



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Imię i nazwisko autora rozprawy: Piotr Kolendo
Dyscyplina naukowa: Automatyka i Robotyka

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Wyznaczanie zadanej trajektorii statku metodą ewolucyjną z zastosowaniem interpolacji wielomianowej

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Determining of ship set trajectory using evolutionary algorithm with application of polynomial interpolation

Promotor <i>podpis</i>	Drugi promotor <i>podpis</i>
Prof. dr hab. inż. Roman Śmierzchalski, prof. nadzw. PG	
Promotor pomocniczy <i>podpis</i>	Kopromotor <i>podpis</i>

Gdańsk, rok 2016

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i terminów	3
1 Wstęp	4
1.1 Wprowadzenie.....	5
1.2 Teza i cele pracy.....	9
2 Problem wyznaczania trajektorii zadanej statku	11
2.1 Metody modelowania trajektorii zadanej statku.....	11
2.1.1 Modelowanie trajektorii zadanej statku przy zastosowaniu odcinków prostych z aproksymacją własności dynamicznych.	12
2.1.2 Modelowanie trajektorii zadanej statku przy zastosowaniu interpolacji wielomianowej.	14
2.2 Metody wyznaczania zadanej trajektorii statku.....	18
2.2.1 Metody analityczne	18
2.2.2 Metody wykorzystujące techniki sztucznej inteligencji.....	20
3 Rozwiązanie zadania wyznaczania zadanej trajektorii statku z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej.....	25
3.1 Definicja problemu optymalizacji	25
3.2 Wyznaczanie trajektorii zadanej metodą ewolucyjną	26
3.2.1 Jednopolacyjny algorytm ewolucyjny wyznaczania zadanej trajektorii statku	26
3.2.1.1 Preselekcja (reprodukcja)	27
3.2.1.2 Operatory genetyczne	28
3.2.1.3 Ocena osobników	30
3.2.1.4 Postselekcja (Sukcesja)	30
3.2.1.5 Warunek końcowy zakończenia procesu ewolucji.....	30
3.2.2 Wielopolacyjny algorytm wyznaczania trajektorii zadanej statku	31
3.2.3 Sterowanie naciskiem selektywnym.....	32
3.3 Modelowanie trajektorii zadanej z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z dynamiki statku	34
3.3.1 Sposób weryfikacji trajektorii o własności dynamiczne statku	35
3.4 Weryfikacja poprawności wyznaczonych trajektorii przy zastosowaniu modelu statku odniesienia.....	39
3.4.1 Regulator kursu statku i metoda Line Of Sight (LOS).....	40
4 Badania procesu wyznaczania zadanej trajektorii statku z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej	42
4.1 Badania porównawcze metod ewolucyjnych wykorzystujących odcinki proste oraz interpolację wielomianową do wyznaczania zadanej trajektorii statku	43
4.1.1 Wyniki badań porównawczych algorytmów modelowania trajektorii przy zastosowaniu interpolacji wielomianowej oraz odcinków prostych	74
4.2 Badania rzeczywistego ruchu statku po trajektorii zadanej wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej.....	76
5 Wnioski	88
6 Bibliografia.....	92

Wykaz ważniejszych oznaczeń i terminów

AIS	<i>Automatyczny system identyfikacji (ang. Automatic Identification System)</i>
ARPA	<i>System do tworzenia automatycznych nakresów radarowych (ang. Automatic Radar Plots Aid)</i>
CPA	<i>Punkt największego zbliżenia (ang. Closest Point of Approach)</i>
DCPA	<i>Odległość największego zbliżenia (ang. Distance to Closest Point of Approach)</i>
DEA	<i>Wielopopulacyjny wyspowy algorytm ewolucyjny (ang. Distributed Evolutionary Algorithm)</i>
DGPS	<i>Różnicowy system pozycjonowania GPS (ang. Differential Global Positioning System)</i>
DSS	<i>Deterministyczna metoda selekcji osobników (ang. Deterministic sampling selector)</i>
ECDIS	<i>System map elektronicznych (ang. Electronic Chart Display and Information System)</i>
GPS	<i>System pozycjonowania GPS (ang. Global Positioning System)</i>
GNC	<i>Guidance Navigation Control</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
JAEWTI	<i>Jednopolulacyjny Algorytm Ewolucyjny Wyznaczania zadanej Trajektorii statku z modelowaniem trajektorii przy użyciu Interpolacji wielomianowej</i>
JAEWTO	<i>Jednopolulacyjny Algorytm Ewolucyjny Wyznaczania zadanej Trajektorii statku z modelowaniem trajektorii przy użyciu Odcinków prostych</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
MPDM	<i>Międzynarodowe Prawo Drogi na Morzu (ang. International Regulations for Preventing Collisions at Sea - COLREGs)</i>
MSS	<i>Symulator systemów morskich (ang. Marine Systems Simulator)</i>
PPK	<i>Punkt Potencjalnej Kolidzji</i>
SOLAS	<i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>
SRS	<i>Stochastyczna metoda selekcji osobników (ang. Stochastic Reminder Sampling)</i>
TCPA	<i>Czas do osiągnięcia odległości największego zbliżenia (ang. Time to Closest Point of Approach)</i>
WAEWTI	<i>Wielopopulacyjny Algorytm Ewolucyjny Wyznaczania zadanej Trajektorii statku z modelowaniem trajektorii przy użyciu Interpolacji wielomianowej</i>
WEANM	<i>Wielokryterialny Ewolucyjny Algorytm Nawigacji Meteorologicznej</i>
VTS	<i>System kierowania ruchem statków (ang. Vessel Traffic System)</i>

Statek własny *Statek, który podejmuje akcję unikania kolidzji*

Obiekty obce *Obiekty, względem, których podejmowane są manewry antykolidzyjne (przeszkody statyczne takie jak lądy, kanały, mielizny, cieśniny, tory wodne oraz przeszkody dynamiczne takie jak obce statki, zmienne warunki hydrometeorologiczne) (Śmierzchalski, 1998b)*

1 Wstęp

Wyznaczanie trajektorii zadanej rejsu statku jest jednym z głównych zadań nawigatorów. Plan transportowy określający trajektorię rejsu z punktu startowego, poprzez punkty pośredniczące, do punktu docelowego jest obligatoryjny dla większości jednostek pływających jeszcze przed rozpoczęciem rejsu. Wyznaczona trajektoria powinna uwzględniać warunki pogodowe, zapewnić bezpieczne mijanie przeszkód nawigacyjnych oraz spełniać określone kryteria optymalizacyjne. Powinna ona zostać wyznaczona na okres trwania całego rejsu, jak również być na bieżąco aktualizowana, w odniesieniu do zmieniającej się sytuacji nawigacyjnej.

Systemy nawigacyjne eksploatowanych statków są w określonym stopniu zależne od czynników ludzkich. Szacuje się, że 75-96% wypadków na morzu spowodowanych jest przez błąd człowieka (Antao i Guedes Soares, 2008). Większości z tych wypadków można by uniknąć, gdyby nawigatorzy postępowali w sposób właściwy (Śmierzchalski, 2013a). Czynnikiem zwiększającym ryzyko wystąpienia kolizji są między innymi: braki w szkoleniu załóg spowodowane obniżaniem kosztów, niewielka praktyka morska nawigatorów, trudne warunki pogodowe oraz poruszanie się w akwenach morskich o dużym natężeniu ruchu. Kolizja na morzu oprócz strat w ludziach oraz strat materialnych, negatywnie wpływa na środowisko naturalne.

Przepisy międzynarodowe dotyczące bezpieczeństwa żeglugi MPDM (Międzynarodowe Prawo Drogi Morskiej) precyzują sposób podejmowania manewrów antykolizyjnych w sytuacji spotkania dwóch statków w warunkach dobrej widoczności. W przypadku większej ich liczby przepisy nie definiują, kolejowania i sposobu wykonywania manewrów. Istnieje zatem potrzeba opracowania systemów wspomaganie decyzji nawigatora mających na celu poprawę bezpieczeństwa żeglugi, co zostało przedstawione między innymi w pracach (Hadnett, 2008) (Pietrzykowski, 2011). Systemy te spełniają coraz to ważniejszą rolę w nowoczesnych systemach prowadzenia statku (Fossen, 2002) nie tylko ze względu na poprawę bezpieczeństwa, ale również ekonomikę żeglugi.

Systemy wspomaganie decyzji nawigatora są systemami, które na podstawie określonego zadania transportowego i warunków środowiskowych, wyznaczają trajektorię zadaną statku własnego. Według obowiązujących przepisów (IMO, 1974) trajektoria wyznaczona przez te systemy, nie może zostać wprowadzona bezpośrednio do systemów sterowania ruchem statku, a musi zostać zatwierdzona przez nawigatora. Tendencje światowe (Golding, 2004) (Fossen, 2011) (Śmierzchalski, 2013a) pokazują, iż systemy wspomaganie decyzji nawigatora, przy wyznaczaniu trajektorii zadanej statku powinny w jak najbardziej dokładny sposób odzwierciedlić jego rzeczywisty ruch, dodatkowo zachowując ciągłość wartości prędkości oraz przyspieszeń wzdłuż całej wyznaczonej trajektorii. Pozwala to na precyzyjne prowadzenie statku, bez przeregulowań oraz zachowanie minimalnej odchyłki od trajektorii zadanej. Ma to istotne znaczenie w przypadku manewrowania w wąskich przejściach (np. portach, cieśninach, obszarach rozgraniczenia ruchu). Aby możliwe było podjęcie stosownego manewru antykolizyjnego, systemy te są zobligowane do wyznaczenia trajektorii zadanej w czasie zbliżonym do rzeczywistego.

Na podstawie literatury można stwierdzić, iż brak jest kompleksowych metod, które pozwoliłyby na rozwiązanie problemu wyznaczenia trajektorii zadanej w taki sposób, aby odzwierciedlić rzeczywisty ruch statku, zachowując ciągłość wartości prędkości oraz przyspieszeń wzdłuż trajektorii, dodatkowo wyznaczając rozwiązanie w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Dlatego też celem jest opracowanie nowej metody do rozwiązania tak postawionego problemu.

W pracy opracowano nową metodę służącą do wyznaczania trajektorii zadanej statku przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej uwzględniającej ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku. Zastosowanie algorytmu ewolucyjnego pozwala na wyznaczenie bezpiecznej trajektorii zadanej, w dynamicznie zmieniającym się środowisku, w czasie zbliżonym do rzeczywistego (Śmierzchalski, 2000). Zastosowanie interpolacji wielomianowej pozwala

natomiast na zamodelowanie trajektorii spełniającej warunek ciągłości prędkości oraz przyspieszeń wzdłuż trajektorii zachowując ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku.

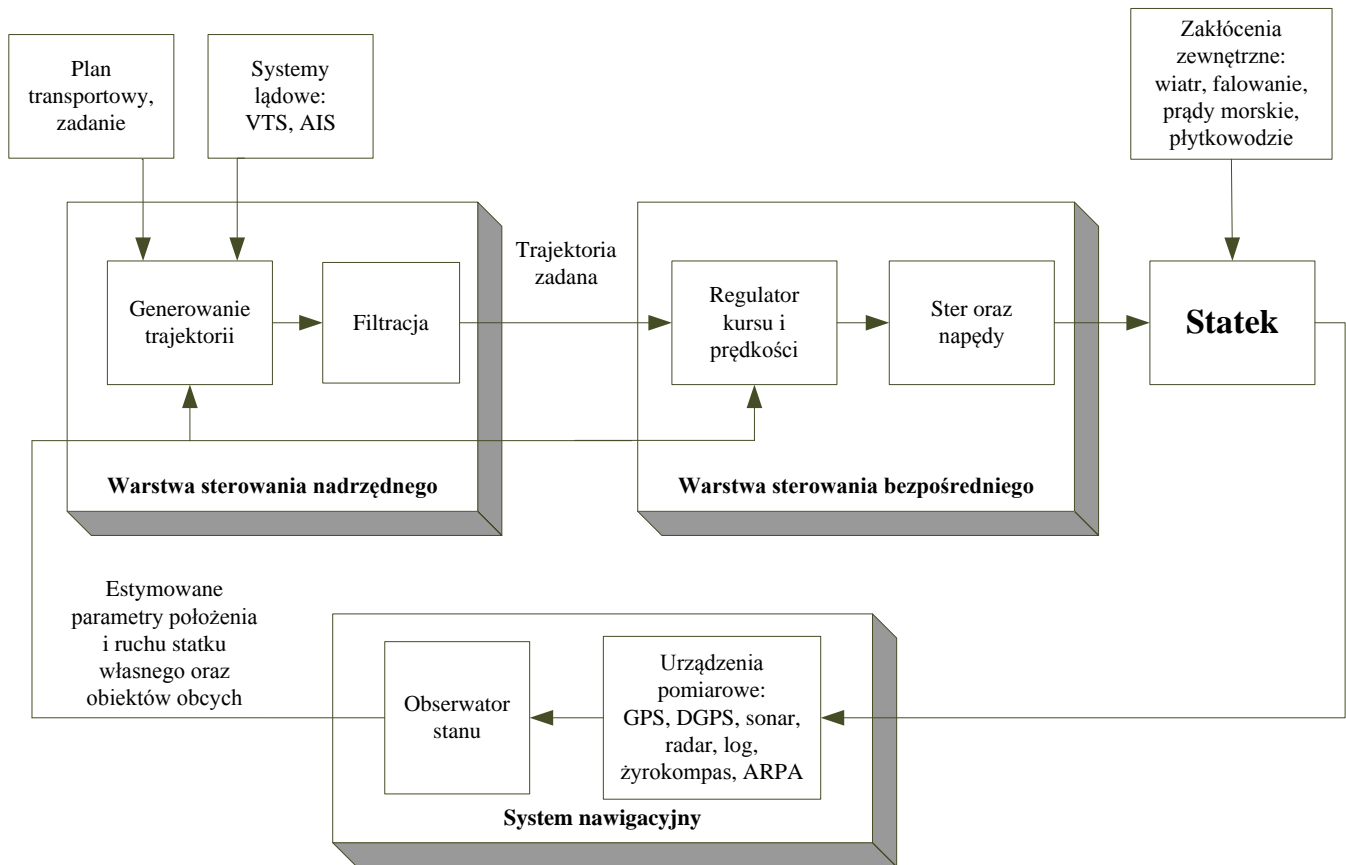
W ramach pracy opracowano i przebadano metodę wykorzystującą algorytmy ewolucyjne oraz interpolację wielomianową do rozwiązania problemu wyznaczania zadanej trajektorii statku. Wykonano badania porównawcze zaproponowanej metody w odniesieniu do stosowanego powszechnie w literaturze podejścia opartego na algorytmach ewolucyjnych oraz modelowaniu trajektorii za pomocą odcinków prostych. Następnie wykonano badania weryfikujące wyznaczone trajektorie w odniesieniu do własności manewrowych statku.

Praca składa się z pięciu rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiona została ogólna charakterystyka problemu wraz ze sformułowanymi celami oraz tezą pracy. W rozdziale drugim w sposób szczegółowy przedstawiony został problem wyznaczania zadanej trajektorii statku. Rozdział ten składa się z syntezy metod modelowania oraz metod optymalizacji służących do rozwiązania problemu. Rozdział trzeci prezentuje proponowaną przez autora nową metodę wyznaczania zadanej trajektorii statku. Rozdział czwarty przedstawia badania symulacyjne metody wraz z badaniami porównawczymi, w odniesieniu do podejścia wykorzystującego modelowanie trajektorii przy zastosowaniu odcinków prostych. Dodatkowo, w rozdziale tym przedstawione zostały wyniki badań weryfikacji wyznaczonych trajektorii o ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku na podstawie wybranego modelu odniesienia. Rozdział piąty podsumowuje pracę.

1.1 Wprowadzenie

Problem kierowania ruchem statku składa się z dwóch głównych zagadnień. Pierwszym z nich jest wyznaczenie trajektorii zadanej, względem której będzie się poruszał statek, natomiast drugim, sterowanie ruchem wzdłuż tej trajektorii (Śmierzchalski, 2013a). System kierowania ruchem statku (Rysunek 1) składa się z:

- a) warstwy sterowania nadrzędnego, w której na podstawie planu transportowego i informacji o środowisku morskim generowana jest trajektoria zadana,
- b) warstwy sterowania bezpośredniego, która za pośrednictwem regulatorów kursu i prędkości, oddziałuje na urządzenia wykonawcze statku w celu sterowania jego ruchem wzdłuż wyznaczonej trajektorii,
- c) systemu nawigacyjnego, który na podstawie sygnałów z urządzeń pomiarowych oraz systemów zewnętrznych estymuje parametry ruchu statku własnego oraz statków obcych.



Rysunek 1. Struktura systemu kierowania ruchem statku

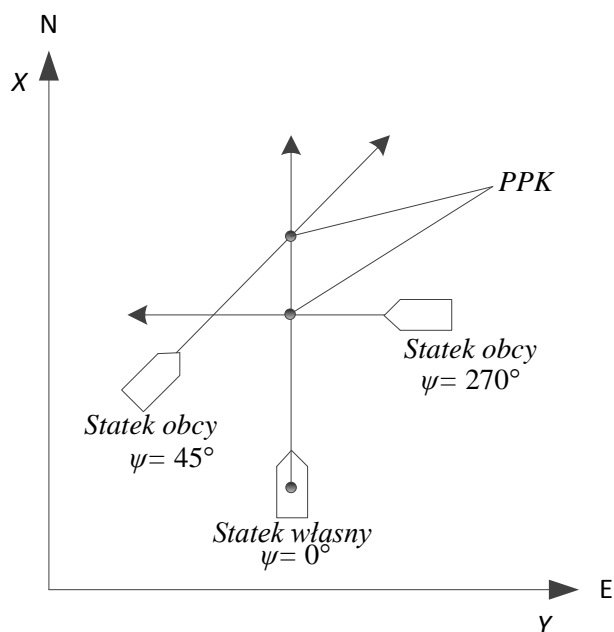
Zadaniem warstwy sterowania nadrzędnego jest wyznaczenie trajektorii zadanej statku na podstawie określonego zadania transportowego oraz informacji o środowisku. Informacje wejściowe dotyczące środowiska, w jakim porusza się statek, dostarczane są do układu z urządzeń systemu nawigacyjnego statku oraz z systemów zewnętrznych takich jak VTS (Vessel Traffic System) czy AIS (Automatic Identification System).

Warstwa sterowania bezpośredniego jest odpowiedzialna za prowadzenie statku w odniesieniu do wyznaczonej trajektorii zadanej (zatwierdzonej przez nawigatora), kompensując zakłócenia oddziałujące na statek w czasie rzeczywistym, takie jak: falowanie, wiatry, prądy morskie czy też zmiany wysokości wody nad dnem. Trajektoria zadana jest funkcją wejściową dla regulatora kursu i prędkości, który steruje ruchem statku korzystając z jego urządzeń wykonawczych. Sterowanie statkiem wzdłuż wyznaczonej trajektorii może być realizowane na dwa sposoby (Śmierzchalski, 2013a).

- pierwszym sposobem jest podążanie za geometrycznie wyznaczoną trajektorią w sposób niezależny od czasu (ang. Path following). W zależności od użytej metody i wymagań odnośnie sterowania, statek może poruszać się dokładnie po wyznaczonej trajektorii, odwzorowując każdy jej punkt lub też poruszać się zgodnie z kursem, jaki definiowany jest na danym odcinku trajektorii zadanej, bez dokładnego jej odwzorowania,
- drugim sposobem jest podążanie za wyznaczoną trajektorią w sposób ściśle zależny od czasu. Sposób ten nazywany jest śledzeniem trajektorii (ang. Trajectory tracking). W przypadku tej metody sterowanie może odbywać się również w sposób dokładnie odzwierciedlający położenie statku wzdłuż trajektorii, alternatywnie poruszać się zgodnie z kierunkiem trajektorii bez dokładnego odwzorowywania jej punktów.

System nawigacyjny odpowiedzialny jest za dostarczenie informacji o parametrach ruchu statku własnego oraz statków obcych na podstawie sygnałów z urządzeń pomiarowych oraz innych urządzeń zewnętrznych. Urządzenia takie jak GPS, DGPS, żyrokompas czy sonar wyznaczają parametry położenia statku w trójwymiarowej przestrzeni kartezjańskiej. Do pomiaru prędkości statku wykorzystywany jest

log oraz pomiar z GPS, natomiast dzięki układowi radarowemu pozyskiwane są informacje o położeniu i parametrach ruchu obiektów obcych. Dane te są dodatkowo uzupełniane poprzez lądowe systemy pomocnicze takie jak AIS (Wawruch, 2002). System AIS zbiera informacje ze statków wyposażonych w ten system dotyczące rodzaju jednostki, planu transportowego czy stanów awaryjnych, a następnie rozsyła ją do pozostałych obiektów w rejonie żeglugi. System ten jest wymagany dla wszystkich statków o wyporności przekraczającej 300 ton brutto (zgodnie z konwencją SOLAS (ang. International Convention for the Safety of Life at Sea) (IMO, 1974)). Dodatkowymi elementami poprawiającymi bezpieczeństwo żeglugi są systemy VTS. Systemy VTS używane są przy wejściach do większości portów i pozwalają na sterowanie ruchem większej ilości jednostek w obszarach rozgraniczenia ruchu, poprzez odpowiednie ich kolejkowanie, nadawanie prędkości i kursów podczas wplywania i wyplywania z portów. Informacje z wymienionych urzędzeń przekazywane są do systemów takich jak ECDIS (Weinrit, 2009) i ARPA (Lenart, 1986) (Gawrychowski i inni, 1989) (Śmierzchalski, 1998b). System ECDIS na podstawie map elektronicznych oraz sygnałów z urzędzeń pomiarowych obrazuje sytuację nawigacyjną rejonu poruszania się statku. Mapy elektroniczne zawierają informacje o ukształtowaniu obszaru żeglugi uzupełnione o sygnały z urzędzeń pomiarowych. System ARPA jest urządzeniem do tworzenia automatycznych nakresów radarowych. Na podstawie sygnałów pozyskiwanych z ech radarowych, układ prowadzi automatyczne śledzenie obiektów, które są w zasięgu radaru. Analizuje parametry ruchu statków obcych i w razie zaistnienia sytuacji zagrożenia kolizyjnego, sygnalizuje to w postaci alarmu, dodatkowo umożliwia symulację manewru antykolizyjnego (Śmierzchalski, 2013a). Sytuacja zagrożenia kolizyjnego pojawia się wtedy, kiedy na ekranie radaru widoczny jest, chociaż jeden obiekt. W przypadku obiektów dynamicznych system ARPA sprawdza czy statki obce znajdują się na kursie kolizyjnym ze statkiem własnym (Rysunek 2). Punkt przecięcia się kursu statku własnego i statku obcego nazywany jest Potencjalnym Punktem Kolizji (PPK) (Śmierzchalski, 1998b).

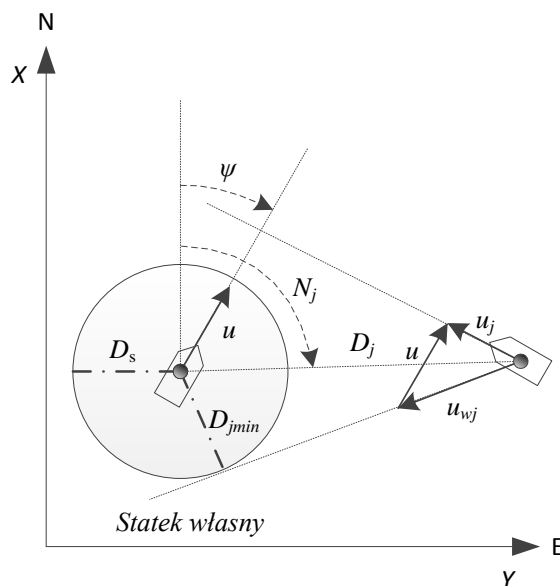


Rysunek 2. Wyznaczenie Potencjalnego Punktu Kolizji (PPK)

Układ ARPA poprzez śledzenie ech radarowych i analizę ich parametrów ruchu obrazuje sytuację nawigacyjną na morzu z przedstawieniem parametrów ruchu statków własnego oraz statków obcych. Na podstawie informacji radarowej przedstawia on takie parametry obiektów obcych jak położenie (x,y) , prędkość (u) , kurs (ψ) , namiar na obiekt (N) , odległość największego zbliżenia (ang. Distance to Closest Point of Approach (DCPA)), czas do osiągnięcia odległości największego zbliżenia (ang. Time to Closest Point of Approach (TCPA)) (Śmierzchalski, 2013a). Sposób określania parametrów w systemie ARPA został przedstawiony na Rysunku 3, natomiast sposób wyliczania ryzyka kolizji dla j -tego obiektu (r_j) (1.1) (Lisowski, 1986), gdzie D_s jest wartością bezpiecznej odległości mijania, D_{jmin} jest odległością

największego zbliżenia, T_{jmin} jest czasem do osiągnięcia odległości największego zbliżenia, D_j jest odległością pomiędzy statkiem własnym a statkiem obcym j , u_{wj} prędkością względną statku własnego.

$$r_j = \left[c_1 \left(\frac{D_{jmin}}{D_s} \right)^2 + c_2 \left(\frac{T_{jmin}}{T_s} \right)^2 + \left(\frac{D_j}{D_s} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$



Rysunek 3. Wyznaczanie parametrów ruchu obiektów w systemie ARPA

Na podstawie obowiązujących przepisów (IMO, 1974) (PRS, 2009) większość statków produkowanych po 1984 roku jest zobligowana do posiadania systemu ARPA. Dokładniejszy opis systemów nawigacyjnych statku został przedstawiony w pracach (Golding, 2004) (Guema i inni, 2005).

Wyznaczanie zadanej trajektorii statku realizowane jest w warstwie sterowania nadrzędnego. W procesie tworzenia planu strategicznego określona zostaje ogólna trasa rejsu statku w odniesieniu do konkretnych portów pośrednich jak również portu docelowego. Plan nawigacyjny określa w sposób bardziej dokładny czas przybycia do określonych portów jak również definiuje trajektorię pomiędzy punktami pośrednimi, gdzie dodatkowo uwzględnione zostają warunki hydrometeorologiczne. Zagadnienie to w literaturze nazywane jest nawigacją meteorologiczną. Synteza metod nawigacji meteorologicznej przedstawiona została w pracy (Szłapczyńska, 2009).

W trakcie trwania rejsu statku następuje aktualizacja jego trajektorii zadanej w celu uwzględnienia zmieniających się warunków środowiskowych w rejonie żeglugi. Na tym etapie trajektoria zadana powinna dodatkowo uwzględniać możliwe sytuacje kolizyjne z obiektami obcymi, jak również spełniać określone kryteria optymalizacyjne. Problem wyznaczania zadanej trajektorii statku jest złożonym zadaniem optymalizacji wielokryterialnej (Śmierchalski, 2013a). Kryteria optymalizacyjne związane są z bezpieczeństwem i ekonomią podróży, gdzie bezpieczeństwo żeglugi związane jest z minimalizacją ryzyka kolizji, natomiast kryteria ekonomiczne związane są m.in. z długością trasy, czasem jej przebycia czy też z zużyciem paliwa. Kryteria te są często przeciwstawne gdyż np. zużycie paliwa, a więc koszt ekonomiczny podróży będzie przeciwstawny do prędkości pokonania trasy, a zwiększanie odległości bezpiecznego mijania przeszkód, będzie w przeciwieństwie do jej długości. Dodatkowym utrudnieniem przy wyznaczaniu trajektorii zadanej jest konieczność wyznaczenia manewru antykolizyjnego w czasie zbliżonym do rzeczywistego, aby możliwe było podjęcie stosownego działania, mającego na celu uniknięcie kolizji. W pracach (Śmierchalski, 1998b) (Statheros i inni, 2008) (Śmierchalski, 2013a) przedstawiony został przegląd metod unikania kolizji na morzu. Na podstawie powyższych prac można przyjąć ogólny podział metod służących do wyznaczania zadanej trajektorii statku w sytuacji kolizyjnej na (szczegółowy opis metod przedstawiony został w rozdziale 2):

- metody analityczne,
- metody wykorzystujące sztuczną inteligencję.

Pierwsza grupa metod wymaga precyzyjnego modelu matematycznego jak również określonej metody analitycznej. Rozwiązania te oparte są o zasadę maksimum, programowanie dynamiczne czy teorię gier. Podejście wykorzystujące metody sztucznej inteligencji nie wymaga dokładnych modeli matematycznych, dlatego sposób ich działania jest znacznie uproszczony. Metody te oparte są np. na sieciach neuronowych, systemach wnioskowania rozmytego, algorytmach ewolucyjnych oraz systemach eksperckich. W pracy (Statheros i inni, 2008) dodatkowo wyróżnione są metody hybrydowe, które są połączeniem powyższych metod.

Kształt modelowanej trajektorii powinien odzwierciedlać rzeczywisty ruch statku. Dlatego też istotnym elementem jest dobór odpowiedniej metody modelowania trajektorii zadanej, określający kształt trajektorii pomiędzy punktami zwrotu. Na podstawie rozwiązań dostępnych w literaturze, można stwierdzić, iż istnieją dwa główne rodzaje podejść do modelowania trajektorii zadanej:

- modelowanie oparte o łączenie punktów zwrotu za pomocą odcinków prostych,
- modelowanie oparte o interpolację wielomianową.

W rozdziale 2 dokonano syntezy metod modelowania trajektorii zadanej oraz metod optymalizacji trajektorii. Na jej podstawie przedstawiono potrzebę opracowania nowej metody wyznaczania trajektorii zadanej statku i sformułowano cele pracy oraz metody ich realizacji.

1.2 Teza i cele pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie nowej metody dla systemu wspomagania decyzji nawigatora, pozwalającej na wyznaczenie zadanej trajektorii statku przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej, uwzględniającej ograniczenia wynikające z właściwości dynamicznych statku. Przedstawiona metoda pozwoli na:

- wyznaczenie trajektorii zadanej w czasie zbliżonym do rzeczywistego,
- zamodelowanie trajektorii zadanej mogącej odzwierciedlać rzeczywisty ruch statku, która będzie spełniała ograniczenia wynikające z jego dynamiki, dodatkowo zachowując ciągłość prędkości i przyspieszeń wzdłuż trajektorii,
- uwzględnienie własności dynamicznych statku w trakcie procesu optymalizacji trajektorii.

Cele szczegółowe dotyczą:

- opracowania sposobu wyznaczania trajektorii zadanej przy zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych oraz syntezy stosowanych operatorów genetycznych, jak również doboru parametrów strojenia algorytmu w odniesieniu do trajektorii modelowanej za pomocą interpolacji wielomianowej,
- opracowania metody modelowania trajektorii zadanej z wykorzystaniem interpolacji wielomianowej, uwzględniającej możliwości manewrowe statku oraz spadki prędkości wynikające z wykonywanych manewrów przy wykorzystaniu wybranego modelu odniesienia statku,
- porównania zaproponowanej metody w odniesieniu do metody korzystającej z podejścia opartego o algorytmy ewolucyjne i trajektorię złożoną z odcinków prostych,
- weryfikacji poprawności wyznaczonych trajektorii poprzez symulację ruchu modelu statku odniesienia wzdłuż trajektorii zadanych.

Teza pracy

Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych i interpolacji wielomianowej do wyznaczenia bezpiecznej trajektorii zadanej, umożliwi wyznaczenie trajektorii odwzorowującej rzeczywisty ruch statku, w czasie zbliżonym do rzeczywistego, co pozwoli na zwiększenie bezpieczeństwa żeglugi oraz dokładności kierowania ruchem statku.

Zadania badawcze

Poniżej przedstawione zostały realizowane zadania badawcze, określone na podstawie założonych celów:

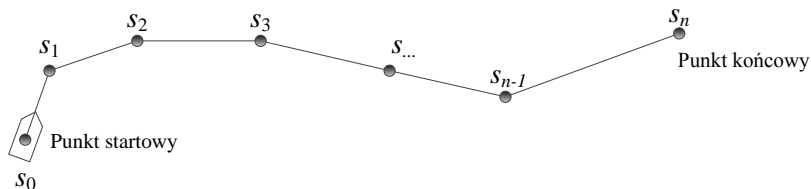
- przegląd metod optymalizacji oraz metod modelowania trajektorii w problemie poszukiwania zadanej trajektorii statku,
- zdefiniowanie problemu poszukiwania trajektorii zadanej statku,
- opracowanie nowej metody wyznaczania zadanej trajektorii statku uwzględniającej założenia przedstawione w celach pracy (punkt 1.2),
- przeprowadzenie badań symulacyjnych proponowanej metody wraz z porównaniem jej z metodą ewolucyjną wykorzystującą modelowanie trajektorii za pomocą odcinków prostych,
- weryfikacja wyznaczonych trajektorii zadanych poprzez badania symulacyjne ruchu modelu statku odniesienia.

2 Problem wyznaczania trajektorii zadanej statku

Wyznaczanie zadanej trajektorii statku jest problemem planowania ścieżki przejścia obiektu ruchomego. Problem ten występuje w wielu zagadnieniach technicznych takich jak np. wyznaczanie zadanej trajektorii pojazdów nawodnych (Śmierzchalski, 1998b) (Fossen, 2002) (Szłapczyńska, 2009), łodzi podwodnych (Fogel i Fogel, 1999) (Kanakakis i Tsourveloudis, 2007), planowanie ścieżki przejścia robotów mobilnych (Shibata i Fukuda, 1993) (Xiao i inni, 1997) (Kurata i inni, 1998) jak również planowanie trasy przelotu samolotów związane z zadaniem rekonesansu, pomocy czy też obserwacji pogody (Rathbun i inni, 2002) (Nikolos i inni, 2003) (Pongpunwattana i Rysdyk, 2007) (Mittal i Deb, 2007). Problem wyznaczania ścieżki przejścia obiektu ruchomego definiowany jest następująco: dany jest obiekt o określonych własnościach kinematycznych i dynamicznych oraz środowisko, w którym obiekt się porusza. Należy znaleźć ścieżkę przejścia pomiędzy punktem startowym a punktem końcowym, omijając przeszkody statyczne oraz dynamiczne, dodatkowo spełniając określone kryteria optymalizacyjne. W problemie poszukiwania ścieżki przejścia obiektu ruchomego proponowane podejście, a więc metoda optymalizacji oraz sposób modelowania trajektorii jest silnie zależny od specyfiki problemu. Dobór metody optymalizacji zależy od zdefiniowanej funkcji celu, jak również dodatkowych ograniczeń np. uzyskania wyników obliczeń w czasie rzeczywistym. Sposób modelowania trajektorii zależny jest od własności dynamicznych obiektu sterowania. Dlatego też w rozdziale przedstawiona zostanie synteza metod poszukiwania trajektorii zadanej statku w odniesieniu do metod modelowania ścieżki oraz sposobu jej optymalizacji.

2.1 Metody modelowania trajektorii zadanej statku

Proces określania trajektorii zadanej statku (Rysunek 4) realizowany jest poprzez wyznaczenie określonej ilości punktów zwrotu (s_n), a następnie modelowanie kształtu trajektorii pomiędzy nimi.



Rysunek 4. Przykład trajektorii zadanej statku

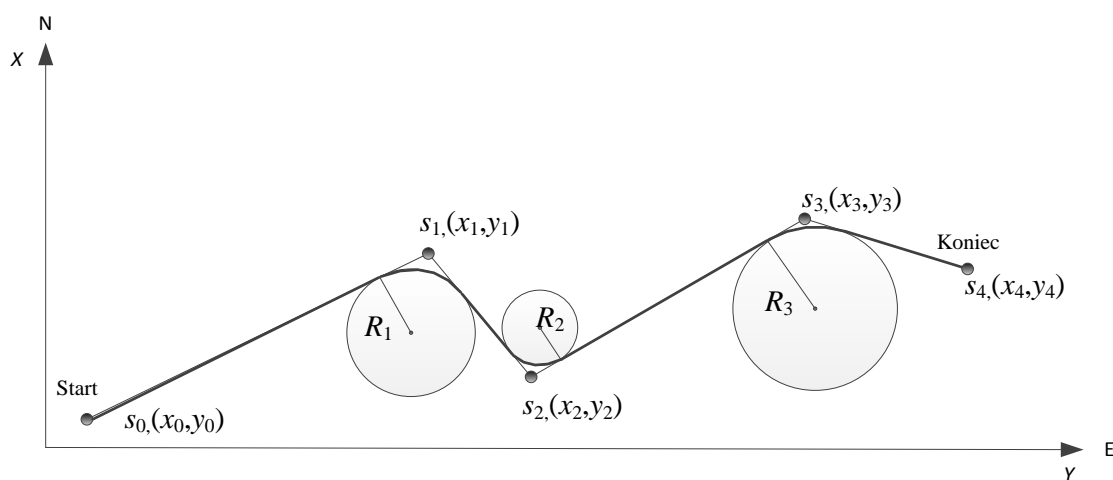
Przy projektowaniu trajektorii zadanej, przyjmuje się że prezentowane statki obce modelowane są za pomocą domen (Śmierzchalski, 1998b). Jest to obszar wokół statku, który nie powinien zostać naruszony. Założenie, że przy wyznaczaniu manewru antykolizyjnego statki obce prezentowane są za pomocą domen, pozwala traktować statek własny jako punkt. Kształt i rozmiar domeny zależny jest od wielu czynników takich jak:

- rodzaj statku oraz prędkość poruszania się względem statków obcych,
- natężenie ruchu w rejonie żeglugi,
- praktyka morska nawigatora,
- sytuacje awaryjne.

Sposoby tworzenia oraz rodzaje domen zostały przedstawione w pracach (Goodwin, 1975) (Davis i inni, 1982) (Śmierzchalski, 1998b) (Śmierzchalski i Weintrit, 1999) (Pietrzykowski, 2004). W pracy wykorzystywana jest domena o kształcie sześciokąta opisana w (Śmierzchalski, 1998b).

Metody modelowania trajektorii zadanej statku można podzielić na dwa główne rodzaje:

- pierwszy z nich polega na łączeniu punktów zwrotu za pomocą odcinków prostych i aproksymacji własności dynamicznych obiektu sterowania pomiędzy segmentami (np. za pomocą łuków okręgu (Rysunek 5). Takie rozwiązanie zostało przedstawione w szeregu prac dotyczących wyznaczania trajektorii zadanej statku (Lisowski, 1986) (Holzhüter, 1990) (Śmierzchalski, 1998b) (Fossen, 2011) jak również w innych aplikacjach modelowania trajektorii zadanej np. dla samolotów (Capozzi, 2001) (Rathbun i inni, 2002) (Rubio Torella, 2004) (Pongpunwattana i Rysdyk, 2007) czy też robotów mobilnych (Xiao i inni, 1997). Rozwiązania oparte na tych metodach wyznaczają trajektorię zadaną dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczane są punkty zwrotu, które następnie zostają połączone za pomocą odcinków prostych. W etapie drugim dokonywana jest modyfikacja trajektorii, mająca na celu aproksymację własności dynamicznych statku. Wadą tego typu rozwiązań jest fakt, iż po tym procesie, trajektoria zadana może naruszać ograniczenia nawigacyjne, co wymusza konieczność powtórzenia procesu obliczeniowego. Zaletami tego rodzaju metod jest niewielki nakład obliczeniowy i prosta implementacja.



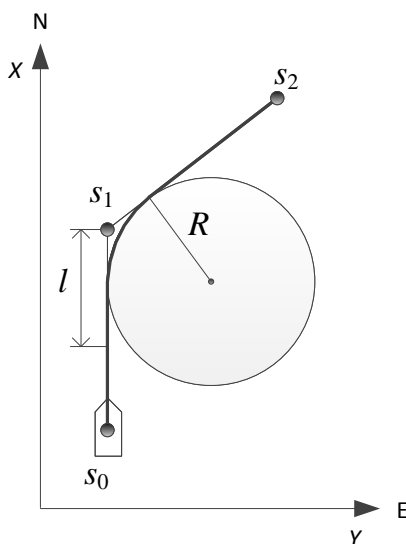
Rysunek 5. Trajektorja złożona z odcinków prostych i łuków okręgu

- druga grupa metod modelowania trajektorii zadanej bazuje na rozwiązaniach opartych o interpolację wielomianową. Rozwiązania korzystające z modelowania trajektorii przy pomocy wielomianów zostały przedstawione w szeregu prac w odniesieniu do pojazdów nawodnych (Corneliussen, 2003) (Jensen, 2011) (Fossen, 2011), robotów mobilnych (Chang i Liu, 2009) (Magdid i inni, 2006) (Piazzini i inni, 2010), jak również samolotów (Kanakakis i Tsourveloudis, 2007) (Nikolos i inni, 2003). Zaletą tego rodzaju rozwiązań jest możliwość zamodelowania gładkiej trajektorii, uwzględniającej własności dynamiczne obiektu sterowania w trakcie procesu optymalizacji. Modelowanie przy użyciu wielomianów może dodatkowo zapewnić ciągłość wartości prędkości oraz przyspieszeń wzdłuż trajektorii. Wadą tego podejścia jest zwiększony nakład obliczeniowy związany ze specyfiką rozwiązania.

2.1.1 Modelowanie trajektorii zadanej statku przy zastosowaniu odcinków prostych z aproksymacją własności dynamicznych.

W obecnych rozwiązaniach, najczęściej używaną metodą modelowania trajektorii zadanej jest metoda oparta na łączeniu punktów zwrotu odcinkami prostymi, wraz z aproksymacją własności dynamicznych statku za pomocą łuków okręgu (Rysunek 5) (Lisowski, 1979) (Morawski, 1994) (Śmierzchalski, 1998b) (Fossen, 2002) (Golding, 2004).

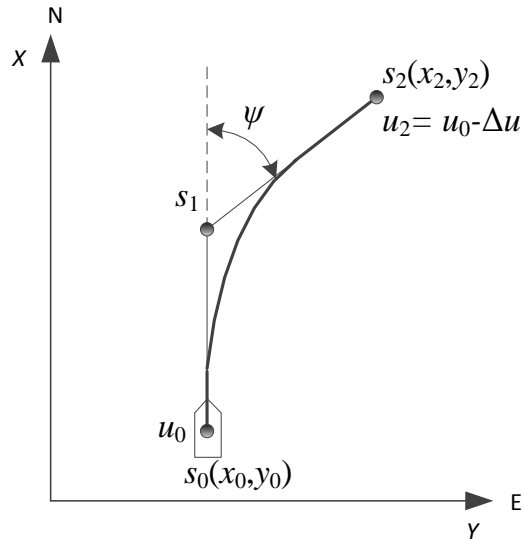
Na fragmentach trajektorii będącymi odcinkami prostymi zakłada się, że statek porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, natomiast na łukach okręgu ruchem jednostajnym ze stałą prędkością kątową zwrotu. Promienie łuków okręgów R_1 , R_2 , R_3 wyznacza się w odniesieniu do możliwości manewrowych statku, prędkości początkowej przed wejściem na łuk oraz stanu załadowania. Wielkość promienia R pomiędzy poszczególnymi segmentami wyznacza się w odniesieniu do czasu wyprzedzenia manewru t_w (Lisowski, 1979) lub odległości wyprzedzenia manewru l (Rysunek 6) (Morawski, 1994). Wielkości te określają miejsce, w jakim statek własny powinien podjąć akcję zmiany kursu na danym segmencie, aby było możliwe wejście na kolejny segment. Sposób wyliczania t_w zależy od położenia segmentu następnego oraz prędkości kątowej zwrotu odpowiedniej dla danej jednostki.



Rysunek 6. Odległość wyprzedzenia manewru l

Powszechność metody związana jest z jej prostotą i niewielkim nakładem obliczeniowym. Wadą takiego rozwiązania jest brak ciągłości wartości prędkości i przyspieszeń wzdłuż trajektorii. Wynikają one z faktu, iż przy przechodzeniu z odcinków prostych na łuk okręgu następuje skokowa zmiana wartości prędkości kątowej zwrotu ω_0 (z wartości równej 0 do określonej stałej wartości). Będzie to skutkowało przeregulowaniami w trakcie sterowania statkiem wzdłuż tak zamodelowanej trajektorii (Fossen, 2002) (Golding, 2004) (Skjente, 2005). Dodatkowo aproksymacja własności dynamicznych realizowana jest już po wyznaczeniu trajektorii. Po wykonaniu aproksymacji może się okazać, że trajektoria narusza ograniczenia nawigacyjne i konieczne jest powtórzenie procesu obliczeniowego.

Innym podejściem do aplikacji własności dynamicznych statku jest metoda aproksymacji krzywą łamaną s_0 - s_1 - s_2 (Rysunek 7) (Gawrychowski i inni, 1987) (Śmierchalski, 1998b) (Śmierchalski, 2013a). W metodzie tej nie uwzględnia się rzeczywistej trajektorii przejścia statku między segmentami, a określa się współrzędne punktu rozpoczęcia manewru (x_0, y_0) , współrzędne punkt jego zakończenia (x_2, y_2) , prędkość wzdłużną końcową (u_2) oraz czas po jakim zostanie osiągnięty punkt końcowy (t_2) . Wyznaczenie tych parametrów realizowane jest poprzez symulację ruchu statku przy zastosowaniu matematycznego modelu odniesienia lub też na podstawie rzeczywistych prób morskich (dla określonej wartości zmiany kursu (ψ) przy prędkości wyjściowej (u_0)).



Rysunek 7. Modelowanie trajektorii metodą krzywej łamanej

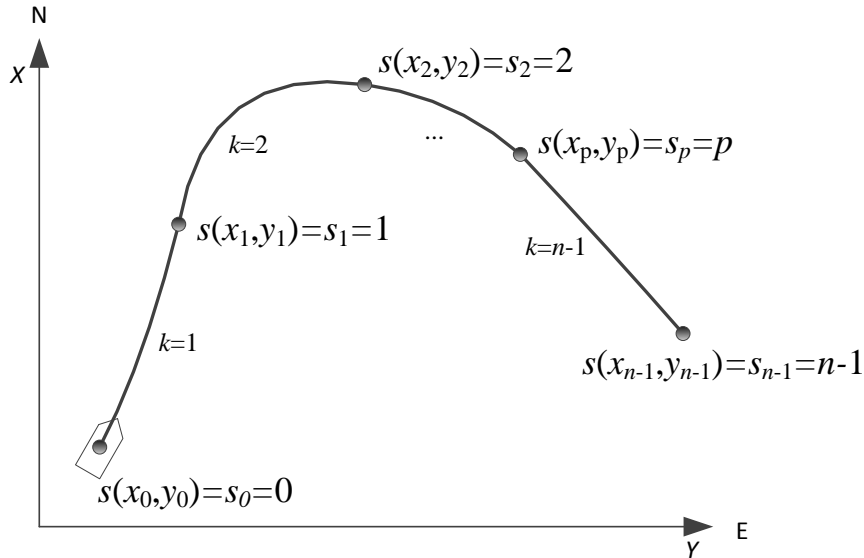
Podjęcie wykorzystujące model matematyczny statku do modelowania własności dynamicznych przy wyznaczaniu trajektorii zadanej, zostało przedstawione również w pracach (Amerongen, 1982) (Fossen, 2002). W odróżnieniu od metody krzywej łamanej gdzie określane są jedynie parametry przejścia pomiędzy poszczególnymi segmentami, w rozwiązaniach tych symulowany jest rzeczywisty ruch statku wzdłuż całej trajektorii (na podstawie matematycznego modelu odniesienia). Wadą tego podejścia jest fakt, iż przy wyznaczaniu trajektorii zadanej stosowany jest określony regulator kursu i prędkości, dlatego też rozwiązania te silnie zależą od jego rodzaju.

Odwzorowanie własności dynamicznych statku może być realizowane w sposób alternatywny przy wykorzystaniu modelu dynamiki układu masa-tłumik-sprężyna (Golding, 2004) (Domachowski i Hossein Ghaemi, 2007) (Fossen, 2011). Współczynniki modelu dobierane są w sposób pozwalający na odwzorowanie rzeczywistych własności dynamicznych statku. Rozwiązanie takie jest stosunkowo proste, jednak mało dokładne. Sposób tworzenia modelu odniesienia za pomocą takiego modelu dynamiki można znaleźć w pracy (Fossen, 2011).

2.1.2 Modelowanie trajektorii zadanej statku przy zastosowaniu interpolacji wielomianowej.

Odmiernym podejściem do modelowania trajektorii zadanej jest zastosowanie interpolacji wielomianowej. Dzięki interpolacji wielomianowej możliwe jest wyznaczenie gładkiej trajektorii spełniającej warunki ciągłości położenia, prędkości oraz przyspieszenia (Fossen, 2002), która przy odpowiednich założeniach może odwzorowywać rzeczywisty ruch statku. Taka gładka trajektoria jest pożądana dla systemów sterowania bezpośredniego, ponieważ pozwala na sterowanie wzdłuż niej bez przeregulowań i przy zachowaniu minimalnej odchyłki od trajektorii zadanej.

Sposób modelowania trajektorii zadanej przy użyciu wielomianu stopnia trzeciego typu „cubic spline” został przedstawiony w pracach (Fossen, 2002) (Corneliussen, 2003) (Golding, 2004). W metodzie tej każdy segment pomiędzy poszczególnymi punktami zwrotu, modelowany jest przy pomocy wielomianu o różnych współczynnikach. Przykładowa trajektoria wyznaczona za pomocą wielomianu stopnia trzeciego została przedstawiona na Rysunku 8.



Rysunek 8. Trajektoria modelowana przy użyciu cubic spline

Trajektoria złożona jest z n punktów zwrotu oraz $n-1$ segmentów k , gdzie $k=1, \dots, n-1$. Trajektoria opisana jest przy pomocy zmiennej s , gdzie:

$$0 \leq s \leq n-1 \quad (2.1)$$

Dla każdego segmentu k wyznaczana jest para wielomianów stopnia trzeciego, która definiuje kształt segmentu (dla współrzędnej x i y) (2.2):

$$\begin{aligned} x_k(s) &= a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0, \\ y_k(s) &= b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dla uproszczenia zapisu sposób wyliczania współczynników wielomianów, zostanie przedstawiony tylko w odniesieniu do współrzędnej x . Obliczenie współczynników dla współrzędnej y jest wykonywane w sposób analogiczny.

Wielomiany wyznaczone dla każdego segmentu pomiędzy poszczególnymi punktami zwrotu spełniają warunki zachowania ciągłości położenia, prędkości oraz przyspieszeń. Warunki ograniczające, służące do wyznaczenia współczynników wielomianu należy dobrać, więc w taki sposób, aby zapewnić warunki zachowania ciągłości w punktach zwrotu. Będą one, zatem punktem potrójnej interpolacji. Wartości położenia, prędkości oraz przyspieszeń wzdłuż segmentów są przedstawione w sposób następujący (2.3).

$$\begin{aligned} x_k(s) &= a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \\ x_k'(s) &= 3a_3 s^2 + 2a_2 s + a_1 \\ x_k''(s) &= 6a_3 s + 2a_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

W celu wyznaczenia współczynników wielomianu należy założyć warunki ograniczające w punkcie startowym, punktach zwrotu oraz punkcie końcowym. Warunki te przedstawiają się następująco (Fossen, 2010):

a) Dla punktu startowego będą to dwa warunki:

- Wartość drugiej pochodnej w punkcie startowym,

$$x''_k(0) = x''_1(0) = 0 \quad (2.4)$$

- Współrzędna punktu startowego,

$$x_k(0) = x_1(0) = x_0 \quad (2.5)$$

b) Dla punktu końcowego również dwa warunki:

- Wartość drugiej pochodnej w punkcie końcowym,

$$x_k''(n-1) = x_{n-1}''(n-1) = 0 \quad (2.6)$$

- Współrzędna punktu końcowego,

$$x_k(n-1) = x_{n-1}(n-1) = x_{n-1} \quad (2.7)$$

c) Dla każdego z punktów zwrotu powinny zostać założone cztery warunki ograniczające:

- Współrzędna początku modelowanego segmentu k jest końcem segmentu poprzedniego,

$$x_k(s_{p-1}) = x_p \quad (2.8)$$

- Współrzędna końca modelowanego segmentu k jest początkiem segmentu następnego,

$$x_k(s_p) = x_{p+1} \quad (2.9)$$

- Wartość pierwszej pochodnej powinna być jednakowa z dwóch stron punktów zwrotu,

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k'(s_p) &= \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k'(s_p) \\ \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k'(s_p) - \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k'(s_p) &= 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

- Wartość drugiej pochodnej powinna być jednakowa z dwóch stron punktów zwrotu (2.11),

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k''(s_p) &= \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k''(s_p) \\ \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k''(s_p) - \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k''(s_p) &= 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Na podstawie przedstawionych warunków otrzymuje się układ równań przedstawiony poniżej. Składa się on z dwóch równań dla punktu startowego i końcowego (oznaczone kolorem żółtym) oraz czterech równań dla każdego z punktów zwrotu.

$$\left\{ \begin{array}{l} 6a_{3,1} * s(x_0) + 2a_{2,1} = 0 \\ a_{3,1} * s^3(x_0) + a_{2,1} * s^2(x_0) + a_{1,1} * s(x_0) + a_{0,1} = x_0 \\ a_{3,1} * s^3(x_1) + a_{2,1} * s^2(x_1) + a_{1,1} * s(x_1) + a_{0,1} = x_1 \\ a_{3,2} * s^3(x_1) + a_{2,2} * s^2(x_1) + a_{1,2} * s(x_1) + a_{0,2} = x_1 \\ -3a_{3,1} * s^2(x_1) - 2a_{2,1} * s(x_1) - a_{1,1} + 3a_{3,2} * s^2(x_1) - 2a_{2,2} * s(x_1) - a_{1,2} = 0 \\ -6a_{3,1} * s(x_1) - 2a_{2,1} + 6a_{3,2} * s(x_1) - 2a_{2,2} = 0 \\ \dots \\ a_{3,p} * s^3(x_p) + a_{2,p} * s^2(x_p) + a_{1,p} * s(x_p) + a_{0,p} = x_p \\ a_{3,p} * s^3(x_p) + a_{2,p} * s^2(x_p) + a_{1,p} * s(x_p) + a_{0,p} = x_p \\ -3a_{3,p} * s^2(x_p) - 2a_{2,p} * s(x_p) - a_{1,p} + 3a_{3,p} * s^2(x_p) - 2a_{2,p} * s(x_p) - a_{1,p} = 0 \\ -6a_{3,p} * s(x_p) - 2a_{2,p} + 6a_{3,p} * s(x_p) - 2a_{2,p} = 0 \\ 6a_{3,n-1} * s(x_{n-1}) + 2a_{2,n-1} = 0 \\ a_{3,n-1} * s^3(x_{n-1}) + a_{2,n-1} * s^2(x_{n-1}) + a_{1,n-1} * s(x_{n-1}) + a_{0,n-1} = x_{n-1} \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Układ równań (2.12) można przedstawić w postaci macierzowej:

$$C = AW \quad (2.13)$$

gdzie macierz C jest macierzą ograniczeń:

$$C = [0 \quad x_0, \quad x_1, \quad x_1, \quad 0, \quad 0, \quad x_2, \quad x_2, \quad 0, \quad 0, \quad \dots \quad x_{n-1}, \quad 0]^T \quad (2.14)$$

Macierz W jest macierzą współczynników wielomianów dla poszczególnych segmentów trajektorii od 1 do $n-1$:

$$W = \begin{bmatrix} a_{3,1} & \dots & a_{3,n-1} \\ a_{2,1} & \dots & a_{2,n-1} \\ a_{1,1} & \dots & a_{1,n-1} \\ a_{0,1} & \dots & a_{0,n-1} \end{bmatrix}^T \quad (2.15)$$

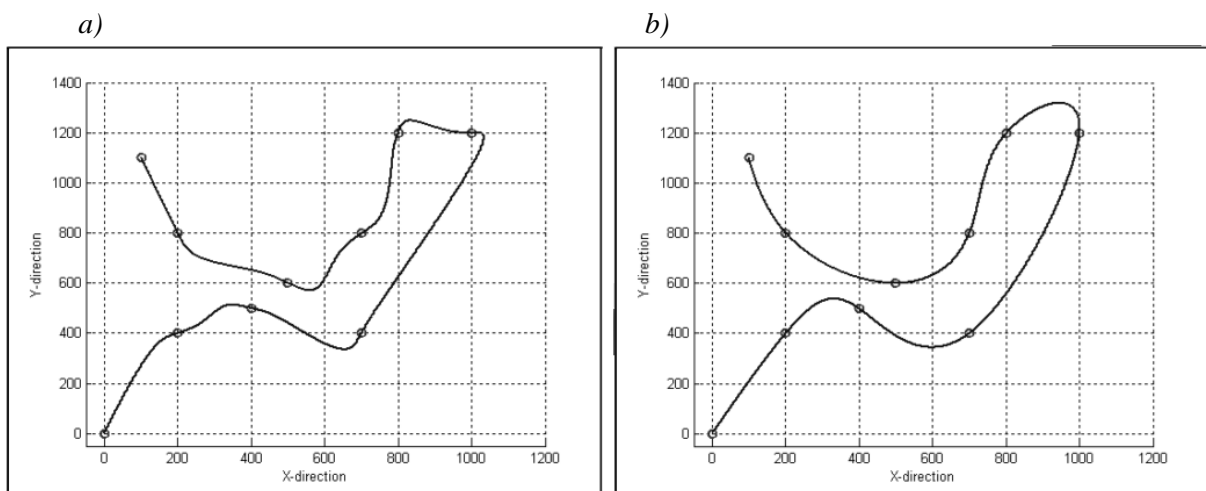
Natomiast A jest macierzą przekształceń:

$$A = \begin{bmatrix} 6s(x_0) & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s^3(x_0) & s^2(x_0) & s(x_0) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s^3(x_1) & s^2(x_1) & s(x_1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s^3(x_1) & s^2(x_1) & s(x_1) & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3s^2(x_1) & -2s(x_1) & -1 & 0 & 3s^2(x_1) & 2s(x_1) & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6s(x_1) & -2 & 0 & 0 & 6s(x_1) & 2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & s^3(x_{n-1}) & s^2(x_{n-1}) & s(x_{n-1}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 6s(x_{n-1}) & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Rozwiązanie równania macierzowego (2.17) pozwala na wyznaczenie wartości współczynników wielomianów dla poszczególnych segmentów.

$$W = A^{-1}C \quad (2.17)$$

Dla niektórych regulatorów kursu i prędkości np. w metodzie Backstepping (Witkowska, 2011) konieczne jest uwzględnienie ciągłości trzeciej pochodnej wzdłuż całej trajektorii. Zamodelowanie kolejnych warunków ograniczających możliwe jest poprzez zastosowanie wielomianu wyższego stopnia (Corneliusson, 2003). Przy stosowaniu wielomianów wyższego stopnia pojawia się problem z oscylacjami w okolicy punktów zwrotu. Wraz ze wzrostem stopnia wielomianu, pojawiają się zakrzywienia trajektorii w okolicy punktów zwrotu. Można zaobserwować to na Rysunku 9, gdzie pokazane są przykładowe trajektorie zamodelowane wielomianem stopnia 3 i 9 dla tych samych punktów zwrotu. Wraz ze wzrostem stopnia wielomianu, możliwe jest założenie większej ilości warunków ograniczających, jednakże skutkuje to pogorszeniem warunku gładkości trajektorii.



Rysunek 9. Trajektorie utworzone dla tych samych punktów zwrotu przy zastosowaniu a) wielomianu stopnia 9, b) wielomianu stopnia 3 cubic spline, (Corneliusson, 2003)

Aby wyznaczyć trajektorię zadaną, zachowując warunek ciągłości trzeciej pochodnej można alternatywnie zastosować metodę łączoną, gdzie trajektorie wyznaczone są przy użyciu „cubic spline”, a fragmenty trajektorii niespełniające założeń ciągłości 3 pochodnej są zastępowane odcinkami wielomianu stopnia 7. Takie rozwiązanie zostało przedstawione w pracy (Corneliusson, 2003).

Na podstawie wyników badań (Fossen, 2002) (Corneliussen, 2003) można stwierdzić, że do modelowania trajektorii zadanej statku najbardziej odpowiednie są wielomiany stopnia 3, ponieważ trajektoria wyznaczona przy ich pomocy pozwala na zachowanie warunków ciągłości położenia, prędkości oraz przyspieszeń, dodatkowo umożliwiając zamodelowanie gładkiego splajnu. Trajektorie wyznaczone tą metodą są zbliżone do oczekiwań nawigatorów (Golding, 2004).

2.2 Metody wyznaczania zadanej trajektorii statku

W rozdziale tym przedstawione zostały metody wyznaczania zadanej trajektorii statku w odniesieniu do sposobu optymalizacji. Zgodnie z tym co zostało opisane we wstępie, metody te można podzielić na:

- metody analityczne,
- metody wykorzystujące techniki sztucznej inteligencji,

2.2.1 Metody analityczne

Istnieje szereg metod analitycznych służących do rozwiązania problemu wyznaczania trajektorii zadanej statku. Synteza algorytmów optymalnej strategii statku w sytuacji kolizyjnej została przedstawiona w pracach (Lisowski, 1979) (Lisowski i Śmierchalski, 1995) (Śmierchalski, 1998b) (Statheros i inni, 2008) (Śmierchalski, 2013a). Rozwiązania te oparte są przede wszystkim na metodach gradientowych np. zasadzie maksimum (Śmierchalski, 1998b), programowania dynamicznego (Lisowski, 2009) oraz teorii gier (Lisowski, 1979) (Lisowski, 2012).

Metody gradientowe silnie zależą od wyboru punktu startowego rozwiązania i związane są z dużym nakładem obliczeniowym. Jedną z takich metod jest zmodyfikowana zasady maksimum Pointriagina (Śmierchalski, 1998b). Jako kryterium przyjmuje się minimalizację funkcjonau jakości sterowania $J(x,u,t)$, przy jednoczesnym spełnieniu warunków ograniczających trajektorię $x(t)$.

$$J(\hat{x}(t), \hat{u}(t), t) = \min_{U_0, X_0} \int_{t_p}^{t_k} f_0(x(t), u(t), t) dt \quad (2.18)$$

$$f_0(x(t), u(t), t) = \frac{(\psi_z - \psi(t))^2}{2}$$

gdzie:

- $x(t)$ - to trajektoria, a $\hat{x}(t)$ to trajektoria optymalna,
- $u(t)$ - wektor sterowań, $\hat{u}(t)$ to wektor sterowań optymalnych,
- $\psi(t)$ - kurs rzeczywisty statku,
- X_0 - zbiór trajektorii dopuszczalnych,
- U_0 - zbiór sterowań dopuszczalnych,
- ψ_z - kurs zadany,

Zgodnie z zasadą maksimum definiowany jest Hamiltonian $H(x(t), u(t), p(t), t)$, gdzie dla optymalnego wektora sterowań $\hat{u}(t)$ oraz optymalnej trajektorii $\hat{x}(t)$ istnieje niezerowe rozwiązanie $\hat{p}(t)$ układu równań, takie że:

$$H(\hat{x}, \hat{u}, \hat{p}, t) = \max_{u \in U_0} H(\hat{x}, u, \hat{p}, t) \quad (2.19)$$

W problemie wyznaczania trajektorii optymalnej należy uwzględnić ograniczenia nawigacyjne, dlatego też, aby warunki zasady maksimum zostały spełnione, Hamiltonian modyfikowany jest do postaci:

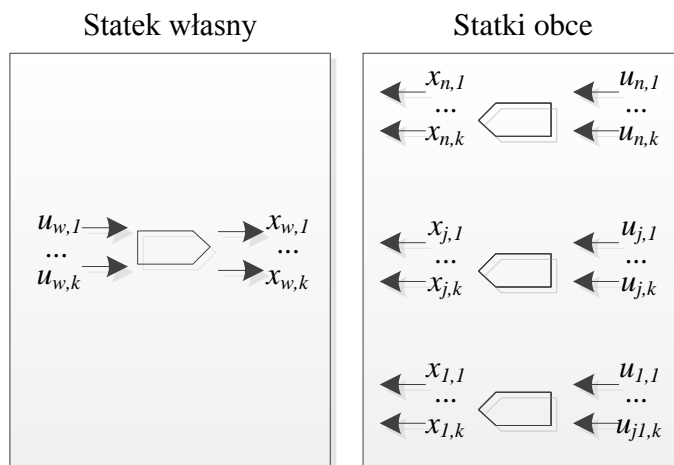
$$\begin{aligned} H_\lambda &= H - \lambda G \\ G(x(t), t) &\leq 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

gdzie:

$\lambda > 0$ - przedziałami ciągła funkcja czasu,

W pracach (Lisowski, 2007) (Lisowski, 2012) przedstawiony został przegląd metod wyznaczenia bezpiecznej trajektorii zadanej statku w oparciu o teorię gier. W ujęciu ogólnym są to metody oparte na modelu gry pozycyjnej oraz modelu gry macierzowej.

Model matematyczny procesu gry pozycyjnej dla statku własnego oraz statków obcych składa się z wektora wejściowego sterowań statku własnego \vec{u}_w , wektora sterowań m -obiektów spotkanych \vec{u}_j , wektora zmiennych stanu statku własnego \vec{x}_w oraz obiektów obcych \vec{x}_j (Rysunek 10) .



Rysunek 10. Diagram sygnałów wejściowych oraz zmiennych stanu dla modelu gry pozycyjnej

Dokładne przedstawienie zależności zmiennych stanu od dynamiki statku wraz z przykładowymi danymi dla wybranego kontenerowca zostało przedstawione w pracy (Lisowski, 2012).

W przypadku gry pozycyjnej, w ujęciu ogólnym, zmienne stanu odnoszą się do współrzędnych pozycji statku, natomiast zmienne sterujące do kursu oraz jego prędkości (Lisowski, 2012). Dla statku własnego wyznaczone są one w sposób następujący:

$$\begin{aligned} x_{w,1} &= X_1, & x_{w,2} &= Y_1 \\ u_{w,1} &= \psi, & u_{w,2} &= V \end{aligned} \quad (2.21)$$

Dla statków obcych:

$$\begin{aligned} x_{j,1} &= X_j, & x_{j,2} &= Y_j \\ u_{j,1} &= \psi_j, & u_{j,2} &= V_j \end{aligned} \quad (2.22)$$

gdzie:

X_1, Y_1 - współrzędne położenia statku własnego w określonej chwili czasu,

ψ - kurs zadany statku własnego,

V - zadana prędkość statku własnego,

X_j, Y_j - współrzędne położenia statku obcego w określonej chwili czasu,

ψ_j - kurs zadany statku obcego,

V_j - zadana prędkość statku obcego,

Dla danej sytuacji nawigacyjnej wyznaczony zostaje zbiór trajektorii dopuszczalnych dla statku własnego i statków obcych. Zbiory te są od siebie zależne, a więc zmiana trajektorii któregośkolwiek z obiektów obcych wpływa na kształt pozostałych trajektorii. W przypadku modelu gry pozycyjnej statek własny wyznacza bezpieczną trajektorię przejścia na podstawie zbioru wyznaczonych wcześniej trajektorii bezpiecznych dla statku własnego i statków obcych. Realizowane jest to poprzez optymalizację funkcji celu i różni się w zależności od tego czy wyznaczone jest dla obiektów uwzględniających współpracę między sobą (2.23) lub jej brak (2.24).

$$F1_w = \min_{u_w \in \bigcap_{j=1}^n S_{w,j}} \max_{u_j \in S_j} \min_{u_w, u_j \in S_{w,j}} \int_{t_p}^{t_k} u_w(t) dt \quad (2.23)$$

$$F2_w = \min_{u_w \in \bigcap_{j=1}^n S_{w,j}} \min_{u_j \in S_j} \min_{u_w, u_j \in S_{w,j}} \int_{t_p}^{t_k} u_w(t) dt \quad (2.24)$$

gdzie:

$F1_w$ – funkcja celu dla obiektów, których zakłada się współpracę między sobą,

$F2_w$ – funkcja celu dla obiektów, których nie zakłada się współpracy między sobą,

S_w - zbiór trajektorii dopuszczalnych dla obiektu własnego,

S_j – zbiór trajektorii dopuszczalnych dla j -tego obiektu,

t_p, t_k – czas początku i końca rejsu,

Innym podejściem jest rozwiązanie oparte o model gry macierzowej, gdzie zmienne stanu dla obiektów obcych oraz sterowania zależne są od namiaru na obiekt oraz odległości największego zbliżenia (Lisowski, 2012). W metodzie tej nie uwzględnia się dynamiki statku. Dla statku własnego wektor sterowań wyznaczany jest w sposób następujący:

$$u_{w,1} = \psi, \quad u_{w,2} = V \quad (2.25)$$

Dla pozostałych statków obcych:

$$\begin{aligned} x_{j,1} &= D_j, & x_{j,2} &= N_j \\ u_{j,1} &= \psi_j, & u_{j,2} &= V_j \end{aligned} \quad (2.26)$$

Trajektoria optymalna wyznaczana jest na podstawie optymalizacji współczynnika ryzyka kolizji równaniem (1.1). W zależności od tego czy strategie jednostek zakładają współpracę między sobą (2.27) lub jej brak (2.28), funkcja celu przedstawia się następująco:

$$F3_w = \min_{u_w} \max_{u_j} r_j \quad (2.27)$$

$$F4_w = \min_{u_w} \min_{u_j} r_j \quad (2.28)$$

Jak zostało wskazane w pracy (Śmierzchalski, 2013a) metody analityczne przydatne są do rozwiązywania zadań o nieskomplikowanej strukturze modelu, ponieważ w przypadku bardziej złożonych, uzyskanie rozwiązania końcowego nie może zostać osiągnięte w czasie zbliżonym do rzeczywistego (Statheros i inni, 2008).

2.2.2 Metody wykorzystujące techniki sztucznej inteligencji

Odmiernym podejściem do problemu wyznaczania zadanej trajektorii statku są rozwiązania oparte o metody sztucznej inteligencji wykorzystujące sieci neuronowe, logikę rozmytą oraz algorytmy ewolucyjne (AE). Przegląd metod służących do wyznaczania trajektorii zadanej statku przy użyciu metod sztucznej inteligencji został przedstawiony w pracach (Statheros i inni, 2008) (Śmierzchalski, 2013a). Dominującą grupą rozwiązań są rozwiązania oparte o systemy wnioskowania rozmytego i algorytmy ewolucyjne lub też ich połączenia.

Sieci neuronowe w większości przypadków wykorzystywane są do modelowania zdolności manewrowych statku, dzięki temu nie jest konieczne korzystanie z dokładnego modelu matematycznego, jak w przypadku metod analitycznych. W pracy (Hong i inni, 1999) sieci neuronowe zostały zastosowane do odtwarzania własności dynamicznych statku podczas gdy trajektoria bezpieczna wyznaczana jest przy użyciu geometrii analitycznej i teorii zbiorów wypukłych. W pracy (Lisowski, 2009) sieci neuronowe są

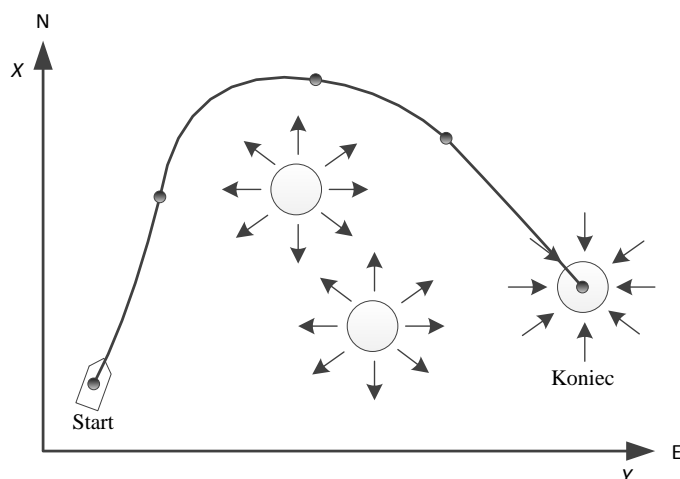
używane do modelowania domen o zmiennych kształtach w sytuacji kolizyjnej, natomiast do poszukiwania optymalnej trajektorii używa się metody programowania dynamicznego.

Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych do problemu wyznaczania trajektorii zadanej statku zostało przedstawione w szeregu prac (Hasegawa, 1987) (Hwang, 2002) (Lee i inni, 2004) (Liu i Liu, 2006) (Perrera i inni, 2011).

W pracy (Hwang, 2002) został przedstawiony system rozmyty, który określa stopień zagrożenia kolizyjnego i na jego podstawie wyznacza manewr zmiany kursu. Podjęcie manewru uzależnione jest od parametru największego zbliżenia. Jeżeli odległość największego zbliżenia przekracza odległość bezpieczną system podejmuje decyzję zmiany kursu w odniesieniu do przepisów Międzynarodowego Prawa Drogi na Morzu (MPDM z ang. COLREGs).

Inne podejście zostało przedstawione w pracy (Liu i Liu, 2006) gdzie na podstawie aktualnych informacji o środowisku i zdefiniowanego uprzednio zbioru reguł, wyznaczony zostaje odpowiedni manewr antykolizyjny. Korzystając z podejścia Case Based Reasoning (CBR) baza reguł zostaje uaktualniana o zarejestrowane wcześniej sytuacje nawigacyjne, które zostały uznane za prawidłowe (na podstawie oceny przez mechanizm wnioskowania rozmytego). W metodzie tej najpierw odczytywane i przetwarzane są dane z układów wejściowych. Następnie na podstawie aktualnej oceny sytuacji oraz istniejącej bazy wiedzy oceniane jest ryzyko wystąpienia kolizji i podejmowana jest decyzja dotycząca rodzaju wykonywanego manewru. Manewr ten zostaje oceniany przy użyciu systemu wnioskowania rozmytego i jeżeli został określony, jako akceptowalny, dodaje się go, jako regułę do bazy wiedzy.

Zastosowanie systemu wnioskowania rozmytego i pól potencjałowych Virtual Force Fields (VFF) do unikania kolizji zostało przedstawione w pracy (Lee i inni, 2004). Ogólna idea algorytmów opartych o pola potencjałowe została przedstawiona na Rysunek 11. W problemie unikania kolizji cel końcowy „przyciąga” do siebie statek własny, natomiast obiekty obce go „odpychają”. Metoda pól potencjałowych w tejże pracy została użyta do dwojakiego celu: unikania kolizji oraz do sterowania ruchem statku wzdłuż trajektorii. Ze względu na to, że w procesie unikania kolizji występują przeszkody dynamiczne, w pracy została przedstawiona zmodyfikowana metoda Modified Virtual Force Fields (MVFF), która je uwzględnia.

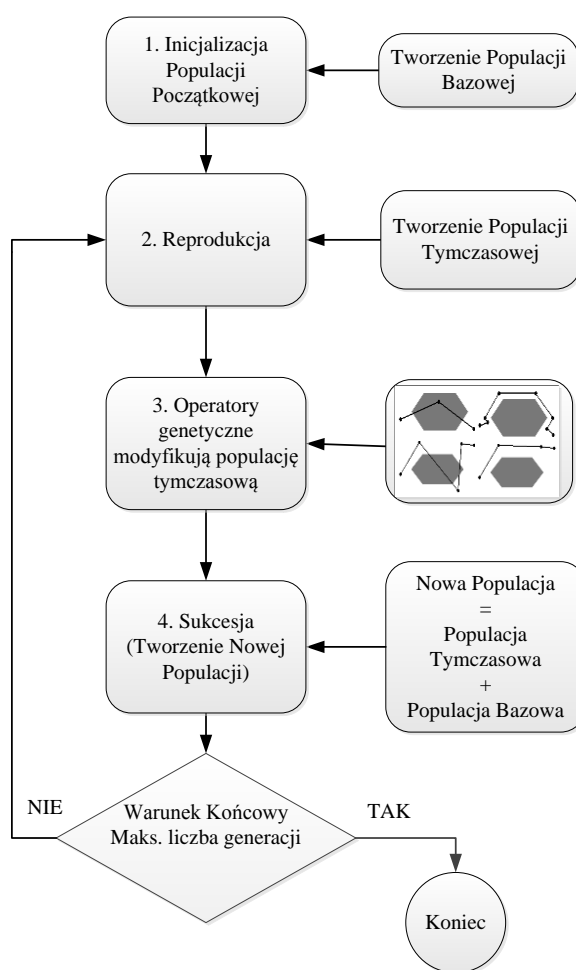


Rysunek 11. Ogólna idea pól potencjałowych w metodzie unikania kolizji na morzu

Kolejną grupą metod są rozwiązania oparte o algorytmy ewolucyjne. Zaletą algorytmów ewolucyjnych jest ich łatwość implementacji przy znacznej liczbie ograniczeń (niezależnie od charakterystyki problemu) (Nikolos i inni, 2003) oraz możliwość znalezienia rozwiązania zadania dynamicznej optymalizacji wielokryterialnej w czasie zbliżonym do rzeczywistego (Śmierchalski, 1998b). W stosunku do metod analitycznych metody ewolucyjne są znacznie bardziej krzepkie i umożliwiają aktywne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań (Szałpczyńska, 2009). Ze względu na wymienione zalety metody wykorzystujące AE są powszechnie stosowane w aplikacjach poszukiwania ścieżki przejścia obiektu ruchomego w środowisku dynamicznym. Wykorzystanie algorytmów

ewolucyjnych do planowania ścieżki przejścia obiektów ruchomych zostało przedstawione w szeregu prac w odniesieniu do planowania ścieżki przejścia dla robotów mobilnych (Shibata i Fukuda, 1993) (Xiao i inni, 1997) (Magdid i inni, 2006) (Chang i Liu, 2009) (Piazzi i inni, 2010), planowania trasy przelotu samolotów (Capozzi, 2001) (Rathbun i inni, 2002) (Nikolos i inni, 2003) (Mittal i Deb, 2007), łodzi podwodnych (Fogel i Fogel, 1999) (Kanakakis i Tsourveloudis, 2007) czy też w przypadku wyznaczania ścieżki przejścia statku nawodnego (Śmierchalski, 1997) (Śmierchalski, 1998a) (Ito i inni, 1999) (Śmierchalski, 2004) (Szałpczyńska, 2009). Większość przedstawionych metod wyznacza trajektorię zadaną jedynie dla statku własnego. Odmienne podejście zostało zaproponowane w pracy (Szałpczyński, 2012), gdzie został przedstawiony algorytm ESOSST (Evolutionary Set of Safe Ship Trajectory), który przy użyciu algorytmów ewolucyjnych oraz teorii gier wyznacza zbiór rozwiązań trajektorii dopuszczalnych nie tylko dla statku własnego, ale dla wszystkich statków znajdujących się w sytuacji kolizyjnej. Dodatkowo autorzy w pracy (Jaworski i inni, 2012) przedstawili koncepcje mechanizmu Wielkiego Wymierania, jako procedury służącej do testowania krzepkości ewolucyjnego algorytmu poszukiwania trajektorii zadanej.

Przykładowy jednopopulacyjny algorytm ewolucyjny poszukiwania trajektorii zadanej statku został przedstawiony na Rysunku 12.



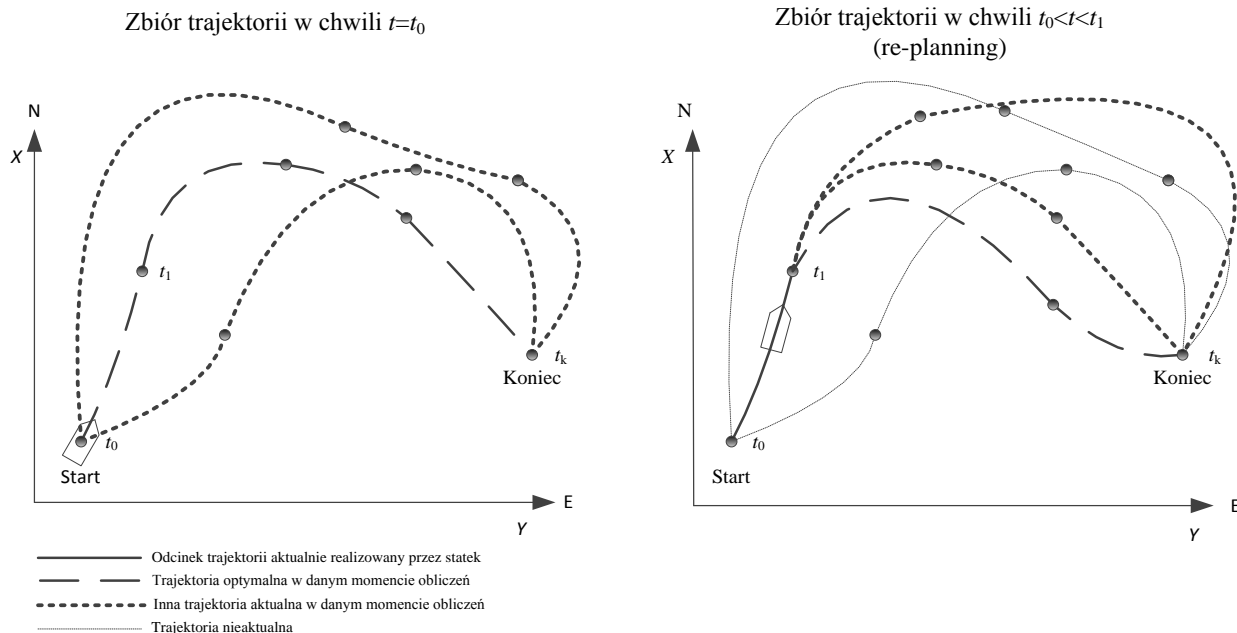
Rysunek 12. Algorytm ewolucyjny wyznaczania zadanej trajektorii statku

Poprzez pojęcie osobnika rozumie się pojedyncze rozwiązanie, trajektorię. Populacją nazywa się zbiór osobników biorących udział w procesie ewolucji. Generacją nazywa się pojedynczy cykl pracy algorytmu. Funkcja przystosowania jest funkcją celu określającą stopień przystosowania osobnika do środowiska.

W pierwszym etapie generowana jest losowa populacja początkowa. Następnie tworzy się populację tymczasową, do której przy użyciu określonej metody preselekcji, dobierane są osobniki

z populacji początkowej. Im większa jest wartość funkcji przystosowania tym większe prawdopodobieństwo wylosowania osobnika do populacji tymczasowej. Na osobnikach populacji tymczasowej wykonywane są operacje genetyczne krzyżowania i mutacji, które modyfikują jej kształt. W następnym kroku tworzona jest nowa populacja bazowa przy użyciu odpowiedniej metody post selekcji, z osobników starej populacji bazowej oraz populacji tymczasowej. Utworzenie nowej populacji bazowej kończy cykl pracy algorytmu (generację). Cykl ten jest powtarzany aż do momentu osiągnięcia warunku końcowego. Szczegółowy opis operatorów genetycznych, metod preselekcji, postselekcji oraz warunków końcowych pracy algorytmu zostanie przedstawiony w następnym rozdziale.

Trajektoria zadana statku wyznaczana przy pomocy algorytmów ewolucyjnych może być realizowana w trybie off-line lub on-line, w zależności od tego czy dana metoda uwzględnia zmianę toru ruchu obiektów obcych. W trybie off-line zakłada się, że przeszkody dynamiczne poruszają się ruchem jednostajnym prostoliniowym z prędkością i kursem założonym w chwili rozpoczęcia obliczeń i nie uwzględnia się zmian toru ruchu obiektów obcych. W trybie on-line dokonywana jest cykliczna aktualizacja trajektorii zadanej (re-planning) w trakcie poruszania się statku własnego wzdłuż kolejnych segmentów trajektorii. Ma to na celu uwzględnienie zmian występujących w środowisku nawigacyjnym w trakcie trwania rejsu. Obiekt własny rozpoczyna swój ruch wzdłuż segmentu trajektorii wyznaczonym w punkcie początkowym. Jeżeli zmiana toru ruchu obiektów obcych wymusi konieczność zmiany wcześniej wyznaczonej trajektorii, statek porusza się dalej wzdłuż nowo wyznaczonej trajektorii. Zostało to przedstawione na Rysunku 13. Po lewej stronie zostały przedstawione przykładowe trajektorie zadane w chwili rozpoczęcia rejsu, gdzie optymalna została oznaczona pogrubioną linią przerywaną. Na rysunku po stronie prawej statek porusza się wzdłuż pierwszego segmentu od punktu początkowego do następnego punktu zwrotu. Podczas pokonywania trajektorii mogą nastąpić zmiany w środowisku, które wymuszają skorygowanie wcześniej wyznaczonej trajektorii. Algorytm na bieżąco aktualizuje zmiany występujące w środowisku i na ich podstawie dokonywana jest korekta wcześniej wyznaczonej trajektorii. Dzięki pracy algorytmu w trybie on-line, w prosty sposób adaptuje się on do dynamicznie zmieniającego się środowiska.



Rysunek 13. Wyznaczania zadanej trajektorii w trybie on-line (re-planning)

Metody wyznaczania ścieżki przejścia obiektu ruchomego przy użyciu algorytmów ewolucyjnych można podzielić, ze względu na sposób użytej metody optymalizacji wielokryterialnej, na dwa główne rodzaje, gdzie:

- a) Preferencje decydenta znane są „a priori”- problem optymalizacji wielokryterialnej sprowadzony jest do zadania optymalizacji jednokryterialnej o określonych współczynnikach wagowych. Rozwiązanie takie jest stosunkowo proste i pozwala na zredukowanie nakładu obliczeniowego, jednakże występuje problem w postaci doboru odpowiednich wartości współczynników wagowych. Nawigator określa swoje preferencje, co do trasy przed rozpoczęciem obliczeń i ich zmiana wymusza konieczność ponownego przeliczenia trajektorii optymalnej. Rozwiązania oparte o metody „a priori” są powszechnie stosowane w przypadku wyznaczania trajektorii zadanej w trybie on-line. Pozwala ona na wyznaczenie rozwiązania zadania optymalizacji wielokryterialnej w czasie rzeczywistym, a ponowne przeliczenie trajektorii odbywa się podczas re-planningu z uwzględnieniem zmian występujących w środowisku, wtedy też możliwa jest zmiana preferencji nawigatora. Takie podejście stosowane jest w rozwiązaniach dla robotów mobilnych (Michalewicz i Xiao, 1995), dla samolotów (Rathbun i inni, 2002) (Nikolos i inni, 2003) oraz statków nawodnych (Śmierchalski, 1997).

- b) Preferencje decydenta znane są „a posteriori”- rozwiązania korzystają z algorytmów optymalizacji wielokryterialnej opartych o dominację Pareto. W pierwszym etapie wyznacza się front rozwiązań niezdominowanych, a następnie za pomocą odpowiedniego klasyfikatora wskazywane są rozwiązania końcowe. Poprzez front rozwiązań niezdominowanych rozumiany jest zbiór rozwiązań, które są optymalne względem poszczególnych kryteriów np. najkrótsza trasa, najmniejsze zużycie paliwa itp. Następnie decydent określa swoje preferencje, co do ścieżki przy użyciu odpowiedniej metody klasyfikującej i na tej podstawie wyznaczane są rozwiązania najlepsze. W metodzie tej istnieje możliwość zmiany preferencji bez ponownego przeliczenia trasy przez algorytm, a jedynie zmian współczynników w klasyfikatorze. Do uwzględnienia zmian w środowisku konieczne jest jednak ponowne przeliczenie trasy. Rozwiązania tego typu stosowane są dla wyznaczania zadanej trajektorii w trybie off-line np. w przypadku pogodowego planowania podróży w nawigacji meteorologicznej (Szlarczyńska, 2009) jak również przy wyznaczania trajektorii przejścia robota mobilnego w środowisku statycznym (Mittal i Deb, 2007).

3 Rozwiązanie zadania wyznaczania zadanej trajektorii statku z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej

Problem wyznaczania zadanej trajektorii statku przedstawia się w sposób następujący: zakładając, że statek o zdefiniowanych własnościach dynamicznych oraz kinematycznych, porusza się w określonym środowisku morskim, należy wyznaczyć trajektorię przejścia pomiędzy punktem początkowym i końcowym omijając statyczne i dynamiczne ograniczenia nawigacyjne, dodatkowo spełniając określone kryteria optymalizacyjne.

Analiza rozwiązań przedstawionych w punktach 2.1 oraz 2.2 pozwala stwierdzić, iż brak jest kompleksowej metody, która pozwoliłaby na wyznaczenie takiej trajektorii zadanej w czasie zbliżonym do rzeczywistego, jednocześnie modelując gładką trajektorię, mogącą odwzorowywać rzeczywisty ruch statku.

Dlatego też autor proponuje nową metodę wyznaczania zadanej trajektorii statku opartą o algorytmy ewolucyjne oraz interpolację wielomianową. Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych, gdzie preferencje decydenta znane są „a priori”, pozwala na znalezienie rozwiązania problemu w czasie zbliżonym do rzeczywistego, przez co możliwe jest wyznaczenie manewru antykolizyjnego, uwzględniając zmiany zachodzące w środowisku nawigacyjnym (praca algorytmu w trybie on-line). Wykorzystanie interpolacji wielomianowej do modelowania trajektorii zadanej wraz z weryfikacją możliwości manewrowych statku, umożliwia wyznaczenie gładkiej trajektorii, która może odwzorowywać rzeczywisty ruch statku. Pozwala to na sterowanie jego ruchem z minimalną odchyłką od trajektorii zadanej, bez zbędnych przeregulowań. Jest to istotne przy wyznaczaniu manewru antykolizyjnego w wąskich przejściach (np. porty, cieśniny), gdzie każde odejście od trajektorii zadanej może skutkować kolizją. Możliwość dokładnego odwzorowania trajektorii przez statek umożliwia minimalizację strat energii przy wykonywaniu manewrów.

W dalszej części rozdziału przedstawiony został problem optymalizacji, jak również dokładny opis proponowanej przez autora metody wyznaczania zadanej trajektorii statku. Metoda ta rozpatrywana jest dla statków o napędzie klasycznym (posiadających śruby napędowe oraz ster).

3.1 Definicja problemu optymalizacji

Problem wyznaczania zadanej trajektorii statku jest problemem optymalizacji wielokryterialnej ze względu na występowanie w funkcji celu przeciwstawnych kryteriów. Przy wyznaczaniu zadanej trajektorii statku najistotniejszą kwestią jest znalezienie rozwiązania w czasie zbliżonym do rzeczywistego, dlatego też proponowane jest zastosowanie podejścia opartego na zastąpieniu wielokryterialnej funkcji celu, funkcją jednokryterialną (f) ze współczynnikami wagowymi w_1, w_2, w_3, w_4 (3.1) przedstawioną w pracy (Śmierzchalski, 1998b), zmodyfikowanej o składową uwzględniającą możliwości manewrowe statku (dyn_c).

$$\begin{aligned} f &= econ_c + safe_c \\ econ_c &= w_1 * dist_c + w_2 * time_c + w_3 * smooth_c \\ safe_c &= w_4 * clear_c + dyn_c \end{aligned} \quad (3.1)$$

Funkcja przystosowania składa się z kosztów związanych z ekonomiką żeglugi ($econ_c$) oraz kosztów bezpieczeństwa ($safe_c$).

- a) Koszty ekonomiczne ($econ_c$) - związane są z długością trajektorii ($dist_c$), czasem potrzebnym na jej przebycie ($time_c$), jak również stopniem gładkości ($smooth_c$).

- b) Koszty bezpieczeństwa (*safe_c*) - związane są z bezpiecznym mijaniem ograniczeń nawigacyjnych zarówno statycznych jak i dynamicznych (*clear_c*) oraz realizowalnością trajektorii w odniesieniu do własności dynamicznych statku (*dyn_c*).

Składowa (*clear_c*) definiuje bezpieczną odległość mijania ograniczeń nawigacyjnych. Jeżeli trajektoria narusza ograniczenia nawigacyjne wartość funkcji przystosowania wzrasta. Wraz ze wzrostem odległości od mijanych przeszkód, maleje ryzyko wystąpienia kolizji, a więc wartość funkcji przystosowania również maleje (Śmierchalski, 1998b).

W przypadku kiedy trajektoria nie spełnia ograniczeń wynikających z własności dynamicznych statku, wartość funkcji przystosowania zostaje zwiększona o wartość składowej (*dyn_c*). W rozpatrywanych przypadkach, wartość funkcji celu trajektorii dopuszczalnej nie przekracza wartości 400, dlatego też wartość składowej (*dyn_c*) została ustalona na wartość 500. Dzięki temu nawet najgorsza ścieżka dopuszczalna posiada lepszą wartość funkcji przystosowania niż ta, która nie spełnia ograniczeń wynikających z własności dynamicznych statku.

3.2 Wyznaczanie trajektorii zadanej metodą ewolucyjną

Sposób wyznaczania trajektorii zadanej przy zastosowaniu klasycznego jednopopulacyjnego algorytmu ewolucyjnego został przedstawiony na Rysunek 12. Algorytm tworzy w sposób losowy populację początkową. Następnym krokiem jest etap preselekcji (reprodukcji), gdzie przy pomocy określonej metody, osobniki (trajektorie) wybierane są do populacji tymczasowej. Następnie osobniki te podlegają działaniu operatorów genetycznych krzyżowania i mutacji. Tak zmodyfikowane osobniki podlegają ocenie i określona zostaje wartość ich funkcji przystosowania. Na tym etapie trajektorie weryfikowane są pod względem ich fizycznej realizowalności wynikającej z ograniczeń dynamiki statku i uwzględniane jest to w wartości funkcji przystosowania. Po wyliczeniu wartości funkcji przystosowania osobników następuje proces postselekcji (sukcesji), a więc wyboru osobników do nowej populacji bazowej. Etapy te są powtarzane aż do osiągnięcia przez algorytm warunku końcowego.

W pracy (Śmierchalski i inni, 2013 b) przedstawiony został wielopopulacyjny algorytm ewolucyjny poszukiwania trajektorii zadanej statku. Złożony jest on z czterech populacji pracujących równolegle, które poszukują trajektorii optymalnej w sposób identyczny jak w przypadku algorytmu jednopopulacyjnego. Różnica występuje jednak na etapie postselekcji, gdzie najlepsze osobniki z danej populacji migrują do populacji sąsiednich. Dodatkowo istnieje również piąta populacja elitarna, do której przekazywane są osobniki najlepsze ze wszystkich pozostałych i nie występuje w niej etap ewolucji. Rozwiązaniem końcowym jest najlepsze rozwiązanie z populacji elitarniej. Jak wskazują autorzy, zastosowanie algorytmu ewolucyjnego w wersji wielopopulacyjnej pozwala na uzyskanie lepszych rezultatów od wersji jednopopulacyjnej przy nieznacznie zwiększonym nakładzie obliczeniowym. Do wyznaczania trajektorii zadanej statku, w pracy proponuje się zastosować wariant jednopopulacyjny oraz wielopopulacyjny.

W podrozdziale (3.2.1) przedstawione zostaną w sposób szczegółowy etapy pracy algorytmu jednopopulacyjnego, następnie przedstawiony zostanie wariant wielopopulacyjny oraz sposób sterowania naciskiem selektywnym w metodzie.

3.2.1 Jednopopulacyjny algorytm ewolucyjny wyznaczania zadanej trajektorii statku

Jednopopulacyjny algorytm ewolucyjny przedstawiony został na Rysunek 12 i złożony jest z następujących po sobie etapów: reprodukcji, operacji genetycznych, oceny osobników, sukcesji oraz sprawdzenia warunku końcowego. Poniżej wyszczególniony zostanie każdy z etapów wraz z opisem wykorzystywanych metod.

3.2.1.1 Preselekcja (reprodukcja)

Preselekcja odpowiedzialna jest za sposób doboru osobników z populacji bazowej do populacji tymczasowej. Przegląd metod preselekcji w ewolucyjnej metodzie poszukiwania ścieżki przejścia obiektu ruchomego został przedstawiony w pracy (Kolendo i inni, 2011 c). W pracy tej badane były klasyczne mechanizmy preselekcji stosowane w algorytmach ewolucyjnych (Goldberg, 1989) (Arabas, 2001), w kierunku przydatności w metodzie wyznaczania zadanej trajektorii statku. Do metod preselekcji zalicza się:

- ruletka proporcjonalna

W metodzie ruletki proporcjonalnej osobnik wybierany jest z populacji bazowej na podstawie prawdopodobieństwa, które bazuje na stosunku wartości funkcji przystosowania pojedynczego osobnika (f_i) do wartości funkcji przystosowania całej populacji. Prawdopodobieństwo (p_i) wylosowania poszczególnych osobników określa zależność, gdzie n oznacza ilość osobników w populacji, natomiast i jest numerem osobnika:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (3.2)$$

- selekcja turniejowa

W metodzie selekcji turniejowej w pierwszym etapie określa się liczbę osobników biorących udział w turnieju. Grupa osobników biorących udział w turnieju jest wybierana z populacji bazowej metodą ruletki proporcjonalnej. Najlepszy z tej grupy przechodzi do populacji tymczasowej. Proces ten powtarza się do momentu uzyskania określonej liczby osobników w populacji tymczasowej.

- selekcja rangowa

Selekcja rangowa odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym wszystkie osobniki otrzymują rangę odpowiadającą wartości ich funkcji przystosowania. W przypadku, kiedy wartość funkcji przystosowania kilku osobników jest identyczna, w zależności od rozwiązania, osobniki te mają tą samą lub różną wartość rangi. W drugim etapie definiuje się funkcję, która na podstawie rangi określa prawdopodobieństwo wylosowania i na tej podstawie osobniki wybierane są do populacji tymczasowej.

- selekcja deterministyczna

Selekcja deterministyczna (DSS- Deterministic Sampling Selector) odbywa się również w dwóch etapach. W pierwszym liczona jest oczekiwana liczba kopii danego osobnika. Osobniki o najwyższej liczbie oczekiwanych kopii wchodzi w skład populacji tymczasowej w ilości równej liczbie całkowitej oczekiwanej liczby kopii. Pozostałą część populacji sortuje się względem wielkości ich części dziesiętnej i te o największej wartości uzupełniają populację tymczasową.

- selekcja stochastyczna

Selekcja stochastyczna (SRS- Stochastic Reminder Sampling) odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym liczona jest oczekiwana liczba kopii danego osobnika. Osobniki o najwyższej liczbie oczekiwanych kopii określają liczbę osobników w populacji tymczasowej równą liczbie całkowitej oczekiwanej liczby kopii. Następnie część dziesiętna oczekiwanej liczby kopii stanowi prawdopodobieństwo wylosowania poszczególnego osobnika i na tej podstawie uzupełniana jest pozostała część populacji tymczasowej.

- selekcja losowa (uniform)

W metodzie tej przyjmuje się, że każdy osobnik ma jednakowe prawdopodobieństwo wylosowania. Prawdopodobieństwo obliczane jest według zależności:

$$p_i = \frac{1}{n} \quad (3.3)$$

gdzie: n jest to liczba osobników w populacji bazowej.

Na podstawie badań przeprowadzonych w pracy (Kolendo i inni, 2011 c) stwierdzono, że dla problemu poszukiwania zadanej trajektorii statku najniższe wartości funkcji przystosowania osiągnane były dla selekcji turniejowej. Dlatego też taki rodzaj selekcji będzie używany dla zaproponowanych algorytmów.

3.2.1.2 Operatory genetyczne

Operatory genetyczne modyfikują trajektorie populacji tymczasowej przy użyciu operatorów krzyżowania oraz mutacji. W ewolucyjnej metodzie wyznaczania zadanej trajektorii statku wykorzystywanych jest kilka operatorów krzyżowania oraz mutacji lub naprawy. W pojedynczej generacji wybierany jest w sposób losowy jeden z operatorów krzyżowania i jeden z operatorów mutacji lub naprawy, który wykonuje operacje genetyczne na populacji tymczasowej. Szczegółowy opis operatorów krzyżowania i mutacji w ewolucyjnej metodzie planowania ścieżki przejścia został przedstawiony w pracach (Śmierzchalski, 1998b) (Kolendo i inni, 2011 c). W pracy wykorzystywano dwa rodzaje krzyżowania:

- krzyżowanie jednopunktowe
Operator wybiera losowe punkty zwrotu dwóch trajektorii i początek pierwszej trajektorii łączy z końcem drugiej, a początek drugiej łączy z końcem pierwszej. W ten sposób zmodyfikowane zostają 2 ścieżki populacji tymczasowej.
- krzyżowanie uśredniające
Trajectoria wynikowa jest kombinacją liniową dwóch trajektorii populacji tymczasowej z określonym lub losowym współczynnikiem wyboru punktu uśredniania, dla każdego punktu trajektorii indywidualnie. Metoda została opisana w sposób szczegółowy w pracy (Kuczkowski i inni, 2012) .

Do mutacji osobników wykorzystywano:

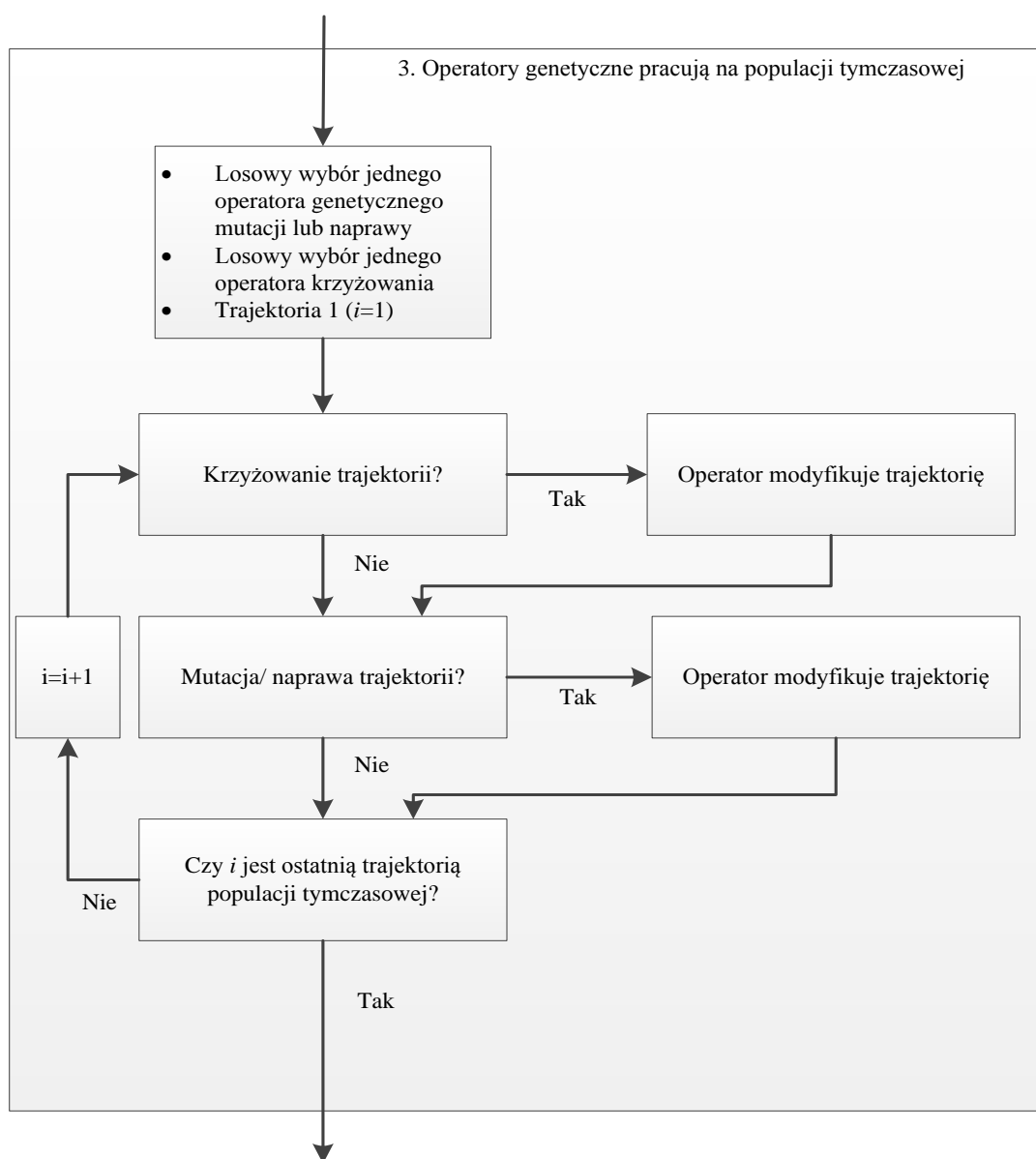
- mutacja twarda
Operator przesuwa w sposób losowy jeden z punktów zwrotu. Po przesunięciu, trajectoria może naruszać przeszkody i być w zbiorze trajektorii niedopuszczalnych,
- mutacja miękka
Operator przesuwa w sposób losowy punkt zwrotu, tak aby po przesunięciu trajectoria była dalej bezkolizyjna i znajdowała się w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych,
- mutacja prędkości
Operator modyfikuje w sposób losowy prędkość zadaną statku w określonych granicach (+/- 2 węzły w odniesieniu do aktualnej prędkości zadanej).

Operatory naprawy trajektorii:

- dodanie genu
Operator dodaje punkt zwrotu w segmencie trajektorii, który narusza przeszkodę,
- zmiana pozycji genów
Operator zamienia kolejność dwóch kolejnych punktów zwrotu trajektorii,
- usuwanie genu
Operator wygładza trajektorię poprzez usunięcie losowego punktu zwrotu,
- reperacja osobnika
Działaniom tego operatora podlegają trajektorie (osobniki) niedopuszczalne (wchodzące w kontakt z co najmniej jednym z ograniczeń). W określonej odległości od punktu przecięcia trajektorii z ograniczeniem tworzony jest nowy punkt zwrotu, dający początek odcinkom obejścia ograniczenia. Operator kierując trajektorią wzdłuż krawędzi ograniczenia tworzy kolejne odcinki pomiędzy punktami zwrotu aż do momentu napotkania punktu przecięcia się z naprawianą

trajektorią lub przekroczenia dopuszczalnej, maksymalnej liczby punktów zwrotu dla pojedynczej trajektorii. Określony punkt przecięcia jest końcowym punktem zwrotu odcinków obejścia ograniczenia. Nowo powstały element trajektorii jest dodawany do naprawianej trajektorii, a odcinki przecinające przeszkodę są usuwane. W ten sposób trajektoria niebezpieczna przechodzi do zbioru trajektorii bezpiecznych.

W pracy zostały wykorzystane wszystkie operatory genetyczne opisane powyżej z wyłączeniem operatora reperacji osobnika dla metod wykorzystujących interpolację wielomianową. Sposób wyboru operatorów genetycznych w trakcie procesu ewolucji został przedstawiony na Rysunku 14 (Etap 3 z Rysunku 12).



Rysunek 14. Sposób wyboru operatorów genetycznych w danej generacji

W każdej generacji wybierany jest jeden operator krzyżowania oraz jeden operator mutacji lub naprawy. Następnie na podstawie prawdopodobieństwa krzyżowania i prawdopodobieństwa mutacji sprawdza się czy dana trajektoria ma zostać zmodyfikowana. Proces ten powtarzany jest dla wszystkich osobników w populacji tymczasowej.

3.2.1.3 Ocena osobników

Po modyfikacji trajektorii przez operatory genetyczne każda ze ścieżek zostaje oceniona na podstawie funkcji przystosowania przedstawionej w równaniu (3.1). Przed wyliczeniem wartości funkcji przystosowania odbywa się weryfikacja każdej trajektorii w odniesieniu do własności dynamicznych statku. Jeżeli trajektoria nie jest możliwa do realizowania przez statek, wartość funkcji przystosowania zostaje zmodyfikowana zgodnie ze składową dyn_c i ścieżka zostaje dodana do zbioru niedopuszczalnych.

3.2.1.4 Postselekcja (Sukcesja)

Po etapie oceny występuje etap postselekcji. Metoda postselekcji określa sposób tworzenia nowej populacji bazowej. Przegląd metod postselekcji w ewolucyjnej metodzie wyznaczania trajektorii zadanej statku został przedstawiony w pracy (Kolendo i inni, 2011 c). Rozróżnia się 3 główne metody postselekcji:

- Sukcesja z całkowitym zastępowaniem
W tym rozwiązaniu populacja bazowa jest całkowicie zastępowana przez populację tymczasową zmodyfikowaną przez operatory genetyczne,
- Sukcesja z częściowym zastępowaniem
Populacja bazowa zastępowana jest w określonym stopniu przez populację tymczasową. Stopień oraz rodzaj wymiany definiowany jest przez użytkownika. W takim wariantcie określona liczba osobników z populacji tymczasowej zostaje dodana do nowej populacji bazowej i na podstawie określonego rodzaju wymiany usuwana jest nadmiarowa liczba osobników. Istnieją różne rodzaje wymiany osobników np. wymiana poprzez usuwanie osobników najgorzej przystosowanych, usuwanie losowych osobników czy też osobników rodzicielskich,
- Sukcesja elitarna
Jest to szczególny przypadek sukcesji z częściowym zastępowaniem. Z populacji tymczasowej wybierana jest określona liczba najlepszych osobników, które dodawane są do populacji bazowej. Następnie z populacji bazowej usuwa się najgorzej przystosowane osobniki,
- Sukcesja elitarna w ujęciu wielopopulacyjnym
W odróżnieniu od pozostałych w metodzie tej występuje kilka niezależnie ewoluujących populacji poszukujących rozwiązania globalnego. Każda z tych populacji wykorzystuje sukcesję z częściowym zastępowaniem. Następnie najlepsze osobniki ze wszystkich populacji dodawane są do populacji elitarniej.

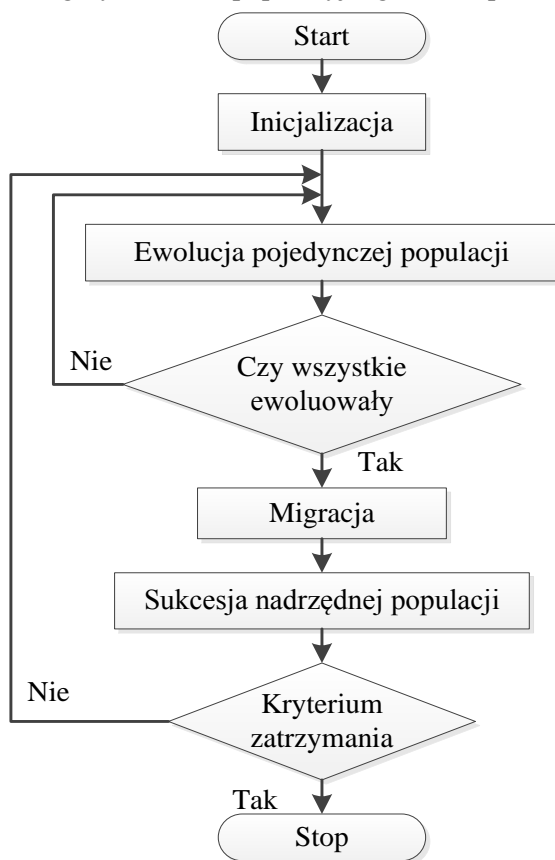
W pracy wykorzystano sukcesję elitarną w ujęciu jednopopulacyjnym oraz wielopopulacyjnym.

3.2.1.5 Warunek końcowy zakończenia procesu ewolucji

Generacje algorytmu powtarzane są aż do osiągnięcia określonego warunku końcowego. Może być to maksymalna ilość generacji, określony stopień zbieżności algorytmu czy też uzyskiwanie określonego stopnia rozwiązań o niższych wartościach funkcji przystosowania w kolejnych populacjach. Szczegóły dotyczące rodzajów warunków końcowych zostały przedstawione w pracach (Goldberg, 1989) (Arabas, 2001). Badania wykazały (Śmierzchalski, 1998b) (Kolendo i inni, 2011 a) (Kolendo i inni, 2011 b,) że zastosowanie maksymalnej ilości generacji, jako warunku końcowego, pozwala na znalezienie bezpiecznej trajektorii w czasie zbliżonym do rzeczywistego, dlatego też w proponowanej metodzie zastosowano taki warunek końcowy zakończenia procesu ewolucji.

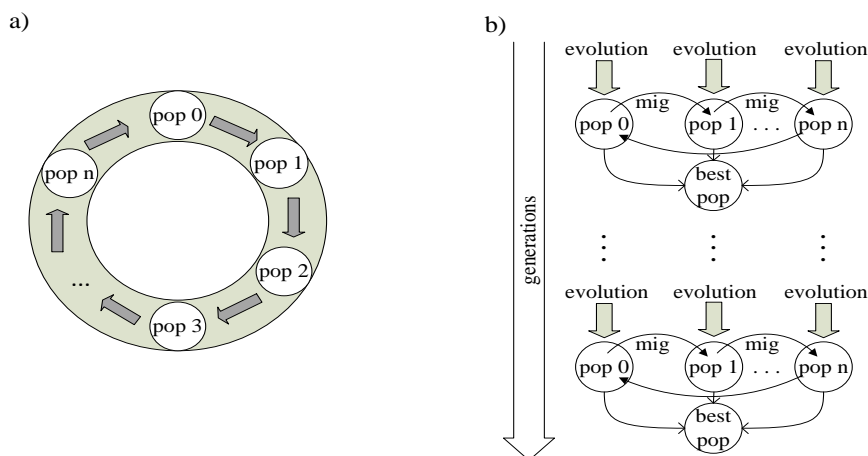
3.2.2 Wielopopulacyjny algorytm wyznaczania trajektorii zadanej statku

Do rozwiązania zadania wyznaczania zadanej trajektorii statku proponowane jest zastosowanie algorytmu ewolucyjnego w wariancie wielopopulacyjnym. W pracy wykorzystano wielopopulacyjny algorytm Distributed Evolutionary Algorithm (DEA) zaproponowany w (Wall, 1996) (Śmierchalski i inni, 2013 b). Schemat działania algorytmu wielopopulacyjnego został przedstawiony na Rysunku 15.



Rysunek 15. Algorytm wielopopulacyjny wyznaczania zadanej trajektorii statku (Śmierchalski i inni, 2013 b)

Po inicjalizacji 4 niezależnych populacji początkowych, w każdej z nich wykonywany jest proces ewolucji odpowiedni dla algorytmu jednopopulacyjnego. W następnym kroku następuje migracja osobników pomiędzy populacjami, gdzie do sąsiedniej populacji przekazywana jest określona liczba najlepszych osobników (Rysunek 16).



Rysunek 16. Sposób migracji osobników między populacjami (Śmierchalski i inni, 2013 b)

Po tym procesie następuje sukcesja najlepszych osobników ze wszystkich populacji do populacji elitarniej. Populacja ta nie podlega ewolucji, osobniki są w niej sortowane od najlepszego do najgorszego. Najlepszy osobnik populacji elitarniej jest rozwiązaniem końcowym. Proces ten jest powtarzany aż do osiągnięcia warunku końcowego. Struktura algorytmu oraz dobór parametrów zostały przedstawione przez autorów w pracy (Śmierzchalski i inni, 2013 b). Na podstawie badań (Śmierzchalski i inni, 2013 b) można stwierdzić, że algorytm wielopopulacyjny wymaga mniejszej ilości generacji aby uzyskiwać stabilne rozwiązanie końcowe (około 100 w porównaniu do 300-400 dla wariantu jednopopulacyjnego).

3.2.3 Sterowanie naciskiem selektywnym

Jednym z najistotniejszych aspektów w ewolucyjnej metodzie poszukiwania trajektorii zadanej statku jest odpowiedni sposób sterowania naciskiem selektywnym. W trakcie procesu obliczeniowego algorytm eksploruje przestrzeń rozwiązań i eksploatuje znalezione ekstrema lokalne w celu znalezienia rozwiązania globalnie optymalnego. Nacisk selektywny pozwala na kontrolę równowagi pomiędzy zdolnością eksploracji przestrzeni rozwiązań, a eksploatacją ekstremów lokalnych. Według definicji „*Nacisk selektywny algorytmu to tendencja do poprawiania średniej wartości przystosowania populacji bazowej. Jest on tym większy, im większa jest wartość oczekiwana liczby kopii lepszego osobnika w porównaniu z liczbą kopii osobnika gorszego*” (Arabas, 2001). Niewielki nacisk selektywny zwiększa zdolności eksploracyjne algorytmu, jednakże powoduje zmniejszenie jego zdolności eksploatacyjnych. Zbyt duży nacisk selektywny może prowadzić do przedwczesnej zbieżności i „utykanie” w minimach lokalnych, powodując w rezultacie pogorszenie zdolności przeszukiwania przestrzeni rozwiązań. Sterowanie naciskiem selektywnym może odbywać się m. in. poprzez odpowiedni dobór metod preselekcji, postselekcji, operatorów genetycznych, skalowanie funkcji przystosowania jak również niszowanie. Badania metod sterowania naciskiem selektywnym w problemie wyznaczania zadanej trajektorii statku zostały przedstawione w pracach (Kolendo i inni, 2011 a) (Kolendo i inni, 2011 b) (Kolendo i inni, 2011 d) (Śmierzchalski i inni, 2013 c).

Metody preselekcji oraz postselekcji definiują sposób wymiany osobników i tworzenia populacji tymczasowej oraz bazowej. Poprzez sterowanie stopniem (liczbą osobników) i rodzajem wymiany osobników (zastępowanie najgorszych osobników, osobników najlepszych, rodzicielskich itp.) wpływa się bezpośrednio na zwiększenie lub zmniejszenie nacisku selektywnego. W większości przypadków przyjmuje się jednak stały schemat losowania osobników do populacji tymczasowej jak również tworzenia nowej populacji bazowej, dlatego też w trakcie trwania procesu obliczeniowego schemat losowania osobników pozostaje niezmienny (nie wpływa na zmianę nacisku selektywnego).

Nacisk selektywny może być również kontrolowany poprzez operatory genetyczne. Mutacja pozwala na „opuszczanie” minimów lokalnych, a więc zwiększenie eksploracji przestrzeni rozwiązań, natomiast krzyżowanie na ich eksploatację. W proponowanej metodzie prawdopodobieństwo wylosowania poszczególnych operatorów jest stałe, dlatego też nie ma wpływu na zmiany nacisku selektywnego.

Kolejnym sposobem sterowania naciskiem selektywnym jest skalowanie funkcji przystosowania. Zastosowanie skalowania funkcji przystosowania w ewolucyjnej metodzie wyznaczania zadanej trajektorii statku zostało przedstawione w pracach (Kolendo i inni, 2011 a) (Kolendo i inni, 2011 b). Na podstawie badań można stwierdzić, iż wpływ skalowania (np. liniowego lub potęgowego) w niewielkim stopniu wpływa na zwiększenie zdolności eksploracyjnych algorytmu. Związane jest to z faktem, iż skalowanie realizowane jedynie w odniesieniu do wartości funkcji przystosowania pojedynczych trajektorii. W przypadku takiego podejścia osłabia się konkurencyjność najlepiej przystosowanych, natomiast zwiększa średnich.

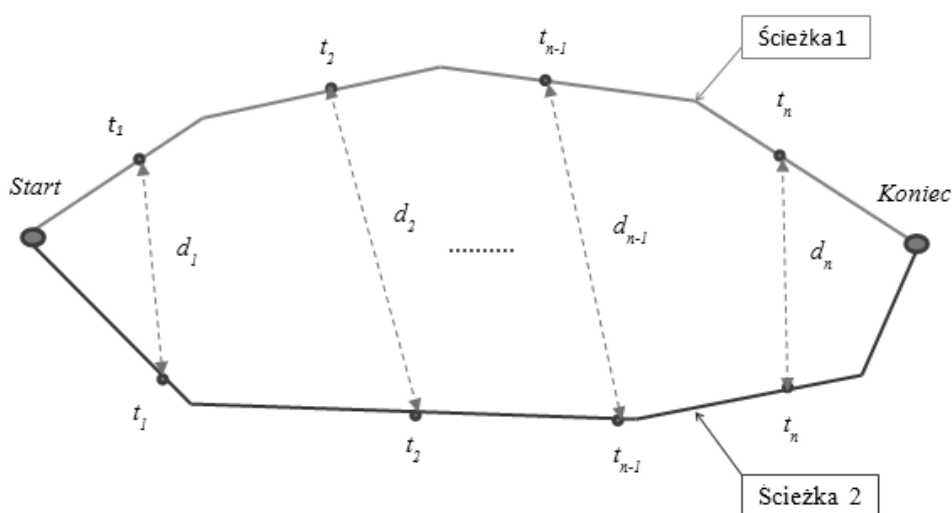
Korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie mechanizmu niszowania (Śmierzchalski i inni, 2013 c). Jest to również jeden ze sposobów skalowania funkcji przystosowania, jednakże skalowanie realizowane jest w odniesieniu do odległości pomiędzy trajektoriami, a nie w odniesieniu do wartości funkcji przystosowania. Pozwala to na utrzymanie różnorodności populacji, przez co zwiększa się

zdolności eksploracyjne algorytmu. Odległość pomiędzy dwoma trajektoriami (l_j) wyliczana jest na podstawie równania (3.4) (Śmierchalski i inni, 2013 c).

$$l_j = \sum_{i=1}^n d_i \quad (3.4)$$

gdzie: l_j – odległość pomiędzy dwoma trajektoriami,
 d_i – jest długością poszczególnych odcinków pomiędzy trajektoriami,
 n – ilość odcinków, które używa się do określania odległości pomiędzy trajektoriami,

Sposób wyliczania odległości pomiędzy trajektoriami zaproponowany przez autorów w pracy (Śmierchalski i inni, 2013 c) został przedstawiony na Rysunku 17.



Rysunek 17. Sposób wyznaczania odległości pomiędzy trajektoriami (Śmierchalski i inni, 2013 c)

Dla dwóch trajektorii wyznaczone zostają miejsca, w których będzie znajdował się statek własny w określonych chwilach czasu t_1, t_2, \dots, t_n . Następnie wyznacza się odległości składowe d_1, d_2, \dots, d_n dla odpowiadających sobie chwil czasu. Suma odległości składowych jest całkowitą odległością l_j pomiędzy ścieżkami.

Mechanizm niszczenia grupuje trajektorie „podobne”, w sensie odległości fizycznej w tzw. nisze. Następnie obniża konkurencyjność rozwiązań „podobnych”, czyli znajdujących się w tej samej niszy. Pozwala to na zwiększenie konkurencyjności rozwiązań o gorszej wartości funkcji przystosowania znajdujących się „dalej” (w sensie odległości fizycznej) od najlepszych w danej chwili czasu. Realizuje się to poprzez modyfikację funkcji przystosowania według wzoru (3.5) (Wall, 1996).

$$f' = \frac{f}{\sum_{j=1}^m s(l_j)} \quad (3.5)$$

$$s(l_j) = \begin{cases} l_j < \sigma \rightarrow 1 - \left(\frac{l_j}{\sigma}\right) \\ l_j \geq \sigma \rightarrow 0 \end{cases}$$

gdzie: f' - zmodyfikowana funkcja przystosowania,
 f - bazowa funkcja przystosowania,
 m - ilość osobników w populacji,
 l_j - odległość pomiędzy dwoma osobnikami (trajektoriami),
 σ - rozmiar niszy,
 $s(l_j)$ – wypadkowa odległość pomiędzy daną trajektorią, a pozostałymi trajektoriami znajdującymi się w tej samej niszy,

Warunkiem koniecznym wykonania skalowania funkcji przystosowania według wzoru (3.5) jest obecność co najmniej 2 nieidentycznych trajektorii w niszy. Dlatego też suma wartości $s(l_j) > 0$.

Mechanizm niszowania zapobiega koncentracji rozwiązań wokół jednego z ekstremów, ponieważ trajektorie o gorszej wartości funkcji przystosowania, oddalone od aktualnie najlepszego rozwiązania, będą lepiej oceniane niż te, które leżą w jego bliskim sąsiedztwie. Pozwala to na zachowanie większej różnorodności w populacji. Dobór parametrów mechanizmu niszowania został przedstawiony w pracy (Śmierchalski i inni, 2013 c). Badania (Śmierchalski i inni, 2013 c) pokazują, że ten sposób sterowania naciskiem selektywnym, umożliwia osiągnięcie mniejszych końcowych wartości funkcji przystosowania dla trajektorii w odniesieniu do pozostałych metod. Dlatego też został on wykorzystany w metodzie zaproponowanej przez autora.

3.3 Modelowanie trajektorii zadanej z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z dynamiki statku

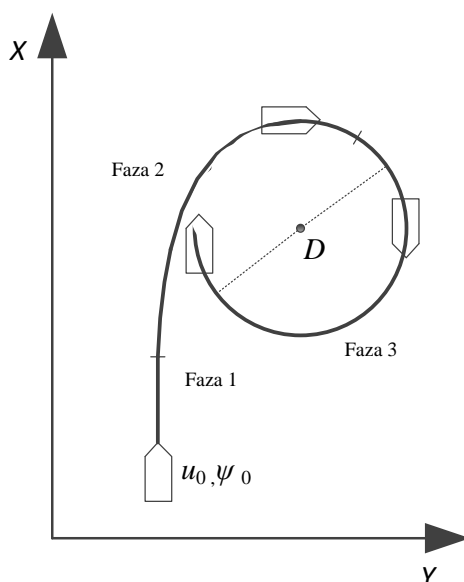
Metoda modelowania określa kształt trajektorii zadanej pomiędzy poszczególnymi punktami zwrotu. Wyznaczona trajektoria powinna odzwierciedlać rzeczywisty ruch statku, uwzględniając ograniczenia wynikające z jego własności dynamicznych. Do modelowania trajektorii zadanej proponuje się zastosowanie interpolacji wielomianowej (wielomianu trzeciego stopnia „cubic spline”) z dodatkową weryfikacją o ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku. Modelowanie trajektorii zadanej przy użyciu „cubic spline” zostało opisane w podrozdziale 2.1.2. Natomiast sposób weryfikacji o własności dynamiczne statku zostanie przedstawiony w 3.3.1.

Modelowanie trajektorii zadanej następuje każdorazowo po wyznaczeniu przez AE określonej ilości punktów zwrotu (5-8 punktów). Trajektoria zadana zostaje utworzona z kilku wielomianów połączonych ze sobą w punktach zwrotu. Ilość wielomianów równa jest liczbie segmentów pomiędzy nimi. Aby zachować warunki ciągłości położenia, prędkości oraz przyspieszenia wzdłuż trajektorii, wyznacza się wartości współczynników (dla współrzędnej x : a_0, \dots, a_3 oraz y : b_0, \dots, b_3 przedstawionych we wzorze (2.2) dla każdego wielomianu, na podstawie warunków ograniczających przedstawionych we wzorach (2.4)-(2.11). Współczynniki otrzymywane są poprzez rozwiązanie równania macierzowego (2.17).

Proces weryfikacji trajektorii o ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku następuje już po jej zamodelowaniu i nie modyfikuje kształtu trajektorii. Określa on jedynie czy jest ona możliwa do zrealizowania przez statek. Proces ten realizowany jest w trakcie obliczania wartości funkcji przystosowania (zgodnie ze wzorem (3.1)). Jeżeli trajektoria jest możliwa do zrealizowania, składowa funkcja przystosowania $dyn_c=0$. Jeżeli natomiast zostaje uznana za niedopuszczalną to dyn_c zostaje zwiększone o stałą wartość, przez co jest automatycznie dodawana do zbioru niedopuszczalnych. Poniżej przedstawiony został sposób weryfikacji trajektorii zadanej o własności dynamiczne statku.

3.3.1 Sposób weryfikacji trajektorii o własności dynamiczne statku

Weryfikacja trajektorii zadanej o własności dynamiczne realizowana jest w odniesieniu do prób cyrkulacji statku. Próba cyrkulacji (Rysunek 18) określa rzeczywisty tor ruchu statku przy wykonywaniu manewru zmiany kursu. Próba ta dostarcza również informacji o spadkach prędkości wynikających z wykonywanego manewru. Próba ta powinna być wykonywana w neutralnych warunkach pogodowych dla określonych prędkości początkowych oraz kątów wychylenia steru zarówno na prawą jak i lewą burtę. Dla określonej prędkości początkowej oraz określonego kąta wychylenia steru, rejestrowany jest rzeczywisty tor ruchu statku, aż do momentu wpłynięcia statku na kurs przy którym manewr się rozpoczął (Wełnicki, 1989) (Rysunek 18).

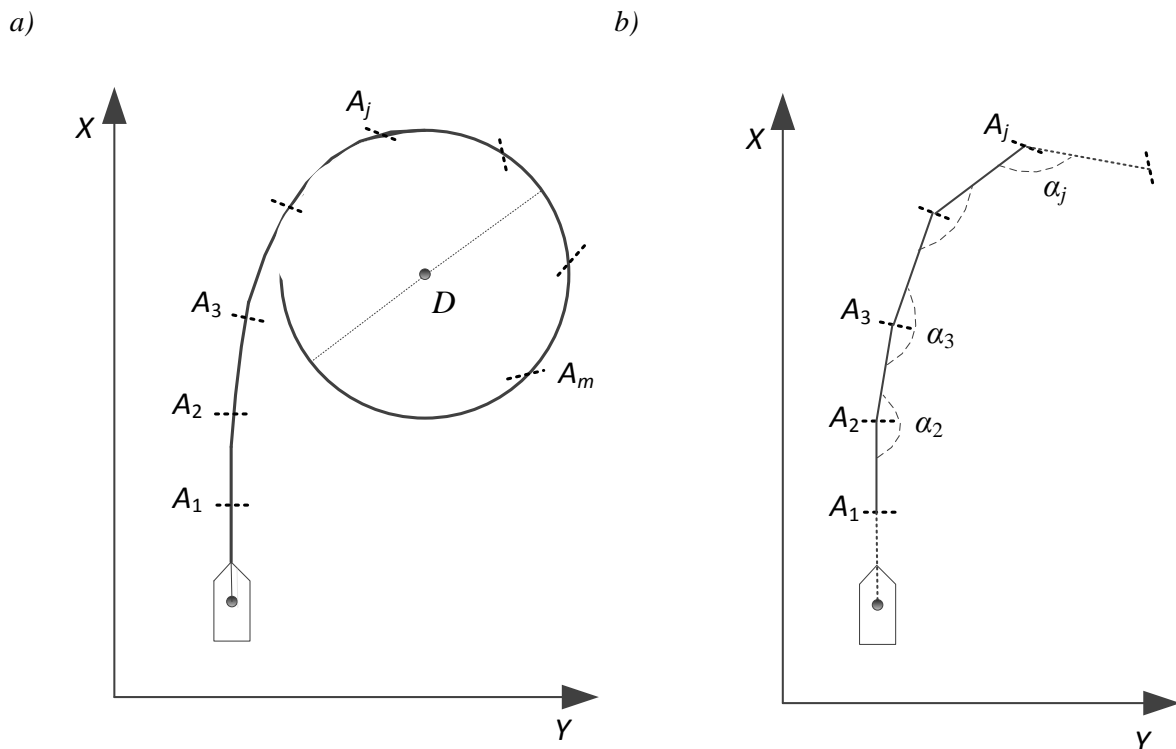


Rysunek 18. Próba cyrkulacji statku

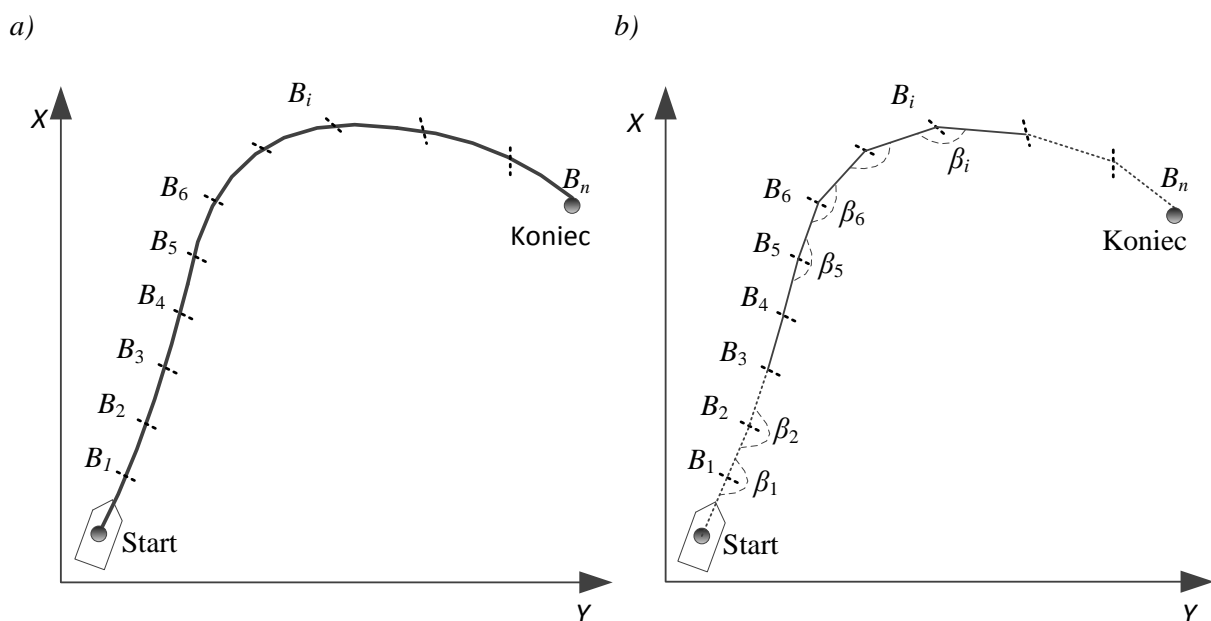
Próba cyrkulacji składa się z 3 faz. Faza 1 trwa od chwili wychylenia steru do ustania przesunięcia w stronę przeciwną (Wełnicki, 1989). Faza druga rozpoczyna się w chwili zakończenia fazy pierwszej i trwa aż do chwili kiedy siły hydrostatyczne oddziałujące na statek osiągają stan równowagi (stała prędkość kątowa zwrotu oraz promień krzywizny). Faza 3 rozpoczyna się w chwili zakończenia fazy drugiej i jest ruchem ustalonym po kole.

W pracy zaproponowano weryfikowanie trajektorii zadanej poprzez porównanie jej z trajektoriami uzyskanymi z prób cyrkulacji. Wzdłuż całej trajektorii określa się wartość prędkości aktualnej (u_a), uwzględniając spadki prędkości wynikające z wykonywanych manewrów, co umożliwia precyzyjne określenie położenia statku własnego w określonej chwili czasu. Próby cyrkulacji zostały wykonane dla manewrów na prawą i lewą burtę, dla następujących kątów wychylenia steru: 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 7°, 8°, 9°, 10° dla różnych prędkości początkowych: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 węzłów.

Każdą z prób cyrkulacji podzielono na równe odcinki ($A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_m$), gdzie dla każdego z nich wyznaczono kąty pomiędzy nimi ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_{m-1}$) (Rysunek 19). Trajektorię zadaną (Rysunek 20) również podzielono na równe odcinki ($B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_n$) z odpowiadającymi im kątami ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_{n-1}$). Długość odcinków została dobrana eksperymentalnie na podstawie badań w dalszej części pracy.



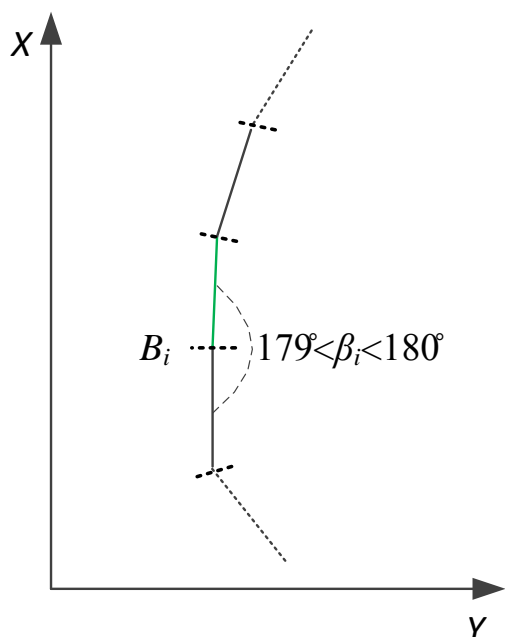
Rysunek 19. Próba cyrkulacji a) rzeczywista b) podzielona na równe odcinki proste



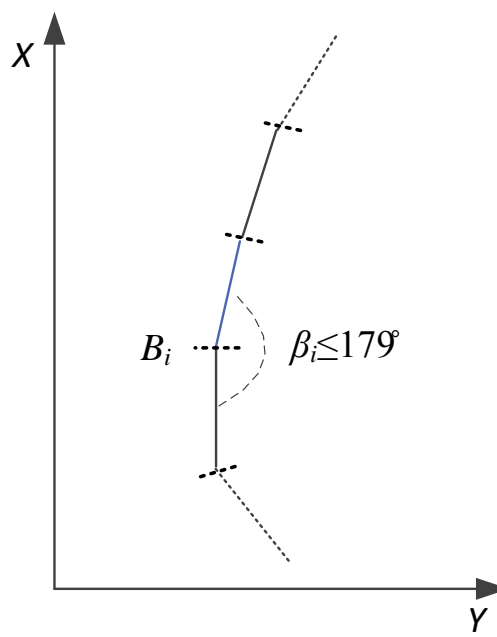
Rysunek 20. Trajektoria zadana a) rzeczywista b) podzielona na równe odcinki proste

Jeżeli kąt β_i pomiędzy poszczególnymi odcinkami zawiera się w przedziale $179^\circ < \beta_i \leq 180^\circ$, czyli nie przekracza 1° , fragment trajektorii uznaje się za linię prostą. Konieczne jest przyjęcie takiego założenia ze względu na fakt, że trajektoria zamodelowana za pomocą interpolacji wielomianowej nigdy nie będzie odzwierciedlać odcinka prostego (Rysunek 21).

a)



b)

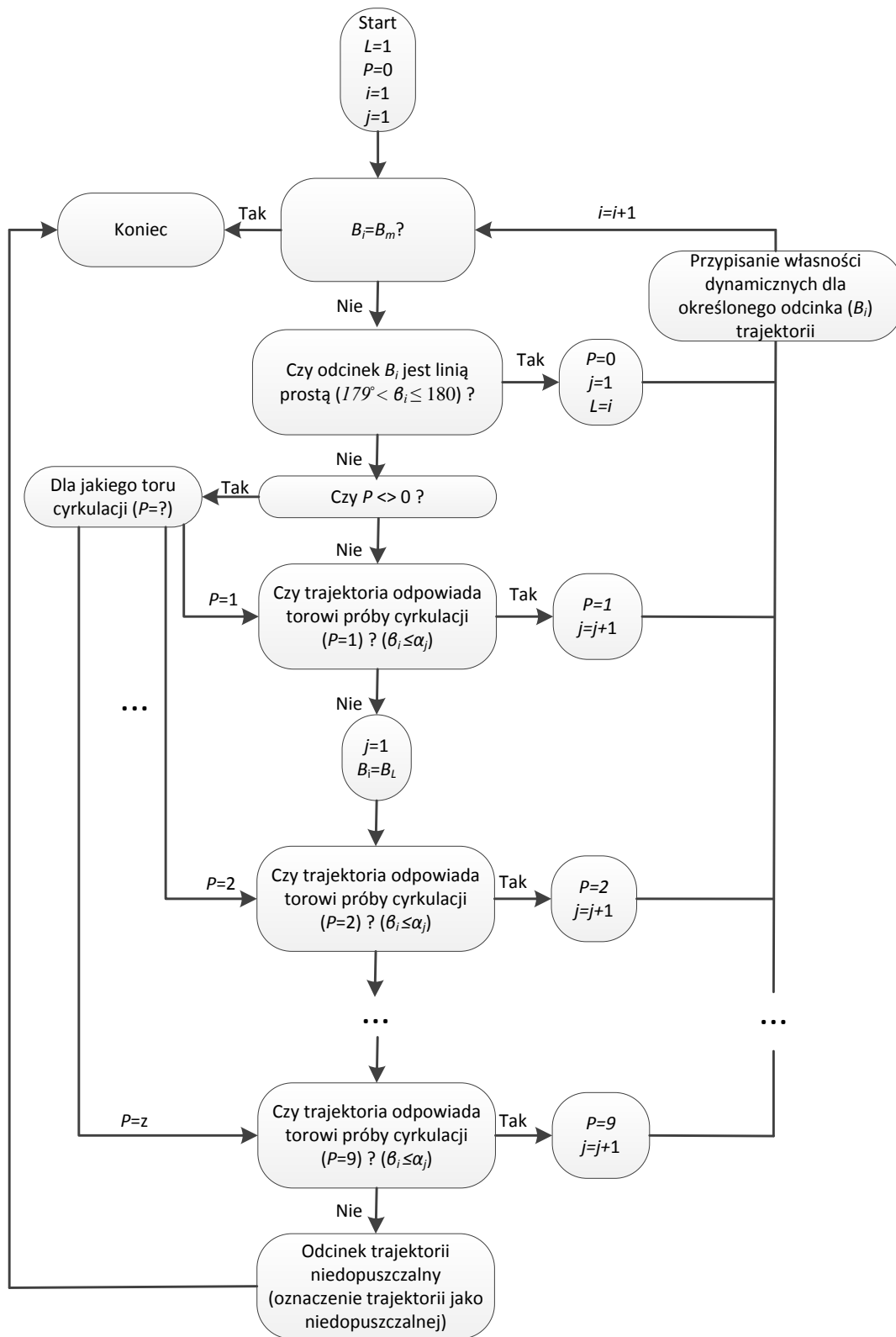


Rysunek 21. Fragment trajektorii a) uznany za odcinek prosty, b) uznany za kontynuację określonej próby cyrkulacji

Algorytm weryfikacji trajektorii o własności dynamiczne przedstawiony zostanie na przykładzie trajektorii zadanej z Rysunku 20. Realizowany jest on w następujący sposób:

- Rozpoczęcie weryfikacji zaczyna się w punkcie B_1 , gdzie wyznacza się kąt β_1 . Przyjmuje się, że w punkcie początkowym aktualna prędkość statku (u_a) wynikająca z określonej prędkości obrotowej śruby głównej, równa jest prędkości zadanej (u_0).
- W pierwszym kroku sprawdza się czy dany fragment trajektorii jest linią prostą (czy kąt $179^\circ < \beta_1 \leq 180^\circ$). Jeżeli uzna się go za odcinek prosty, algorytm przesuwa się do kolejnego odcinka i wyznacza kąt β_2 . Prędkość u_a w danym punkcie nie zostaje zmodyfikowana.
- Jeżeli fragment trajektorii nie jest linią prostą, następuje porównywanie tego fragmentu trajektorii zadanej z poszczególnymi próbami cyrkulacji. Jako pierwsza do porównania wykorzystywana jest próba cyrkulacji, na wybraną burtę, dla prędkości początkowej równej prędkości aktualnej (u_a) oraz dla najmniejszego kąta wychylenia steru (2). Jeżeli dla danej próby cyrkulacji kąt $\alpha_1 < \beta_1$ to fragment uznaje się za realizowalny i następuje sprawdzenie kolejnego odcinka trajektorii (B_2). Porównywanie wykonywane jest aż do momentu ponownego wykrycia prostego odcinka trajektorii i jeżeli warunek $\alpha_j < \beta_i$ jest spełniony, fragment zostaje uznany za możliwy do zrealizowania. Jeżeli natomiast, w którymś z punktów warunek ten nie został spełniony, algorytm wraca do miejsca rozpoczęcia manewru i porównuje go z następną w kolejności próbą cyrkulacji (kąt wychylenia steru 3). Jeżeli warunek $\alpha_j < \beta_i$ nie jest spełniony nawet dla ostatniej próby (kąt wychylenia steru 10) trajektoria zostaje uznana za nierealizowalną.
- W przypadku wykrycia kolejnego odcinka prostego następuje modyfikacja aktualnej prędkości statku (u_a). Przy wykonywaniu manewru zmiany kursu, prędkość aktualna statku zmniejsza się, w stosunku do prędkości zadanej w punkcie zwrotu. Dlatego też w przypadku ruchu statku po prostym odcinku trajektorii nastąpi zwiększenie prędkości wzdłużnej do wartości zadanej, wynikającej z aktualnej prędkości obrotowej śruby napędowej. Zmiana wartości prędkości aktualnej realizowana jest zgodnie z własnościami dynamiki statku.
- Weryfikacja realizowana jest dla całej trajektorii i jeżeli wszystkie kąty $\alpha_j < \beta_i$ to trajektoria zostaje uznana za możliwą do zrealizowania.

Schemat algorytmu służącego do weryfikowania trajektorii zadanej z uwzględnieniem własności dynamicznych statku przedstawiony został na Rysunku 22.



Rysunek 22. Schemat algorytmu weryfikującego trajektorię zadaną

Opis oznaczeń:

P - wskaźnik, w którym zapamiętywany jest numer próby cyrkulacji użytej aktualnie do porównania z trajektorią zadaną, gdzie $P=0,1,2,3,4,5,6,7,8,9$. $P=0$ oznacza linię prostą, $P=1$ jest próbą cyrkulacji dla której kąt wychylenia steru wynosi 2^0 , $P=2$ kąt wychylenia steru 3^0 , natomiast $P=9$ (10^0) dla maksymalnego kąta wychylenia steru. W zależności od kierunku manewru dotyczy prób wykonywanych na lewą lub prawą burtę,

L - wskaźnik początku fragmentu trajektorii, dla którego dopasowywana jest próba cyrkulacji. Wskaźnik ten ustawiany jest gdy kolejny odcinek, który jest sprawdzany, uznaje się za linię prostą,

W obecnie stosowanych w literaturze metodach, w pierwszej kolejności wyznaczone zostają punkty zwrotu, które następnie łączy się liniami prostymi. Modelowanie własności dynamicznych (za pomocą łuków okręgu, bądź też symulacji ruchu modelu matematycznego statku wzdłuż wyznaczonej trajektorii) odbywa się tylko dla najlepszej trajektorii już po zakończeniu procesu obliczeniowego. Wadą takiego rozwiązania jest fakt, że jeżeli trajektorie te po uwzględnieniu własności dynamicznych statku będą naruszać ograniczenia nawigacyjne, konieczne będzie ponowne wyznaczenie trajektorii zadanej. W metodzie ewolucyjnej przy zastosowaniu prezentowanego modelowania ograniczeń, własności dynamiczne będą uwzględniane, dla każdego odcinka, w trakcie trwania procesu obliczeniowego. Eliminuje to powyższy problem gdyż końcowe rozwiązanie będzie spełniało warunki bezpiecznego mijania przeszkód i uwzględnienia własności dynamicznych statku równocześnie, co stanowi nowe rozwiązanie w tego typu zagadnieniach.

Podejście proponowane w pracy pozwala na uwzględnienie pełnej próby cyrkulacji przy weryfikowaniu trajektorii zadanej. W przypadku metody korzystającej z łuków okręgu, do modelowania własności dynamicznych wyznacza się okrąg o stałym promieniu, a więc korzysta się jedynie z 3 fazy próby cyrkulacji gdzie prędkość kątowna zwrotu oraz szybkość liniowa jest stała. Ze względu na to, że modelowana trajektoria zadana ma być gładka, spadki prędkości zostaną zaproksymowane przy wykorzystaniu 1 oraz 2 fazy poszczególnych prób cyrkulacji. Dlatego też możliwe jest dokładniejsze określenie wartości prędkości statku wzdłuż całej trajektorii. Dokładniejsza aproksymacja prędkości pozwala na precyzyjne określenie położenia statku w danej chwili czasowej w ruchu po trajektorii.

3.4 Weryfikacja poprawności wyznaczonych trajektorii przy zastosowaniu modelu statku odniesienia

Weryfikacja poprawności trajektorii wyznaczonych zaproponowanymi metodami, realizowana jest poprzez symulację ruchu statku modelu odniesienia. Do celów badawczych wykorzystano przykładowy kontenerowiec o długości 175m, którego model wraz z dokładnym opisem parametrów został przedstawiony w (Nomoto, 1981). Model wykorzystywany do symulacji pochodzi z biblioteki Marine System Simulator (MSS), pakiet Guidance Navigation and Control (GNC), którego opis implementacji w środowisku Matlab został przedstawiony w (Fossen, 2002).

Wektor sygnałów wejściowych modelu odniesienia statku składa się z dwóch wartości:

- δ_{zad} – zadany kąt wychylenia steru [rad],
- n_{zad} – wartość zadaną prędkości obrotowej wału głównego [obr/min],

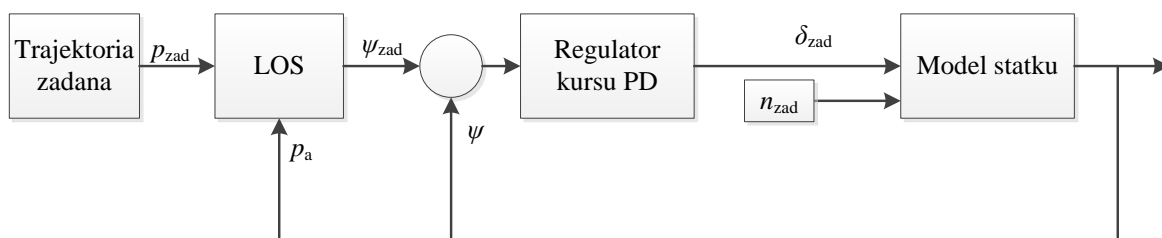
Wektor sygnałów wyjściowych jest pochodną wektora zmiennych stanu $[u, v, r, x, y, \psi, p, phi, \delta, n]$ oraz wartości prędkości wzdłużnej u [m/s], gdzie:

- u – prędkość wzdłużna [m/s],
- v – prędkość poprzeczna [m/s],

- r – prędkość kątowna [rad/s],
- x – położenie względem osi x [m],
- y – położenie względem osi y [m],
- ψ – kurs statku [rad],
- p – [rad/s],
- γ – [rad],
- δ – kąt wychylenia steru [rad],
- n – prędkość obrotowa wału napędowego [obr/min],

Dla wybranego modelu przyjęto maksymalny kąt wychylenia steru oraz prędkość wału napędowego $\delta_{max} = \pm 10^\circ$, $n_{max} = 160$ [obr/min].

Do sterowania ruchem statku wzdłuż trajektorii wykorzystano regulator kursu PD, natomiast do wyznaczenia kursu zadanego zastosowano metodę Line Of Sight (LOS). Poniżej przedstawiony został schemat układu regulacji (Rysunek 23).



Rysunek 23. Układ regulacji do sterowania ruchem statku wzdłuż trajektorii zadanej

Gdzie odpowiednio:

- p_{zad} – współrzędne trajektorii zadanej (x, y) ,
- p_a – współrzędne aktualnego położenia statku (x, y) ,
- ψ_{zad} – kurs zadany [rad],
- ψ – aktualny kurs statku [rad],

3.4.1 Regulator kursu statku i metoda Line Of Sight (LOS)

Do sterowania ruchem statku zastosowano regulator kursu PD. Wartość wyjściowa δ_{zad} z regulatora wyznaczana jest w następujący sposób:

$$\delta_{zad} = -K_p * ((\psi - \psi_{zad}) + T_d * r) \quad (3.4)$$

gdzie:

- K_p – wzmacnienie regulatora,
- T_d – stała czasowa różniczkowania,

Wartości nastaw regulatora $K_p = 1$, $T_d = 10$ zostały dobrane eksperymentalnie dla wykorzystywanego modelu kontenerowca, na podstawie symulacji ruchu statku wzdłuż trajektorii zadanych.

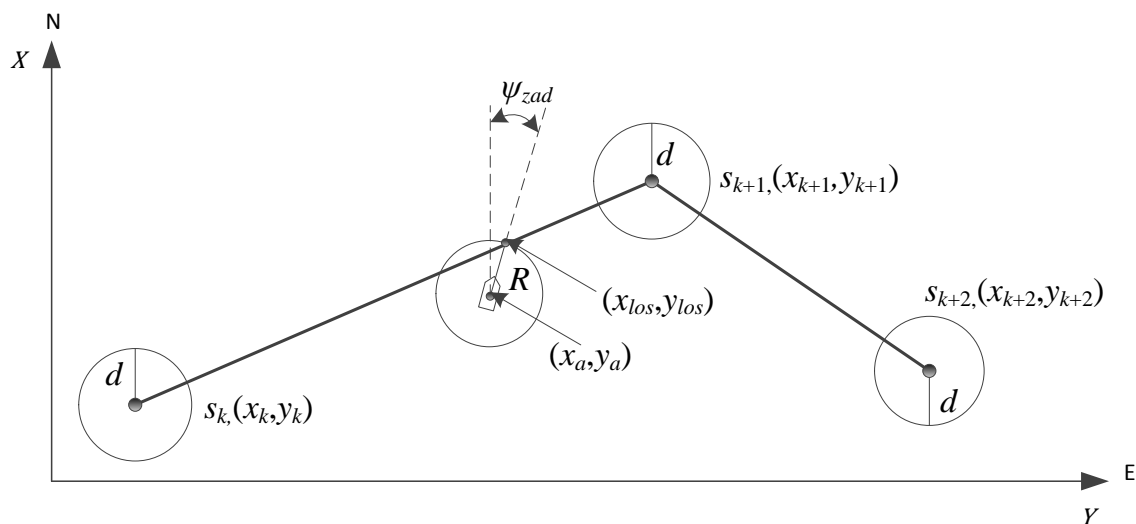
Kurs zadany statku, który jest wartością wejściową dla regulatora PD, wyznaczany jest przy wykorzystaniu metody Line of Sight. W tym celu tworzy się okrąg o promieniu R wokół statku własnego. Okrąg ten przecina trajektorię w określonych punktach (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , gdzie współrzędne jednego z nich traktowane są jako referencyjne (x_{los}, y_{los}) . Kurs zadany (ψ_{zad}) jest aktualnym kursem statku na pozycję punktu (x_{los}, y_{los}) .

$$\psi_{zad} = \arctan\left(\frac{y_{los} - y_a}{x_{los} - x_a}\right) \quad (3.5)$$

gdzie:

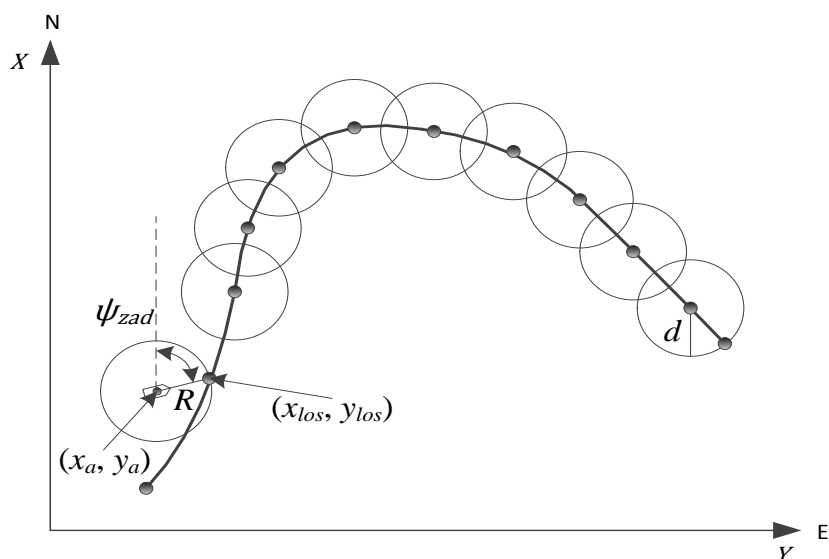
x_a, y_a – aktualne współrzędne położenia statku,

W przypadku metody LOS należy dodatkowo określić promień okręgu wokół punktów zwrotu (d) oraz promień okręgu wokół statku własnego (R). Promień okręgu (d) definiuje odległość przy jakiej następuje zmiana segmentu trajektorii, względem którego ma poruszać się statek. W rozpatrywanym przypadku wartości te zostały dobrane eksperymentalnie: promień okręgu $R = 3,5 * L = 595\text{m}$. (długość statku $L = 175\text{m}$). Na Rysunku 24 przedstawiony został sposób wyznaczania kursu zadanego metodą LOS dla trajektorii złożonej z odcinków.



Rysunek 24. Sposób wyznaczania kursu zadanego w metodzie LOS dla trajektorii złożonej z odcinków prostych

W przypadku trajektorii zamodelowanej przy pomocy interpolacji wielomianowej sposób wyznaczania kursu zadanego będzie identyczny jak w przypadku odcinków prostych (3.5). Różnica w stosunku do podejścia wykorzystującego odcinki proste polega na tym, iż okrąg o promieniu akceptacji (d) wyznaczany jest nie tylko w punktach zwrotu, ale z określonym odstępem- na całej długości trajektorii (Rysunek 25).



Rysunek 25. Sposób wyznaczania kursu zadanego w metodzie LOS dla trajektorii zamodelowanej przy użyciu interpolacji wielomianowej

4 Badania procesu wyznaczania zadanej trajektorii statku z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej

W rozdziale przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu metody ewolucyjnej oraz interpolacji wielomianowej. W punkcie 4.1 przedstawiono badania porównawcze zaproponowanych metod (wariant jednopopulacyjny i wielopopulacyjny), z metodą ewolucyjną wykorzystującą odcinki proste do modelowania trajektorii. Punkt 4.2 zawiera weryfikację poprawności wyznaczonych trajektorii na podstawie symulacji rzeczywistego ruchu statku przy użyciu modelu statku odniesienia.

Badania zostały przeprowadzone dla 10 przykładowych sytuacji nawigacyjnych (dla kilku populacji początkowych) przy wykorzystaniu trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI, których opis przedstawiony został w Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Parametry algorytmów ewolucyjnych do wyznaczania trajektorii statku

Algorytm	Pełna nazwa	Preselekcja	Operatory genetyczne	Sukcesja	Warunek końcowy	Mechanizm niszczenia
JAEWTO	Jednopopulacyjny algorytm ewolucyjny wykorzystujący do modelowania trajektorii zadanej, punkty zwrotu połączone odcinkami prostymi	Selekcja turniejowa	<ul style="list-style-type: none"> Krzyżowanie: jednopunktowe, uśredniające, Mutacja: miękka, twarda, Naprawa: dodania genu, usunięcia genu, zmiana pozycji genu, reperacja osobnika, 	Elitarna	Maksymal na ilość generacji	Tak (100 generacji)
JAEWTI	Jednopopulacyjny algorytm ewolucyjny wykorzystujący do modelowania trajektorii zadanej punkty zwrotu połączone wielomianami trzeciego stopnia „cubic spline”	Selekcja turniejowa	<ul style="list-style-type: none"> Krzyżowanie: jednopunktowe, uśredniające, Mutacja: miękka, twarda, Naprawa: dodania genu, usunięcia genu, zmiana pozycji genu, reperacja osobnika, 	Elitarna	Maksymal na ilość generacji	Tak (100 generacji)
WAEWTI	Wielopopulacyjny algorytm ewolucyjny wykorzystujący do modelowania trajektorii zadanej punkty zwrotu połączone wielomianami trzeciego stopnia „cubic spline”	Selekcja turniejowa	<ul style="list-style-type: none"> Krzyżowanie: jednopunktowe, uśredniające, Mutacja: miękka, twarda, Naprawa: dodania genu, usunięcia genu, zmiana pozycji genu, 	Elitarna w ujęciu wielopopulacyjnym	Maksymal na ilość generacji	Tak (100 generacji)

Parametry algorytmów jak również współczynniki wagowe dla funkcji przystosowania zostały wyznaczone na podstawie badań przeprowadzonych we wcześniejszych pracach (Śmierchalski, 1997) (Kolendo i inni, 2011 a) (Kolendo i inni, 2011 c) (Kolendo i inni, 2011 d) (Kuczkowski i inni, 2012) (Śmierchalski i inni, 2013 b) (Śmierchalski i inni, 2013 c) dodatkowo uwzględniając specyfikę modelowania trajektorii dla algorytmów wykorzystujących interpolację wielomianową (Kolendo i Śmierchalski, 2015 a) (Kolendo i Śmierchalski, 2015 b). Do badań przyjęte zostały następujące parametry algorytmów (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Parametry algorytmów ewolucyjnych do wyznaczania trajektorii statku

Parametr	JAEWTI	JAEWTO	WAEWTI
Ilość osobników w populacji	30	30	30x4
Stopień wymiany	40%	40%	40%
Prawdopodobieństwo mutacji/ naprawy	0.3	0.5	0.5
Prawdopodobieństwo krzyżowania	0.7	0.7	0.7
Stopień migracji	-	-	25%
Niszowanie (ilość generacji)	100	100	100
Warunek końcowy (ilość generacji)	400	300	100

Współczynniki wagowe funkcji celu (3.1) zostały dobrane eksperymentalnie i wynoszą odpowiednio $w_1 = 0.8$, $w_2 = 1.1$, $w_3 = 0.9$, $w_4 = 1.3$.

Operatory genetyczne używane przez algorytmy zostały szczegółowo przedstawione w podrozdziale 3.2.1.2. W przypadku algorytmów korzystających z interpolacji wielomianowej nie stosowano operatora reperacji osobnika. Ze względu na brak operatora reperacji, konieczne było zwiększenie wartości prawdopodobieństwa mutacji, tak aby ułatwić opuszczanie obszarów zabronionych. Badania symulacyjne zostały wykonane na komputerze o następujących parametrach:

- procesor intel i7,
- 8 GB pamięci RAM,
- System operacyjny Windows 7 Professional,

4.1 Badania porównawcze metod ewolucyjnych wykorzystujących odcinki proste oraz interpolację wielomianową do wyznaczania zadanej trajektorii statku

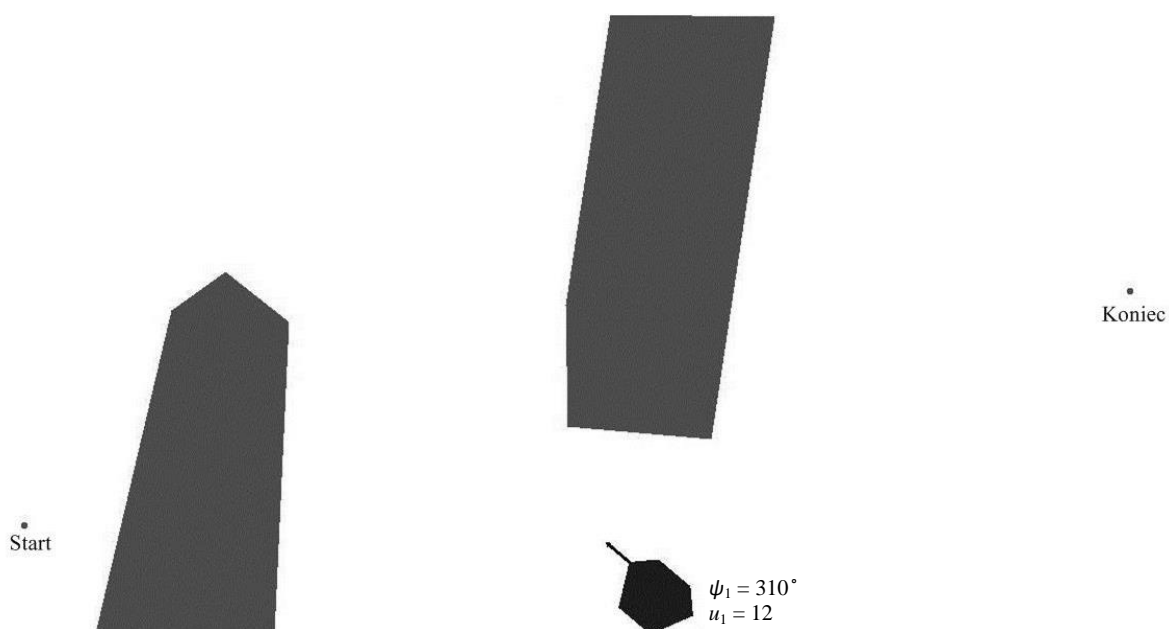
W podrozdziale zawarte zostały wyniki badań, dotyczące porównania zaproponowanych metod ewolucyjnych (wariant jednopopulacyjny JAEWTI i wielopopulacyjny WAEWTI) wykorzystujących interpolację wielomianową do wyznaczania zadanej trajektorii statku, z metodą ewolucyjną korzystającą z odcinków prostych do modelowania trajektorii (JAEWTO). Wybór metody referencyjnej dla metody zaproponowanej przez autora został wykonany na następującej podstawie:

- modelowanie trajektorii zadanej poprzez łączenie punktów zwrotu za pomocą odcinków prostych jest powszechnie stosowane w literaturze, dlatego też celowym jest wskazanie zalet podejścia opartego na interpolacji wielomianowej w odniesieniu do tej metody,
- rozwiązanie zadania optymalizacji przedstawione w punkcie 3.1 powinno zostać wyznaczone w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Na podstawie syntezy metod wyznaczania trajektorii zadanej przedstawionej w 2.2, można stwierdzić, że metoda ewolucyjna spełnia to kryterium.

Zastosowanie metody referencyjnej JAEWTO pozwala na porównanie nakładu obliczeniowego w odniesieniu do zaproponowanego przez autora rozwiązania (JAEWTI, WAEWTI),

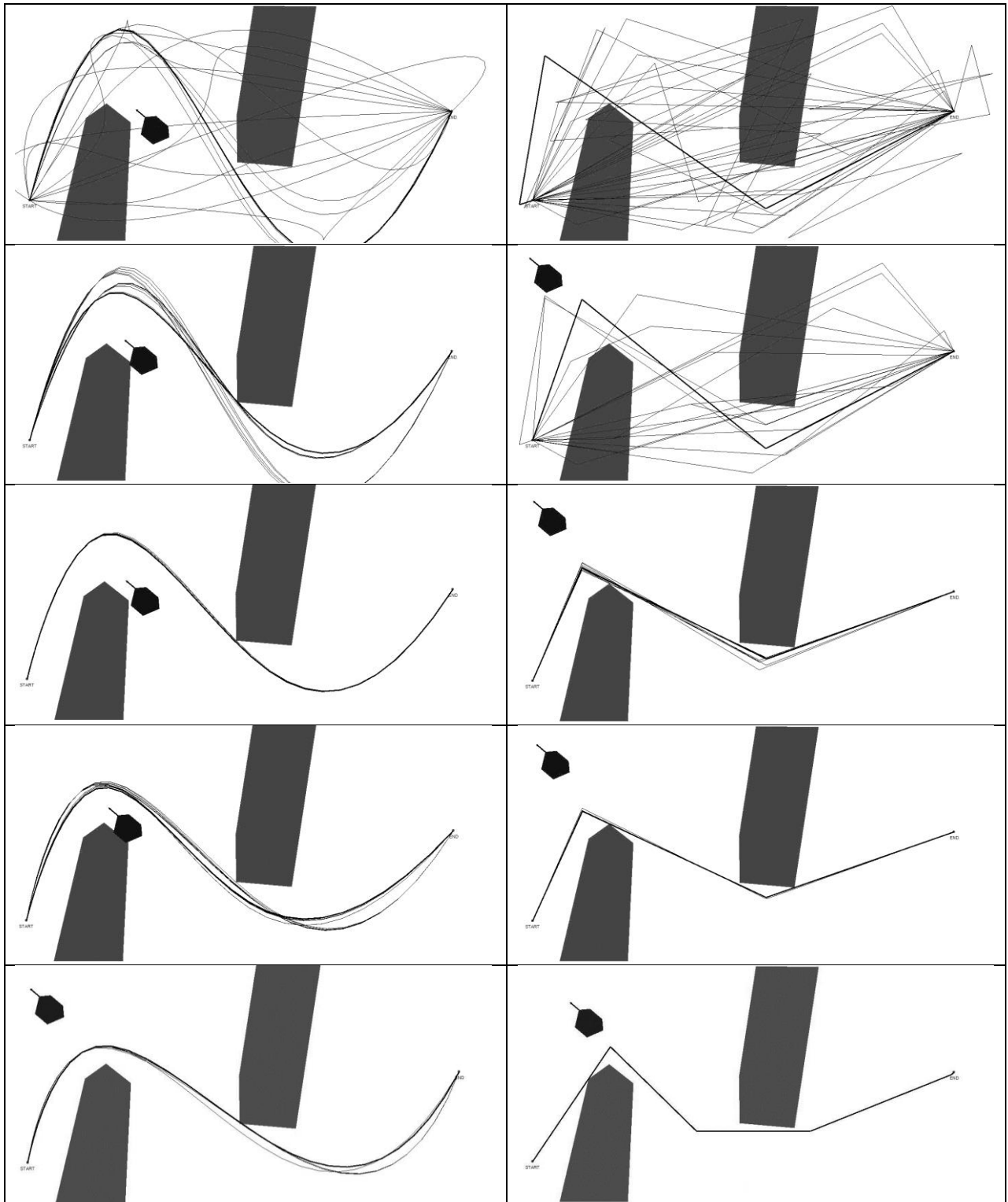
Badania porównawcze zostały wykonane dla sytuacji kolizyjnych w środowisku nawigacyjnym o różnym stopniu skomplikowania (o różnych konfiguracjach oraz ilości przeszkód statycznych oraz dynamicznych). Ze względu na fakt, iż rozwiązania uzyskane metodą ewolucyjną istotnie zależą od populacji początkowej, każde środowisko testowe zostało przebadane dla 10 różnych populacji początkowych. W pracy (Śmierzchalski i inni, 2013 c) wskazano pozytywny wpływ zastosowania wariantu wielopopulacyjnego algorytmu do wyznaczania trajektorii zadanej statku. Dlatego też oprócz wariantu jednopopulacyjnego, zostanie zastosowany wariant wielopopulacyjny korzystający z interpolacji wielomianowej.

Sytuacja nawigacyjna nr 1 została przedstawiona na Rysunku 26. Środowisko symulacyjne składa się z 2 przeszkód statycznych oraz 1 przeszkody dynamicznej. Rysunek 27 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu modelowania trajektorii przy użyciu odcinków prostych (JAEWTO - prawa kolumna) oraz interpolacji wielomianowej (JAEWTI - lewa kolumna). Na rysunkach nie przedstawiono procesu ewolucji algorytmu WAEWTI, ze względu na fakt iż maksymalna ilość generacji równa się 100 w odniesieniu do 300-400 generacji dla wariantów jednopopulacyjnych. Nie pozwala to na porównanie etapów pracy algorytmów. Na poniższych rysunkach kurs statków obcych (ψ) podawany jest w stopniach, natomiast prędkość wzdłużna (u) w węzłach.



Rysunek 26. Sytuacja nawigacyjna nr 1

Na Rysunku 27 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej wynoszącej 300 dla JAEWTI i 400 dla JAEWTO. Najlepsza trajektoria jest przedstawiana przy użyciu pogrubionej linii.



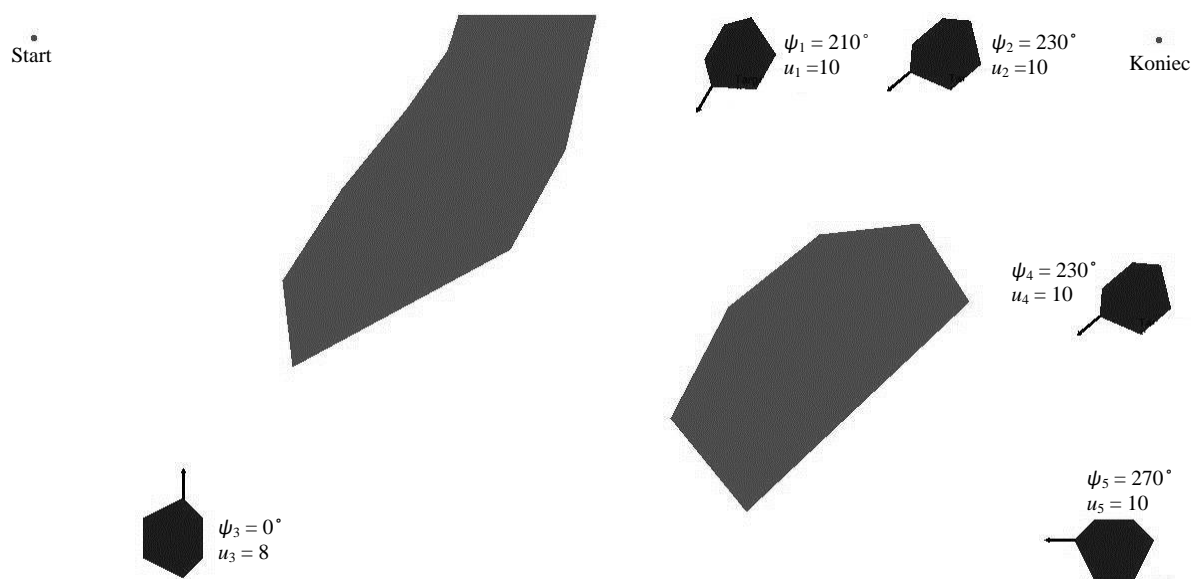
Rysunek 27. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 1

W tabeli 4.3 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.3. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 1

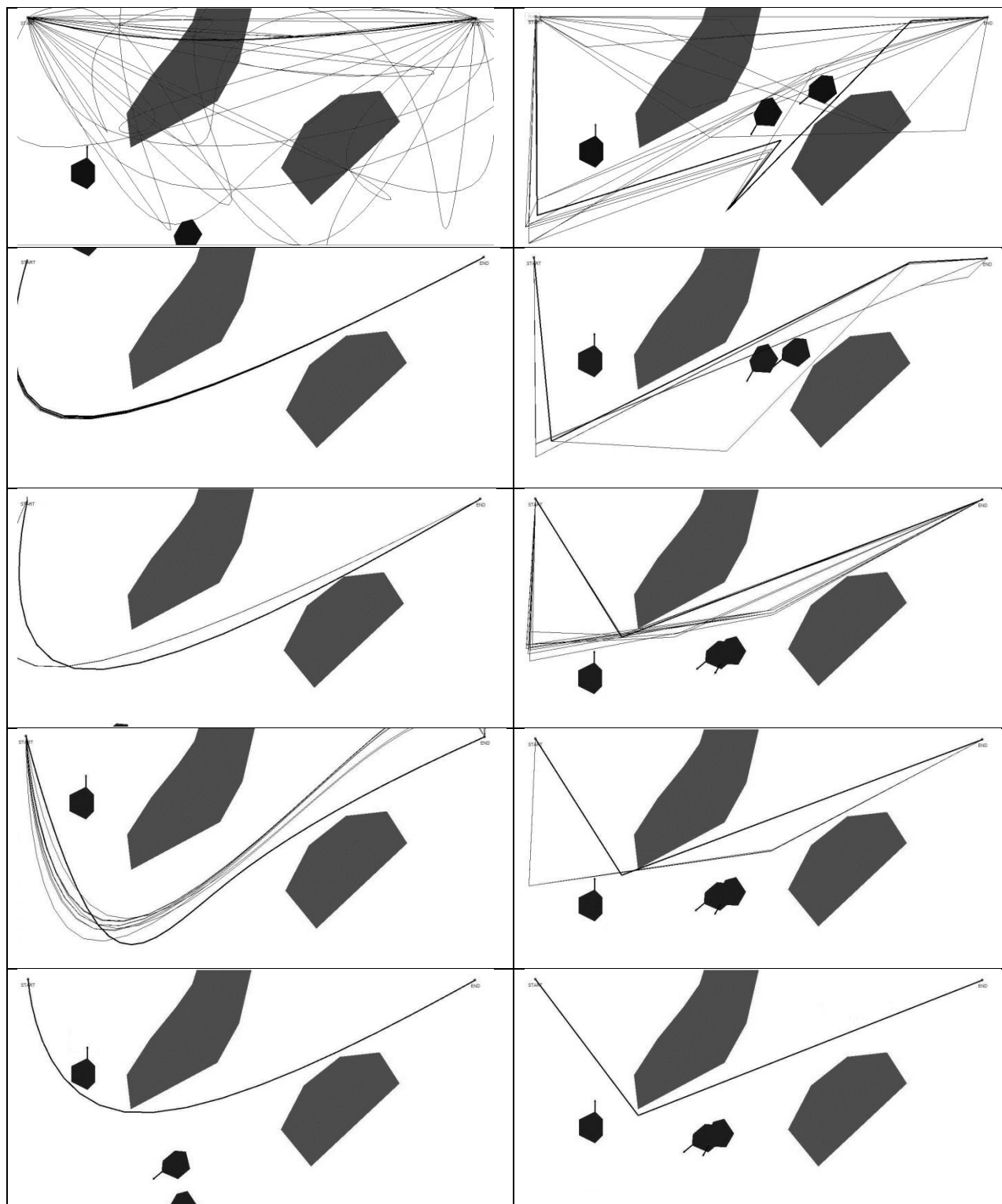
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	156	34	36	191	144	244
2	JAEWTO	154	34				
3	JAEWTO	234	34				
4	JAEWTO	176	34				
5	JAEWTO	144	43				
6	JAEWTO	199	34				
7	JAEWTO	244	34				
8	JAEWTO	215	34				
9	JAEWTO	206	34				
10	JAEWTO	178	43				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	167	63	65	206	167	268
2	JAEWTI	212	65				
3	JAEWTI	235	65				
4	JAEWTI	189	67				
5	JAEWTI	175	67				
6	JAEWTI	190	63				
7	JAEWTI	268	65				
8	JAEWTI	212	65				
9	JAEWTI	198	67				
10	JAEWTI	210	67				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	150	145	144	160	146	186
2	WAEWTI	146	144				
3	WAEWTI	159	144				
4	WAEWTI	156	148				
5	WAEWTI	170	142				
6	WAEWTI	186	148				
7	WAEWTI	148	144				
8	WAEWTI	159	140				
9	WAEWTI	166	144				
10	WAEWTI	156	145				

Sytuacja nawigacyjna nr 2 została przedstawiona na Rysunku 28. Środowisko symulacyjne składa się z dwóch przeszkód statycznych oraz 5 przeszkód dynamicznych. Rysunek 29 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO (prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 28. Sytuacja kolizyjna na morzu nr 2

Na Rysunku 29 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



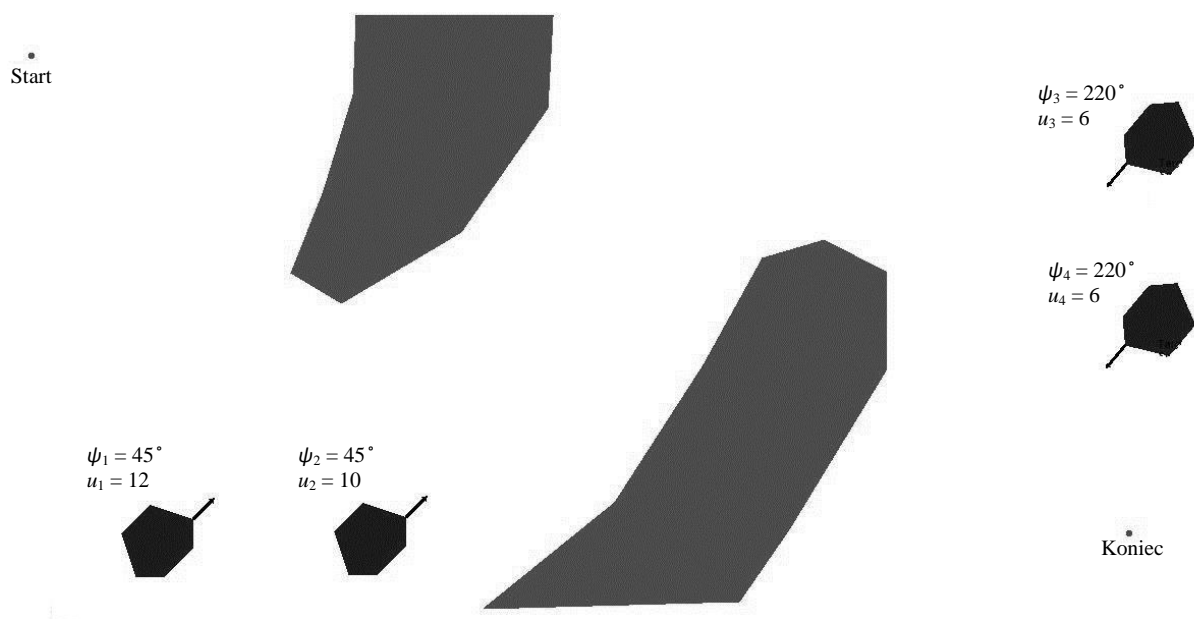
Rysunek 29. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 2

W tabeli 4.4 przedstawione zostały wartości końcowych funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.4. Wyniki końcowe wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 2

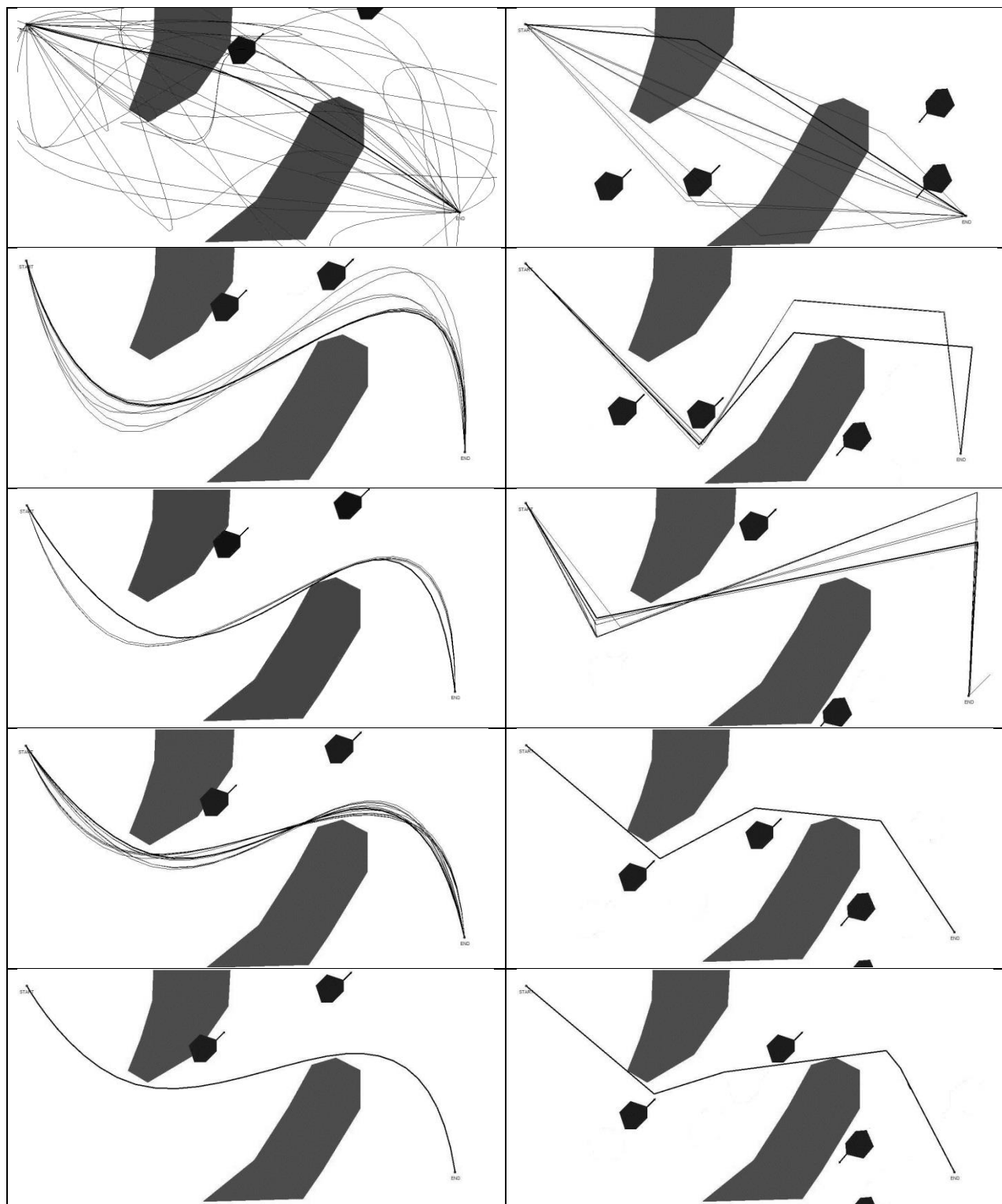
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	149	49	49	169	143	98
2	JAEWTO	143	48				
3	JAEWTO	198	45				
4	JAEWTO	198	56				
5	JAEWTO	149	49				
6	JAEWTO	179	48				
7	JAEWTO	188	49				
8	JAEWTO	179	48				
9	JAEWTO	155	52				
10	JAEWTO	147	47				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	152	108	113	154	149	166
2	JAEWTI	149	113				
3	JAEWTI	162	112				
4	JAEWTI	151	118				
5	JAEWTI	157	114				
6	JAEWTI	166	109				
7	JAEWTI	149	113				
8	JAEWTI	155	110				
9	JAEWTI	151	112				
10	JAEWTI	152	117				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	146	198	202	149	146	155
2	WAEWTI	148	196				
3	WAEWTI	155	220				
4	WAEWTI	148	233				
5	WAEWTI	146	190				
6	WAEWTI	146	196				
7	WAEWTI	148	201				
8	WAEWTI	151	190				
9	WAEWTI	148	211				
10	WAEWTI	155	187				

Sytuacja nawigacyjna nr 3 została przedstawiona na Rysunku 30. Środowisko symulacyjne składa się z dwóch przeszkód statycznych oraz czterech przeszkód dynamicznych. Rysunek 31 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO(prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 30. Sytuacja nawigacyjna nr 3

Na Rysunku 31 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



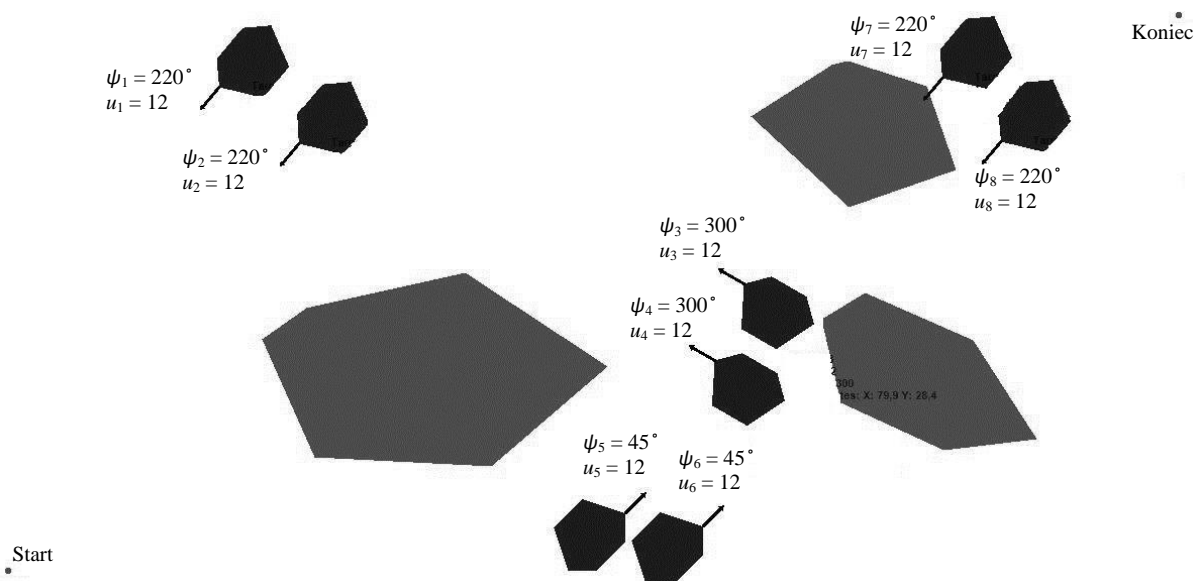
Rysunek 31. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 3

W tabeli 4.5 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.5. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 3

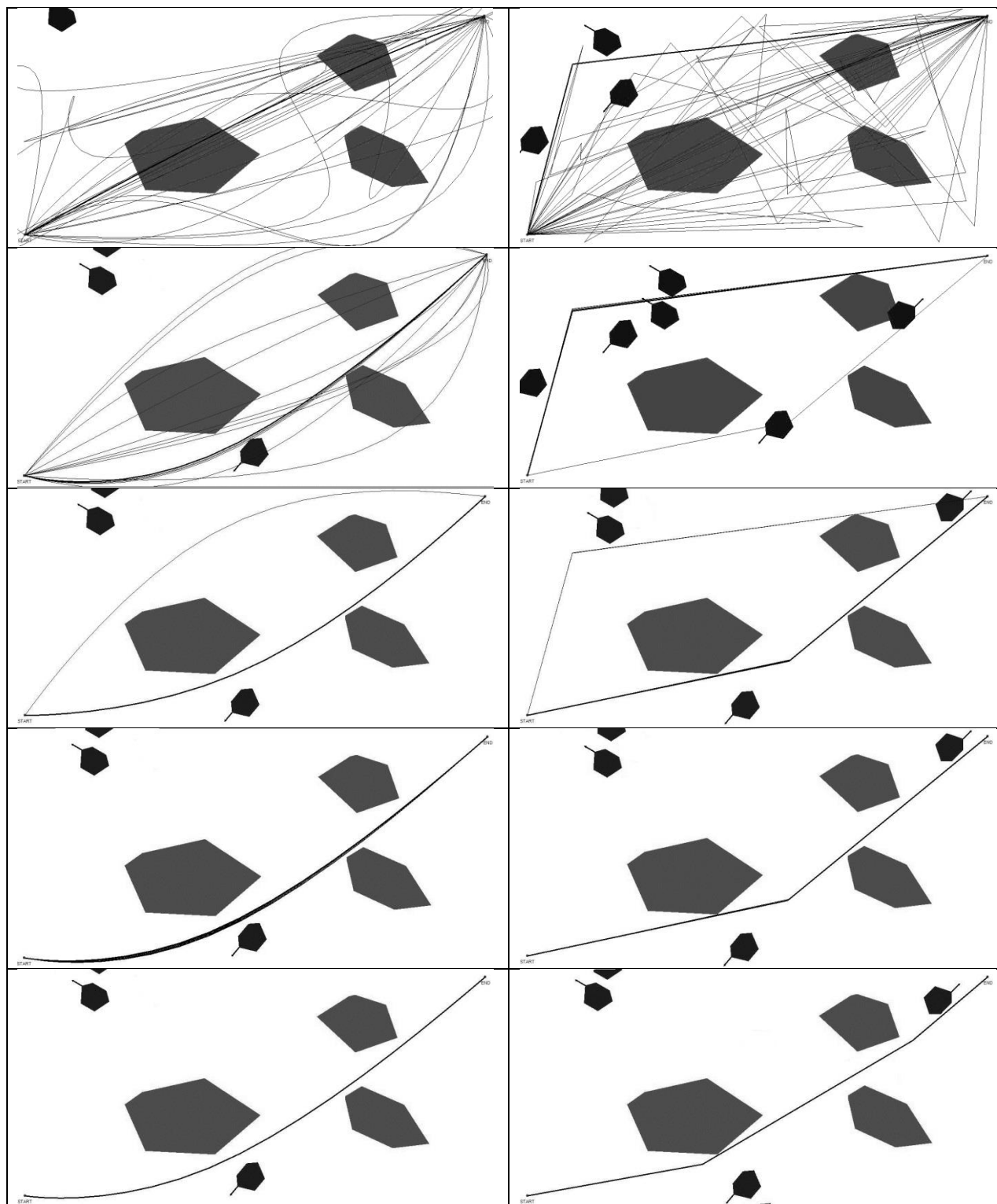
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	286	40	42	241	155	314
2	JAEWTO	228	41				
3	JAEWTO	232	41				
4	JAEWTO	155	49				
5	JAEWTO	314	41				
6	JAEWTO	198	42				
7	JAEWTO	222	41				
8	JAEWTO	285	40				
9	JAEWTO	200	41				
10	JAEWTO	292	43				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	148	97	99	180	143	315
2	JAEWTI	147	99				
3	JAEWTI	272	97				
4	JAEWTI	315	97				
5	JAEWTI	147	102				
6	JAEWTI	154	96				
7	JAEWTI	166	99				
8	JAEWTI	143	101				
9	JAEWTI	148	99				
10	JAEWTI	155	101				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	155	215	220	172	148	345
2	WAEWTI	148	244				
3	WAEWTI	149	215				
4	WAEWTI	345	219				
5	WAEWTI	150	228				
6	WAEWTI	156	215				
7	WAEWTI	153	220				
8	WAEWTI	149	221				
9	WAEWTI	149	209				
10	WAEWTI	167	215				

Sytuacja nawigacyjna nr 4 została przedstawiona na Rysunku 32. Środowisko symulacyjne składa się z 3 przeszkód statycznych oraz 8 przeszkód dynamicznych. Rysunek 33 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO (prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 32. Sytuacja nawigacyjna nr 4

Na Rysunku 33 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



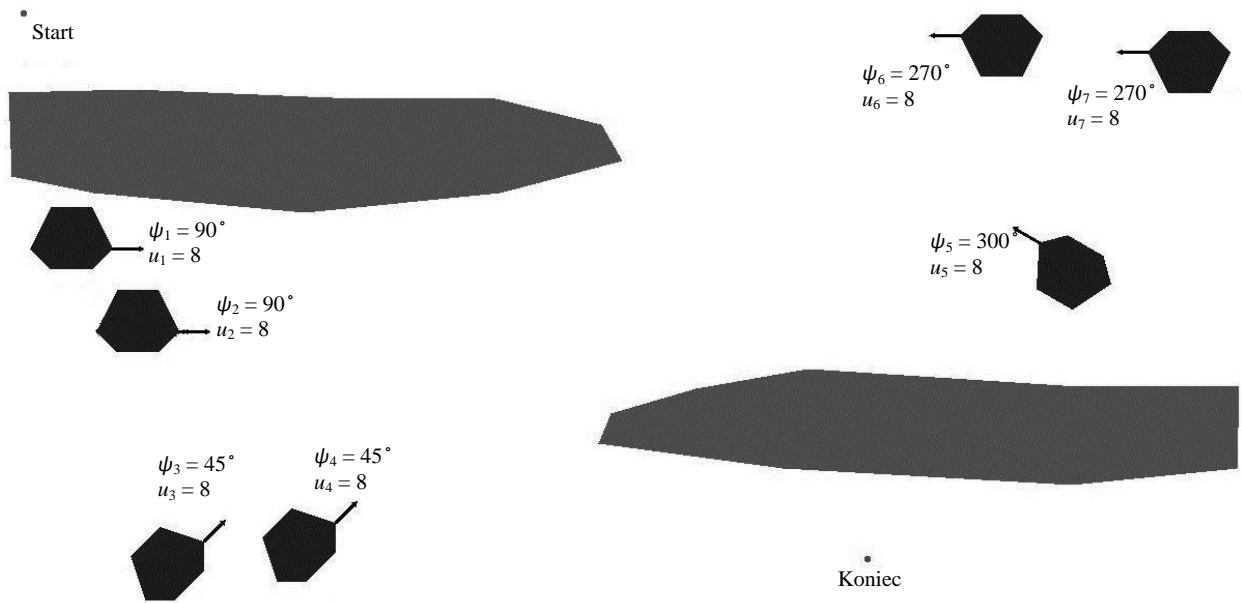
Rysunek 33. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 4

W tabeli 4.6 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.6. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 4

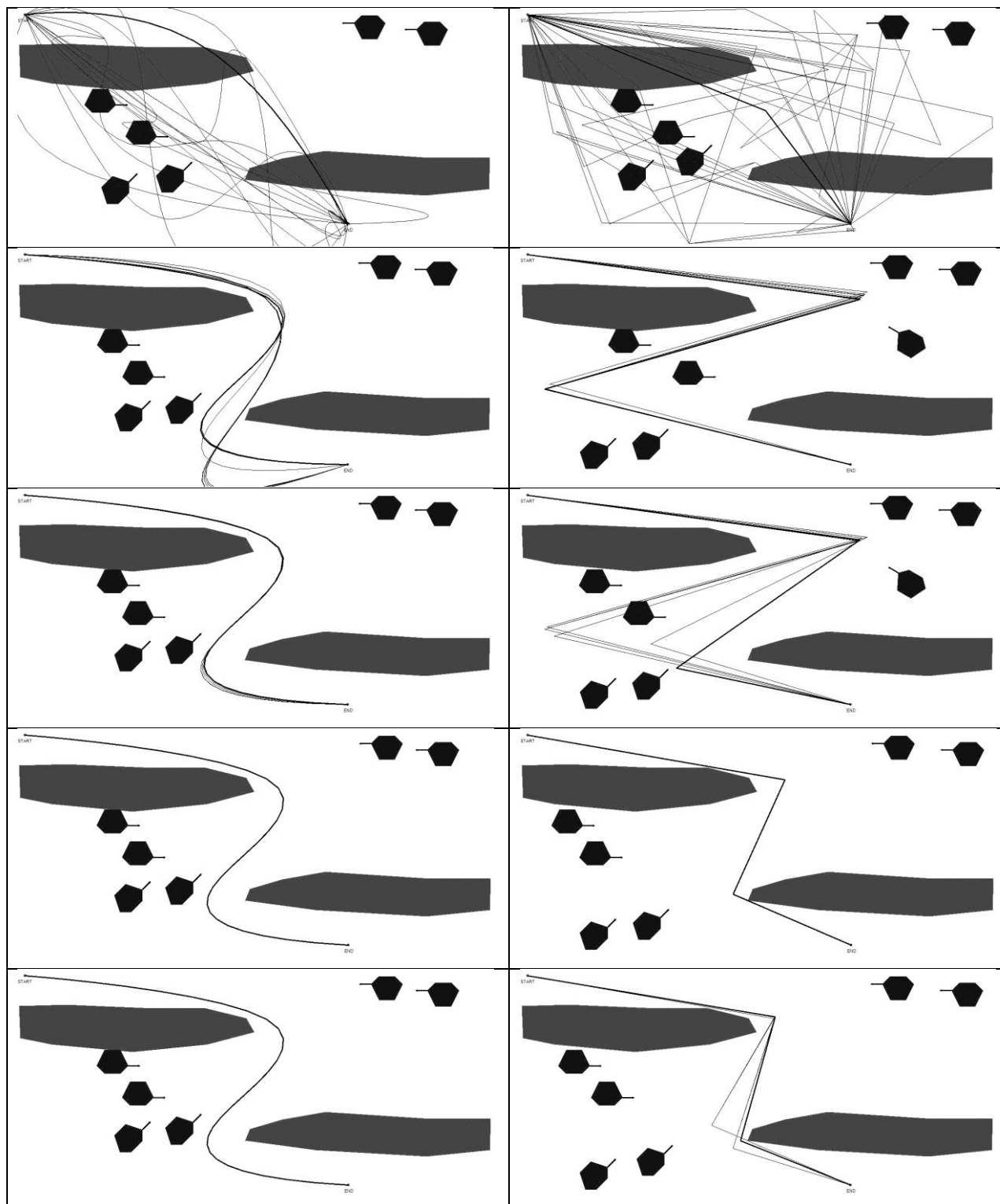
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	141	76	80	146	139	152
2	JAEWTO	145	79				
3	JAEWTO	139	82				
4	JAEWTO	143	85				
5	JAEWTO	152	81				
6	JAEWTO	148	84				
7	JAEWTO	150	76				
8	JAEWTO	152	78				
9	JAEWTO	145	80				
10	JAEWTO	145	82				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	132	148	145	133	131	138
2	JAEWTI	133	143				
3	JAEWTI	132	147				
4	JAEWTI	138	148				
5	JAEWTI	132	146				
6	JAEWTI	132	143				
7	JAEWTI	132	139				
8	JAEWTI	131	146				
9	JAEWTI	134	144				
10	JAEWTI	132	148				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	132	234	236	132	131	133
2	WAEWTI	132	238				
3	WAEWTI	132	238				
4	WAEWTI	131	236				
5	WAEWTI	131	234				
6	WAEWTI	131	234				
7	WAEWTI	131	238				
8	WAEWTI	133	236				
9	WAEWTI	132	240				
10	WAEWTI	133	236				

Sytuacja nawigacyjna nr 5 została przedstawiona na Rysunku 34. Środowisko symulacyjne składa się z 2 przeszkód statycznych oraz 7 przeszkód dynamicznych. Rysunek 35 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO (prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 34. Sytuacja nawigacyjna nr 5

Na Rysunku 35 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



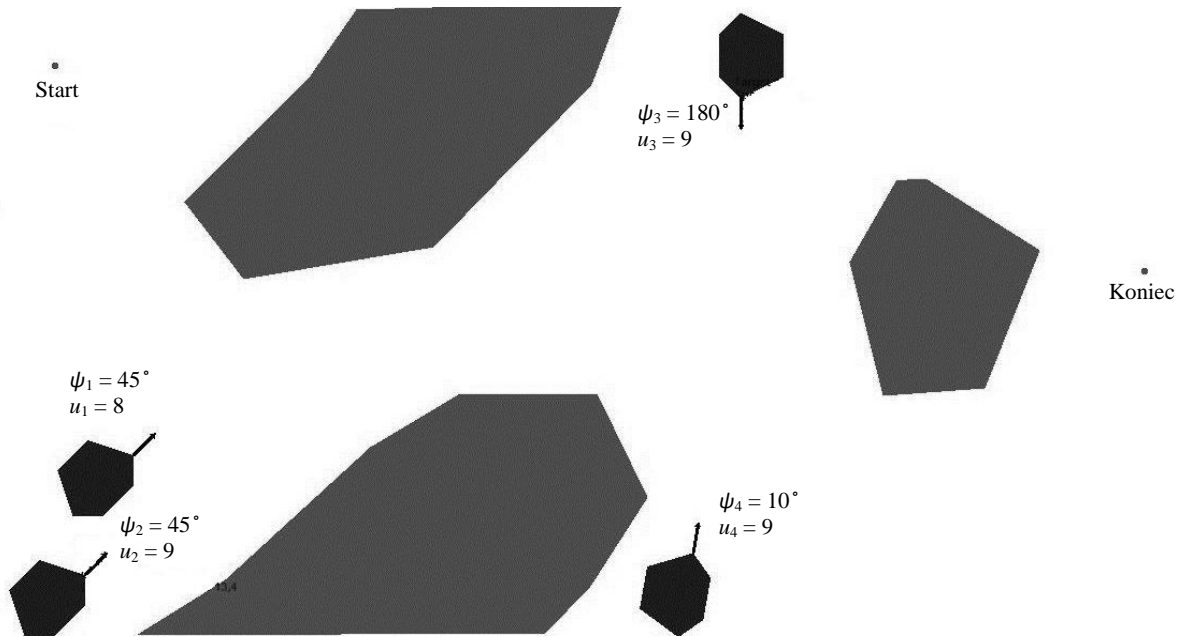
Rysunek 35. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 5

W tabeli 4.7 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.7. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 5

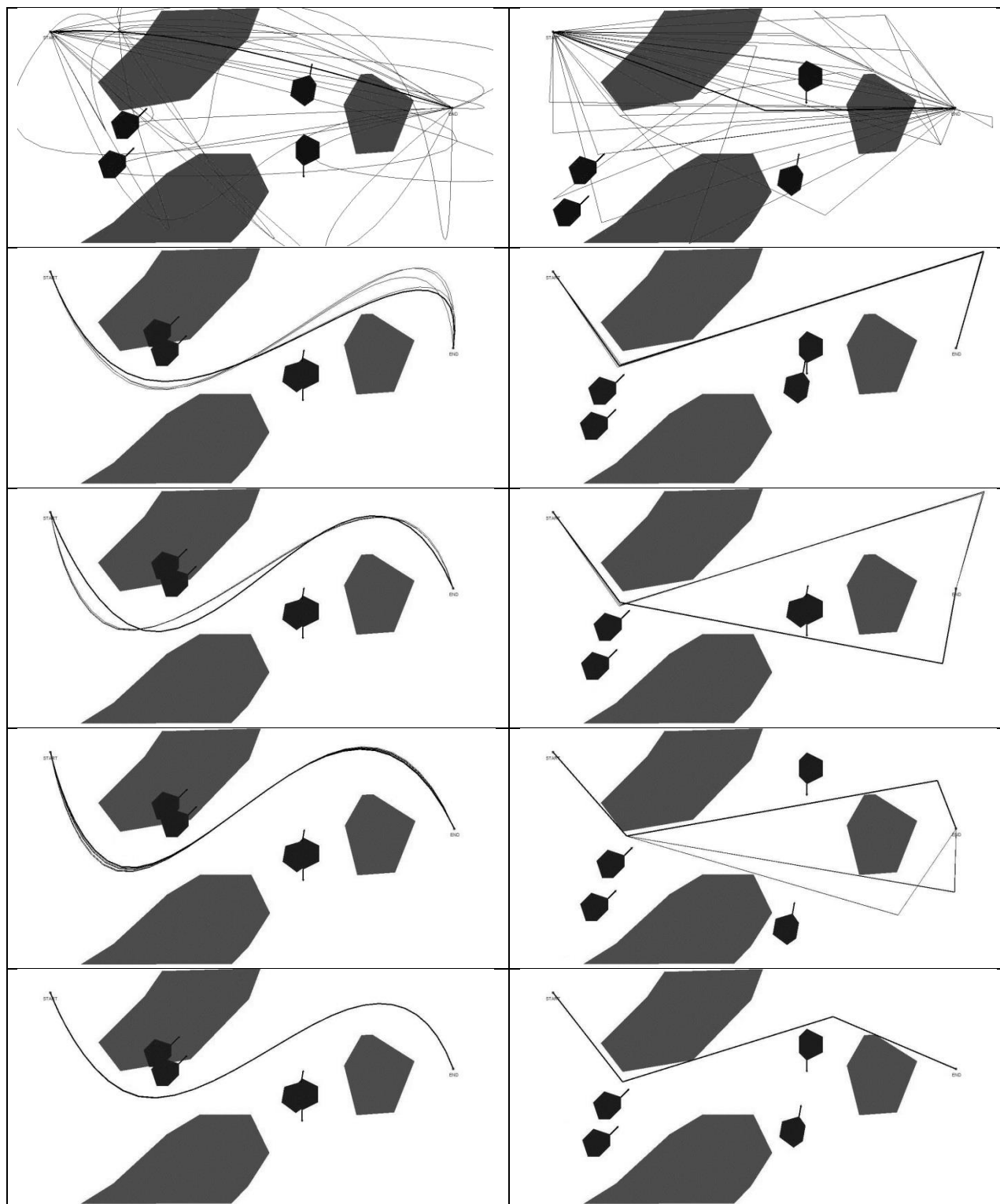
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	276	74	75	277	137	456
2	JAEWTO	320	70				
3	JAEWTO	353	78				
4	JAEWTO	240	72				
5	JAEWTO	137	80				
6	JAEWTO	302	75				
7	JAEWTO	248	78				
8	JAEWTO	156	74				
9	JAEWTO	456	76				
10	JAEWTO	280	74				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	240	132	134	245	215	315
2	JAEWTI	231	140				
3	JAEWTI	215	132				
4	JAEWTI	276	131				
5	JAEWTI	231	132				
6	JAEWTI	224	134				
7	JAEWTI	315	138				
8	JAEWTI	245	133				
9	JAEWTI	241	134				
10	JAEWTI	232	133				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	171	164	167	210	169	245
2	WAEWTI	169	168				
3	WAEWTI	199	171				
4	WAEWTI	233	166				
5	WAEWTI	211	164				
6	WAEWTI	234	166				
7	WAEWTI	190	168				
8	WAEWTI	230	168				
9	WAEWTI	245	166				
10	WAEWTI	217	164				

Sytuacja nawigacyjna nr 6 została przedstawiona na Rysunku 36. Środowisko symulacyjne składa się z 3 przeszkód statycznych oraz 4 przeszkód dynamicznych. Rysunek 37 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO (prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 36. Sytuacja nawigacyjna nr 6

Na Rysunku 37 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



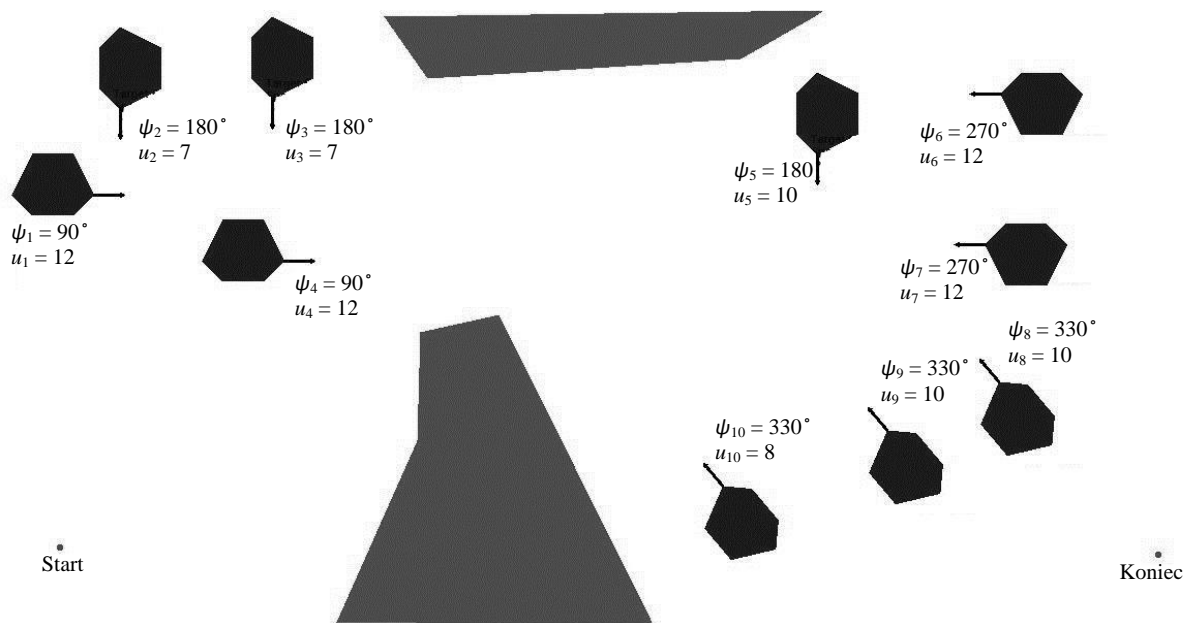
Rysunek 37. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 6

W tabeli 4.8 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	118	48	49	169	118	290
2	JAEWTO	129	49				
3	JAEWTO	131	45				
4	JAEWTO	256	48				
5	JAEWTO	129	48				
6	JAEWTO	248	55				
7	JAEWTO	130	47				
8	JAEWTO	137	53				
9	JAEWTO	290	48				
10	JAEWTO	125	47				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	234	78	76	176	117	290
2	JAEWTI	148	76				
3	JAEWTI	142	74				
4	JAEWTI	117	76				
5	JAEWTI	290	74				
6	JAEWTI	247	78				
7	JAEWTI	145	76				
8	JAEWTI	150	74				
9	JAEWTI	144	78				
10	JAEWTI	145	78				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	139	156	152	140	138	145
2	WAEWTI	143	148				
3	WAEWTI	139	152				
4	WAEWTI	139	153				
5	WAEWTI	145	156				
6	WAEWTI	138	151				
7	WAEWTI	141	154				
8	WAEWTI	141	153				
9	WAEWTI	138	149				
10	WAEWTI	139	151				

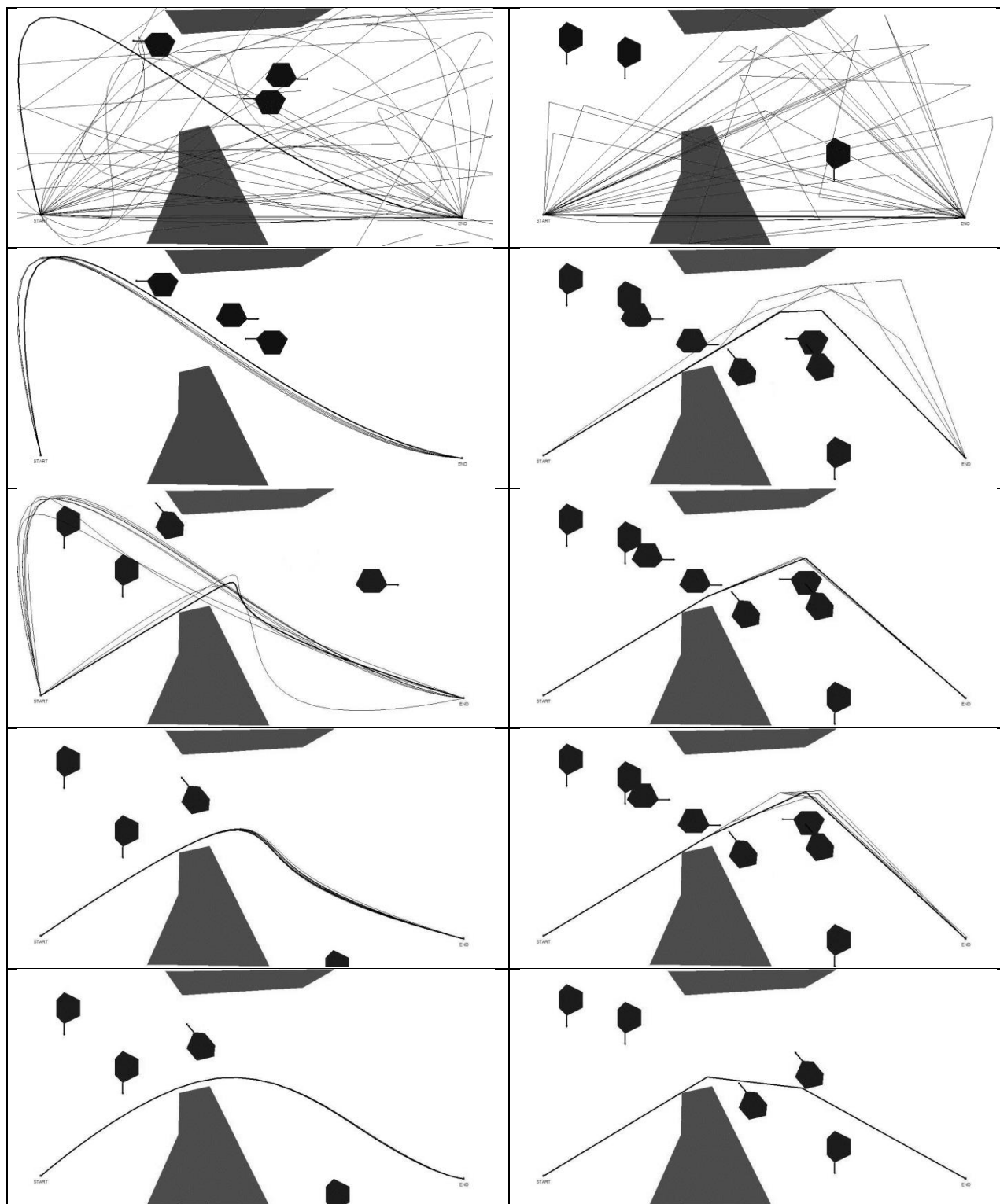
Tabela 4.8. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 6

Sytuacja nawigacyjna nr 7 została przedstawiona na Rysunku 38. Środowisko symulacyjne składa się z 2 przeszkód statycznych oraz 10 przeszkód dynamicznych. Rysunek 39 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO (prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 38. Sytuacja nawigacyjna nr 7

Na Rysunku 39 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



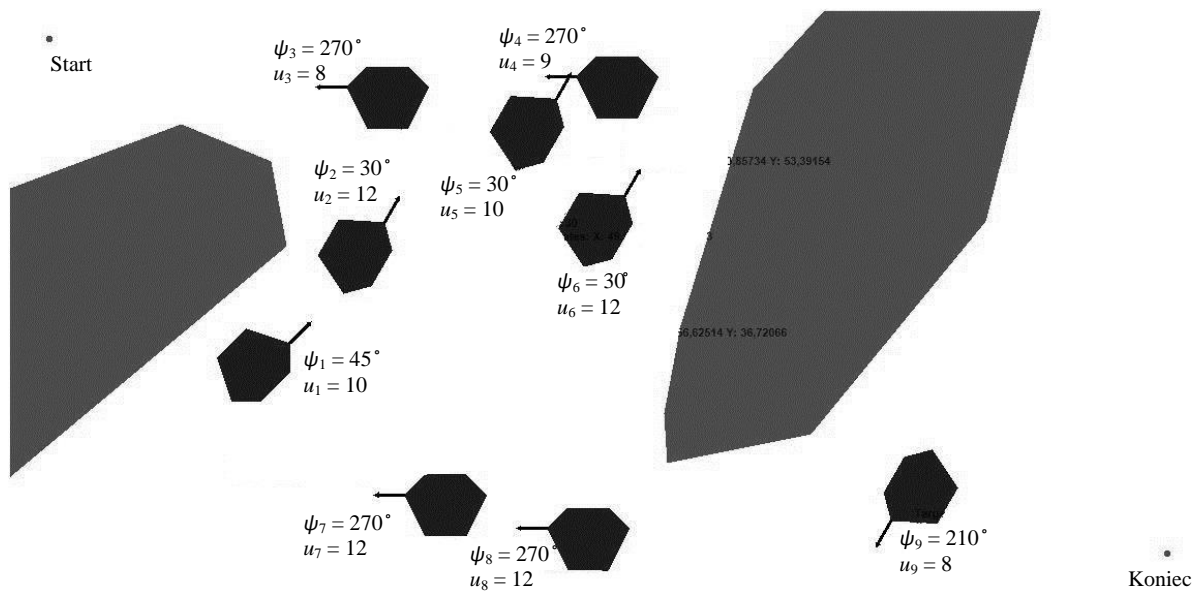
Rysunek 39. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 7

W tabeli 4.9 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.9. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 7

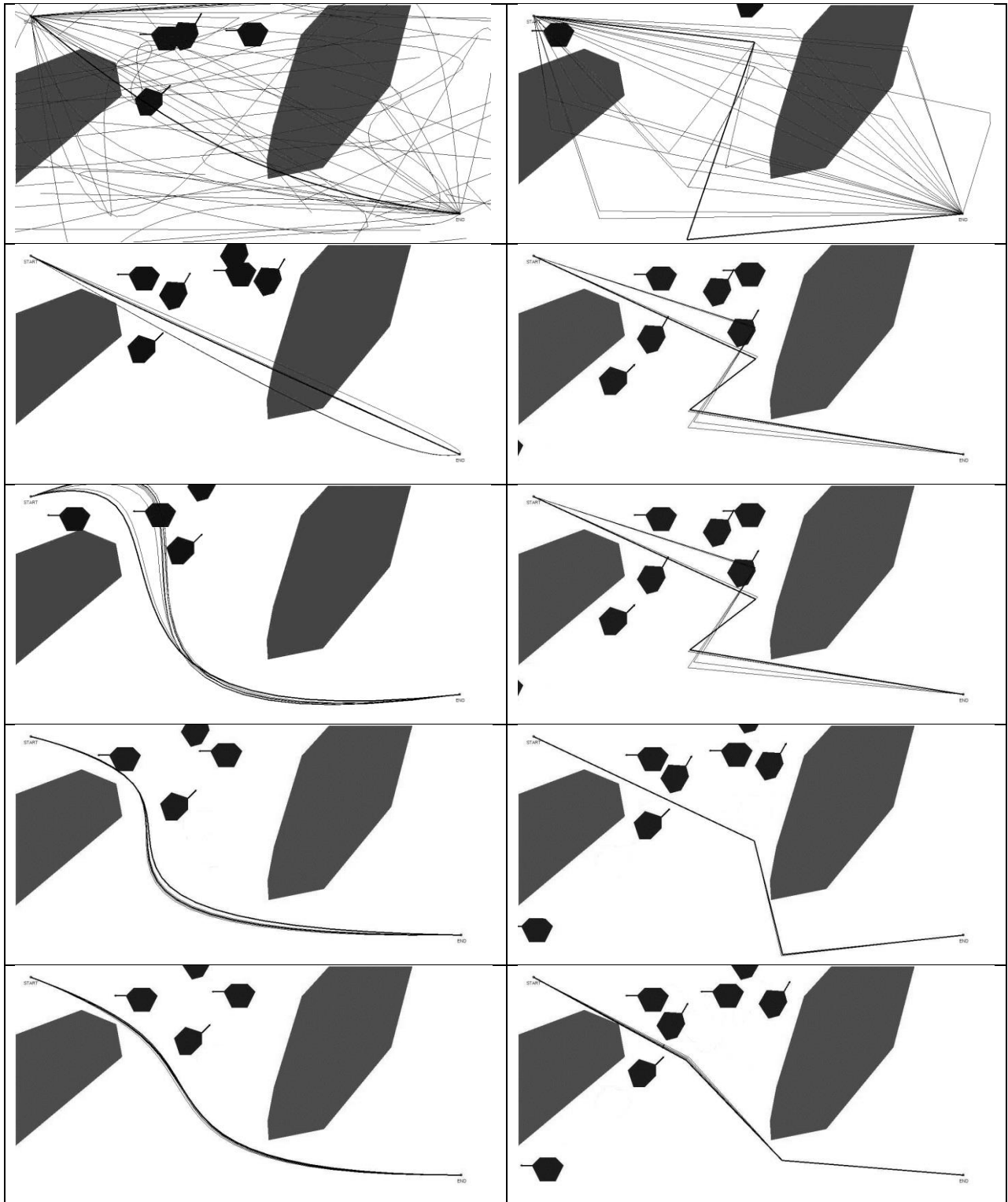
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	127	45	45	129	122	144
2	JAEWTO	131	45				
3	JAEWTO	128	46				
4	JAEWTO	144	43				
5	JAEWTO	128	45				
6	JAEWTO	132	44				
7	JAEWTO	122	45				
8	JAEWTO	125	46				
9	JAEWTO	128	45				
10	JAEWTO	129	43				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	135	75	76	135	128	146
2	JAEWTI	129	76				
3	JAEWTI	128	80				
4	JAEWTI	137	73				
5	JAEWTI	146	75				
6	JAEWTI	130	75				
7	JAEWTI	132	80				
8	JAEWTI	145	74				
9	JAEWTI	135	79				
10	JAEWTI	132	77				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	146	115	118	135	125	146
2	WAEWTI	142	118				
3	WAEWTI	130	113				
4	WAEWTI	126	121				
5	WAEWTI	128	118				
6	WAEWTI	125	116				
7	WAEWTI	136	122				
8	WAEWTI	143	118				
9	WAEWTI	144	118				
10	WAEWTI	134	121				

Sytuacja nawigacyjna nr 8 została przedstawiona na Rysunku 40. Środowisko symulacyjne składa się z 2 przeszkód statycznych oraz 9 przeszkód dynamicznych. Rysunek 41 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO(prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 40. Sytuacja nawigacyjna nr 8

Na Rysunku 41 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



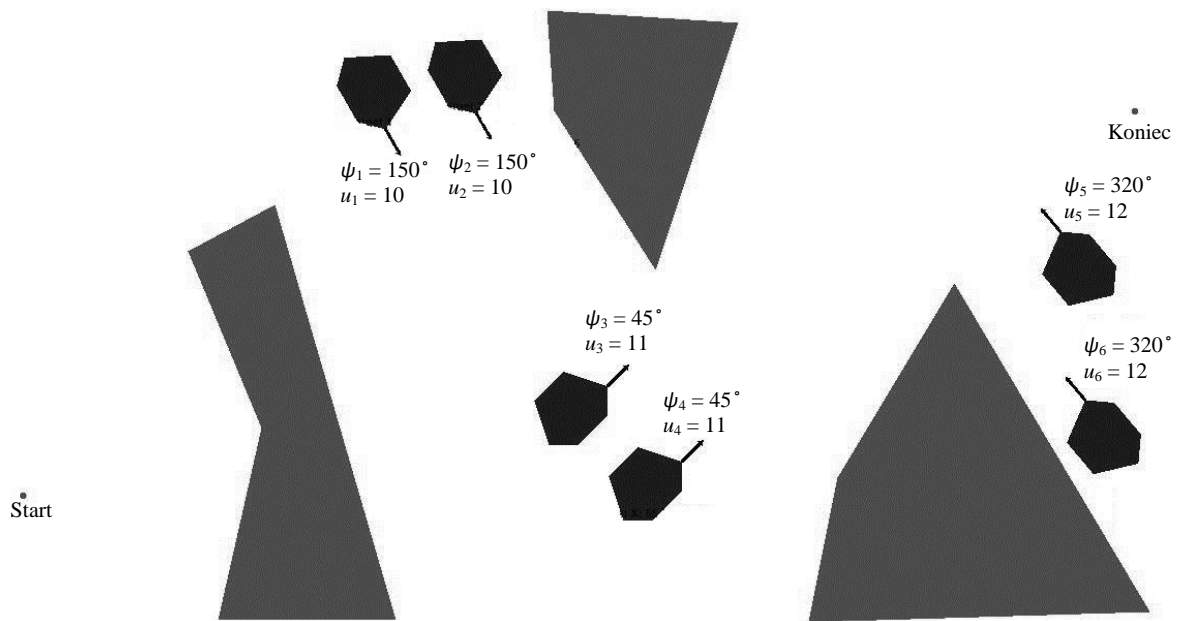
Rysunek 41. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI (lewa kolumna) oraz JAEWTO (prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 8

W tabeli 4.10 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.10. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 8

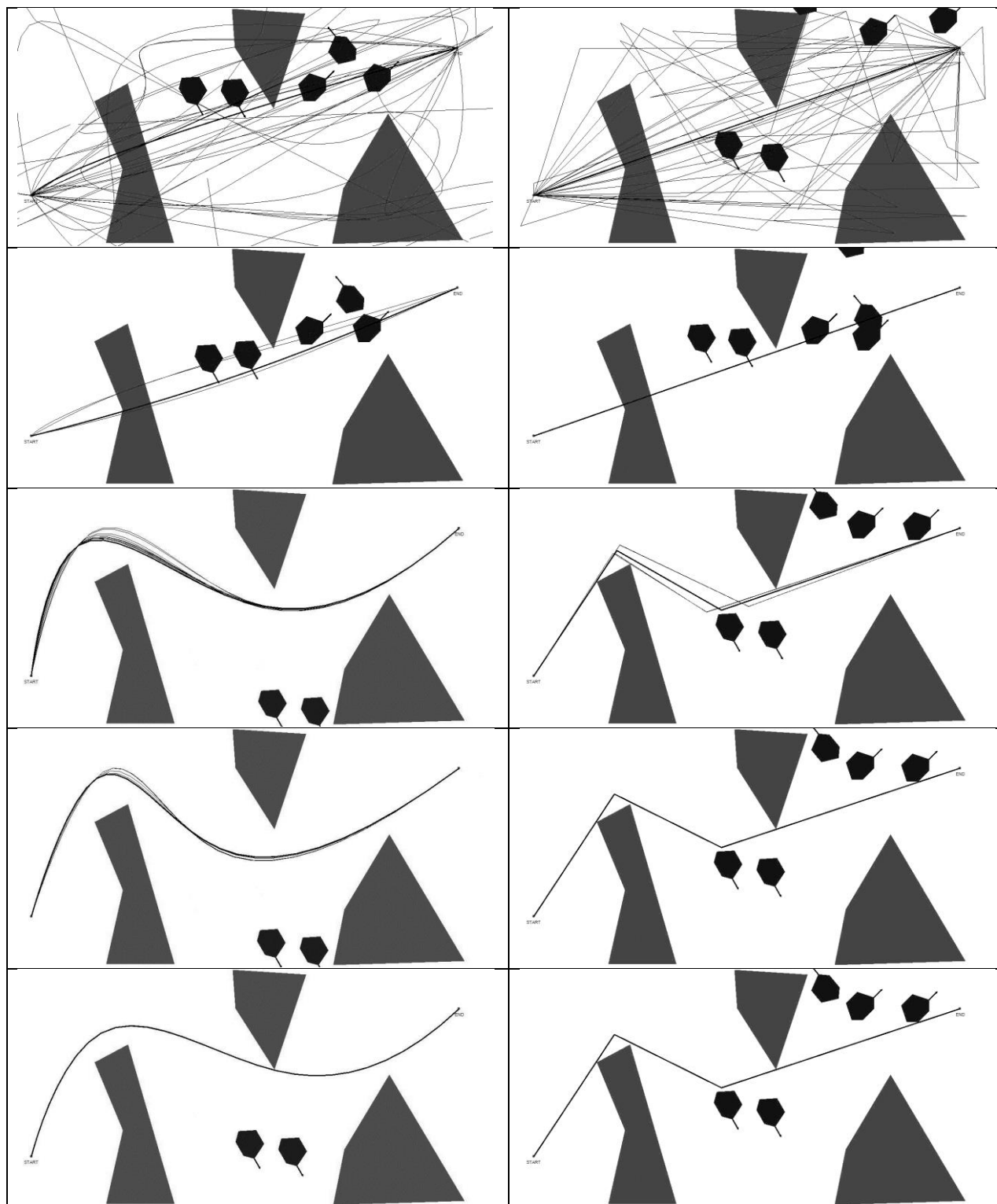
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	263	65	66	185	131	263
2	JAEWTO	212	65				
3	JAEWTO	155	67				
4	JAEWTO	131	64				
5	JAEWTO	186	64				
6	JAEWTO	165	64				
7	JAEWTO	213	68				
8	JAEWTO	156	66				
9	JAEWTO	155	67				
10	JAEWTO	217	67				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	135	98	97	160	127	233
2	JAEWTI	134	102				
3	JAEWTI	127	95				
4	JAEWTI	218	98				
5	JAEWTI	233	98				
6	JAEWTI	215	96				
7	JAEWTI	145	96				
8	JAEWTI	133	98				
9	JAEWTI	134	95				
10	JAEWTI	127	98				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	125	135	134	126	122	133
2	WAEWTI	124	132				
3	WAEWTI	133	132				
4	WAEWTI	124	133				
5	WAEWTI	133	132				
6	WAEWTI	122	134				
7	WAEWTI	124	134				
8	WAEWTI	124	132				
9	WAEWTI	131	141				
10	WAEWTI	124	132				

Sytuacja nawigacyjna nr 9 została przedstawiona na Rysunku 42. Środowisko symulacyjne składa się z 3 przeszkód statycznych oraz 6 przeszkód dynamicznych. Rysunek 43 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO(prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 42. Sytuacja nawigacyjna nr 9

Na Rysunku 43 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



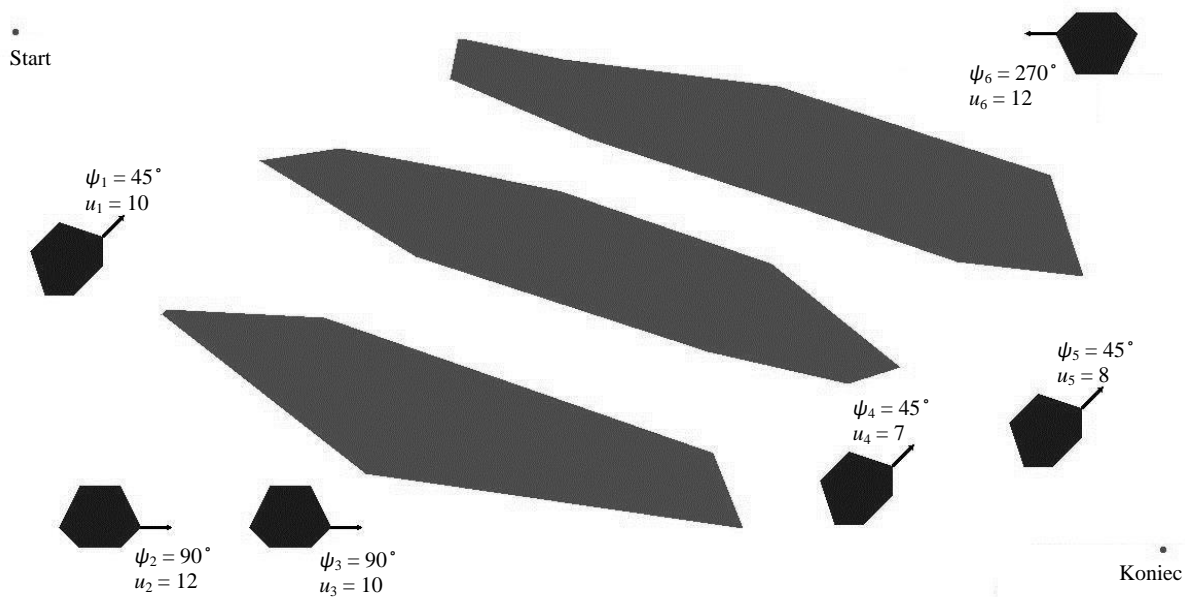
Rysunek 43. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI(lewa kolumna) oraz JAEWTO(prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 9

W tabeli 4.11 przedstawione zostały wartości końcowych funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.11. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 9

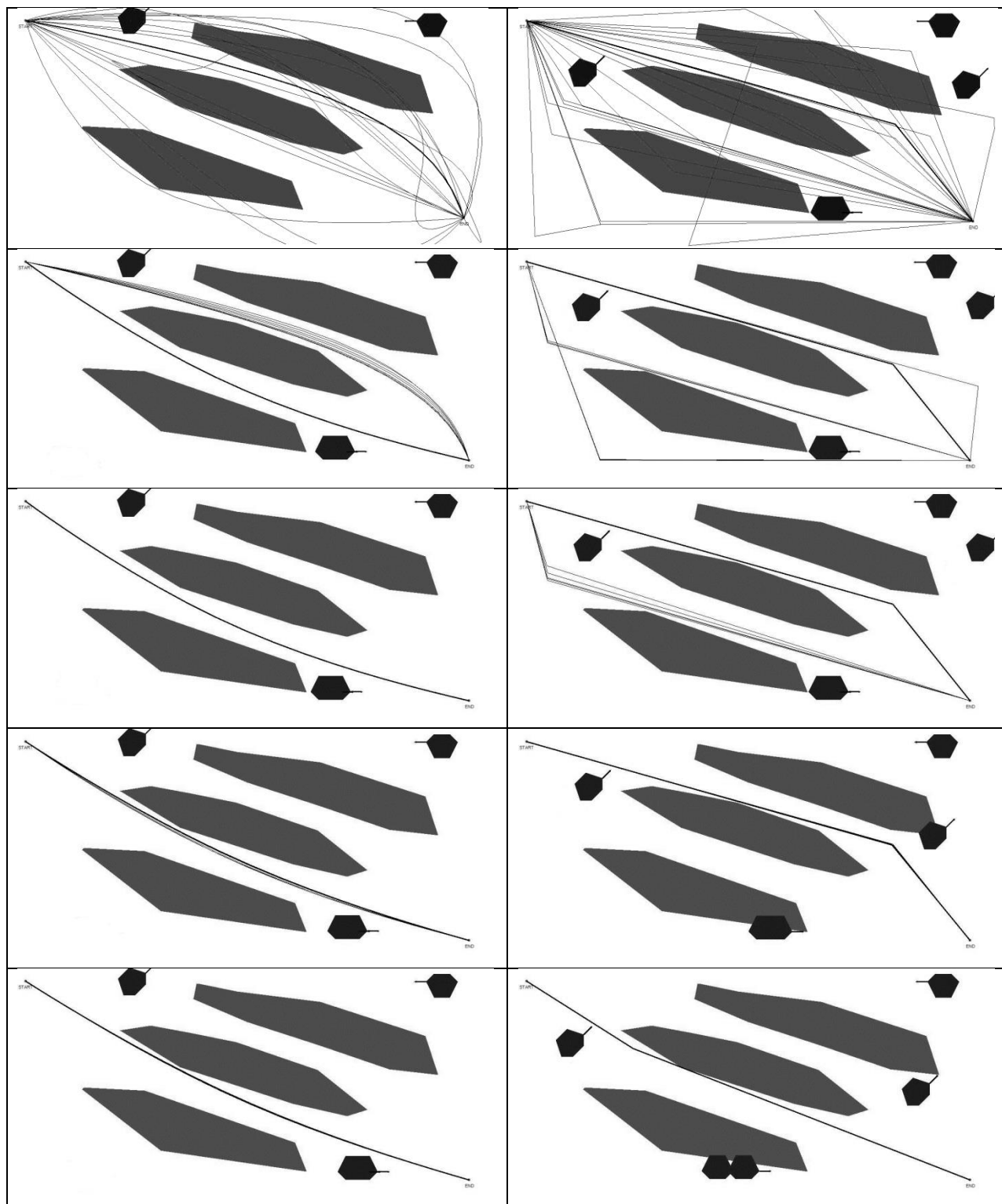
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	152	45	44	145	142	152
2	JAEWTO	143	42				
3	JAEWTO	143	42				
4	JAEWTO	144	45				
5	JAEWTO	145	43				
6	JAEWTO	142	45				
7	JAEWTO	148	45				
8	JAEWTO	144	43				
9	JAEWTO	143	43				
10	JAEWTO	144	42				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	152	67	65	156	152	160
2	JAEWTI	159	65				
3	JAEWTI	160	66				
4	JAEWTI	157	66				
5	JAEWTI	156	64				
6	JAEWTI	155	64				
7	JAEWTI	158	62				
8	JAEWTI	155	68				
9	JAEWTI	155	65				
10	JAEWTI	156	65				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	159	98	97	152	142	168
2	WAEWTI	145	96				
3	WAEWTI	146	97				
4	WAEWTI	168	95				
5	WAEWTI	146	96				
6	WAEWTI	155	98				
7	WAEWTI	142	97				
8	WAEWTI	146	96				
9	WAEWTI	153	98				
10	WAEWTI	155	97				

Sytuacja nawigacyjna nr 10 została przedstawiona na Rysunku 44. Środowisko symulacyjne składa się z 3 przeszkód statycznych oraz 6 przeszkód dynamicznych. Rysunek 45 przedstawia proces poszukiwania trajektorii zadanej dla najlepszych trajektorii uzyskanych przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO (prawa kolumna) oraz JAEWTI (lewa kolumna).



Rysunek 44. Sytuacja nawigacyjna nr 10

Na Rysunku 44 został przedstawiony proces poszukiwania trajektorii zadanej dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej.



Rysunek 45. Proces wyznaczania zadanej trajektorii statku przy zastosowaniu algorytmu JAEWTI(lewa kolumna) oraz JAEWTO(prawa kolumna) dla generacji 5, 50, 200, 250 oraz generacji końcowej dla sytuacji nawigacyjnej nr 10

W tabeli 4.12 przedstawione zostały końcowe wartości funkcji przystosowania dla wszystkich trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI dla 10 różnych populacji początkowych. Po prawej stronie przedstawione zostały wartości średnie uzyskiwane dla poszczególnych algorytmów jak również zakres osiąganych wyników.

Tabela 4.12. Wyniki końcowych wartości funkcji przystosowania dla sytuacji nawigacyjnej nr 10

Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTO	130	48	48	127	125	130
2	JAEWTO	127	49				
3	JAEWTO	127	48				
4	JAEWTO	126	48				
5	JAEWTO	127	49				
6	JAEWTO	125	47				
7	JAEWTO	125	48				
8	JAEWTO	126	49				
9	JAEWTO	127	49				
10	JAEWTO	126	47				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	JAEWTI	123	76	75	123	122	124
2	JAEWTI	123	78				
3	JAEWTI	122	74				
4	JAEWTI	123	74				
5	JAEWTI	123	75				
6	JAEWTI	124	75				
7	JAEWTI	122	75				
8	JAEWTI	122	74				
9	JAEWTI	123	76				
10	JAEWTI	124	74				
Nr populacji	Typ algorytmu	Wartość funkcji przystosowania	Czas [s]	Średni czas [s]	Wartość funkcji przystosowania		
					Średnia	Min.	Maks.
1	WAEWTI	124	109	109	124	123	125
2	WAEWTI	123	107				
3	WAEWTI	123	109				
4	WAEWTI	123	111				
5	WAEWTI	123	108				
6	WAEWTI	124	108				
7	WAEWTI	123	107				
8	WAEWTI	124	111				
9	WAEWTI	125	109				
10	WAEWTI	123	110				

4.1.1 Wyniki badań porównawczych algorytmów modelowania trajektorii przy zastosowaniu interpolacji wielomianowej oraz odcinków prostych

Badane algorytmy wyznaczały trajektorię zadaną statku własnego dla 10 przykładowych sytuacji nawigacyjnych oraz różnych populacji początkowych.

Przedstawione wyniki badań pozwalają stwierdzić iż wyznaczone trajektorie różniły się między sobą w zależności od zastosowanego algorytmu pod względem:

- czasu obliczeń,
- średniej wartości końcowej funkcji przystosowania,
- rozrzutu pomiędzy minimalną oraz maksymalną wartością końcowej funkcji przystosowania,
- możliwości rzeczywistej realizacji trajektorii przez statek (różnica pozycji pomiędzy wyznaczoną trajektorią zadaną, a trajektorią wynikającą z symulacji rzeczywistego ruchu statku wzdłuż niej).

Czas obliczeń

Wartość średnia czasu obliczeń różniła się w zależności od stopnia skomplikowania sytuacji nawigacyjnej i mieściła się w przedziałach: 34-85s dla JAEWTO, 62- 148s dla JAEWTI oraz 95-244s w przypadku WAEWTI. Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, iż rozwiązania uzyskiwane przy zastosowaniu JAEWTO wyznaczone są dwukrotnie szybciej niż w przypadku tożsamyh rozwiązań uzyskiwanych dla trajektorii modelowanej przy zastosowaniu JAEWTI i prawie trzykrotnie szybciej niż w przypadku zastosowania wariantu wielopopulacyjnego. Różnice w czasie obliczeń wynikały ze stopnia skomplikowania sytuacji nawigacyjnej, konieczności dyskretyzacji rozwiązań uzyskiwanych przy zastosowaniu interpolacji wielomianowej, jak również prowadzenia obliczeń dla kilku populacji jednocześnie w przypadku wariantu wielopopulacyjnego. Maksymalny czas obliczeń wyniósł 244s, dla jednej z sytuacji kolizyjnych w wariantcie wielopopulacyjnym. Można więc stwierdzić iż niezależnie od zastosowanego algorytmu wszystkie rozwiązania zostały wyznaczone w czasie zbliżonym do rzeczywistego, a więc są akceptowalne.

Wartość funkcji przystosowania (średnia, minimalna oraz maksymalna)

W odniesieniu do końcowej wartości funkcji przystosowania, osiągnane rozwiązania różniły się zarówno pod względem wartości minimalnej, wartości średniej jak i zakresu zmienności.

W przypadku kilku środowisk (sytuacja nawigacyjna nr 2,4,7,9,10) można zaobserwować, iż niezależnie od użytego algorytmu, wartość średnia znajduje się na zbliżonym poziomie i charakteryzuje się niewielkim rozrzutem, a więc uzyskiwane rozwiązania są stabilne. W przypadku sytuacji kolizyjnej nr 2, niezależnie od zastosowanego algorytmu, średnia wartość osiągnanej funkcji przystosowania zawiera się w przedziale 149-169. Zakres zmienności osiągnanych wyników wynosi 143-198 dla JAEWTO, 149-166 dla JAEWTI oraz 146-155 dla WAEWTI. Na przykładzie tym zaobserwować można fakt, iż pomimo niewielkiej różnicy w osiągnanych wartościach funkcji przystosowania, nakład obliczeniowy dla JAEWTI jest około dwukrotnie większy w odniesieniu do JAEWTO i niemal trzykrotnie większy dla WAEWTI. W przypadku sytuacji kolizyjnych nr 4,7,9,10 analogicznie, uzyskujemy rozwiązania o zbliżonych końcowych wartościach funkcji przystosowania z niewielkim rozrzutem osiągnanych wyników. Dla sytuacji kolizyjnej nr 4 średnia wartość osiągnanej funkcji przystosowania zawiera się w granicach 132-146, a zakres 131-152. Dla sytuacji kolizyjnej nr 7 wartość średnia dla wszystkich algorytmów wynosi 129-135 natomiast rozrzut zawiera się w przedziale 122-146. Dla sytuacji nr 9 średnie wartości wynoszą 145-156, natomiast zakres zmienności końcowej wartości funkcji przystosowania mieści się w granicach 142-168. Dla sytuacji 10 średnia wartość funkcji przystosowania wynosi 123-127 i charakteryzuje się najmniejszym rozrzutem wartości 122-130. Podobieństwa występują również w odniesieniu do nakładu obliczeniowego dla poszczególnych algorytmów.

W przypadku sytuacji kolizyjnych nr 1,6,8 można zaobserwować, iż algorytm WAEWTI uzyskiwał najlepsze wartości końcowej funkcji przystosowania, dodatkowo charakteryzując się

niewielkim rozrzutem uzyskiwanych rozwiązań. W przypadku sytuacji kolizyjnej nr 1 wartość końcowa funkcji przystosowania była powtarzalna i na stabilnym poziomie jedynie dla wariantu wielopopulacyjnego algorytmu (wartość średnia wynosiła 160). Zakres zmienności zawierał się w przedziale (146-186). W przypadku wariantu jednopopulacyjnego JAEWTO średnia wartość funkcji przystosowania była na poziomie 194, jednakże rozrzut wartości funkcji przystosowania zawierał się w przedziale (144-244). Dla JAEWTI średnia wartość funkcji przystosowania wynosiła 206 natomiast zakres zmienności wartości końcowej funkcji przystosowania wynosił (167-268). Podobnie rozwiązania kształtowały się dla sytuacji 6 oraz 8. Dla sytuacji kolizyjnej nr 6 wartość średnia funkcji przystosowania algorytmów JAEWTO oraz JAEWTI jest zbliżona i znajduje się na poziomie 169-176, natomiast dla WAEWTI wynosi 140. Dodatkowo zakres zmienności dla algorytmu jednopopulacyjnego znajduje się w zakresie 117-290, natomiast rozwiązania uzyskane dla WAEWTI charakteryzują się znacznie mniejszym rozrzutem i zawierają się w przedziale 138-145. Dla sytuacji 8 algorytm WAEWTI osiąga wartość średnią rozwiązań na poziomie 126 podczas gdy wartość średnia rozwiązań dla algorytmów jednopopulacyjnych zawiera się w przedziale 160-185. Wartości funkcji przystosowania dla WAEWTI były na stabilnym poziomie i zawierały się w przedziale 122-131, natomiast dla algorytmów jednopopulacyjnych wartość końcowych rozwiązań zawierała się w znacznie szerszym zakresie pomiędzy 127-263.

W przypadku dwóch pozostałych sytuacji kolizyjnych zaobserwować można nieznaczną przewagę algorytmów korzystających z interpolacji wielomianowej w odniesieniu do wartości funkcji przystosowania. W przypadku sytuacji kolizyjnej nr 3 oraz 5 algorytm miał największe problemy ze znalezieniem rozwiązania końcowego. Dla każdego algorytmu można zaobserwować znaczący rozrzut w osiąganych wartościach funkcji przystosowania, gdzie dla sytuacji 3 wynosi on 155-314 dla JAEWTO, 143-315 dla JAEWTI oraz 148-345 dla WAEWTI natomiast dla sytuacji nr 5, 137-456 dla JAEWTO, 215-315 dla JAEWTI oraz 169-245 dla WAEWTI. W przypadku tych sytuacji zaobserwować można przewagę algorytmów korzystających z interpolacji wielomianowej, szczególnie wariantu wielopopulacyjnego algorytmu. Pomimo rozrzutu w wartościach końcowej funkcji przystosowania, wartość średnia znajdowała się na poziomie 172, w odniesieniu do 180 dla JAEWTI oraz 241 uzyskanych w metodzie JAEWTO. Dla sytuacji nr 5 wynosił 210 dla WAEWTI w stosunku do 245 dla JAEWTI oraz 277 dla JAEWTO.

Kształt trajektorii

W odniesieniu do wartości końcowej funkcji przystosowania w przypadku większości sytuacji kolizyjnych przedstawionych powyżej (sytuacje nawigacyjne nr 2,4,7,9,10) można stwierdzić, iż niezależnie od zastosowanego algorytmu, osiągane rezultaty były na zbliżonym poziomie, jednocześnie charakteryzując się niewielkim zakresem zmienności. W przypadku porównywania trajektorii uzyskanych wszystkimi trzema algorytmami, końcowa wartość funkcji przystosowania nie może być jednak jedynym wskaźnikiem oceny służący do ich porównania. Wartość funkcji przystosowania byłaby jedynym wskaźnikiem, jeżeli zostałoby przyjęte założenie, że statek jest w stanie dokładnie pokonać trajektorię zadaną, bez przeregulowań i odchyłek od niej. Dlatego też przy ocenie trajektorii koniecznym jest uwzględnienie jej kształtu.

Istotność kształtu trajektorii zaobserwować można w sytuacjach nawigacyjnych nr 2,4,7,9,10. W rozpatrywanych przypadkach wartości końcowej funkcji przystosowania znajdują się na zbliżonym poziomie, jednakże trajektorie uzyskane przez algorytm JAEWTO (Rysunek 27,31,37,41,43) nie są z założenia możliwe do zrealizowania przez statek. Jest to najbardziej widoczne w okolicach punktów zwrotu, gdzie występować będą przeregulowania w trakcie sterowania statkiem wzdłuż trajektorii (zostanie to przedstawione w rozdziale 4.2). Przeregulowania skutkować będą zwiększeniem kosztów ekonomicznych, wynikających z wykonywania dodatkowych manewrów, jak również ze zwiększeniem długości trajektorii i czasu jej przebycia. Dlatego też rzeczywisty koszt trajektorii może znacząco różnić się od zakładanego.

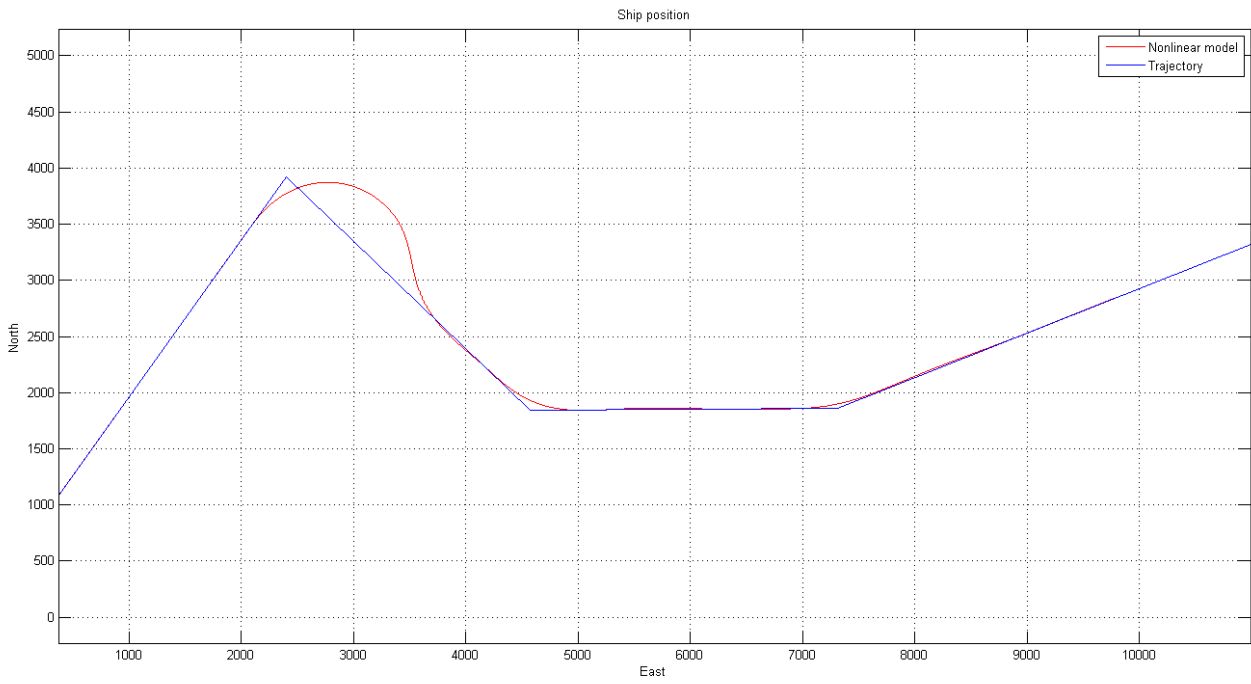
Wpływ kształtu trajektorii można również zaobserwować w przypadku pozostałych sytuacji nawigacyjnych np. 5 lub 6, dla których przykładowe trajektorie zadane zostały przedstawione na Rysunek 35 i Rysunek 37. Dla sytuacji nawigacyjnej nr 5 końcowe wartości funkcji przystosowania przy zastosowaniu algorytmu JAEWTO (135,156) są niejednokrotnie lepsze niż w przypadku zastosowania JAEWTI (215, 224) lub WAEWTI (169,171). Jednakże te rozwiązania, ze względu na kształt trajektorii nie są z założenia możliwe do zrealizowania przez statek.

W następnym rozdziale (4.2) przedstawione zostaną badania symulacyjne rzeczywistego ruchu statku, pozwalające na porównanie wyznaczonych trajektorii w odniesieniu do ich kształtu.

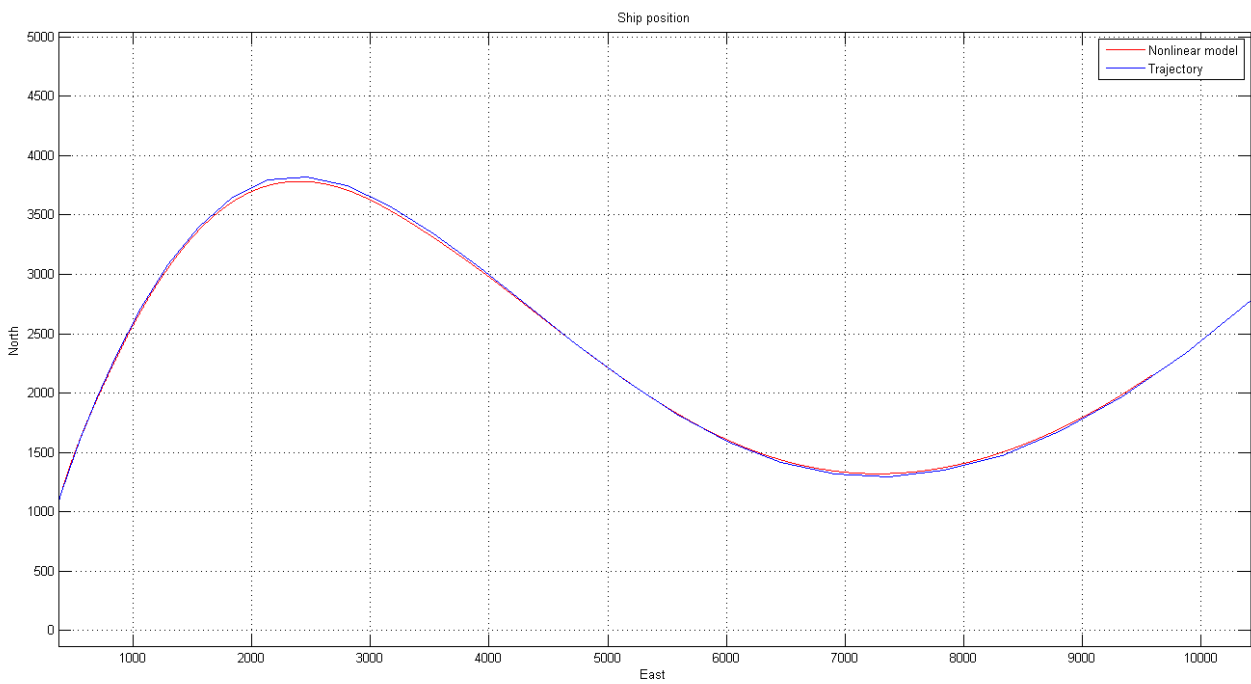
4.2 Badania rzeczywistego ruchu statku po trajektorii zadanej wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej

W niniejszym rozdziale przedstawione zostały badania symulacyjne ruchu statku dla wyznaczonych w rozdziale 4.1 metodami JAEWTO i JAEWTI trajektorii. W tym celu wykorzystany został model kontenerowca wraz z układem regulacji opisanym w rozdziale 3.4. Poniżej przedstawiono wyniki badań dla sytuacji nawigacyjnych od 1 do 10. Kolorem niebieskim przedstawiona została trajektoria zadana, natomiast kolorem czerwonym rzeczywista trajektoria ruchu statku.

a)

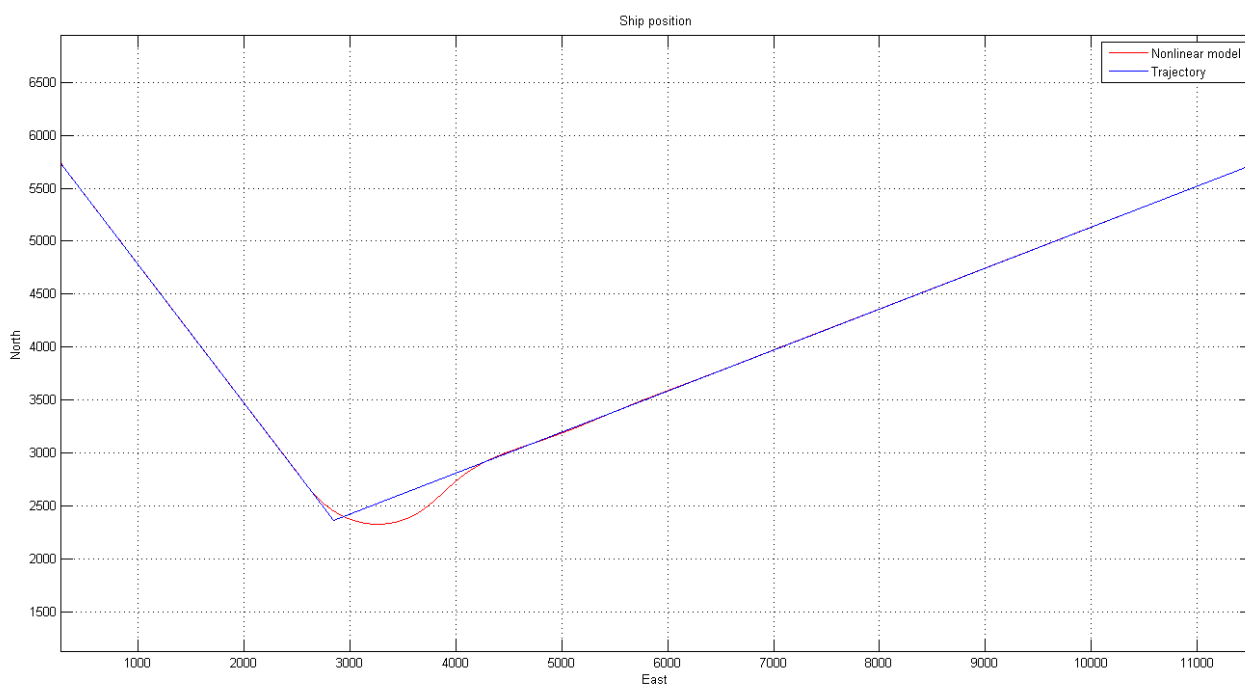


b)

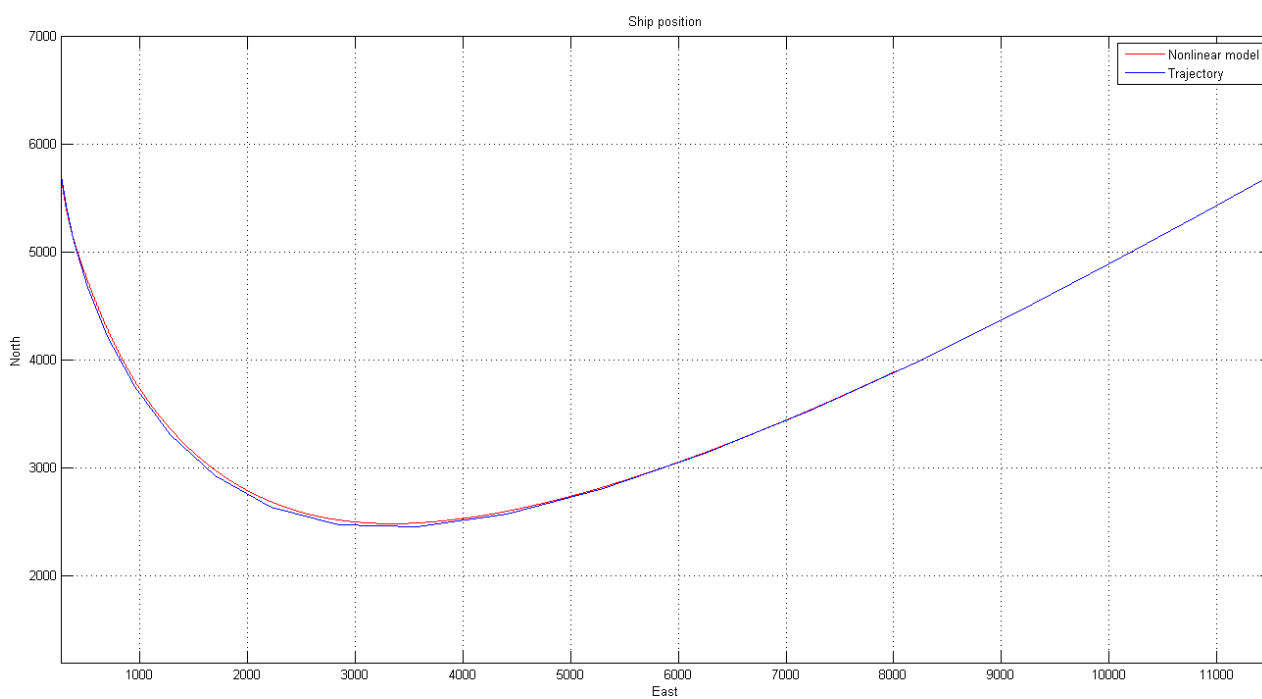


Rysunek 46. Sytuacja nawigacyjna nr 1- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

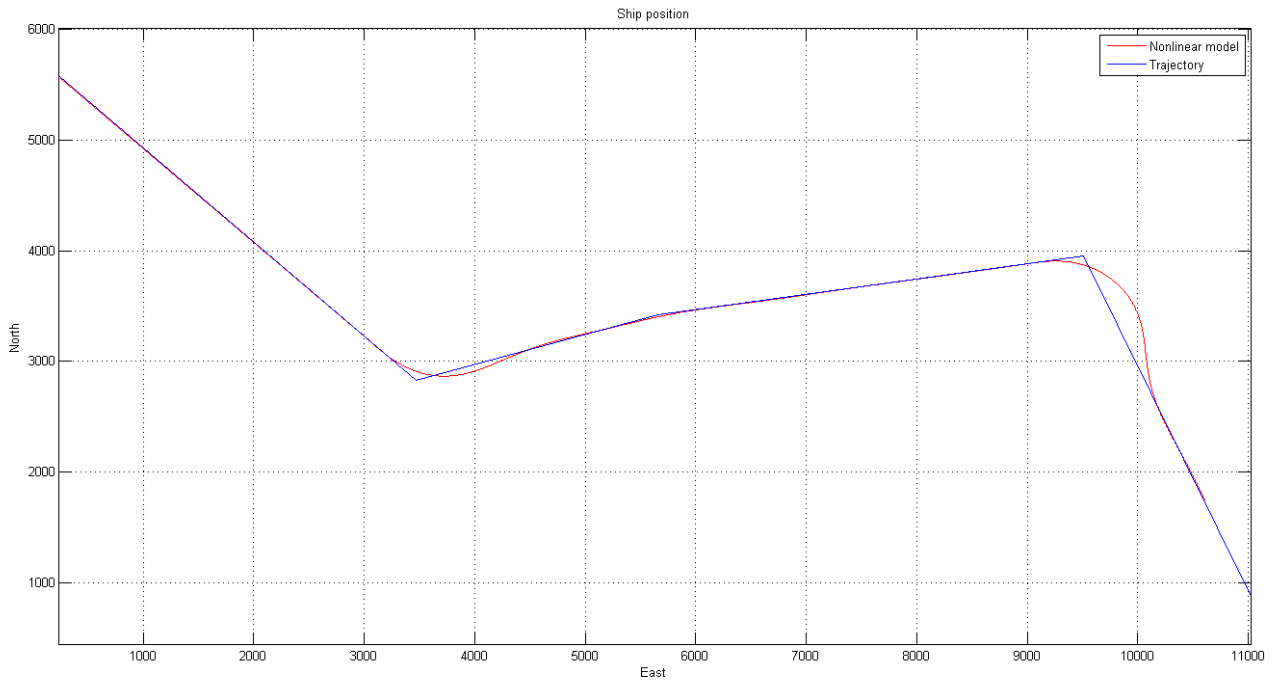


b)

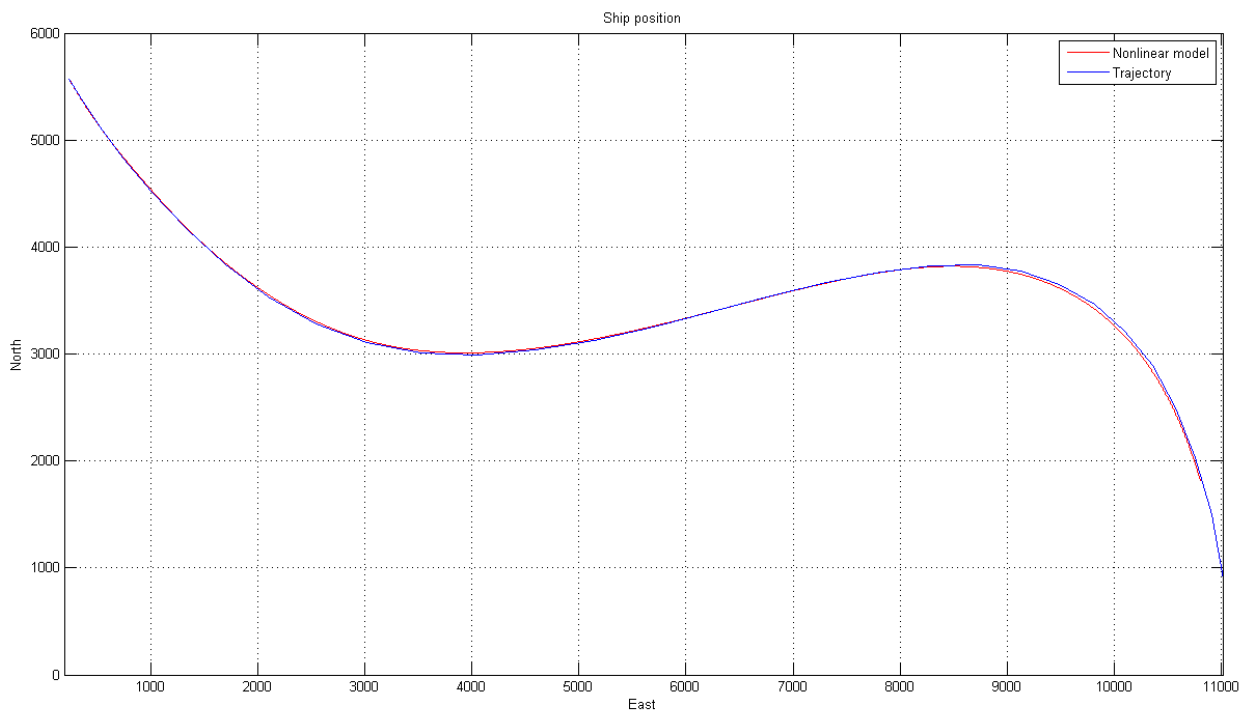


Rysunek 47. Sytuacja nawigacyjna nr 2- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

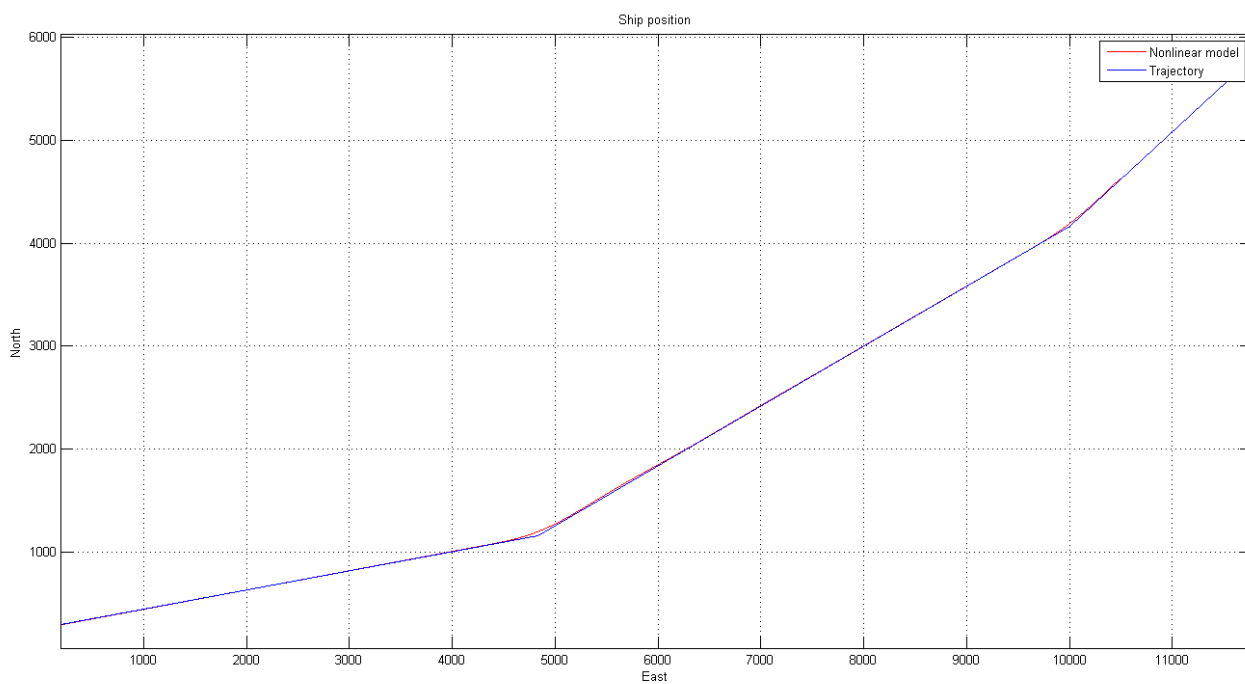


b)

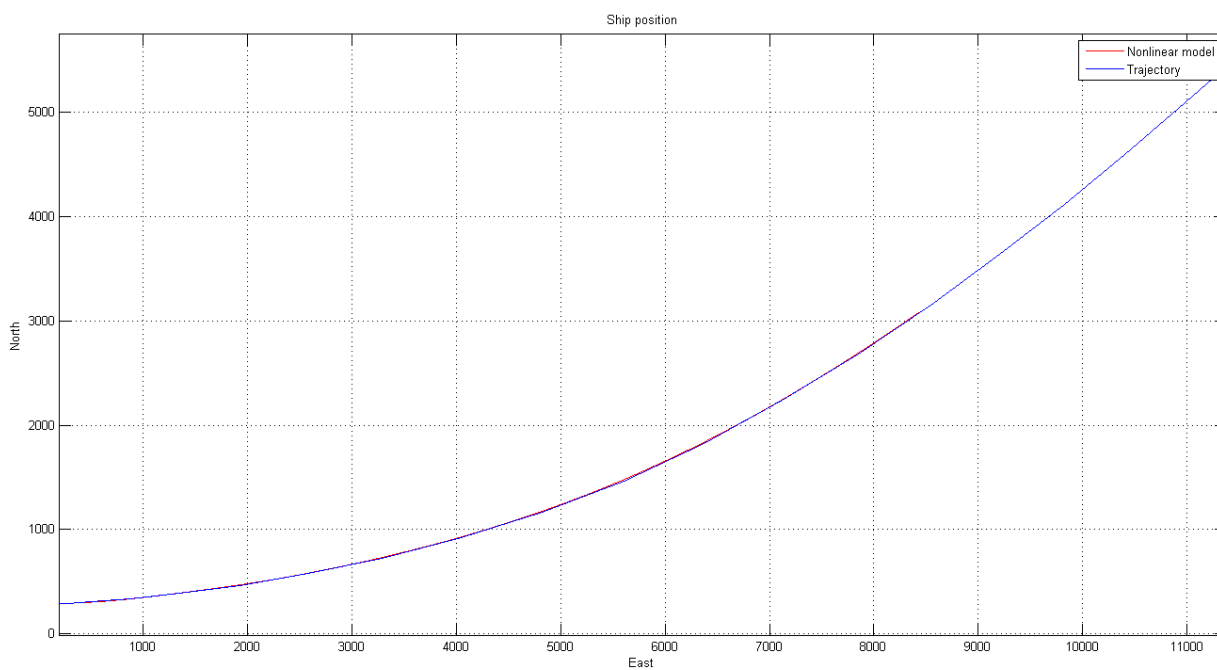


Rysunek 48. Sytuacja nawigacyjna nr 3- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

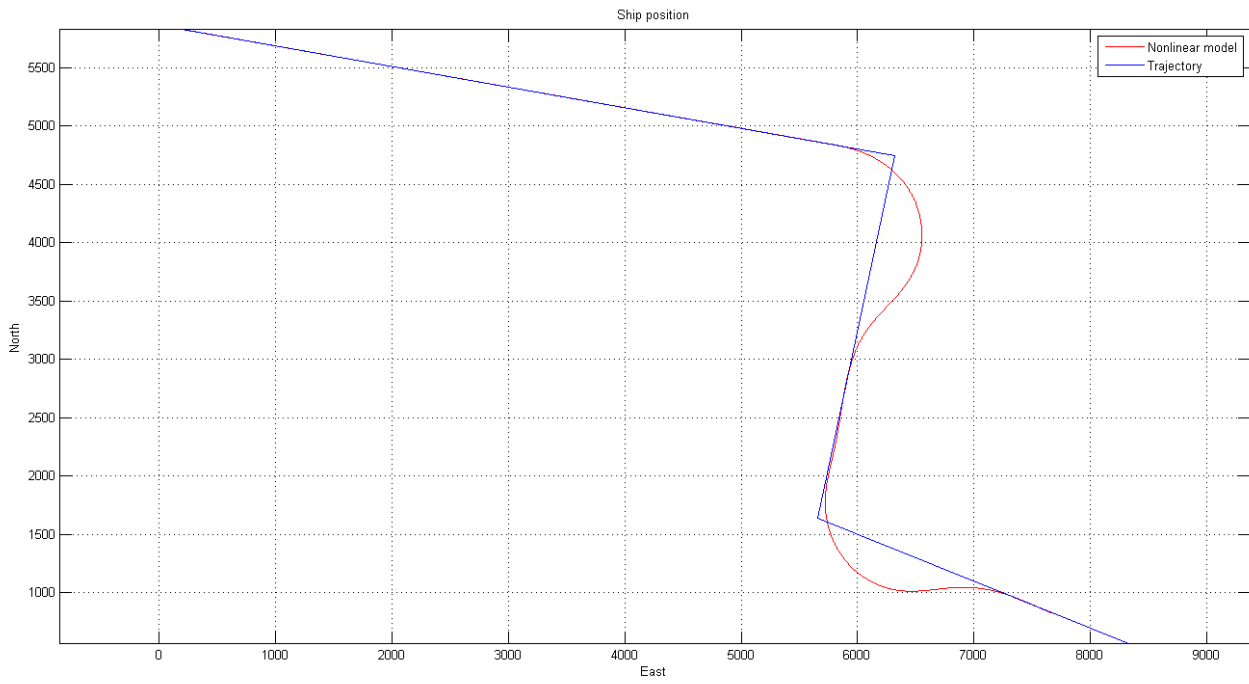


b)

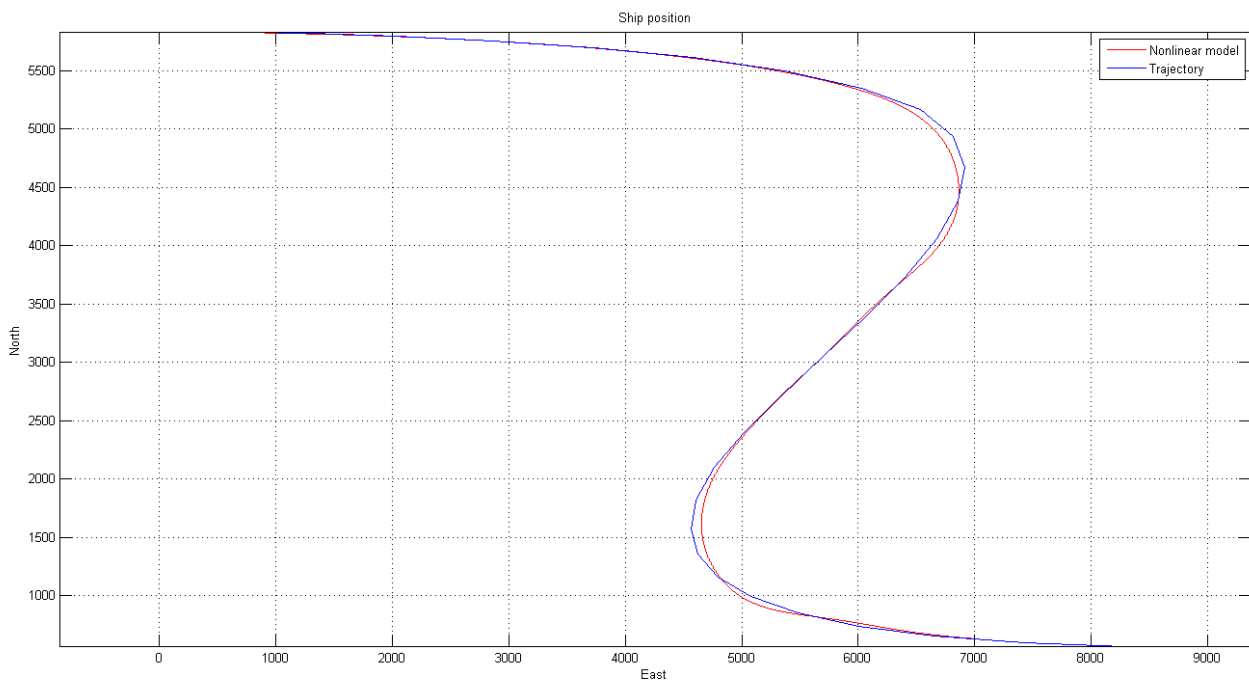


Rysunek 49. Sytuacja nawigacyjna nr 4- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

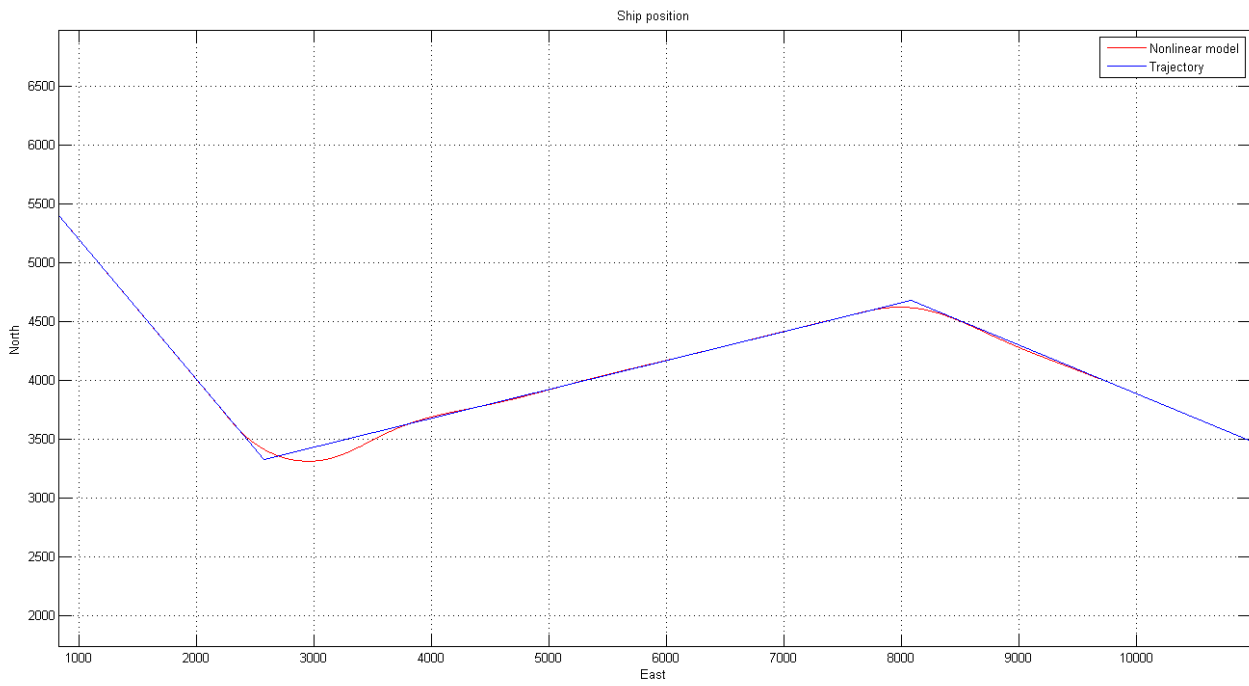


b)

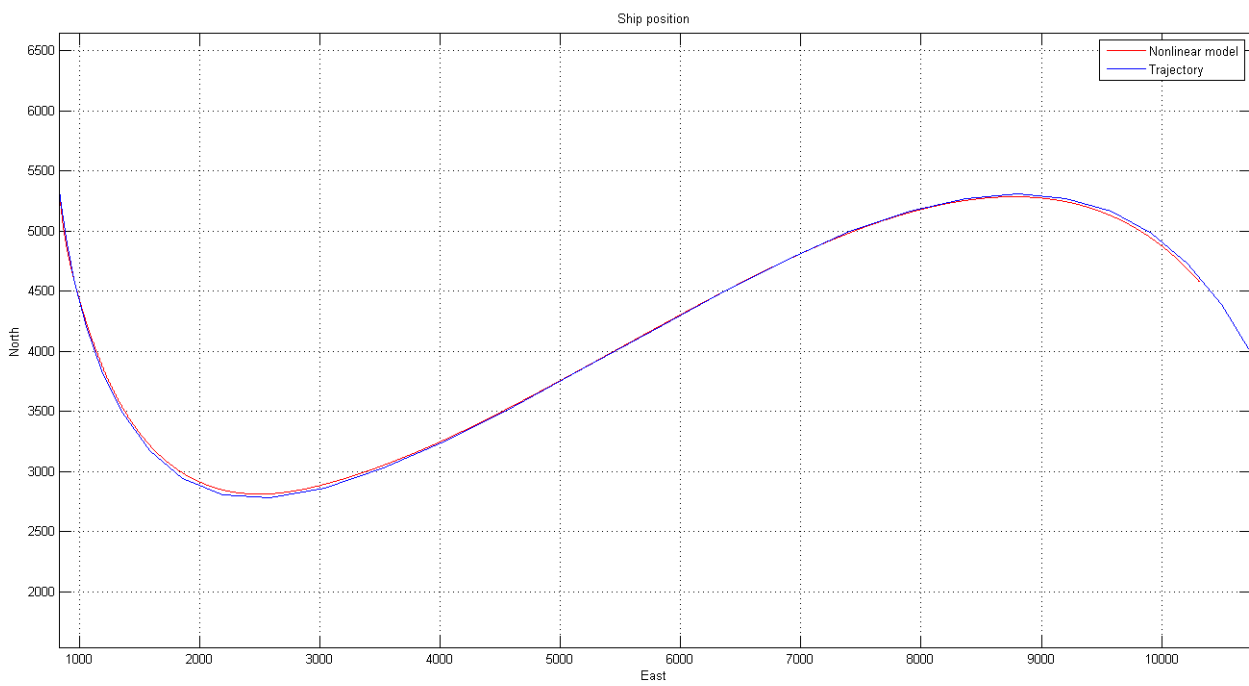


Rysunek 50. Sytuacja nawigacyjna nr 5- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

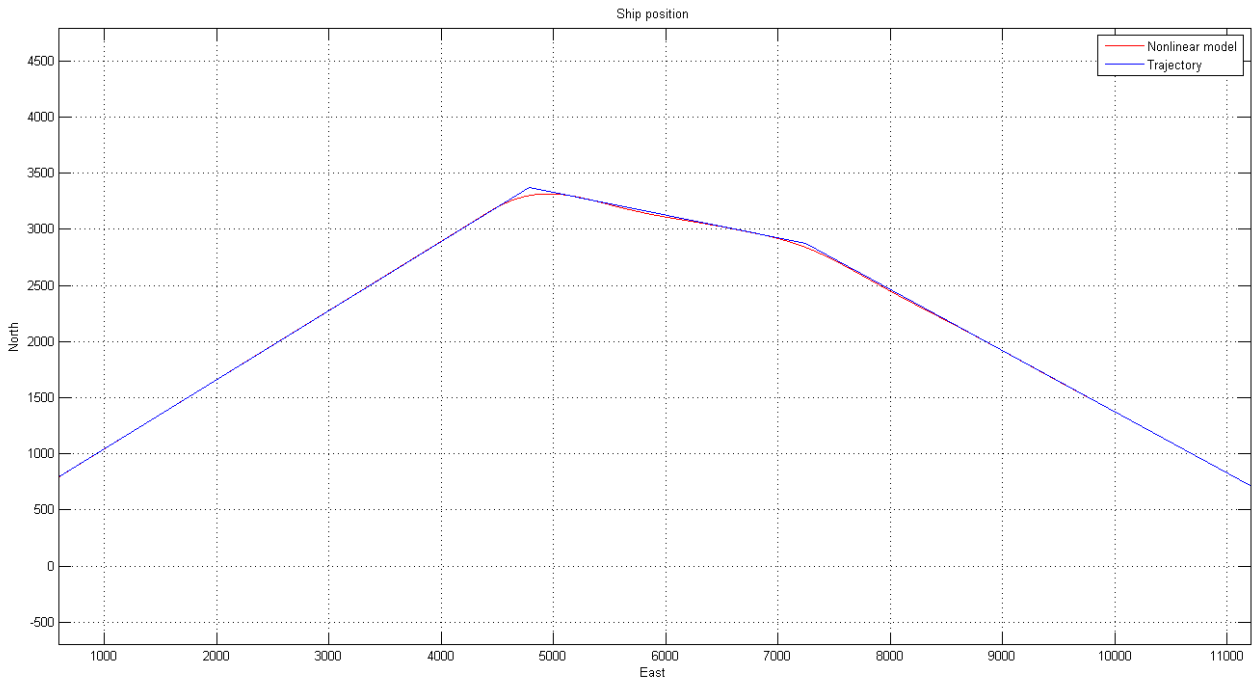


b)

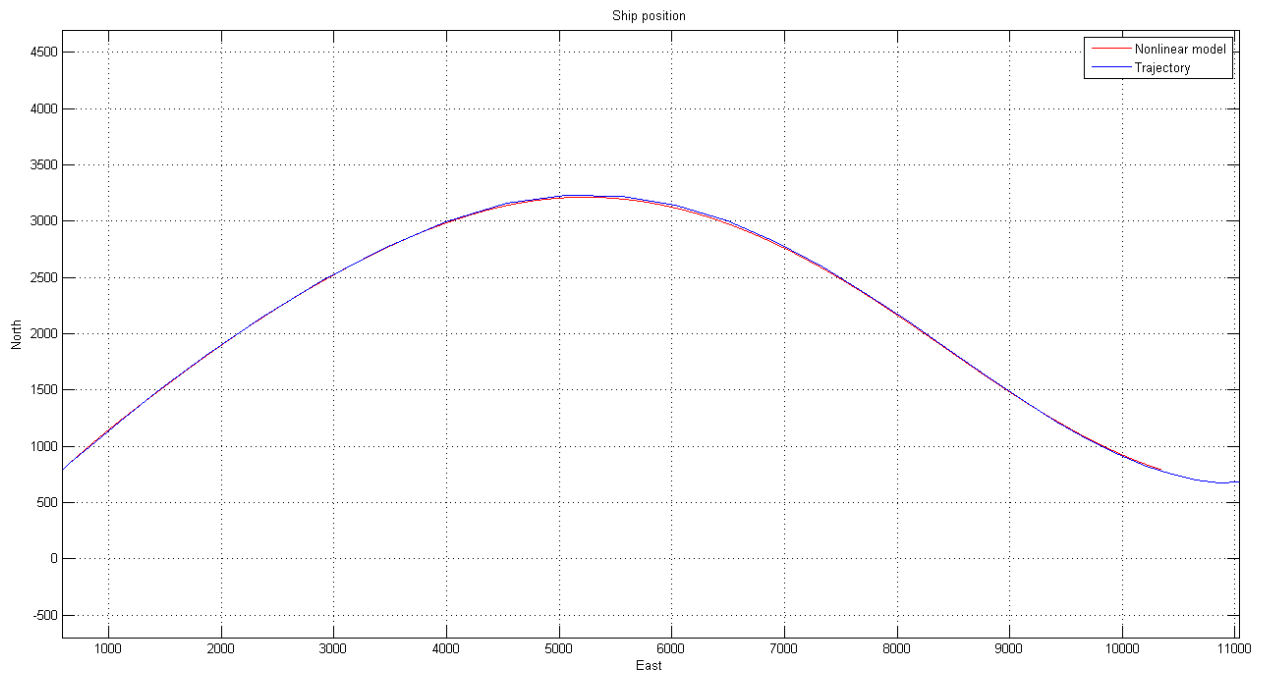


Rysunek 51. Sytuacja nawigacyjna nr 6- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

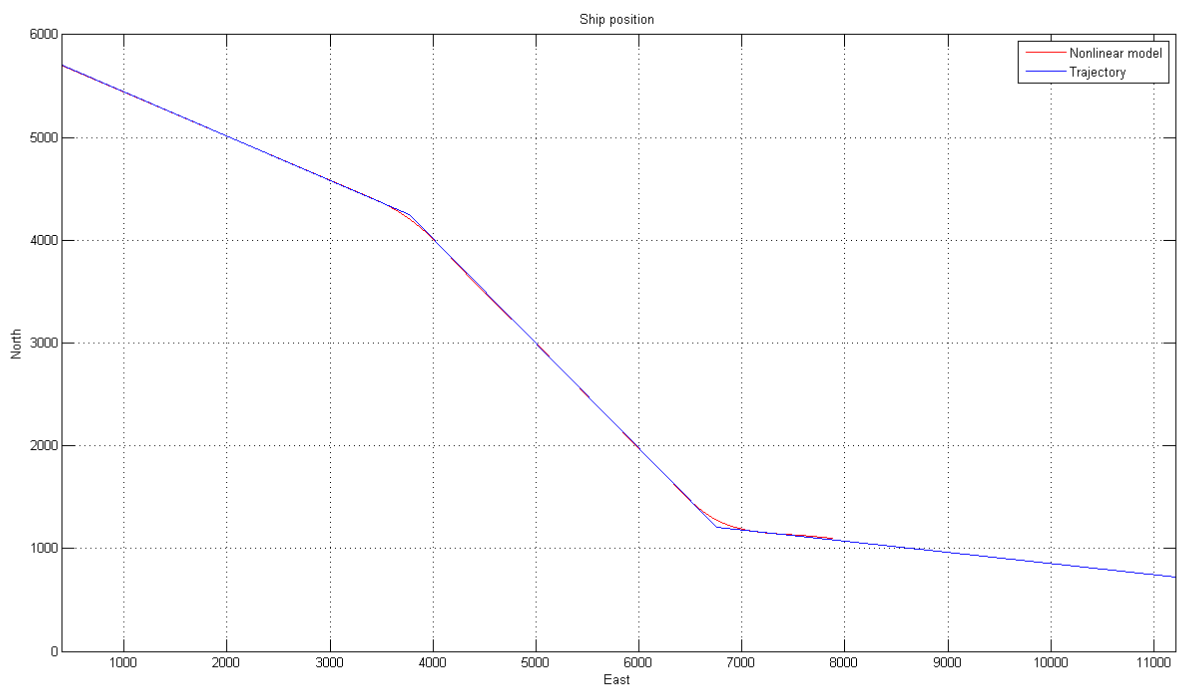


b)

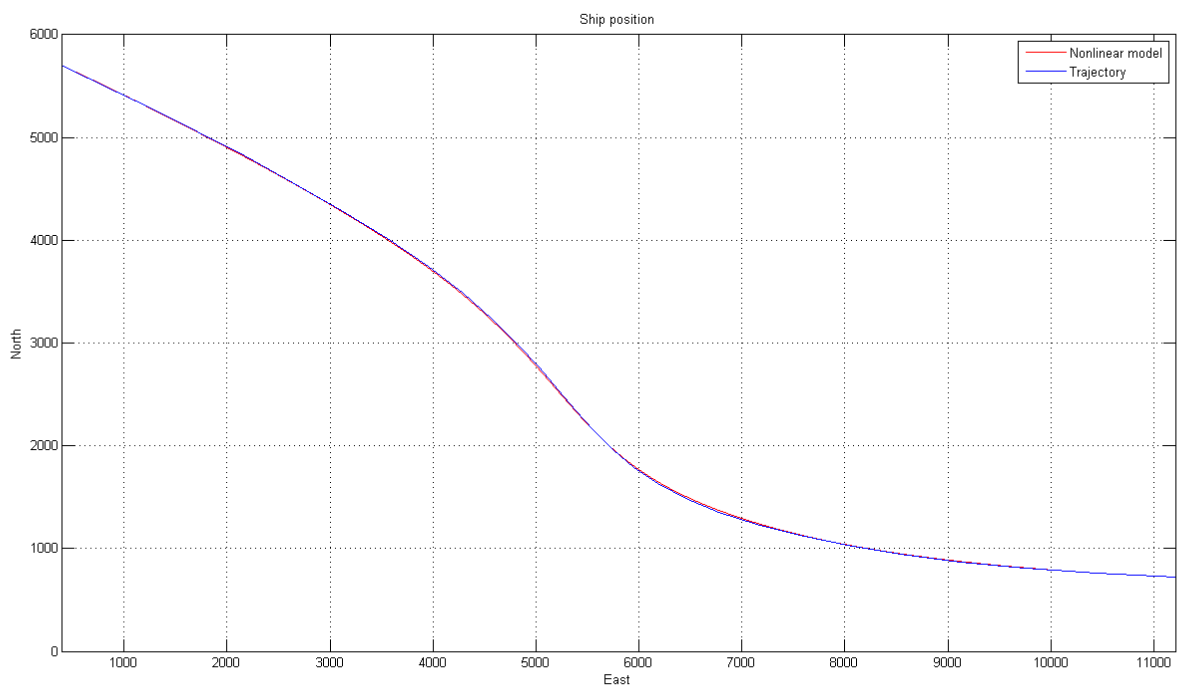


Rysunek 52. Sytuacja nawigacyjna nr 7- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

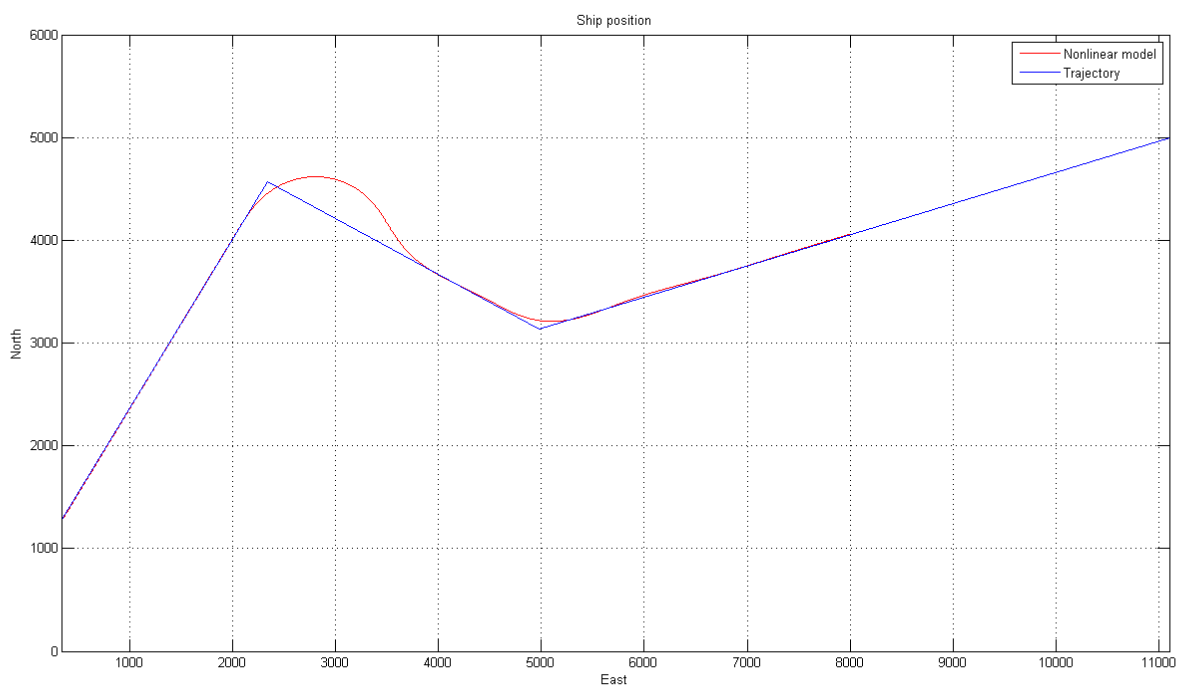


b)

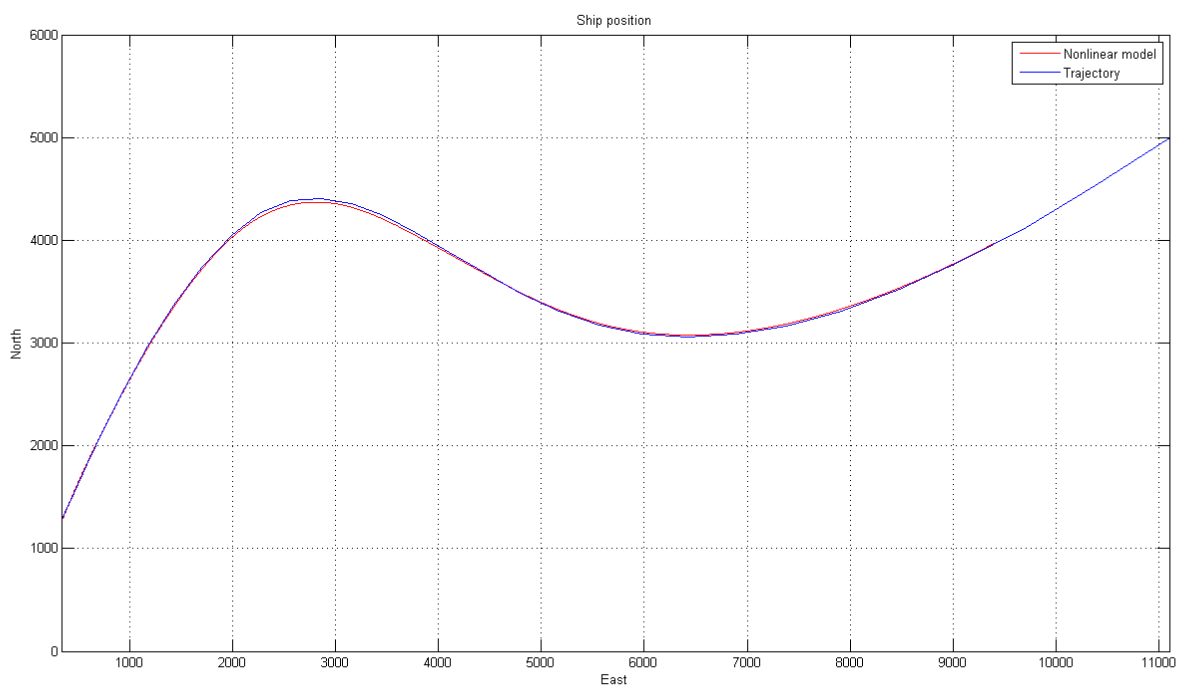


Rysunek 53. Sytuacja nawigacyjna nr 8- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)

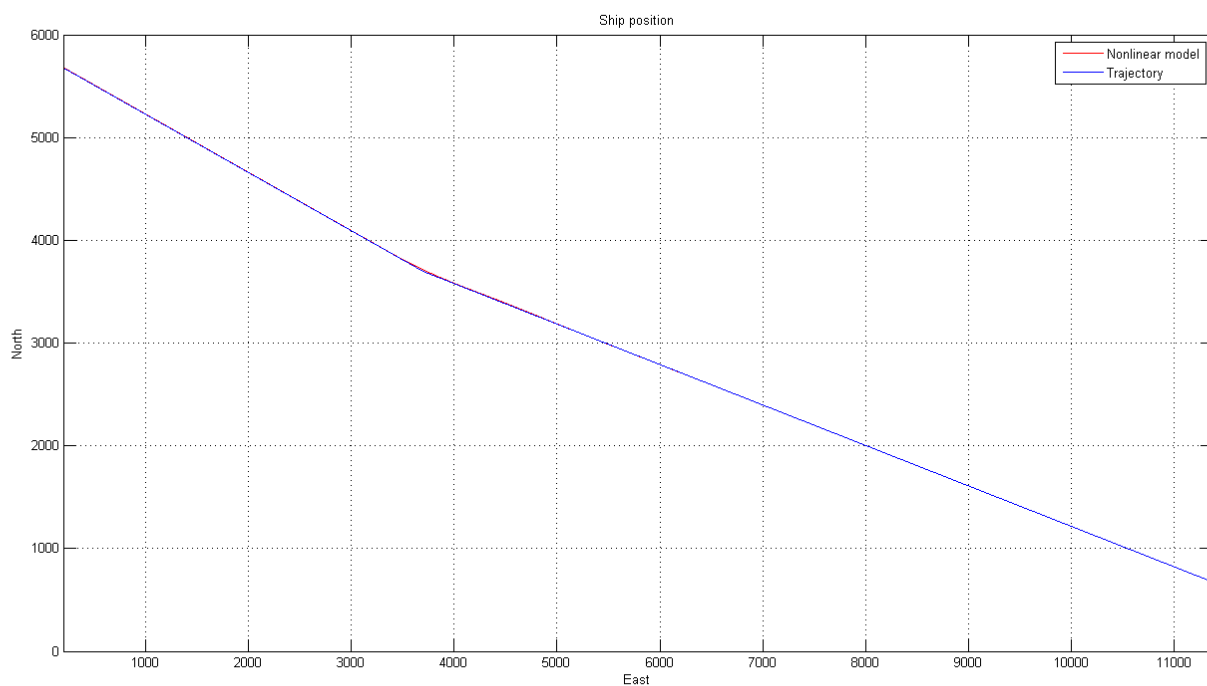


b)

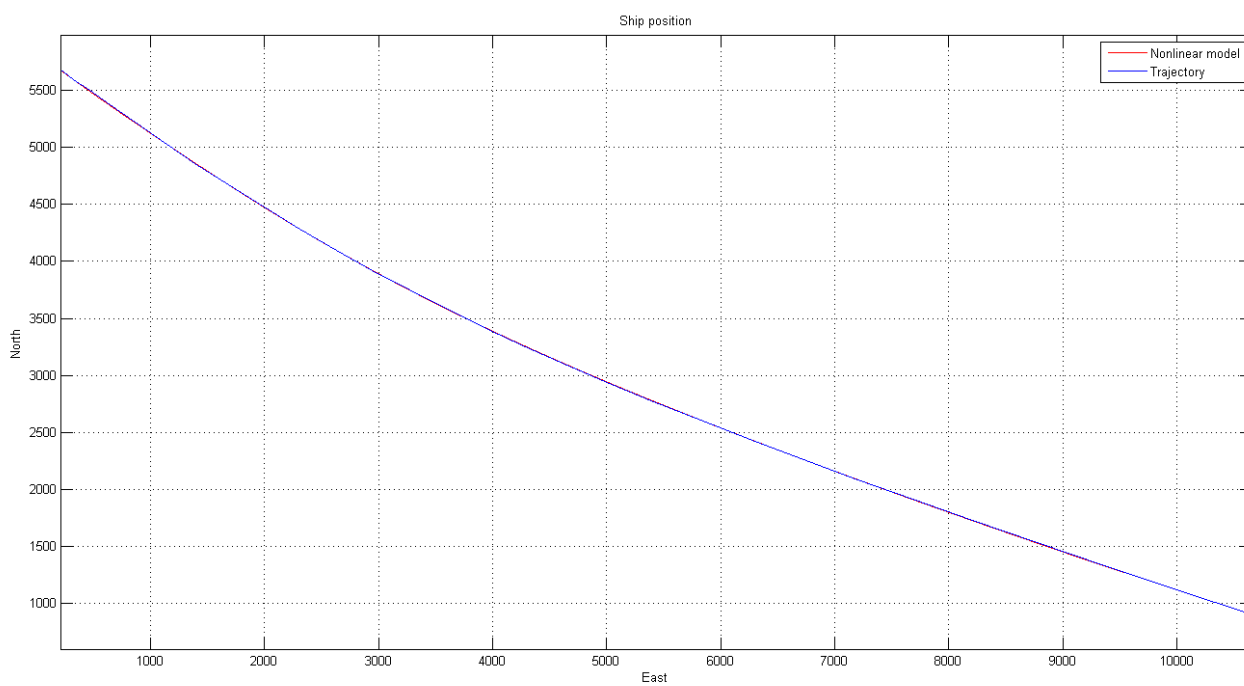


Rysunek 54. Sytuacja nawigacyjna nr 9- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

a)



b)



Rysunek 55. Sytuacja nawigacyjna nr 10- Symulacja rzeczywistego ruchu statku dla trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmu a) JAEWTO, b) JAEWTI

Na przykładzie sytuacji nawigacyjnej nr 1 wskazano zalety trajektorii wyznaczonej przy zastosowaniu interpolacji wielomianowej JAEWTI w stosunku do metody korzystającej z odcinków prostych JAEWTO. W przypadku metody JAEWTO występuje przeregulowanie, które powoduje odejście rzeczywistej trajektorii statku od jego wartości zadanej. Przeregulowania zwiększają rzeczywistą długość trajektorii oraz wpływają na zmianę położenia obiektów obcych w określonych chwilach czasowych, co w rezultacie może prowadzić do kolizji. Dodatkowo ze względu na odchylenie od wartości zadanej, koszt podróży (rzeczywista wartość funkcji celu) będzie różnić się od zakładanej. W przypadku trajektorii uzyskanej metodą interpolacji, rzeczywisty ruch statku jest prawie identyczny z trajektorią zadaną. Dlatego też wartość funkcji celu wyznaczonej tą metodą będzie zbliżona do rzeczywistej jej wartości.

Podobnie wnioski można przedstawić w przypadku sytuacji nawigacyjnych nr 2, 3, 6, 9, gdzie dla metody JAEWTO zaobserwowano odchylenia rzeczywistego toru ruchu statku od trajektorii zadanej. W przypadku sytuacji nawigacyjnej numer 5 różnice te są największe. Rzeczywista trajektoria ruchu statku różni się od zadanej wyznaczonej metodą JAEWTO, naruszając tym samym obszar zajęty przez ograniczenia dynamiczne. Na przykładzie tej sytuacji nawigacyjnej widać, iż po uwzględnieniu ograniczeń wynikających z własności dynamicznych statku w przypadku metody JAEWTO, istnieje konieczność ponownego wyznaczenia trajektorii zadanej.

Trajektorie wyznaczone dla sytuacji nawigacyjnych nr 4, 7, 8, 10 wyznaczone zarówno metodą JAEWTO jak i JAEWTI są gładkie, dlatego też występują tylko niewielkie odchylenia od trajektorii zadanej. W przypadku tych sytuacji nawigacyjnej, trajektorie wyznaczone obiema metodami mogą odwzorowywać rzeczywisty ruch statku. W przypadku metody JAEWTO można stwierdzić, że jeżeli kąt rozchylenia pomiędzy sąsiadującymi segmentami jest niewielki, trajektoria zadana zostaje prawidłowo odwzorowana przez ruch statku. Wraz ze wzrostem tego kąta zwiększają się różnice pomiędzy trajektorią rzeczywistą a zadaną.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, iż dla wszystkich sytuacji nawigacyjnej, trajektorie zadane wyznaczone metodą interpolacji wielomianowej mogą odwzorowywać rzeczywisty ruch statku. Odmienna sytuacja występuje w przypadku metod korzystających z modelowania trajektorii przy zastosowaniu odcinków prostych, gdzie tak jak w przypadku sytuacji nawigacyjnych 1, 2, 3, 5, 9 trajektoria rzeczywista różni się od trajektorii zadanej. Może to skutkować kolizją z obiektami obcymi, jak również zwiększeniem kosztu realizacji trajektorii. W przypadku metod korzystających z interpolacji wielomianowej, niewielkie niedokładności między trajektorią zadaną a rzeczywistą (sytuacja nawigacyjna nr 5) wynikają ze specyfiki metody LOS. W odniesieniu do prób cyrkulacji statku, tak wyznaczona trajektoria zadana przy neutralnych warunkach pogodowych, jest teoretycznie możliwa do zrealizowania.

5 Wnioski

W pracy zaproponowano dwa warianty algorytmów poszukiwania trajektorii zadanej statku, jednopopulacyjny algorytm JAEWTI i wielopopulacyjny algorytm WAEWTI. Głównymi zaletami przedstawionych algorytmów w odniesieniu do obecnie stosowanych rozwiązań są:

- modelowanie trajektorii zadanej, która odwzorowuje rzeczywisty ruch statku - pozwala to na kierowanie jego ruchem bez przeregulowań oraz zwiększenie dokładności oszacowania kosztu przebycia trajektorii. Umożliwia to również precyzyjne wyznaczenie pozycji, w jakiej będzie znajdował się statek własny w określonej chwili czasowej, co warunkuje poprawne wyznaczenie manewrów antykolizyjnych,
- możliwość aplikacji w systemach wspomagania decyzji nawigatora pracujących w trybie „on-line”, w dynamicznie zmieniającym się środowisku morskim - krótki czas obliczeń umożliwia wprowadzenie korekty uwzględniającej zmianę strategii obiektów obcych, w trakcie manewrowania wzdłuż uprzednio wyznaczonej trajektorii,
- weryfikacja trajektorii zadanej o własności dynamiczne statku w trakcie trwania procesu optymalizacji - trajektorie zadane wyznaczone zaproponowanymi metodami, spełniają ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku, ponieważ ich weryfikacja realizowana jest w trakcie każdej generacji algorytmu. Dlatego też nie ma konieczności wykonywania żadnych dodatkowych modyfikacji trajektorii po zakończeniu obliczeń. W przypadku obecnie stosowanych metod, weryfikacja własności dynamicznych realizowana jest po procesie optymalizacji. Jak zostało wskazane w punkcie 3.3.1 może to skutkować koniecznością ponownego wyznaczenia trajektorii zadanej, ponieważ po aplikacji własności dynamicznych, trajektoria zadana narusza ograniczenia nawigacyjne.

Przedstawione w pracy algorytmy JAEWTI i WAEWTI zostały porównane z algorytmem referencyjnym JAEWTO. Porównując końcowe wartości funkcji przystosowania, najlepsze rezultaty osiągnęły dla algorytmu WAEWTI. Rozwiązania uzyskiwane przez ten algorytm charakteryzowały się najmniejszą różnicą pomiędzy wartością maksymalną a minimalną, jak również średnią wartością funkcji przystosowania. Algorytmy JAEWTI i JAEWTO dla przykładowych sytuacji nawigacyjnych (nr 2,4,7,9,10) uzyskiwały rozwiązania zbliżone do algorytmu WAEWTI, jednakże w pozostałych przypadkach różniły się już pod względem średniej wartości funkcji przystosowania dla generowanych losowo 10 populacji początkowych, co zostało dokładnie opisane w punkcie 4.1.1.

W odniesieniu do nakładu obliczeniowego, najkrótszym czasem obliczeń charakteryzował się algorytm JAEWTO. JAEWTI potrzebował średnio 2-krotności tego czasu, natomiast WAEWTI 3-krotności. Rozwiązania uzyskiwane dla wszystkich algorytmów otrzymywane były w czasie zbliżonym do rzeczywistego, dlatego też wszystkie są akceptowalne (najdłuższy czas obliczeń wyniósł 244s).

W rozdziale 4.2 wykazano, że ważnym aspektem przy wyznaczaniu zadanej trajektorii statku, jest odpowiedni dobór metody modelowania kształtu trajektorii. W przypadku algorytmów JAEWTI i WAEWTI można dokładniej określić pozycję, w jakiej będzie znajdował się statek własny w określonej chwili czasowej, ponieważ odwzorowuje ona rzeczywisty ruch statku, dodatkowo uwzględniając spadki prędkości przy wykonywaniu manewrów. Odchylenie od trajektorii zadanej, wynikające z przeregulowań przy manewrowaniu wzdłuż trajektorii w algorytmie JAEWTO, wpływa na poprawność wyznaczenia manewrów antykolizyjnych, ponieważ obiekty obce będą znajdować się w innym położeniu niż było to założone w momencie rozpoczęcia obliczeń. Błędne oszacowanie położenia statku obcego może skutkować kolizją. Dodatkowo ze względu na przeregulowania w okolicach punktów zwrotu, zwiększy się koszt przebycia trajektorii.

W metodach korzystających z interpolacji wielomianowej niewielkie odchylenie od trajektorii zadanej, w trakcie manewrowania wzdłuż trajektorii, można zaobserwować jedynie w przypadku sytuacji nawigacyjnej nr 5. Wynikają one jednak z niedoskonałości metody sterowania (Regulator PD, LOS).

Uwzględniając wyniki prób cyrkulacji można stwierdzić, że manewry te są możliwe do wykonania przez statek. Metoda sterowania statkiem przedstawiona w pracy nie jest optymalna, miała natomiast za zadanie wskazać główne różnice podczas manewrowania statkiem wzdłuż trajektorii wyznaczonymi 3 badanymi metodami. Dobranie optymalnej metody sterowania, nastaw oraz badanie wpływu zakłóceń na rzeczywistą trajektorię rejsu realizowane jest w warstwie sterowania bezpośredniego statkiem przedstawionej na Rysunku 1 i wykracza poza zakres pracy.

W odniesieniu do celów założonych w pracy algorytmy JAEWTI i WAEWTI pozwalają na:

- wyznaczenie trajektorii zadanej w czasie zbliżonym do rzeczywistego,
- zamodelowanie trajektorii zadanej mogącej odzwierciedlać rzeczywisty ruch statku, dodatkowo zachowując ciągłość prędkości i przyspieszeń wzdłuż trajektorii,
- uwzględnienie własności dynamicznych statku w trakcie procesu optymalizacji trajektorii.

Na tej podstawie można stwierdzić, że zaproponowane algorytmy spełniają założenia przedstawione w celach pracy.

PODSUMOWANIE

Wyznaczanie bezpiecznej trajektorii statku w sytuacji kolizyjnej na morzu jest złożonym problemem optymalizacji wielokryterialnej. Poza kryteriami bezpieczeństwa, ważnym aspektem jest spełnienie kryteriów ekonomicznych. W celu prawidłowego wyznaczenia manewrów antykolizyjnych oraz dokładnego oszacowania kosztów podróży istotne jest, aby precyzyjnie określić miejsce statku własnego w określonej chwili czasu. Dlatego też należy zamodelować trajektorie w taki sposób, aby mogły odwzorowywać rzeczywisty ruch statku.

Na podstawie literatury należy stwierdzić, że proponowane rozwiązania nie wyznaczają trajektorii zadanej, odwzorowującej rzeczywisty ruch statku, w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Jednocześnie nie spełniają określonych kryteriów optymalizacyjnych, w taki sposób, aby możliwe było uwzględnienie zmiany strategii innych obiektów (praca w trybie „on-line”). Dlatego też autor zaproponował nową metodę pozwalającą rozwiązać ten problem poprzez optymalizację trajektorii przy zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych oraz modelowanie trajektorii z zastosowaniem interpolacji wielomianowej.

W ramach pracy zrealizowano następujące zagadnienia:

1. Dokonano przeglądu metod wyznaczania trajektorii zadanej statku w odniesieniu do:
 - zastosowanego sposobu modelowania trajektorii,
 - metody optymalizacji trajektorii zadanej,
2. Zdefiniowano problem wyznaczania trajektorii zadanej statku w sytuacji kolizyjnej na morzu,
3. Opracowano dwie metody rozwiązania problemu wyznaczania trajektorii zadanej z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej, w tym opisano:
 - wariant algorytmu jednopopulacyjnego JAEWTI,
 - wariant algorytmu wielopopulacyjnego WAEWTI,
 - metodę niszowania dla zaproponowanych algorytmów,
 - sposób modelowania trajektorii zadanej przy użyciu wielomianów trzeciego stopnia dla zaproponowanych algorytmów,
 - sposób weryfikacji ograniczeń wynikających z własności dynamicznych statku oparty na porównaniach z próbami cyrkulacji.
4. Wykonano program implementujący algorytmy JAEWTO, JAEWTI i WAEWTI.
5. Wykonano badania symulacyjne zaproponowanych metod, w tym badania porównawcze z algorytmem JAEWTO wykorzystującym odcinki proste do modelowania trajektorii oraz na tej podstawie opracowano wnioski.
6. Wykonano badania symulacyjne ruchu modelu statku odniesienia wzdłuż tychże trajektorii, w celu weryfikacji poprawności ich wyznaczania oraz opracowano wnioski szczegółowe odnośnie istotności kształtu modelowanej trajektorii w problemie wyznaczania trajektorii zadanej statku.
7. Przedstawiono wnioski i podsumowanie całej pracy.

Na podstawie wyników badań, można stwierdzić, że przyjęte w pracy cele, zostały zrealizowane. W punkcie 2.2 przedstawiono przegląd metod wyznaczania zadanej trajektorii statku, wraz z wskazaniem zalet metody ewolucyjnej typu JAEWTO nad aktualnie stosowanymi metodami. W dalszej części pracy przedstawiono przewagę metod JAEWTI oraz WAEWTI nad JAEWTO, ze względu na końcowe wartości funkcji przystosowania, jak i na kształt trajektorii odwzorowujący rzeczywisty ruch statku. Proponowane w pracy metody wykorzystujące algorytmy ewolucyjne oraz interpolację wielomianową (zarówno JAEWTI jak i WAEWTI) umożliwiają wyznaczenie zadanej trajektorii bezpiecznej w czasie zbliżonym do rzeczywistego, omijającej wszystkie ograniczenia statyczne i dynamiczne, spełniającej jednocześnie określone kryteria optymalizacyjne, dodatkowo odwzorowującej rzeczywisty ruch statku. Na podstawie wniosków z rozdziału 5 można stwierdzić, że pozwoli to na zwiększenie precyzji

wyznaczenia manewrów antykolizyjnych, dokładniejsze oszacowanie kosztów przebycia trajektorii oraz poprawną pracę algorytmu w dynamicznie zmieniającym się środowisku. Wpłynie to na poprawę jakości kierowania ruchem statku jak również bezpieczeństwa żeglugi, co było tezą pracy.

Autor zamierza kontynuować pracę nad algorytmami JAEWTI i WAEWTI w kierunku ich implementacji w rzeczywistych systemach wspomagania decyzji nawigatora.

6 Bibliografia

- Amerongen, J.**, 1982. *Adaptive steering of ship: a model-reference approach to improved manoeuvring and economical course keeping*, Rozprawa Doktorska, Delf University of Technology.
- Antao, P., Guedes Soares, C.**, 2008. *Realiability Engineering and System Safety*, Casual Factors in Accidents of High Speed Craft and Conventional Ocean Going Vessels, Issue 93:1292-1304.
- Arabas, J.**, 2001. *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa
- Capozzi, B.**, 2001. *Evolution-Based Path Planning and Managment for Autonomus Vechicles*, Rozprawa Doktorska, University of Washington.
- Chang, H., Liu, J.**, 2009. *High-Quality Path Planning for Mobile Robots with n3-splines and Parallel Genetic Algorithms*. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Bangkok.
- Corneliussen, J.**, 2003. *Implementaion of a Guidance System for Cybership II*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Davis, P., Dove, M. i Stockel, C.**, 1982. *A computer simulation of marine traffic with domains and arenas*. Journal of Navigation, vol. 33.
- Domachowski, Z., Hossein Ghaemi, M.**, 2007. *Okrętowe Układy Automatyki*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- Fogel, D., Fogel, L.**, 1999. *Optimal routing of multiple autonomus underwater vechicels through evolutionary programming*, Proceedings of the 1990 Symposium on Autonomus Underwater Vehicle Technology, Issue 44-47.
- Fossen, T.**, 2002. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics AS Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Fossen, T.**, 2011. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, A John Wiley & Sons.
- Gawrychowski, A., Lisowski, J., Morawski, L. i Śmierczalski, R.**, 1987. *Opracowanie założeń i wytycznych projektowych w zakresie obliczania i symulacji manewru antykolizyjnego oraz automatycznego sterowania statkiem po zadanej trajektorii*, Wyższa Szkoła Morska, Gdynia.
- Gawrychowski, A., Giniewicz, J., Komorowski, M., Lisowski, J., Morawski L., Schweizer, P., Śmierczalski R.**, 1989. *Uruchomienie i badanie urządzeń i oprogramowania systemu ARPA 01 z opcjami, opracowanie założeń i wytycznych projektowych dla prototypu*, Wyższa Szkoła Morska, Gdynia.
- Goldberg, D.**, 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc.
- Golding, B.**, 2004. *Industrial Systems for Guidance and Control of Marine Surface Vessels*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Goodwin, E.**, 1975. *A statistical study of ship domains*, Journal of Navigation, vol. 31.
- Gucma, J., Montewka, J., Zieziula, A.**, 2005. *Urządzenia nawigacji technicznej*, Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Szczecinie.
- Hadnett, E.**, 2008. *A bridge too far?*, Journal of Navigation, The Royal Institute of Navigation, Issue 61, 283-289.
- Hasegawa, K.**, 1987. *Automatic collision avoidance system for ship using fuzzy contorl*, Proceedings of 8th Ship Control System Symposium, 234-258.
- Holzhüter, T.**, 1990. *A high precision track controller for ships*, Proceedings of the 11th IFAC World Congress, Tallin, pp.118-123.
- Hong, X., Harris, C., Wilson, P.**, 1999. *Autonomus Ship Collision Free Trajectory Navigation and Control Algorithms*, Proceedings of 7th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, Barcelona, 923-929.
- Hwang, C.**, 2002. *The Integrated Design of Fuzzy Collision-Avoidance and H-Autopilots on Ships*. The Journal of Navigation, nr 55, 117-136.
- IMO**, 1974. *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)*, International Maritime Organization
- Ito, M., Zhang, F., Yosida, N.**, 1999. *Collision avoidance control of ship with genetic algorithm*, Proceedings of the IEEE International Conference on Control Application, 1791-1796.
- Jaworski, B., Śmierczalski, R., Kolendo, P. i Kuczkowski, Ł.**, 2012. *Extinction Event Concepts for*

- the Evolutionary Algorithms*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10b, 252-255.
- Jensen, T.**, 2011. *Waipoint-Following Guidance Based on Feasibility Algorithms*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Kanakakis, V., Tsourveloudis, N.**, 2007. *Evolutionary path planning and navigation of Autonomous Underwater Vehicles*, Proceedings of the Mediterranean Conference on Control and Automation, Ateny.
- Kolendo, P., Śmierczalski, R., Jaworski, B.**, 2011 a. *Experimental research on evolutionary path planning algorithm with fitness function scaling for collision scenarios*, Methods and Algorithms in Navigation: Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, CRC Press, vol 5, nr 4.
- Kolendo, P., Śmierczalski, R., Jaworski, B.**, 2011 b. *Skalowanie funkcji przystosowania w ewolucyjnej metodzie planowania ścieżek przejścia*, Postępy Automatyki i Robotyki, cz. 1, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.
- Kolendo, P., Śmierczalski, R., Jaworski, B.**, 2011 c. *Comparison of selection schemes in evolutionary method of path planning*, Lectures Notes in Artificial Intelligence: Computational Collective Intelligence: Technologies and Applications LNAI 6923, cz. 2.
- Kolendo, P., Śmierczalski, R., Jaworski, B.**, 2011 d. *Methods of Selective Pressure Control in Evolutionary Path Planning*, 16th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje.
- Kolendo, P. i Śmierczalski, R.**, 2015 a. *Ship Evolutionary Trajectory Planning Method with Application of Polynomial Interpolation*. Activities in Navigation- Marine Navigation and Safety of the Sea Transportation, ISBN 978-1-138-02858-6, pp. 161-166.
- Kolendo, P., Śmierczalski, R.**, 2015 b. *Experimental comparison of straight lines and polynomial interpolation modelling methods in Ship Evolutionary Trajectory Planning problem*, Advanced and Intelligent Computations in Diagnosis and Control, series Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 386, pp. 331-340.
- Kuczowski, L., Śmierczalski, R., Kolendo, P., Jaworski, B.**, 2012. *Mean Crossover in evolutionary path planning method for maritime collision avoidance*, Akademia Morska w Szczecinie, Zeszyty Naukowe nr 30 (102).
- Kurata, J., Grattan, K., Uchiyama, H.**, 1998. *Path Planning for a Mobile Robot by Integrating Mapped Information*, 3rd IFAC Conference IAV Intelligent Autonomous Vehicle, Madryt, pp. 319-323.
- Lee, S., Kwon, K., Joh, J.**, 2004. *A fuzzy logic for autonomus navigation of marine vehicles satisfying Colregs guidelines*, International Journal of Control Automation and Systems, vol.2 .
- Lenart, A.**, 1986. *Wybrane problemy analizy i syntezy okrętowych systemów antykolizyjnych*, Zeszyty Naukowe PG, Budownictwo Okrętowe, nr XLIV.
- Lisowski, J.**, 1979. *Metody syntezy układów bezpiecznego sterowania ruchem statków*, Zeszyty Naukowe PG, Elektryka XLVII.
- Lisowski, J.**, 1986. *Okrętowe systemy antykolizyjne*. Gdańsk: Wydawnictwo Morskie.
- Lisowski, J., Śmierczalski, R.**, 1995. *Assigning of safe and optimal trajectory avoidnig collision at sea*, Proceedings of 3rd IFAC Workshop Control Application Marine Systems.
- Lisowski, J.**, 2007. *The dynamic game models of safe navigation*, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, nr 1.
- Lisowski, J.**, 2009. *Dynamic programming of safe ship trajectory with neural state constraints*, Polish Journal of Environmental Studies, vol 18, nr 4B.
- Lisowski, J.**, 2012. *Game control methods in avoidance of ship colissions*, Polish Maritime Research, vol. 19, nr 74.
- Liu, Y., Liu, H.**, 2006. *Case learning base on evaluation system for vessel collision avoidance*, Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics.
- Magdid, E., Keren, D., Rivlin, E., Yavneh, I.**, 2006. *Spline-Based Robot Navigation*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pekin.
- Michalewicz, Z., Xiao, J.**, 1995. *Evaluation of Paths in Evolutionary Planner/Navigator*, Proceedings of the International Workshop on Biologically Inspired Evolutionary Systems, Tokio pp.45-52.
- Mittal, S., Deb, K.**, 2007. *Three Dimensional Offline Path Planning for UAVs Using Multiobjective Evolutionary Algorithms*, Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation CEC.
- Morawski, L.**, 1994. *Metody syntezy układów sterowania ruchem statku*. Wyższa Szkoła Morska, Gdynia.
- Nikolos, I., Valavanis, K., Tsorveloudis, N., Kostaras, A.**, 2003. *Evolutionary Algorithm Based*

- Offline/Online Path Planner for UAV Navigation*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 33(6).
- Nomoto, K., Son K.**, 1981. *On the Coupled Motion of Steering and Rolling of High Speed Container Ship*, Journal of the society of Naval Architects of Japan.
- Perrera, L., Carvalho, J., Guedes Soares, C.**, 2011. *Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy- Bayesian Decision- Action formulation*, IEEE Journal of Ocean Engineering, vol. 37.
- Piazzini, A., Lo Bianco, C., Rivlin, E., Romano, M.**, 2010. *Smooth Path Generation for Wheeled Mobile Robots Using n3-splines*, Motion Control, ISBN 978-953-7619-55-8, pp. 580.
- Pietrzykowski, Z.**, 2004. *Modelowanie Procesów Decyzyjnych w Sterowaniu Ruchem Statków Morskich*, Akademia Morska w Szczecinie.
- Pietrzykowski, Z.**, 2011. *Nawigacyjny System Wspomagania Decyzji na Statku Morskim*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie.
- Pongpunwattana, A., Rysdyk, R.**, 2007. *Evolution-based Dynamic Path Planning for Autonomous Vehicles*, Innovations in Intelligent Machines, pp. 113-145.
- PRS**, 2009. *Przepisy nadzoru konwencyjnego statków. cz.V- Urządzenia nawigacyjne*, Polski Rejestr Statków S.A.
- Rathbun, D., Capozzi, B., Kragelund, S., Pongpunwattana, A.**, 2002. *An Evolution Based Path Planning Algorithm for Autonomous Motion of a UAV Through Uncertain Environments*, Proceedings of the AIAA Digital Avionics System Conference.
- Rubio Torella, J.**, 2004. *Long Range Evolution Based Path Planning for UAVs Through Realistic Weather Environments*, University of Washington.
- Shibata, T., Fukuda, T.**, 1993. *Robot Motion Planning by Genetic Algorithm with Fuzzy Critic*, Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Intelligent Control, Chicago.
- Skjente, R.**, 2005. *The Maneuvering Problem*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Śmierchalski, R.**, 1997. *Trajectory planning for ship in collision situations at sea by evolutionary computation*, Proceedings of IFAC Maneuvering and Control of Marine Craft, Brijuni.
- Śmierchalski, R.**, 1998a. *Adaptive Modeling of a ship Trajectory in Collision Situations at Sea*, Proceedings of the 2nd IEEE Congress on Computational Intelligence, Alaska.
- Śmierchalski, R.**, 1998b. *Synteza metod i algorytmów wspomagania decyzji nawigatora w sytuacji kolizyjnej na morzu*, Akademia Morska w Gdyni.
- Śmierchalski, R., Weintrit, A.**, 1999. *Domains of Navigational Objects as Help in Planning of Trajectory of Ship in Collision Situation at Sea*, VIII Conference of Technical Navigation and Safety, Gdynia.
- Śmierchalski, R.**, 2000. *Modeling of Ship Trajectory in Collision Situations by an Evolutionary Algorithm*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
- Śmierchalski, R.**, 2004. *Ships domains as collision risk at sea in the evolutionary method of trajectory planning*, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, vol.4.
- Śmierchalski, R.**, 2013 a. *Automatyzacja i Sterowanie Statkiem*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- Śmierchalski, R., Kuczkowski, Ł., Kolendo, P., Jaworski, B.**, 2013 b. *Distributed Evolutionary Algorithm for Path Planning in Navigation Situation*, TransNav: the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 7, nr 2.
- Śmierchalski, R., Kolendo, P., Kuczkowski, Ł., Jaworski, B., Witkowska, A.**, 2013 c. *The Niche Mechanism in the Evolutionary Method of Path Planning*, Lectures Notes in Computer Science: Artificial Intelligence and Soft Computing, LNAI 7895, 101-112.
- Statheros, T., Howells, G., McDonald-Maier, K.**, 2008. *Autonomous ship collision avoidance navigation Concepts, Technologies and Techniques*, Journal of Navigation, nr 61.
- Szłapczyńska, J.**, 2009. *Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych oraz metod rankingowych do planowania trasy statku z napędem hybrydowym*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Zachodniopomorski w Szczecinie.
- Szłapczyński, R.**, 2012. *Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories within Traffic Separation Schemes*, Journal of Navigation, vol.66.
- Wall, M.**, 1996. *A C Library of Genetic Algorithm Components*, Massachusetts Institute of Technology.
- Wawruch, R.**, 2002. *Uniwersalny statkowy system automatycznej identyfikacji (AIS)*, Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni.
- Weintrit, A.**, 2009. *Electronic Chart Display and Information System (ECDIS)*, CRC Press Inc.
- Welnicki, W.**, 1989. *Mechanika ruchu okrętu*, Politechnika Gdańska.

Witkowska, A., 2011. *Zastosowanie metody backstepping do sterowania kursem statku*, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska.

Xiao, J., Michalewicz, Z., Zhang, L., Trojanowski, K., 1997. *Adaptive Evolutionary Planner/Navigator for Mobile Robots*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.1, No.1, pp.18-28.