



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Wyznaczanie zadanej trajektorii statku metodą ewolucyjną z zastosowaniem interpolacji wielomianowej

Autor:

mgr inż. Piotr Kolendo

Promotor:

prof. dr hab. inż. Roman Śmierzchalski, prof. nadzw. PG

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Józef Korbicz, członek korespondent PAN

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych

dr hab. inż. Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz, prof. nadzw. PW

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Gdańsk, 2016

Spis treści

1	Wstęp	3
1.1	Wprowadzenie.....	4
1.2	Teza i cele pracy.....	4
2	Rozwiązanie zadania wyznaczania zadanej trajektorii statku z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej	6
2.1	Definicja problemu optymalizacji	6
2.2	Wyznaczanie trajektorii zadanej metodą ewolucyjną	8
2.2.1	Modelowanie trajektorii zadanej z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z dynamiki statku	13
2.3	Metoda weryfikacji poprawności wyznaczonych trajektorii przy zastosowaniu modelu statku odniesienia	18
3	Badania procesu wyznaczania zadanej trajektorii statku z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej	19
3.1	Omówienie wyników badań	20
3.2	Badania rzeczywistego ruchu statku po trajektorii zadanej wyznaczonej przy zastosowaniu algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej	21
4	Podsumowanie.....	22
5	Bibliografia	24

1 Wstęp

Wyznaczanie trajektorii zadanej rejsu statku jest jednym z głównych zadań nawigatorów. 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.

W ramach 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. Zastosowanie interpolacji wielomianowej pozwala natomiast na zamodelowanie trajektorii, która może odwzorowywać rzeczywisty ruch 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 (Śmierchalski, 2013a). System kierowania ruchem statku 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.

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). 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 trajektorie 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 (Szałpczyńska, 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.

1.2 Teza i cele pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie nowej metody dla systemu wspomaganie 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 Rozwiązanie zadania wyznaczania zadanej trajektorii statku z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych oraz interpolacji wielomianowej

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. Metoda ta rozpatrywana jest dla dużych statków (np. kontenerowce, tankowce) o napędzie śrubowym.

2.1 Definicja problemu optymalizacji

Problem wyznaczania zadanej trajektorii statku w sytuacji kolizyjnej polega na wyznaczeniu trajektorii S z pozycji początkowej (x_0, y_0) do określonej pozycji końcowej (x_{n-1}, y_{n-1}) omijając wszystkie ograniczenia statyczne oraz dynamiczne, spełniając określone kryteria optymalizacyjne.

Trajektoria zadana składa się z punktów s_i ($i = 0, \dots, n - 1$) połączonych wielomianami stopnia 3 „cubic spline” o współczynnikach (a_{0k}, \dots, a_{3k}) oraz (b_{0k}, \dots, b_{3k}) zdeterminowanych warunkami zachowania ciągłości położenia, prędkości oraz przyspieszenia wzdłuż trajektorii, dla każdego z k_j ($j = 1, \dots, n - 1$) segmentów.

Przestrzeń możliwych rozwiązań X zdefiniowana jest w przestrzeni kartezjańskiej o określonych wymiarach:

$$X = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2: a \leq x \leq b, c \leq y \leq d\} \quad (2.1)$$

Zakłada się, że trajektoria zadana jest bezpieczna w przestrzeni X , wtedy gdy żaden z k_j segmentów trajektorii nie przecina ograniczeń stałych (łądy, kanały, obszary zabronione) O_{stat_i} ($i = 1, \dots, l$) oraz w chwilach czasu t zdeterminowanych położeniem statku własnego nie narusza ograniczeń dynamicznych $O_{dyn(t)_i}$ ($i = l + 1, \dots, h$) (statki obce). Przeszkody mogą przyjmować kształty wypukłych lub wklęsłych wielokątów. Przestrzeń Y jest bezpieczną gdy (Śmierchalski, 1998b):

$$Y = X - \bigcup_{i=1}^l O_{stat_i} - \bigcup_{i=l+1}^h O_{dyn(t)_i} \quad (2.2)$$

Zbiór trajektorii S należący do przestrzeni X jest zbiorem trajektorii bezpiecznych S_B gdy:

$$S_B \subset Y$$

$$S_B = \left\{ S \subset X : S \cap \left(\bigcup_{i=1}^l O_{stat_i} \cup \bigcup_{i=l+1}^h O_{dyn(t)_i} \right) = \emptyset \right\} \quad (2.3)$$

Trajektorie które nie należą do zbioru Y , są trajektoriami niebezpiecznymi. Dodatkowo w zbiorze trajektorii bezpiecznych S_B wyróżnia się zbiór trajektorii S_{DYN} spełniający ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku:

$$S_{DYN} \subset S_B \quad (2.4)$$

Celem metody ewolucyjnej jest poszukiwanie w przestrzeni X zbioru trajektorii bezpiecznych spełniających ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku S_{DYN} i wyboru trajektorii optymalnej z tego zbioru. Zadanie to realizowane jest w odniesieniu do określonej funkcji przystosowania. Dla trajektorii niebezpiecznych, naruszających ograniczenia nawigacyjne, analizuje się liczbę przekroczonych ograniczeń oraz dystans ich penetracji. Dla trajektorii należących do zbioru trajektorii bezpiecznych S_B wartość funkcji przystosowania składa się zarówno z kosztów ekonomicznych jak i kosztów bezpieczeństwa (Śmierzchalski, 1998b):

$$\begin{aligned} f &= econ_c + safe_c \\ econ_c &= w_1 * dist_c + w_2 * time_c + w_3 * smooth_c \\ safe_c &= w_4 * clear_c + dyn_c \end{aligned} \quad (2.5)$$

Koszty ekonomiczne ($econ_c$) związane są z:

- a) Długością trajektorii rozumianej jako suma długości wszystkich segmentów trajektorii:

$$dist_c = \sum_{i=1}^{n-1} dist(k_i) \quad (2.6)$$

- b) Czasem potrzebnym do przebycia trajektorii:

$$time_c = \sum_{i=1}^{n-1} time(k_i) \quad (2.7)$$

- c) Gładkością trajektorii. Gdzie stopień gładkości trajektorii oceniany jest w odniesieniu do miary kąta β_j pomiędzy odcinkami prostymi trajektorii wyznaczonymi na etapie weryfikacji trajektorii o ograniczenia wynikające z własności dynamicznych statku.

$$smooth_c = \max_{j=1, \dots, n} \{\pi - \beta_j\} \quad (2.8)$$

gdzie, $0 \leq \beta_j \leq \pi$.

Koszty bezpieczeństwa ($safe_c$) są natomiast związane z:

- a) Bezpiecznym mijaniem statycznych oraz dynamicznych ograniczeń nawigacyjnych

$$clear_c = \max_{i=1, \dots, n-1} \{c_i\} \quad (2.9)$$

Gdzie c_i oznacza różnicę między odległością punktu leżącego najbliżej przeszkody (na danym segmencie k), a założoną bezpieczną odległością d .

- b) Spełnieniem ograniczeń wynikających z własności dynamicznych statku:

$$dyn_c = \begin{cases} 0, & \text{dla } S \subset S_{DYN} \\ \max_{i=1, \dots, m} \{S_{DYN}(i)\}, & \text{gdzie } S \cap S_{DYN} = \emptyset \end{cases} \quad (2.10)$$

dyn_c jest interpretowana jako kara za niespełnienie ograniczeń wynikających z własności dynamicznych statku.

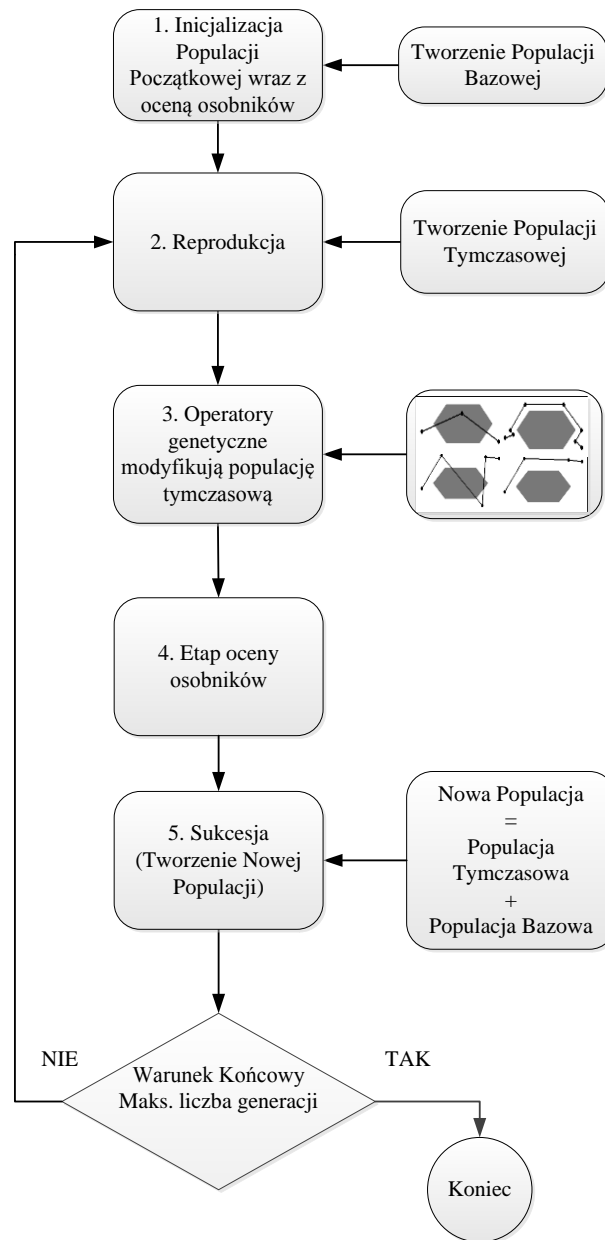
2.2 Wyznaczanie trajektorii zadanej metodą ewolucyjną

W metodzie ewolucyjnej populacja składa się z m osobników (chromosomów) z pośród których wybierana jest trajektoria zadana. Chromosom oprócz informacji o współrzędnych (x, y) punktów zwrotu i współczynnikach (a_{0k}, \dots, a_{3k}) oraz (b_{0k}, \dots, b_{3k}) definiujących poszczególne segmenty, zawiera dane o prędkości V dla każdego z segmentów oraz informację czy dany segment nie przecina ograniczeń nawigacyjnych. Chromosomy mogą składać się z różnej liczby genów.

Tabela 2.1. Struktura populacji w ewolucyjnej metodzie wyznaczania trajektorii zadanej statku

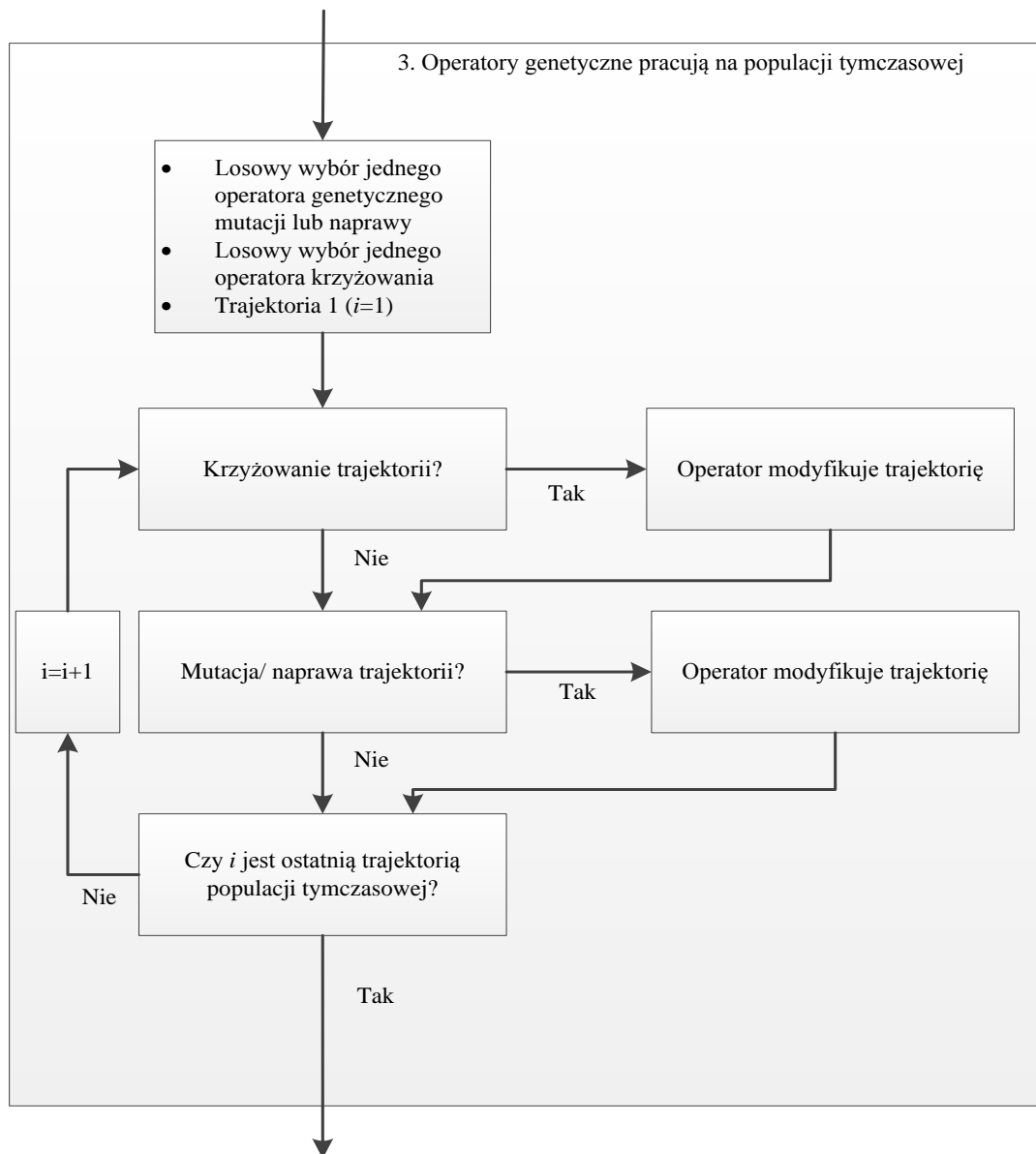
Osobnik 1	Osobnik 2	...	Osobnik m
$x_0, y_0, V_0, \mathbf{a}_{01}, \mathbf{b}_{01}$	$x_0, y_0, V_0, \mathbf{a}_{02}, \mathbf{b}_{02}$		$x_0, y_0, V_0, \mathbf{a}_{03}, \mathbf{b}_{03}$
...
$x_{p1}, y_{p1}, V_{p1}, \mathbf{a}_{k1}, \mathbf{b}_{k1}$	$x_{p2}, y_{p2}, V_{p2}, \mathbf{a}_{k2}, \mathbf{b}_{k2}$		$x_{pm}, y_{pm}, V_{pm}, \mathbf{a}_{km}, \mathbf{b}_{km}$
...
...
...	x_{n-1}, y_{n-1}		...
x_{n-1}, y_{n-1}			...
			x_{n-1}, y_{n-1}

Proces poszukiwania trajektorii zadanej dla algorytmu jednopopulacyjnego został pokazany poniżej:



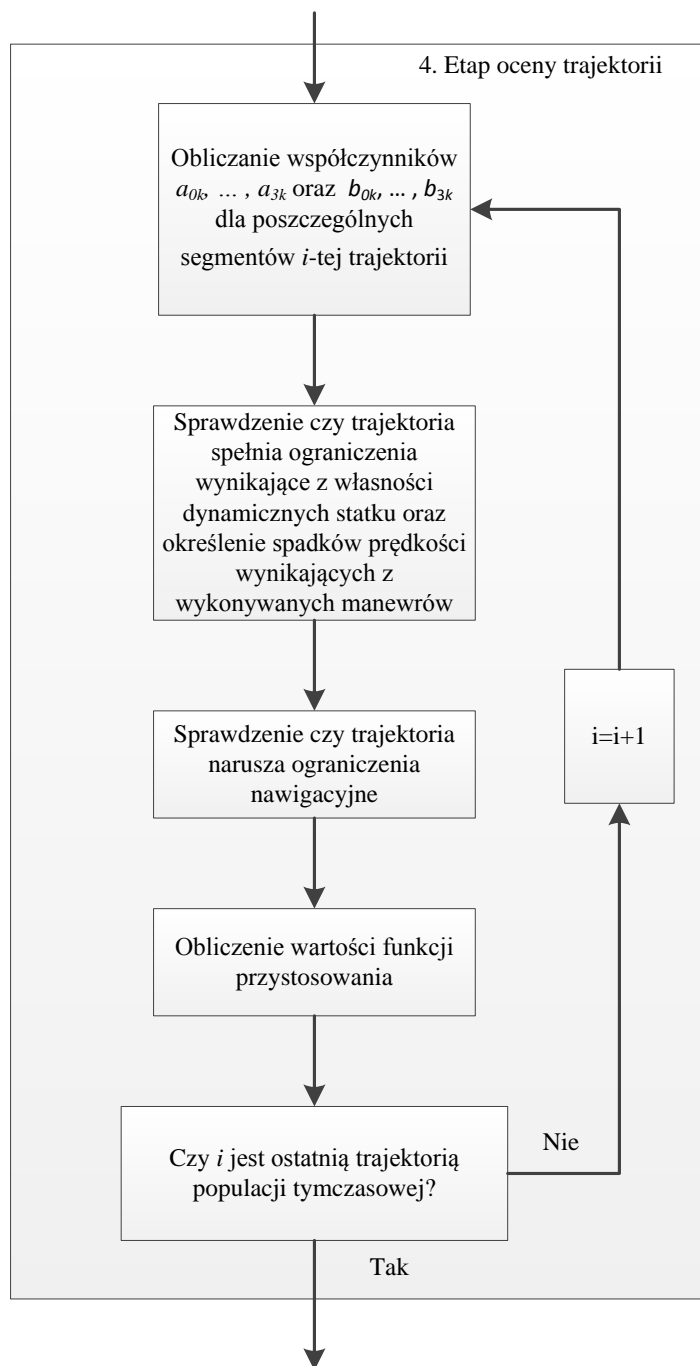
Rysunek 2.1. Jednopopulacyjny algorytm ewolucyjny wyznaczania zadanej trajektorii statku

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.



Rysunek 2.2. Sposób wyboru operatorów genetycznych w danej generacji

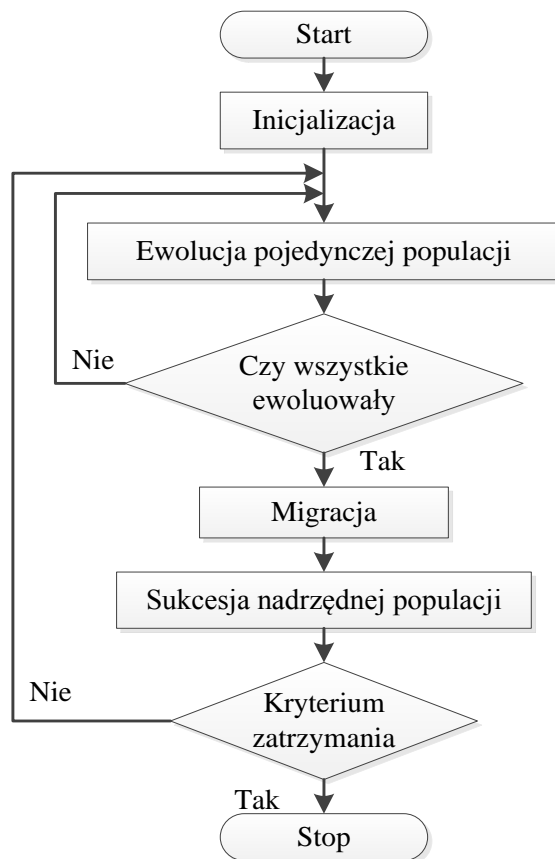
Tak zmodyfikowane osobniki podlegają ocenie i określona zostaje wartość ich funkcji przystosowania. Ocena osobników wykonywana jest po modyfikacji trajektorii zbioru populacji tymczasowej przez operatory genetyczne. Schemat przedstawiający kolejność operacji wykonywanych na etapie oceny osobników:



Rysunek 2.3. Etap oceny osobników populacji

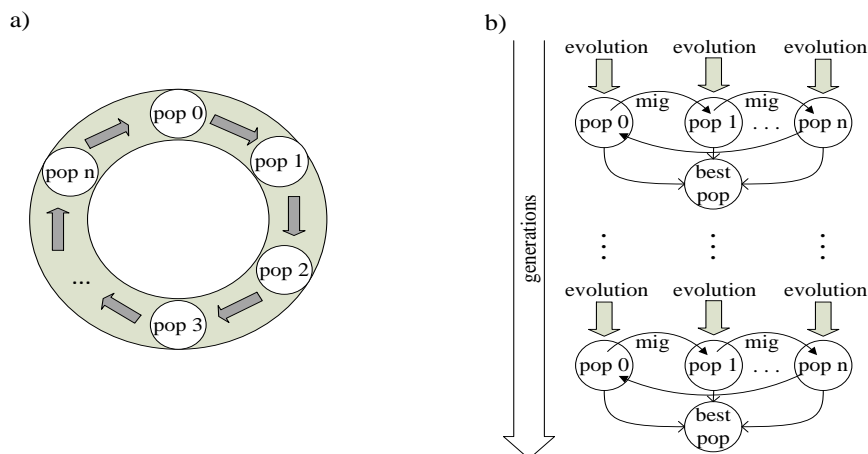
Po wyliczeniu wartości funkcji przystosowania osobników następuje proces postselekcji (sukcesji), a więc wyboru osobników do nowej populacji bazowej. Etapy te są powtarzane aż do osiągnięcia przez algorytm warunku końcowego.

Do rozwiązania zadania wyznaczania zadanej trajektorii statku proponowane jest również zastosowanie algorytmu ewolucyjnego w wariacie wielopopulacyjnym. Schemat działania algorytmu wielopopulacyjnego został przedstawiony poniżej:



Rysunek 2.4. Algorytm wielopopulacyjny wyznaczania zadanej trajektorii statku (Śmierchalski i inni, 2013 b)

Po inicjalizacji 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.

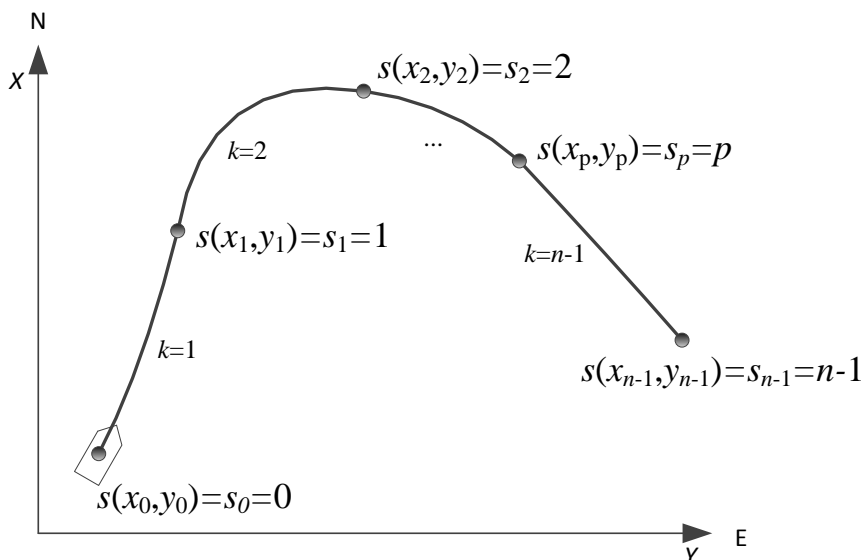


Rysunek 2.5. Sposób migracji osobników między populacjami (Śmierchalski i inni, 2013 b)

Po tym procesie następuje sukcesja najlepszych osobników ze wszystkich populacji do populacji elitarnej. Populacja ta nie podlega ewolucji, osobniki są w niej sortowane od najlepszego do najgorszego. Najlepszy osobnik populacji elitarnej jest rozwiązaniem końcowym. Proces ten jest powtarzany aż do osiągnięcia warunku końcowego.

2.2.1 Modelowanie trajektorii zadanej z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z dynamiki statku

Sposób modelowania trajektorii zadanej przy użyciu wielomianu stopnia trzeciego typu „cubic spline” został przedstawiony w pracach (Fossen, 2002) (Corneliusson, 2003) (Golding, 2004). W metodzie tej każdy segment pomiędzy poszczególnymi punktami zwrotu, modelowany jest przy pomocy wielomianu o różnych współczynnikach.



Rysunek 2.6. Trajektorja modelowana przy użyciu cubic spline

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

$$0 \leq s \leq n - 1 \quad (2.11)$$

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

$$\begin{aligned} x_k(s) &= a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0, \\ y_k(s) &= b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0. \end{aligned} \quad (2.12)$$

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 przyspieszenia. Warunki ograniczające, służące do wyznaczenia współczynników wielomianu należy dobrać, więc w taki sposób, aby zapewnić warunki zachowania ciągłości w punktach zwrotu. Wartości położenia, prędkości oraz przyspieszenia wzdłuż segmentów są przedstawione w sposób następujący:

$$\begin{aligned} x_k(s) &= a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \\ x_k'(s) &= 3a_3 s^2 + 2a_2 s + a_1 \\ x_k''(s) &= 6a_3 s + 2a_2 \end{aligned} \quad (2.13)$$

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,

$$x''_k(0) = x''_1(0) = 0 \quad (2.14)$$

- Współrzędna punktu startowego,

$$x_k(0) = x_1(0) = x_0 \quad (2.15)$$

b) Dla punktu końcowego również dwa warunki:

- Wartość drugiej pochodnej w punkcie końcowym,

$$x''_k(n-1) = x''_{n-1}(n-1) = 0 \quad (2.16)$$

- Współrzędna punktu końcowego,

$$x_k(n-1) = x_{n-1}(n-1) = x_{n-1} \quad (2.17)$$

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

- Współrzędna początku modelowanego segmentu k jest końcem segmentu poprzedniego,

$$x_k(s_{p-1}) = x_p \quad (2.18)$$

- Współrzędna końca modelowanego segmentu k jest początkiem segmentu następnego,

$$x_k(s_p) = x_{p+1} \quad (2.19)$$

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

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k'(s_p) &= \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k'(s_p) \\ \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k'(s_p) - \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k'(s_p) &= 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

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

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k''(s_p) &= \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k''(s_p) \\ \lim_{s \rightarrow s_p^-} x_k''(s_p) - \lim_{s \rightarrow s_p^+} x_k''(s_p) &= 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Układ równań można przedstawić w postaci macierzowej:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{W} \quad (2.22)$$

gdzie macierz \mathbf{C} jest macierzą ograniczeń:

$$\mathbf{C} = [0 \quad x_0 \quad x_1 \quad x_1 \quad 0 \quad 0 \quad x_2 \quad x_2 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad x_{n-1} \quad 0]^T \quad (2.23)$$

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

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} a_{3,1} & \dots & a_{3,n-1} \\ a_{2,1} & \dots & a_{2,n-1} \\ a_{1,1} & \dots & a_{1,n-1} \\ a_{0,1} & \dots & a_{0,n-1} \end{bmatrix}^T \quad (2.24)$$

Natomiast A jest macierzą przekształceń:

$$A = \begin{bmatrix} 6s(x_0) & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s^3(x_0) & s^2(x_0) & s(x_0) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s^3(x_1) & s^2(x_1) & s(x_1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s^3(x_1) & s^2(x_1) & s(x_1) & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3s^2(x_1) & -2s(x_1) & -1 & 0 & 3s^2(x_1) & 2s(x_1) & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6s(x_1) & -2 & 0 & 0 & 6s(x_1) & 2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & s^3(x_{n-1}) & s^2(x_{n-1}) & s(x_{n-1}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 6s(x_{n-1}) & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

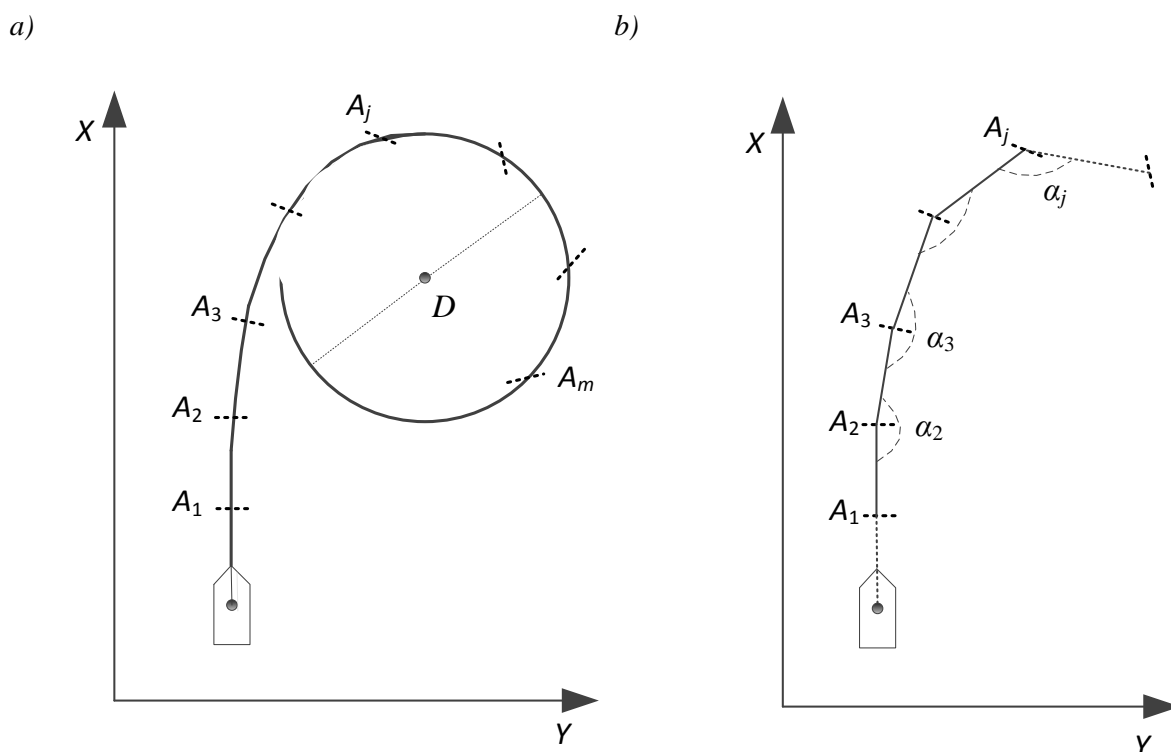
Rozwiązanie równania macierzewego pozwala na wyznaczenie wartości współczynników wielomianów dla poszczególnych segmentów.

$$W = A^{-1}C \quad (2.26)$$

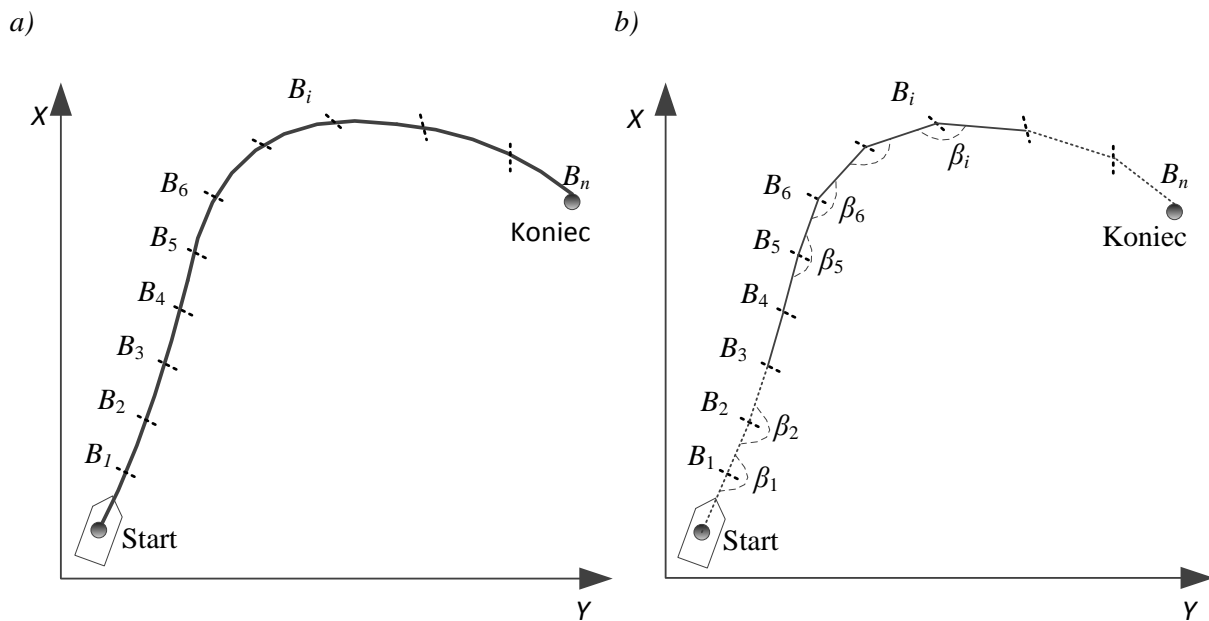
2.2.1.1 Sposób weryfikacji trajektorii o własności dynamiczne statku

Weryfikacja trajektorii zadanej o własności dynamiczne realizowana jest w odniesieniu do prób cyrkulacji statku.

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 ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots, \alpha_{m-1}$). Trajektorię zadaną również podzielono na równe odcinki ($B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_n$) z odpowiadającymi im kątami ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j, \dots, \beta_{n-1}$). Długość odcinków została dobrana eksperymentalnie na podstawie badań eksperymentalnych.

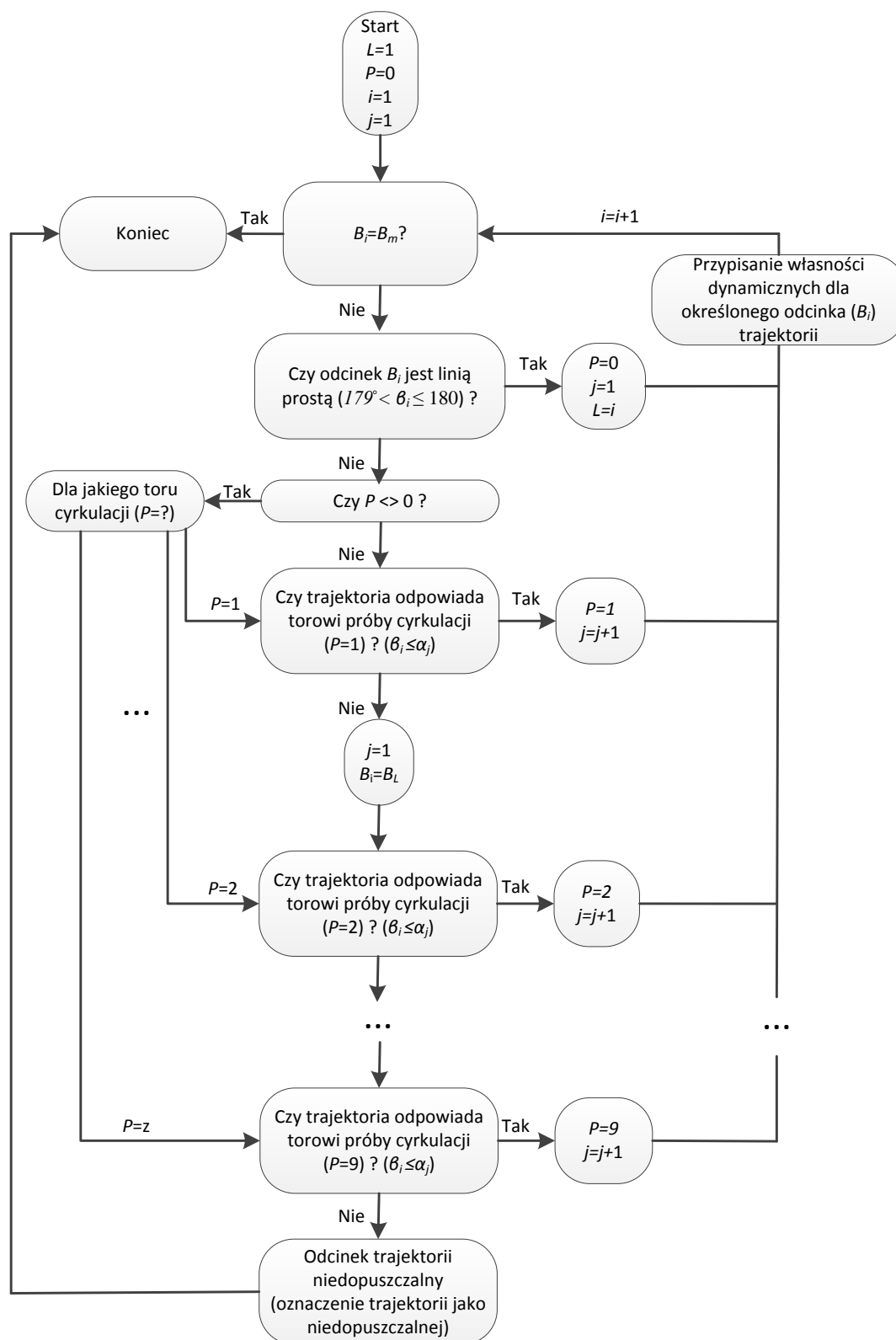


Rysunek 2.7. Próba cyrkulacji a) rzeczywista b) podzielona na równe odcinki proste



Rysunek 2.8. Trajektoria zadana a) rzeczywista b) podzielona na równe odcinki proste

Schemat algorytmu służącego do weryfikowania trajektorii zadanej z uwzględnieniem własności dynamicznych statku:



Rysunek 2.9. 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,

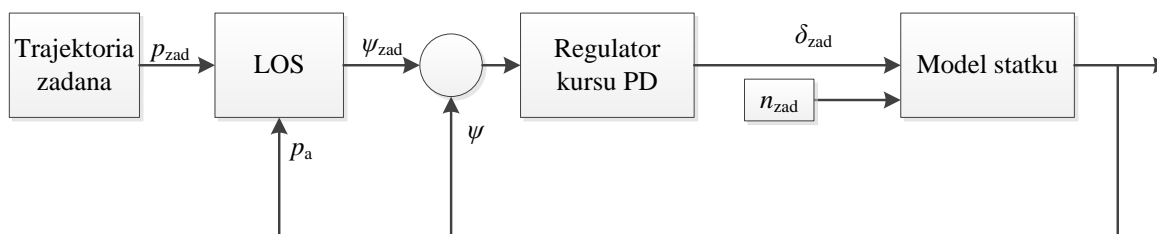
L - wskaźnik początku fragmentu trajektorii, dla którego dopasowywana jest próba cyrkulacji. Wskaźnik ten ustawiany jest gdy kolejny odcinek, który jest sprawdzany, uznaje się za linię prostą,

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.

2.3 Metoda weryfikacji 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).

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

Badania zostały przeprowadzone dla 10 przykładowych sytuacji nawigacyjnych (dla dziesięciu różnych populacji początkowych) przy wykorzystaniu trzech algorytmów JAEWTO, JAEWTI oraz WAEWTI, których opis przedstawiony został w Tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Parametry algorytmów ewolucyjnych do wyznaczania trajektorii statku

Algorytm	Pełna nazwa	Preselekcja	Operatory genetyczne	Sukcesja	Warunek końcowy	Mechanizm niszczenia
JAEWTO	Jednopolacyjny 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	Maksymalna ilość generacji	Tak (100 generacji)
JAEWTI	Jednopolacyjny 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	Maksymalna ilość generacji	Tak (100 generacji)
WAEWTI	Wielopolacyjny 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 wielopolacyjnym	Maksymalna ilość generacji	Tak (100 generacji)

3.1 Omówienie wyników badań

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.

Wartość funkcji przystosowania (średnia, minimalna oraz maksymalna)

Przedstawione w pracy algorytmy JAEWTI i WAEWTI zostały porównane z algorytmem referencyjnym JAEWTO. Porównując końcowe wartości funkcji przystosowania, najlepsze rezultaty osiągnęte były 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 połowy przykładowych sytuacji nawigacyjnych uzyskiwały rozwiązania zbliżone do algorytmu WAEWTI, jednakże w pozostałych przypadkach osiągały znacząco wyższe średnie wartości funkcji przystosowania.

Kształt trajektorii

W odniesieniu do wartości końcowej funkcji przystosowania w przypadku połowy sytuacji kolizyjnych można stwierdzić, iż niezależnie od zastosowanego algorytmu, osiągnęte 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.

Na podstawie symulacji ruchu modelu odniesienia wzdłuż wyznaczonych trajektorii wykazano, istotność doboru 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.

3.2 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 trajektorii wyznaczonych metodami JAEWTO i JAEWTI. W tym celu wykorzystany został wybrany model kontenerowca.

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 połowy sytuacji nawigacyjnych, 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 wynikają ze specyfiki metody LOS. W odniesieniu do prób cyrkulacji statku, tak wyznaczona trajektoria zadana przy neutralnych warunkach pogodowych, jest teoretycznie możliwa do zrealizowania.

4. 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 mogła odwzorowywać rzeczywisty ruch statku.

Na podstawie literatury należy stwierdzić, że proponowane rozwiązania nie wyznaczają bezpiecznej 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 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. Może to skutkować koniecznością ponownego wyznaczenia trajektorii zadanej, ponieważ po aplikacji własności dynamicznych, trajektoria zadana narusza ograniczenia nawigacyjne.

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 niszczenia 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 wniosków z rozdziału podsumowującego można stwierdzić, że zaproponowana metoda 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.

5. 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 Śmierzchalski, 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., Śmierzchalski 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., Śmierzchalski, 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.
- Piazza, 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 Akademi 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 Autonomus 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. *Autonomus ship collision avoidance navigation Concepts, Technologies and Techniques*, Journal of Navigation, nr 61.
- Szlapczyńska, J.**, 2009. *Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych oraz metod rankingowych do planowania trasy statku z napędem hybrydowym*, Rozprawa doktorska, Uniwersytet Zachodniopomorski w Szczecinie.
- Szlapczyński, 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.