Malec, Marcin Morawski, Tomasz Talarczyk, and Marcin Sroka. Biometryczny układ napędowy pojazdu pływającego. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Patent nr. Pat.246984, 2025.
- [79] Marcin Malec, Marcin Morawski, Tomasz Talarczyk, and Marcin Sroka. Dwutorowy układ komunikacji pojazdów podwodnych. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Zgłoszenie nr. P.438091, 2025.
- [80] Jon Erling and Gorset Refsnes. Nonlinear Model-Based Control of Slender Body AUVs. Phd thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2007.
- [81] Alexander Brian Phillips. Simulations of a Self Propelled Autonomous Underwater Vehicle. Phd thesis. University of Southampton, 2010.
- [82] João Lucas and Dozzi Dantas. Experimental Research on AUV Manoeuvrability. *21st International Congress of Mechanical Engineering*, Natal, RN, Brazil, 2011.
- [83] Seong-Keon Lee, Tae-Hwan Joung, Se-Jong Cheo, Taek-Soo Jang, and Jeong-Hee Lee. Evaluation of the added mass for a spheroid-type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 3(3), pp. 174-180, 2011. doi: 10.2478/ijnaoe-2013-0060.
- [84] Brendon J Anderson. Analysis of PMM Data for Underwater Vehicle. MSc thesis. University of Tasmania, 1999.
- [85] He Zhang, Yu ru Xu, and Hao peng Cai. Using CFD software to calculate hydrodynamic coefficients. *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 9(2), pp. 149-155, 2010. doi: 10.1007/s11804-010-9009-9.

- [86] Yu Cun Pan, Huai Xin Zhang, and Qi Dou Zhou. Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 24(6), pp. 840-847, 2012. doi: 10.1016/S1001-6058(11)60311-9.
- [87] Javad Amini Foroushani and Majid Sabzpooshani. Determination of hydrodynamic derivatives of an ocean vehicle using cfd analyses of synthetic standard dynamic tests. *Applied Ocean Research*, Vol. 108, pp. 102539, 2021. doi: 10.1016/j.apor.2021.102539.
- [88] John Nicholas Newman. *Marine Hydrodynamics*. TheMIT Press, 1977.
- [89] An Internet Book on Fluid Dynamics: Values of the Added Mass. dostę: 12.08.2025, <http://brennen.caltech.edu/fluidbook/basicfluidynamics/unsteadyflows/addedmass/valuesoftheadedmass.pdf>.
- [90] William Gracey. The additional-mass effect of plates as determined by experiments. Report No. 707. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1941.
- [91] Minesniper. dostę: 18.03.2025, <https://www.defensa.com/espana/n-4-millones-euros-para-cargas-contra-minas-para-armada>.
- [92] Timothy Prestero. Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle. MSc thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [93] Kihun Kim and Hang S. Choi. Analysis on the controlled nonlinear motion of a test bed AUV-SNUUV I. *Ocean Engineering*, Vol. 34(8-9), pp. 1138-1150, 2007. doi: 10.1016/j.oceaneng.2006.08.011.
- [94] Erik Hedmo, Henrik Ohlsson isy, and Linköpings universitet Björn Johansson. Reglering och navigering av en undervattensfarkost med hjälp av GPS-utrustade bojar Examensarbete utfört i Reglerteknik vid Tekniska högskolan i Linköping av. Wydział Elektrotechniki Wydział Elektrotechniki, Uniwersytet Technologiczny w Linköping, 2008.
- [95] K P Watson, J S Webster, and J W Crane. Prediction of Submersible Maneuvering Performance at High Incidence Angles. *Proceedings of OCEANS '93*, Victoria, BC, Canada, 1993. doi: 10.1109/OCEANS.1993.326108.
- [96] Abdollah Sakaki and Mohsen Sadeghian Kerdabadi. Experimental and numerical determination of the hydrodynamic coefficients of an autonomous underwater vehicle. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, Vol. 62(134), pp. 124-135, 2020. doi: 10.17402/427.
- [97] Thanh Long Le and Duc Thong Hong. Computational fluid dynamics study of the hydrodynamic characteristics of a torpedo-shaped underwater glider. *MDPI, Fluids*, Vol. 6(7), 2021. doi: 10.3390/fluids6070252.

- [98] Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, and Dominic A. Hudson. Propeller Characteristics. *Ship Resistance and Propulsion Practical Estimation of Ship Propulsive Power*. Cambridge University Press. 2017, pp. 277-312. doi: <https://doi.org/10.1017/9781316494196>.
- [99] Jessica Lam, Audrey Chen, Andrew Bennett, and Michael Triantafyllou. Propeller Characterization Testing of a Blue Robotics T200 Thruster. *OCEANS*, Limerick, 2023. doi: 10.1109/OCEANSLimerick52467.2023.10244513.
- [100] Tomasz Talarczyk. A Dynamic Submerging Motion Model of the Hybrid-Propelled Unmanned Underwater Vehicle: Simulation and Experimental Verification. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 33(2), pp. 207-218, 2023. doi: 10.34768/amcs-2023-0016.

Streszczenie

W pracy podjęty został temat skoordynowanego ruchu systemu wielorobotowego pojazdów pływających w oparciu o lokalizację optyczną. Opracowany został algorytm ruchu wykorzystujący informację ograniczoną jedynie do: dystansu do śledzonego pojazdu, namiaru na śledzony pojazd i sygnałów sterujących własnymi napędami. W pierwszej kolejności opracowany został model matematyczny ruchu pojazdu. Identyfikacja współczynników modelu została zrealizowana z wykorzystaniem symulacji CFD i obliczeń analitycznych. Na podstawie modelu matematycznego zbudowany został najpierw model symulacyjny ruchu jednego pojazdu a następnie grupy pojazdów. W oparciu o model symulacyjny opracowany został system lokalizacji optycznej wykorzystujący świecące maszty pojazdów oraz określone zostały jego możliwości i ograniczenia. To w dalszej części prac umożliwiło opracowanie algorytmu skoordynowanego ruchu pojazdów. W ramach symulacji ruchu grupy pojazdów opracowane i dostrojone zostały systemy sterowania pojazdów oraz określone zostały możliwości i ograniczenia ruchu lidera prowadzącego grupę, aby utrzymać wszystkie pojazdy śledzące w formacji. Następnie opracowany algorytm skoordynowanego ruchu grupy poddany został weryfikacji eksperymentalnej na basenie pływackim. Aby możliwe było śledzenie trajektorii ruchu pojazdów w trakcie eksperymentów zbudowany został system śledzenia ruchu Motion Capture. Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły skuteczność działania opracowanego algorytmu ruchu grupy.

Summary

This dissertation addresses the problem of coordinated motion control in a multi-robot system of autonomous underwater vehicles employing optical localization. A motion algorithm was developed that relies solely on three types of information: the distance to a tracked vehicle, the bearing to the tracked vehicle, and control inputs to the vehicle's own propulsion system. The research commenced with the formulation of a mathematical model of vehicle dynamics. Model parameters were identified through a combination of computational fluid dynamics (CFD) simulations and analytical methods. Based on this model, a simulation framework was first established for a single vehicle and subsequently extended to a multi-vehicle system. Within this framework, an optical localization method utilizing illuminated masts mounted on the vehicles was designed and analyzed, with its operational capabilities and limitations identified. This enabled the development of an algorithm for coordinated group motion. Control systems for individual vehicles were designed and tuned within the group simulations, and the operational constraints of the leader vehicle were characterized to ensure reliable formation maintenance by the follower vehicles. The proposed algorithm for coordinated multi-vehicle motion was experimentally validated in controlled swimming pool conditions. To enable accurate trajectory tracking during experiments, a Motion Capture system was constructed. The experimental studies confirmed the effectiveness and robustness of the developed algorithm in maintaining coordinated motion of the vehicle group.

Załącznik 1. Śledzenie ruchu pojazdów - Motion Capture

W trakcie realizacji pracy doktorskiej, pojawił się problem z analizą trajektorii ruchu pojazdów z eksperymentów na basenie pływackim. Metoda wykorzystana w podrozdziale 6.4 oparta na nagraniach z kamery GoPro i analizie w programie Tracker okazała się niewystarczająca, ze względu na nisko zawieszony sufit, a w efekcie mały obszar nagrywany przez kamerę. Na tak małym obszarze nie było możliwe sprawdzenie ruchu pojazdów w formacji, dlatego podjęta została decyzja o wykorzystaniu technologii śledzenia ruchu MoCap (skrót od angielskiego *Motion Capture*). Ponieważ komercyjne systemy MoCap bazują na świetle podczerwonym, które woda skutecznie tłumi, system MoCap zbudowany został z wykorzystaniem standardowych kamer IP DS-2CD1363G2-LIU (Tabela 7.1) i rejestratora DS-7604NXI-K1 firmy HIKVISION. Śledzenie ruchu z wykorzystaniem światła widzialnego w przyszłości pozwoli na analizę trajektorii ruchu pojazdów w pełnym zanurzeniu, gdzie kamery MoCap ustawione będą pod powierzchnią wody.

Tabela 7.1: Parametry kamery HIKVISION DS-2CD1363G2-LIU

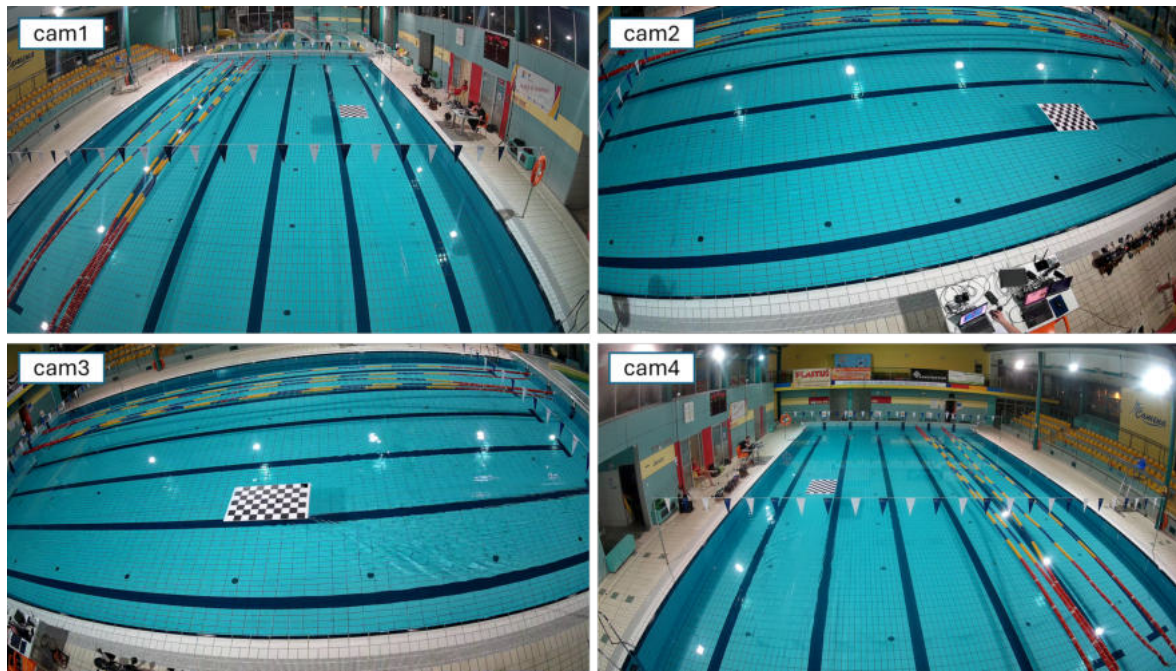
przetwornik	1/2,4" 6 MPx Progressive Scan CMOS
rozdzielczość	3200 x 1800(6 Mpx) @ 20 kl/s
kompresja	H.265+/ H.265/ H.264+/ H.264/ MJPEG
czułość	0,005 lux @ F1,6 (AGC ON), 0 lux (IR / LED ON)
obiektyw	2,8 mm @ F1,6

W pierwszej kolejności wykonana została kalibracja wewnętrzna kamer (mono). Wykorzystany został do tego wzornik w postaci szachownicy 6 x 5 kwadratowych pól o długości boku kwadratu 41 mm. Tabela 7.2 prezentuje wyniki kalibracji. Efektem kalibracji jest macierz parametrów wewnętrznych K i wektor zniekształceń D . Niski błąd reprojekcji poniżej 0,5 piksela świadczy o wystarczającej precyzji kalibracji mono kamer.

Tabela 7.2: Kalibracja wewnętrzna (mono) kamer MoCap.

kamera	liczba zdjęć	błąd reprojekcji [px]	macierz K	wektor D
cam1	29	0,28	$\begin{bmatrix} 1919,241 & 0 & 1580,904 \\ 0 & 1917,020 & 945,224 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,378 \\ 0,159 \\ -0,001 \\ 0,001 \\ -0,039 \end{bmatrix}$
cam2	31	0,36	$\begin{bmatrix} 1945,906 & 0 & 1568,043 \\ 0 & 1947,624 & 923,822 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,373 \\ 0,092 \\ 0,001 \\ 0,001 \\ 0,052 \end{bmatrix}$
cam3	29	0,37	$\begin{bmatrix} 1972,099 & 0 & 1682,981 \\ 0 & 1973,283 & 944,489 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,416 \\ 0,252 \\ -0,004 \\ -0,003 \\ -0,126 \end{bmatrix}$
cam4	28	0,29	$\begin{bmatrix} 1939,860 & 0 & 1579,780 \\ 0 & 1940,344 & 932,753 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,394 \\ 0,191 \\ -0,001 \\ -0,001 \\ -0,055 \end{bmatrix}$

System MoCap rozstawiany jest przed każdym badaniem ruchu i z wykorzystaniem wzornika w postaci szachownicy 10 x 7 pól o długości boku kwadratu 14 cm robiona jest seria zdjęć kalibracyjnych, do kalibracji zewnętrznej (stereo). Wzornik wykonany został poprzez wydruk wielkoformatowy szachownicy na samoprzylepnej matowej folii polimerowej a następnie przyklejenie go na płytę kompozytową typu dibond. Jedną serię zdjęć wzornika prezentuje Rysunek 7.1. Kamera cam2 wybrana została jako kamera referencyjna dla całego systemu MoCap. Do niej skalibrowane zostały kamery cam1 i cam3, natomiast ze względu na brak wspólnych par zdjęć cam2 i cam4, cam4 została skalibrowana do cam3. Tabela 7.3 prezentuje wyniki kalibracji stereo kamer. Błąd reprojekcji wyniósł 2 px przy rozdzielczości obrazu z kamer 3200 x 1800 px. Precyzyjne pomiary położenia pojazdów z dokładnością do 1 cm w trakcie ruchu nie są konieczne a celem jest zgrubne określenie ich trajektorii ruchu. Dlatego taka kalibracja została przyjęta jako wystarczająca. Aby ją poprawić, wymagana jest większa liczba par zdjęć dla każdej pary kamer. Wynik można też poprawić poprzez kalibrację stereo dla innych kamer referencyjnych i docelowych a uzyskane wyniki uśrednić.

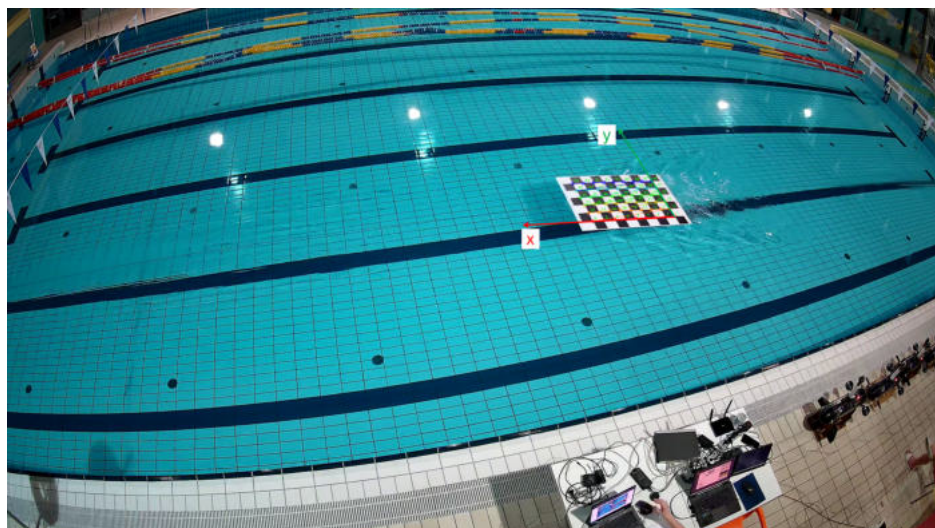


Rysunek 7.1. Seria zdjęć kalibracyjnych wzornika z kamer MoCap.

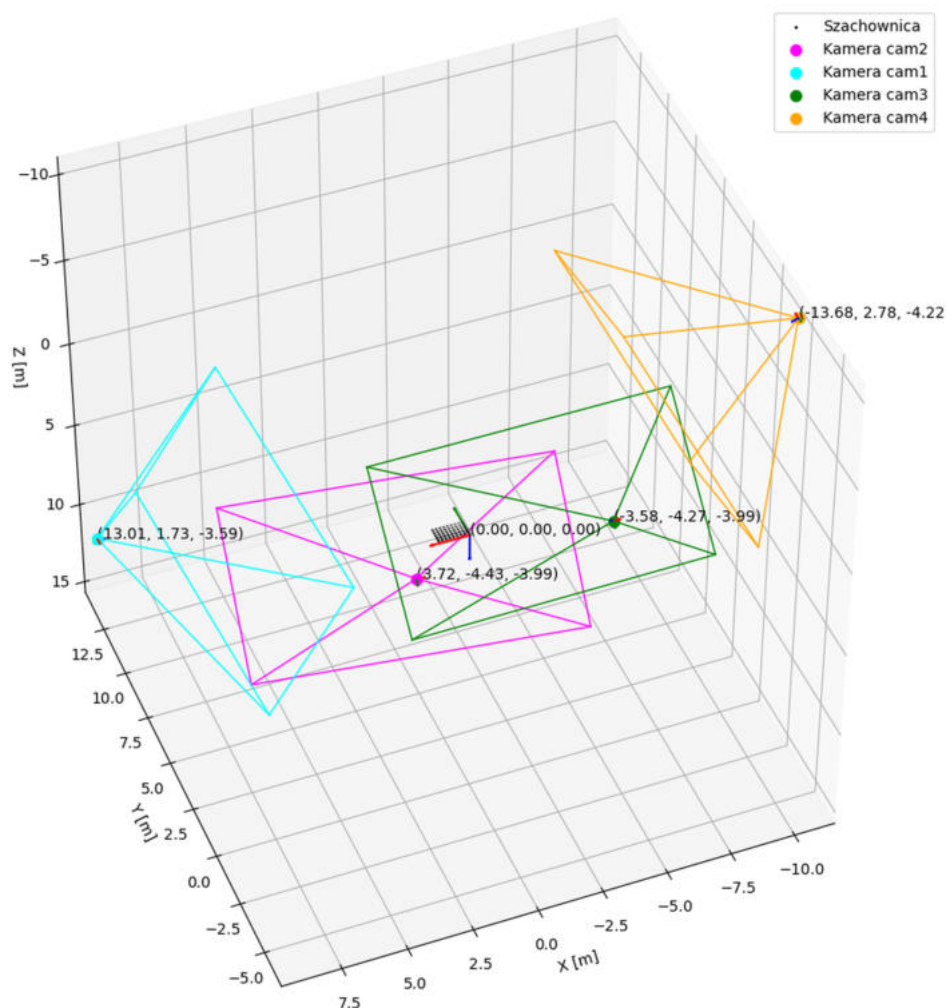
Tabela 7.3: Kalibracja zewnętrzna (stereo) kamer MoCap.

referencyjna → docelowa	liczba par zdjęć	błąd reprojekcji [px]	macierz R	wektor T
cam2→cam1	6	2,3	$\begin{bmatrix} 0,242 & -0,509 & 0,826 \\ 0,728 & 0,658 & 0,192 \\ -0,642 & 0,555 & 0,530 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -10,3 \\ -3,3 \\ 2,7 \end{bmatrix}$
cam2→cam3	7	2,2	$\begin{bmatrix} 0,950 & 0,056 & -0,307 \\ -0,078 & 0,995 & -0,061 \\ 0,302 & 0,082 & 0,949 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 7,1 \\ -0,8 \\ 1,4 \end{bmatrix}$
cam3→cam4	6	2,1	$\begin{bmatrix} 0,073 & 0,493 & -0,867 \\ -0,670 & 0,668 & 0,324 \\ 0,739 & 0,557 & 0,379 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10,5 \\ -5,1 \\ 3,8 \end{bmatrix}$

Mając kalibrację mono kamer i stereo par kamer, ustalony został środek układu współrzędnych (0,0,0), zgodnie z orientacją wzornika na zdjęciu z cam2, które widoczne jest na Rysunku 7.2. Wizualizację pozycji i orientacji kamer względem początku układu współrzędnych przyjętego na wzorniku prezentuje Rysunek 7.3. W nawiasach przy kamerach podane są współrzędne (x,y,z) pozycji kamer względem środka układu współrzędnych (0,0,0).



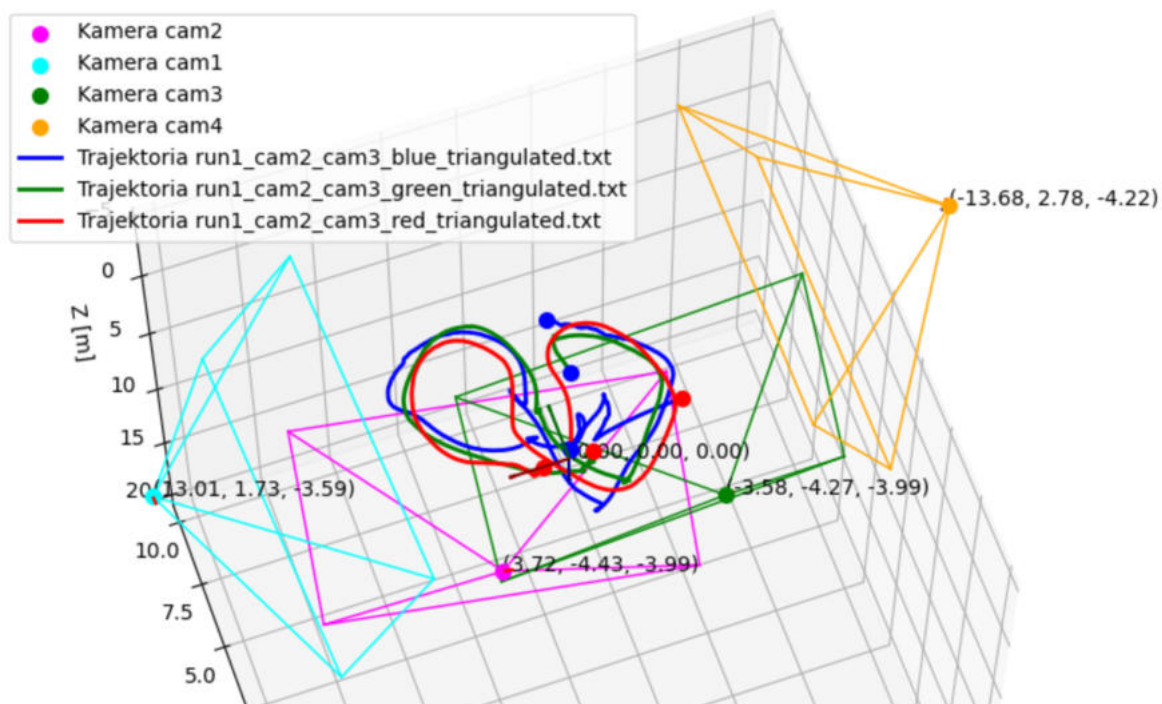
Rysunek 7.2. Przyjęcie początku układu współrzędnych.



Rysunek 7.3. Wizualizacja pozycji i orientacji kamer względem przyjętego układu współrzędnych wzornika.

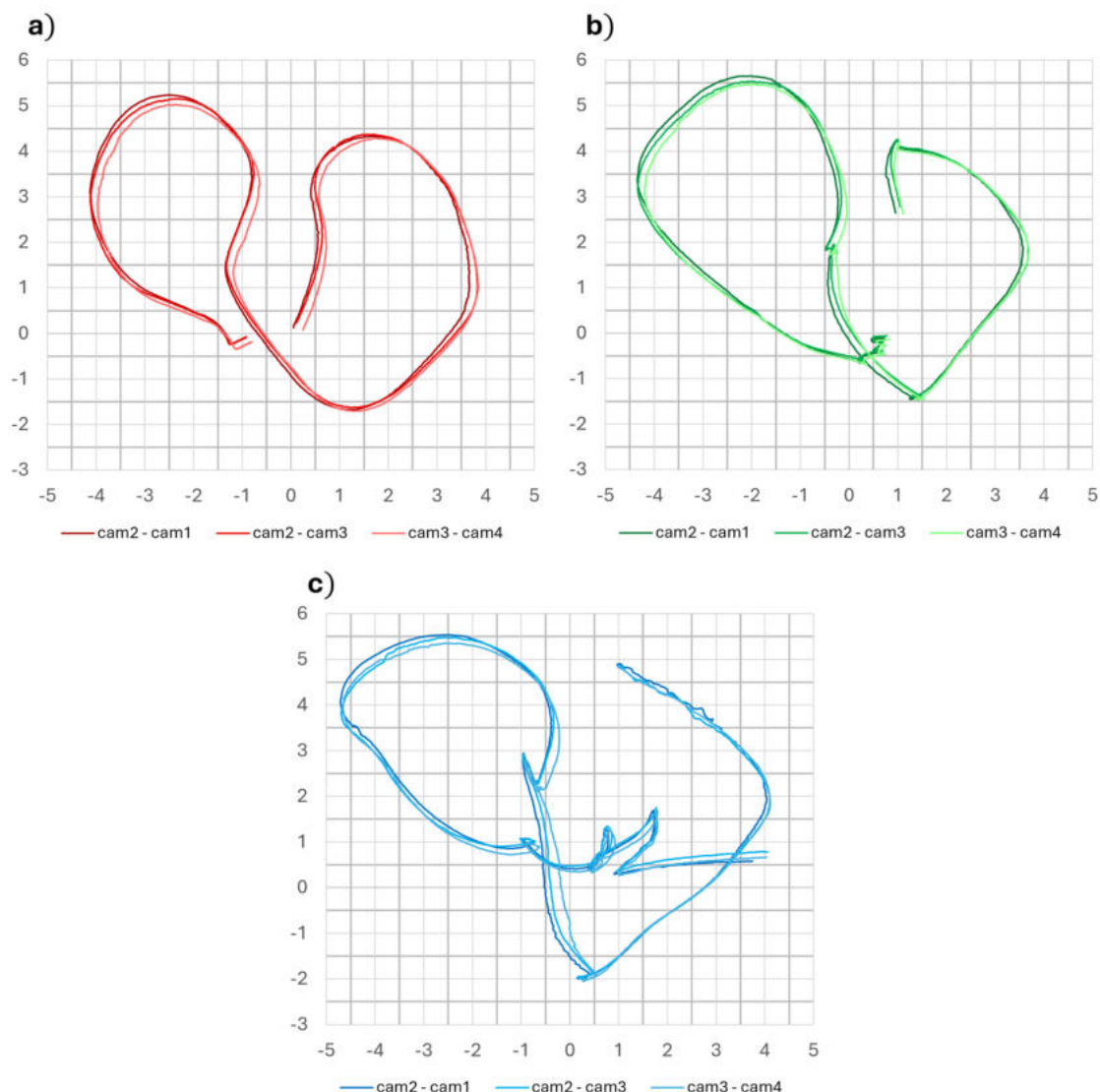
W ramach badań eksperymentalnych przeprowadzone zostały 4 eksperymenty. Ostatnim z nich był ruch w formacji lider, pierwszy pojazd śledzący, drugi pojazd

śledzący. Trajektorie pojazdów uzyskane z pary kamer cam2-cam3 wraz z wizualizacją obszarów widzenia wszystkich czterech kamer przedstawia Rysunek 7.4.



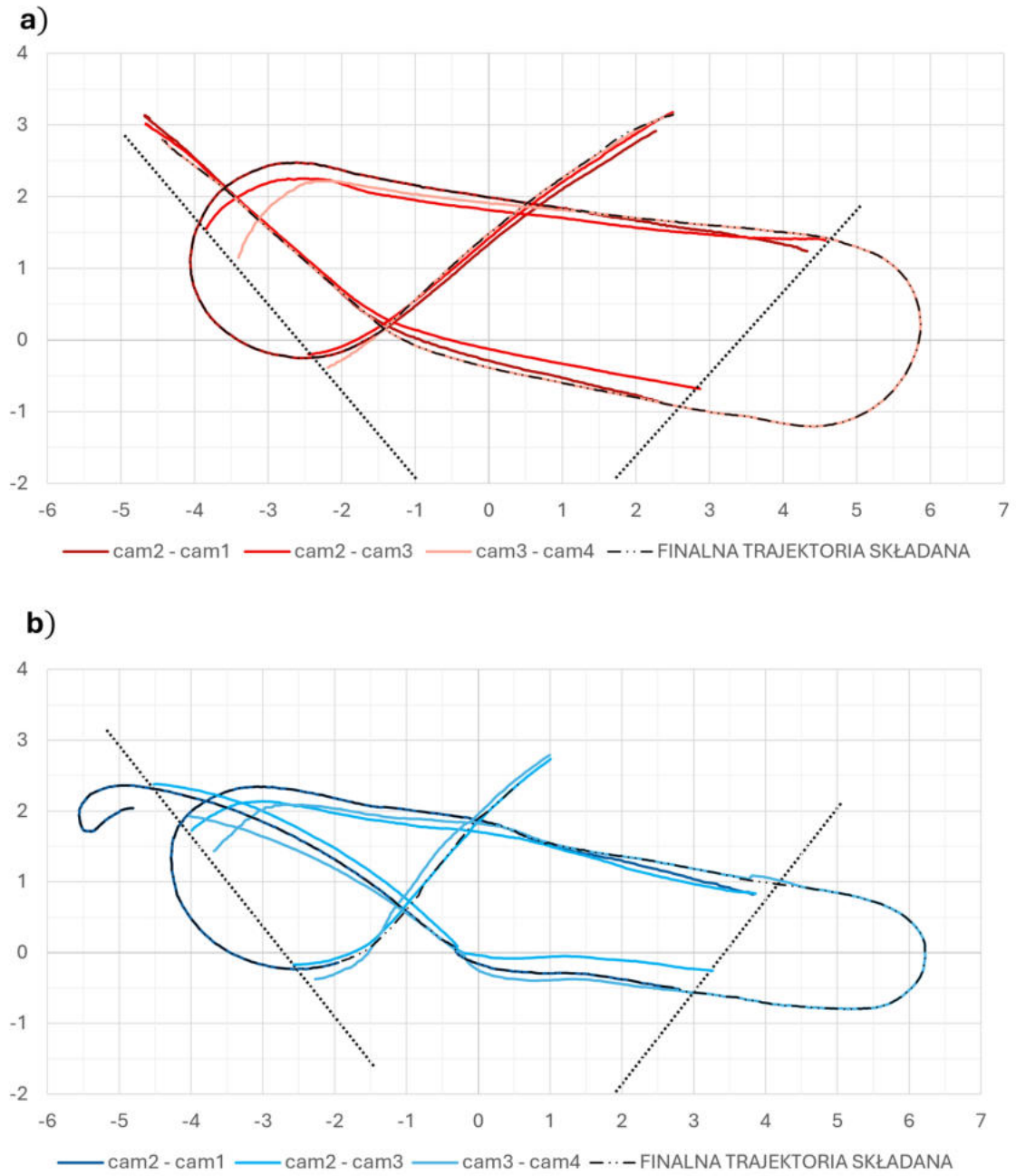
Rysunek 7.4. Trajektorie ruchu pojazdów: lider (czerwony), pierwszy pojazd śledzący (zielony) i drugi pojazd śledzący (niebieski) z badania nr. 4.

Ponieważ kamery cam1 i cam4 są znacznie oddalone od siebie, a cam4 jest kalibrowana do cam3 zamiast do cam2, to mogą występować różnice w dokładności pomiarowej par kamer. Aby zgrubnie oszacować, czy któraś z par nie została błędnie skalibrowana wyniki z wszystkich trzech par kamer zostały zestawione na wykresach trajektorii ruchu kolejno lidera, pierwszego i drugiego pojazdu śledzącego co przedstawia Rysunek 7.5.



Rysunek 7.5. Trajektorie ruchu lidera a), pierwszego pojazdu śledzącego b) i drugiego pojazdu śledzącego c) z wszystkich trzech par kamer.

W badaniu nr.4 pojazdy przez cały czas znajdowały się w obszarze pomiarowym wszystkich trzech par kamer. W pozostałych badaniach, dochodziło do sytuacji, w której tylko jedna para kamer była w stanie śledzić ruch pojazdów a pozostałe nie. taki przypadek prezentuje Rysunek 7.6. Ruch ze skrajnej lewej strony jest w stanie rejestrować tylko para cam2-cam1, natomiast ruch ze skrajnej prawej tylko para cam3-cam4. Czarne kropkowane linie na wykresach pokazują granice, po przekroczeniu których tylko jedna kamera śledzi trajektorie pojazdów. Jeżeli pojazdy znajdują się pomiędzy czarnymi kropkowanymi liniami to wszystkie trzy pary kamer rejestrują ich ruch. W takim przypadku końcowa trajektoria ruchu pojazdu przyjęta została jako trajektoria składana z odcinków co na Rysunku 7.6 pokazują czarne przebiegi.



Rysunek 7.6. Trajektorie ruchu lidera a) i pierwszego pojazdu śledzącego b).