

## WYBRANE METODY OPTIMALIZACJI W ROZWIĄZYWANIU SYTUACJI KOLIZYJNYCH NA MORZU

*Rozwiązanie sytuacji kolizyjnej na morzu wymaga wyznaczenia bezpiecznej trajektorii z uwzględnieniem własności manewrowych statku, warunków hydrometeorologicznych oraz parametrów akwenu. Uwzględnia się również kryteria ekonomiczne. Problem wyboru drogi jest przykładem zadania optymalizacji. W literaturze proponowane są różne metody optymalizacji do wyznaczenia bezpiecznej trajektorii ruchu obiektu. W artykule przedstawiono wybrane algorytmy optymalizacyjne wyboru drogi w różnych gałęziach transportu. Rozpatrzono możliwość zastosowania metody pól potencjałowych do rozwiązywania sytuacji kolizyjnych na morzu.*

### WPROWADZENIE

Wybór drogi ma swoje korzenie w problemie komiwojażera (Travelling Salesman Problem) – sprzedawca chce wykonać pracę i wrócić do domu, przebywając jak najkrótszą trasę. Jest to problem kombinatoryczny, formułowany jako: znaleźć najkrótszą trasę pomiędzy  $n$  miastami, odwiedzając każde miasto tylko raz i wracając do miasta początkowego. Polega na przeszukaniu grafu, gdzie odwiedzane miasta są jego wierzchołkami, a dostępne drogi krawędziami grafu [3]. Problem ten jest trudniejszy w implementacji w przypadku rozbudowanego grafu (duża liczba miast). O tego typu problemach mówi się, że są NP-pełne. Dlatego preferuje się poszukiwanie rozwiązania zadania dla konkretnych przypadków, wtedy jest szansa na otrzymanie rozwiązania w rozsądnym czasie.

Dzisiejsze problemy wyboru drogi są coraz bardziej skomplikowane. Oprócz kryterium najkrótszej trasy, często stosuje się inne kryteria wyboru drogi, np. najmniejsze zużycie paliwa, najkrótszy czas przejścia zadanej trasy. Złożoność problemu prowadzi do zwiększenia wykonywanych operacji, a co za tym idzie dłuższego czasu potrzebnego na wyznaczenie rozwiązania. W takich przypadkach zastępuje się metody dokładne metodami heurystycznymi (przybliżonymi). Taką alternatywę stanowią algorytmy genetyczne. Nie zawsze dają one rozwiązanie optymalne, jednak otrzymane wyniki są oceniane, dzięki czemu można zaakceptować przybliżone rozwiązanie.

W pierwszej części artykułu przedstawiono problem wyboru drogi w różnych gałęziach transportu, z wyróżnieniem transportu morskiego. W kolejnej przedstawiono metody optymalizacji trasy wykorzystywane do wyznaczania optymalnej trajektorii oraz służące do jej wyznaczenia w transporcie morskim. W dalszej części opisano metodę sztucznych pól potencjałowych, proponowaną dla wyznaczania drogi robotów z ominięciem przeszkód. Zaproponowano jej zastosowanie do wyznaczania bezpiecznej trajektorii ruchu statku morskiego w sytuacji kolizyjnej na morzu.

### 1. PROBLEM WYBORU DROGI W ZADANIU TRANSPORTOWYM

Zadanie transportowe definiuje się jako przemieszczenie towarów i ładunków pomiędzy punktami nadania towaru a punktami

odbioru. Liczba punktów nadania ładunku nie musi być równa liczbie punktów jego odbioru [11].

Wyznaczenia trasy przejazdu można dokonać za pomocą różnego typu algorytmów przeszukiwania. W procesie rozwiązywania problemu wyboru drogi należy uwzględnić zdolności manewrowe poruszającego się obiektu oraz jego wymiary. Ważnym czynnikiem jest aktualnie panująca sytuacja, wpływ panujących warunków meteorologicznych (bądź hydrometeorologicznych). W zależności od rodzaju transportu problem wyboru drogi wymaga konieczności opracowania bądź modyfikacji istniejących metod oraz algorytmów wyboru drogi, a w niektórych sytuacjach także systemów wyznaczania trajektorii. Wybór drogi dokonywany jest na podstawie przyjętych kryteriów. Są to m.in. koszt przejazdu, czas przejazdu, wskaźnik bezpieczeństwa. Coraz częściej brane są kryteria ochrony środowiska. Uwzględniane są jednocześnie ograniczenia, np. dostępność obszaru, na którym możliwy jest przejazd. Zadanie wyboru drogi można rozpatrywać względem jednego kryterium (optymalizacja jednokryterialna) lub wielu kryteriów. W zadaniach, gdzie rozpatruje się wiele kryteriów z reguły nie jest możliwe znalezienie takiego rozwiązania, które spełnia wszystkie kryteria. Zadanie rozpatruje się np. metodą ważonych kryteriów lub metodą ograniczonych kryteriów.

Analizowano metody wyboru drogi w transporcie drogowym i powietrznym. Pojazdy drogowe charakteryzują się małymi, w porównaniu np. ze statkiem morskim, wymiarami, masą oraz bezwładnością. Dzięki temu możliwe jest szybkie wykonanie manewru. Pojazdy drogowe budowane są tak, aby minimalizować opór działających na pojazd drogowy sił (m.in. siłę oporu aerodynamicznego), co nie ma znaczącego wpływu na wyznaczenie trasy. Dodatkowym atutem jest fakt, że sieć transportowa w transporcie drogowym jest ograniczona na istniejące drogi. Zatem do wyboru drogi można wykorzystać graf odwzorowujący drogi istniejące. W procesie wyboru drogi należy uwzględnić wiele czynników. Jednym z nich jest czas pokonania pewnego zadanego odcinka trasy. Jest on zależny od panującej sytuacji drogowej – natężenia ruchu, liczby napotkanych pojazdów, gęstości sieci transportowej. W zależności od wybranego obszaru, na którym rozpatrywany jest ruch, można dokonać innego sposobu wyboru drogi. W centrum miast, gdzie natężenie ruchu oraz liczba pojazdów jest duża konieczne będzie podejście dynamiczne. Poza miastem, gdzie ruch jest płynny podejście może być bardziej statyczne, jak przedstawiono to w [24]. Zakłada ono trzy etapy:

- a) identyfikację wszystkich możliwych połączeń,
- b) określenie zbioru realnych do wykonania połączeń,
- c) budowę modelu wyboru drogi na podstawie określonej zasady decyzyjnej.

W etapach 1. oraz 2. generowane są połączenia między punktem początkowym, a punktem końcowym, z tą różnicą, że etap drugi ogranicza wybór tych połączeń do np. tych, których przebieg jest najmniej odchyłony od linii prostej między początkiem a końcem podróży. W etapie 3. na podstawie przyjętego kryterium określone jest prawdopodobieństwo wyboru drogi otrzymanej w etapie 2.

Złożony problem stanowi wybór drogi w transporcie lotniczym. Po pierwsze, nie ma, jak w transporcie drogowym infrastruktury sieci transportowej. Po drugie, ruch należy rozpatrywać w trzech wymiarach. Po trzecie, duże znaczenie mają tu z jednej strony wymiary statku powietrznego – wpływa to na wielkość sił oddziaływających na samolot, a z drugiej strony warunki meteorologiczne – ruch powietrza. Należy ustalić wysokość lotu oraz kurs. Poszukiwana trasa powinna być możliwie najkrótsza, ale przede wszystkim zgodna z przepisami oraz bezpieczna. Dotyczy to omijania zamkniętych przestrzeni powietrznych, omijania frontów burzowych, czy lotu nad brzegiem otwartych obszarów zamiast przecinania tych obszarów (wód, pustyń, lasów). Wybór trasy zależy również od wyposażenia znajdującego się w samolocie. Inna trasa będzie wyznaczana dla samolotów z małymi silnikami, często o niewielkich rozmiarach, inna dla silników o dużej mocy, np. odrzutowych [1]. Wyznaczona trasa powinna być:

- a) możliwie najkrótsza (najczęściej po ortodromie przy sterowaniu z wykorzystaniem autopilota, loksodromie przy sterowaniu manualnym),
- b) uwzględniająca wyposażenia (np. rodzaj silnika) oraz wymóg omijania zamkniętych przestrzeni powietrznych czy otwartych obszarów,
- c) odpowiednia do prognoz (warunki meteorologiczne).

Dużo uwagi poświęca się zagadnieniom wyboru drogi robotów mobilnych. Rozwiązania tu stosowane mogą znaleźć zastosowanie także w przypadku innych obiektów autonomicznych, np. samochodów, statków powietrznych, statków morskich, czy okrętów podwodnych. Wybór trasy robota można rozpatrywać dwojako: globalne planowanie trajektorii oraz lokalne wyznaczenie ścieżki, np. w celu ominięcia przeszkody. Globalnie, poszukiwane są punkty, w których powinien znaleźć się robot, żeby finalnie dotrzeć do celu. Dla rozwiązania tego zadania wystarczy ogólne odwzorowanie przestrzeni. Sprowadza się to do podziału otoczenia na obszary dostępne oraz niedostępne, wyznaczenia punktów, które są możliwe do osiągnięcia i zbudowania na nich grafu, który będzie przeszukiwany w celu znalezienia najkrótszej ścieżki. Przeszukiwanie globalne zakłada znajomość całego obszaru, po którym porusza się robot, jego pozycji oraz rozkładu wszystkich przeszkód. Otrzymane rozwiązanie jest optymalne. W przypadku metod lokalnych, gdy nie jest znany rozkład przeszkód, a robot posiada tylko informacje o najbliższym otoczeniu (odczyt z czujników) zapewniona jest bezkolizyjność. Metoda lokalna gwarantuje optymalność, jednak łącząc lokalne rozwiązania zazwyczaj otrzymana całościowa trasa nie jest optymalna. Metody wyboru ścieżki przez robota to metody grafowe np. metoda grafu widzialności, metoda diagramu Voronia czy metoda pól potencjałowych [21]. Mają one jednak poważną wadę. Zakładają, że omijane przeszkody muszą być wypukłe, by nie doprowadzić do utknięcia robota w przeszko-dzie. Metody wyboru drogi robota są modyfikowane [18], by do tego nie dopuścić, jednak wymagają technik, które zwiększają ilość wykonywanych obliczeń.

## 2. PROBLEM WYBORU DROGI W TRANSPORCIE MORSKIM

Mówiąc o wyborze drogi w transporcie morskim można wyróżnić kilka możliwości. Są to m.in. wybór drogi w planowaniu podróży, wybór drogi w omijaniu przeszkód oraz wybór drogi w sytuacji kolizyjnej w spotkaniu z jednym lub wieloma statkami.

Zgodnie z konwencjami SOLAS (ang. International Convention for the Safety of Life at Sea) i STCW (ang. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping) przed wyjściem w morze powinien być opracowany plan podróży. Jak podaje definicja planowanie podróży to ciągły proces, w którym realizowany jest kontrolowany cel eksploatacji jednostki zgodnie z jej przeznaczeniem [13]. Proces ten uwzględnia wszystkie aktualizowane informacje, mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa oraz efektywność podróży.

Podczas planowania podróży należy [13]:

- zgromadzić dane na temat statku, akwenu oraz warunków meteorologicznych,
- opracować wstępny plan podróży, w którym można wyróżnić 3 etapy:
  - plan strategiczny całej podróży,
  - plan podróży między portami pośrednimi,
  - plan podróży w czasie trwania wacht,
- zaplanować różne warianty wyboru drogi w zależności od zaistniałych zakłóceń zewnętrznych, m.in. prądów, falowań, wzmożonego ruchu statków,
- podjąć decyzję sposobu realizacji trasy na podstawie przyjętego kryterium na danym odcinku trasy.

Wybór drogi w sytuacji kolizyjnej będzie zależał od aktualnej sytuacji.

## 3. METODY OPTIMALIZACJI STOSOWANE W RÓŻNYCH GAŁĘZIACH TRANSPORTU

Wybór drogi w sytuacji kolizyjnej może być dokonywany w oparciu o sformułowanie i rozwiązanie zadania optymalizacji. Rozwiązaniem tego zadania jest trajektoria  $X^*$ , która spełnia określone, ustalone wcześniej kryterium/kryteria. Kryterium przedstawiane jest w postaci funkcji ( $F$ ). W transporcie częściej rozważa się problemy minimalizacji. Przykładami są: najkrótsza trajektoria, najkrótszy czas przebycia zadanego odcinka, przebycie odcinka wykonując najmniejszą liczbę potrzebnych manewrów (zmiana kursu i/lub prędkości).

Tak przedstawione zadanie można zapisać w postaci:

$$F(X^*) = \min\{F(X), X \in D\} \quad (1)$$

gdzie:  $F$  – funkcja kryterium,

$D$  – zbiór rozwiązań dopuszczalnych,

$X$  – dowolne rozwiązanie ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych,

$X^*$  – rozwiązanie optymalne.

Rozróżnia się różne metody optymalizacji. Można je podzielić na metody liniowe i nieliniowe, inny podział to metody statyczne i dynamiczne lub ze względu na rodzaj rozwiązania – optymalne i suboptymalne, czyli dokładne i przybliżone. Najpopularniejsze metody poszukiwania optymalnego rozwiązania to metody związane z przeszukiwaniem grafu, algorytmy mrówkowe, algorytmy genetyczne, gry różniczkowe, metoda pól potencjałowych. O ile możliwe jest zapisanie problemu za pomocą równań liniowych wykorzystywane są metody programowania liniowego, czy metoda Simplex.

Poniżej przedstawiono możliwości wymienionych metod oraz zasadę ich działania.

## Algorytm Dijkstry

Metoda przeszukiwania grafu skierowanego  $G = \langle V, E \rangle$ ,  $V$  - zbiór wierzchołków grafu,  $E$  - zbiór krawędzi grafu o dodatnich wagach. Służy do wyznaczania najmniejszej odległości od ustalonego wierzchołka grafu do pozostałych wierzchołków. Algorytm po odszukaniu najkrótszej trasy do danego wierzchołka poszukuje tras do innych wierzchołków, sprawdzając koszt przejścia każdej z nich. Algorytm kończy pracę, gdy zbiór wierzchołków nieprzeszukanych jest pusty.

Przykład zastosowania algorytmu Dijkstry prezentowano np. w [4], [6], [14].

Przebieg algorytmu (Algorytmy.org):

```
begin
while (zbiór wierzchołków nieprzeszukanych D jest
niepusty) do
    wybierz wierzchołek v o najmniejszej wartości
    krawędzi
    if (wartość trasy dla wierzchołka i > wartość trasy
    dla wierzchołka v + waga krawędzi między v oraz
    i) then
        Zaktualizuj wybór wierzchołka
end
```

Algorytm Dijkstry jest algorytmem dokładnym, przeszukuje wszystkie możliwe ścieżki wyboru drogi pomiędzy dwoma wierzchołkami. Złożoność obliczeniowa wynosi  $O(n^2)$ .

## Algorytm A\*

Szczególny przypadek algorytmu Dijkstry. Algorytm zakłada dodatkowe uporządkowanie wierzchołków za pomocą funkcji oceny, dzięki czemu wierzchołki są już ustalone w pewnej kolejności, co zmniejsza liczbę operacji potrzebnych do zakończenia pracy. Przeszukiwanie odbywa się jednocześnie w dwóch kierunkach – procedurą „najpierw najlepszy” oraz przeszukiwaniem w głąb. Graf może być przedstawiony w postaci drzewa, przez co dokładnie widać poziomy porównywania wierzchołków podczas przeszukiwania w głąb [17]. Algorytm zastosowano m.in. w [10] do wyznaczenia najkrótszej ścieżki.

Procedura przeszukiwania „najpierw najlepszy”:

```
begin
odwiedź wierzchołek v
for każde dostępne w do
    przypisz w wartość zgodnie z funkcją
    oceny
q ← najlepszy dostępny wierzchołek
powtórz procedurę dla wierzchołka q
end
```

## Algorytm mrówkowy

Algorytm służy do szukania optymalnej drogi w grafie. W pierwszej wersji algorytmu występował problem szybkiej zbieżności do lokalnego optimum, jednak po modyfikacjach algorytm znalazł szersze zastosowanie. Metoda polega na imitacji współdziałania mrówek w roju. Algorytm mrówkowy nie działa w oparciu o dowód matematyczny, a jedynie imituje zachowanie mrówek. Mrówki nie szukają najlepszego źródła pokarmu, lecz miejsca, które jest stosunkowo blisko i zaspokaja ich potrzeby. Dlatego konieczne jest

wprowadzenie funkcji oceny, czy dane rozwiązanie jest zadowalające. Wybór ścieżki odbywa się na zasadzie wydzielania i wyczuwania feromonu przez mrówki. Im większe stężenie feromonu, tym większe prawdopodobieństwo, że ścieżka zostanie wybrana. Na tej podstawie wybierane jest „zadowalające” rozwiązanie (niekoniecznie optymalne).

Algorytmy mrówkowe wykorzystano do znalezienia najkrótszej ścieżki w [5], [12], [15], [16].

Kroki algorytmu mrówkowego:

```
begin
while (not WarunekKońca) do
    SzukajŚcieżki()
    AktualizujFeromony()
end
```

Algorytm jest iteracyjny. W poszczególnych iteracjach rozwiązanie sprawdzane jest za pomocą funkcji oceny. WarunekKońca to przeważnie założona liczba iteracji. Pierwsza procedura algorytmu SzukajŚcieżki() imituje zachowanie mrówek. Wylizane jest prawdopodobieństwo, zależne od ilości feromonów na odcinku, wartości funkcji oceny (np. kosztu przejścia danego odcinka) oraz parametrów dopieranych indywidualnie do zagadnienia. Procedura AktualizujFeromony() przypisuje wielkość pozostawionego przez mrówkę feromonu na wyznaczonej ścieżce. Mrówka nie zostawia feromonu wcześniej, ponieważ może z jednej strony nie otrzymać rozwiązania. Z drugiej algorytm dąży do wykorzystania najlepszego z wyznaczonych, dlatego nie ma potrzeby aktualizowania feromonów wcześniej.

Problemy rozwiązywane za pomocą algorytmów mrówkowych często nie dają rozwiązania optymalnego, dlatego stosuje się funkcję oceny, która we współpracy z algorytmem mrówkowym generuje rozwiązanie wystraszające. Algorytmy mrówkowe są stosowane w problemach, w których jest niemożliwe znalezienie optimum lub zadanie to jest złożone obliczeniowo.

## Algorytmy genetyczne i ewolucyjne

Algorytm genetyczny przypomina zjawiska biologiczne. Dana jest pewna populacja, w której należy wskazać najsilniejszego osobnika. Podczas selekcji odrzucane są osobniki najsłabsze, a pozostawiane do dalszych poszukiwań te, które mają największą szansę przeżycia. Oceny dokonuje się na podstawie funkcji przystosowania. Następnie dokonuje się mutacji i/lub krzyżowania genów i ponownie ocenia osobniki.

Podobnie działają algorytmy ewolucyjne: generowane rozwiązania również jest oceniane funkcją przystosowania.

Działanie algorytmu [17]:

```
begin
generuj populację P
ocień populację P
while (nie spełniony warunek końca) do
    begin
        wybierz nową populację P'
        mutuj / krzyżuj P'
        oceń nową populację P'
    end
end
```



Algorytmy genetyczne i ewolucyjne stosowane są w szerokim zakresie:

- obliczanie ekstremum funkcji, których nie można wyznaczyć metodami analitycznymi,
- rozwiązywanie problemów złożonych, których człowiek nie jest w stanie rozwiązać (np. wyznaczenie funkcji spełniającej równanie z członami nieliniowymi),
- omijanie problemu szybkiej zbieżności do optimum lokalnego,
- szukanie rozwiązań w dużej przestrzeni.

Algorytmy genetyczne zostały zastosowane do optymalizacji w: [12], [22] – rozwiązanie sytuacji kolizyjnej statków z kryterium najmniejszej straty drogi, [23] – wyznaczenie trajektorii statków strefach rozgraniczenia ruchu.

Wybór algorytmu optymalizacyjnego zależy od postawionego problemu. Do poszukiwań globalnych, np. wyboru najkrótszej trasy, gdzie poszczególne punkty i odcinki ścieżki można przedstawić na grafie używa się algorytmów przeszukiwania grafu. W problemach lokalnych, np. w sytuacjach kolizyjnych i omijaniu przeszkód wymagana jest dokładna znajomość sytuacji, własności środka transportu oraz otoczenia (istnienie przeszkód statycznych i dynamicznych, wpływ zakłóceń). Na podstawie analizy zadania transportowego określono pożądane cechy algorytmu optymalizacji dla rozwiązania sytuacji kolizyjnej na morzu:

- mała złożoność obliczeniowa,
- dostarczenie rozwiązania optymalnego, w przypadku niemożliwości otrzymania optymalnego – wystarczające,
- odporność na optima lokalne.

Ze względu na złożoność sytuacji kolizyjnej algorytm powinien:

- uwzględniać dynamikę ruchu pojazdu, również człony nieliniowe,
- uwzględniać dynamikę otoczenia: zarówno przeszkody statyczne jak i inne obiekty poruszające się na danych obszarze.

W tabeli 1. przedstawiono zestawienie cech wybranych algorytmów optymalizacji w problemie wyboru drogi.

## 4. METODA SZTUCZNYCH PÓL POTENCJAŁOWYCH

Metoda pól potencjałowych stosowana jest w nawigacji robotów mobilnych [9]. Szczególnie warte uwagi jest omijanie przeszkód. Zasada działania opiera się na oddziaływaniu sił pomiędzy ładunkami. Ładunkami w tym przypadku będą robot i znajdujące się na nim czujniki oraz przeszkody. Robot ma przemierzyć trasę z punktu początkowego do punktu celu, omijając po drodze przeszkody w bezpiecznej odległości. Kierunek ruchu robota jest wypadkową działających na niego sił „przyciągania” do celu oraz „odpychania”

od przeszkód [21]. Wielkości te są ustalane na podstawie informacji pobranych z czujników znajdujących się na robocie oraz umieszczonych na brzegu przeszkód [8]. W zadanym kroku czasowym konieczne jest określenie minimalnej odległości jaką robot ma przemierzyć oraz odległości w jakiej robot minie się z przeszkodą, aby uniknąć zderzenia i za bardzo się do niej nie zbliżyć.

Metoda ta posiada jednak wady związane z problemem minimum lokalnego oraz złożonością metody. Problem minimum lokalnego ma miejsce, gdy wektor wypadkowy jest zerowy. Można stosować modyfikacje metody pól potencjałowych. Jedną z takich metod jest poruszanie się wzdłuż przeszkody i kontynuowanie ruchu do punktu celu lub chwilowe wyłączenie siły przyciągania. W takim przypadku metoda oddali robota od przeszkody na tyle, by ponowne włączenie przyciągania spowodowało ruch w kierunku celu [18]. Powody złożoności obliczeniowej to np. nie uwzględnienie przeszkód znajdujących się poza zasięgiem widzenia robota, problem przejścia robota przy dużym zagęszczeniu przeszkód czy niewystarczająca ilość czujników rozmieszczonych na przeszkodzie.

Metoda pól potencjałowych ma swoje zastosowanie w transporcie morskim. W artykule [19] wykorzystano ją do wykrywania anomalii w ruchu statków, rozumianą jako wyjątek od wzorcowego zachowania. Model wzorcowego zachowania stworzono na podstawie historycznych danych pobranych z systemu AIS. Anomalią jest np. statek przechodzący przez miejsce nie należące do wzorcowego modelu.

W artykule [7] zastosowano metodę pól potencjałowych koordynowania i sterowania zestawem robotów (rojem).

Rozważono zastosowanie metody pól potencjałowych w transporcie morskim - ominięcie przeszkody nawigacyjnej przez statek w bezpiecznej odległości.

Przyjęto, że:

- znane są współrzędne celu ( $x_{cel}, y_{cel}$ ) oraz współrzędne punktu kadłuba, kurs początkowy statku oraz jego prędkość: ( $x_{st}, y_{st}$ ),  $\psi, V$ ,
- znane są współrzędne przeszkód nawigacyjnych ( $x_1, y_1$ ), ..., ( $x_n, y_n$ ),
- ustalona jest bezpieczna odległość minięcia się statku z przeszkodą -  $d_0$ ,
- dopuszcza się odległość poniżej której cel jest uważany za osiągnięty -  $\hat{d}$ ,
- obliczenia wykonywane są w jednostce czasu -  $t$ .

Odległości między punktami są liczone według wzoru:

$$d(A, B) = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}. \quad (2)$$

Tab. 1. Zestawienie cech wybranych algorytmów wyboru drogi

Nazwa algorytmu	Sformułowanie problemu	Złożoność obliczeniowa algorytmu	Zalety	Wady
Algorytm Dijkstry	poszukiwanie najkrótszej ścieżki w grafie	$O(n^2)$ lub $O(n \log n)$ $n$ – liczba węzłów grafu	otrzymane rozwiązanie jest optymalne, pewność przeszukania wszystkich możliwych ścieżek	wagi krawędzi grafu muszą być znane i dodatnio określone
Algorytm A*	znajdowanie najkrótszej ścieżki w grafie ważonym między dowolnymi wierzchołkami spełniająca określony warunek	$O(n)$ $n$ – liczba węzłów grafu	wstępne porządkowanie, rozwiązanie optymalne, jeśli funkcja oceny jest dobrze określona przeszukuje minimalną ilość wierzchołków konieczną do wyznaczenia optymalnej trasy	wymagana jest poprawność funkcji oceny, inaczej algorytm nie znajdzie rozwiązania
Algorytm mrówkowy	szukanie najkrótszej ścieżki	w zależności od liczby iteracji	wykorzystywany w złożonych zadaniach	otrzymane rozwiązanie jest suboptymalne
Algorytm genetyczny lub ewolucyjny	poszukiwanie rozwiązania – osobnika – funkcja przystosowania	w zależności od liczby iteracji	przydatny w problemach złożonych, w których inne metody nie generują rozwiązania oraz do przeszukiwania dużych zbiorów	otrzymane rozwiązanie jest suboptymalne lub niemożliwe do uzyskania przy założonej ilości iteracji

Schemat wyznaczania trajektorii ruchu statku w celu ominięcia przeszkody:

1. Wyznaczenie odległości między statkiem a celem podróży,
2. Wyznaczenie siły przyciągania zgodnie ze wzorem:

$$F_p = k_p \cdot d \quad (3)$$

3. Wyznaczenie odległości między statkiem a poszczególnymi przeszkodami -  $d_i$ ,  $i$ - numer przeszkody,
4. Wyznaczenie sił odpychania pomiędzy statkiem a poszczególnymi przeszkodami nawigacyjnymi:

$$F_i = \begin{cases} 0 & , d_i > d_0 \\ -k_i \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{d_i^2} & , d_i \leq d_0 \end{cases} \quad (4)$$

5. Wyznaczenie wypadkowej siły statek – przeszkoda nawigacyjna ,
6. Na podstawie punktu 5. wyznaczany jest nowy kurs statku  $\psi$  oraz współrzędne:

$$\begin{aligned} x_{st_{nowe}} &= x_{st_{stare}} + Vt \cos \psi \\ y_{st_{nowe}} &= y_{st_{stare}} + Vt \sin \psi. \end{aligned} \quad (4)$$

Powyższy algorytm jest analogiczny do zastosowanego w [9]. Pełna znajomość otoczenia oraz informacja o pozycji statku umożliwia rozpatrzenie globalnego problemu wyboru drogi. Wykorzystanie metody pól potencjałowych zapobiega zatrzymaniu się na przeszkodzie nawigacyjnej, poprzez działanie siły odpychania. Jest to przydatne do unikania kolizji z przeszkodami statycznymi.

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono problem wyboru drogi w różnych gałęziach transportu. Analizowano algorytmy wyboru drogi w sytuacji kolizyjnej na morzu. Rozważono wykorzystanie metody pól potencjałowych w transporcie morskim. Przedstawiono schemat wyboru drogi w sytuacji omijania przeszkód nawigacyjnych przez statek. Przygotowywana jest implementacja metody pól potencjałowych do wyznaczenia trajektorii ruchu statku w sytuacji kolizyjnej z przeszkodami nawigacyjnymi.

## BIBLIOGRAFIA

1. CALYPTE AVIATUM., Pobrano z lokalizacji <http://calypateaviation.com/2014/08/wprowadzenie-do-planowania-trasy/>, 2014
2. Algorytmy.org, Pobrano z lokalizacji [www.algorytmy.org](http://www.algorytmy.org)
3. Alsina C., *Plany metra i sieci neuronowe*, RBA, Barcelona 2010
4. Crauser A., Mehlhorn K., Meyer U. i Sanders P., *A parallelization of Dijkstra's shortest path algorithm*, "Lecture Notes in Computer Science", 1998
5. Dorigo M., Gambardella L. M., *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*, "IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION" 1997, strony 53-66.
6. Dramski M., Mąka M., *Selected Shortest path in the graph algorithms with use of trapezoidal grid in navigation in restricted area*, "Archives of Transport System Telematics", 2012, strony 3-7
7. Furferi, R., Conti, R., Mel E. i Ridolfi A., *Optimization of potential field method parameters through networks for swarm cooperative manipulation tasks*. "International Journal of Advanced Robotic Systems" 2016

8. Garbacz M., *Planowanie ścieżki robota mobilnego na podstawie informacji z czujników odległościowych*, "Automatyka" 2006, t. 10, z.3
9. Garbacz M. i Zaczek M., *Metoda pól potencjałowych w nawigacji kołowej robota mobilnego*, "Automatyka" 2011, t.15, z.3, strony 339-347
10. Hornauer S., Hahn A., Blaich M. i Reuter J., *Trajectory planning with negotiation maritime collision avoidance*, "TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation" 2015, Vol. 9, No. 3, strony 335-341
11. Jacyna M., *Wybrane zagadnienia modelowania systemów transportowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009
12. Jakubowska A. i Piechocka K., *W poszukiwaniu optymalnej trasy – wybrane algorytmy w zastosowaniu do problemu komiwojażera*, "JOURNAL OF TRANSLOGISTICS" 2015, strony 7-23
13. Jurdziński M., *Podstawy nawigacji morskiej*, Fundacja Rozwoju Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 2003
14. Kozieł G., *Algorytmy wyznaczania optymalnej trasy przejazdu*, "Logistyka" 2014, nr3, strony 3206-3212
15. Lazarowska A., *A trajectory base method for ship's safe path planning*, "Procedia Computer Science" 2016, vol.96, strony 1022 – 1031
16. Mąka M. i Dramski M., *The choice of ship's safe route in a restricted area with the use of quadrees for a simplified ant algorithm*, "14th International Scientific and technical Conference on Marine Traffic Engineering", Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2011, strony 319-327
17. Michalewicz Z., Fogel D. B., *Jak to rozwiązać, czyli nowoczesna heurystyka*, Wydawnictwo Naukowe - Techniczne, Warszawa 2006
18. Oborski P., Fedorczyk T., *Zmodyfikowana metoda pól potencjałowych do wyznaczania drogi robota mobilnego*, "Pomiary Automatyka Robotyka" 2015, nr 2, strony 57-64
19. Osekowska E., Axelsson S. i Carlsson B., *Potential Fields in Maritime Anomaly*, "Proceedings of the 3rd international conference on models and technologies for intelligent transport systems" 2013. TUD Press
20. Pietrzykowski Z., Mielniczuk S. i Hattas P., *Trajektoria ruchu statku w procesie bezpiecznego prowadzenia statku po akwenuie otwartym*, "TTS Techniki Transportu Szynowego" 2015, nr 12
21. Podśędowski L., *Dynamiczne planowanie trajektorii robotów mobilnych w zmiennej przestrzeni roboczej*, "Zeszyty Naukowe Nr Rozprawy Naukowe", Politechnika Łódzka, Łódź 1998
22. Szlarczyński R., *Evolutionary sets of safe ship trajectories: a new approach to collision avoidance*, "The Journal of Navigation" 2011, vol.64, strony 169-181
23. Szlarczyński R., *Evolutionary sets of safe ship trajectories with speed reduction manoeuvres within traffic separation schemas*, "Polish Maritime Research" 2014, strony 20-27
24. Żochowska R., *Modele wyboru drogi wykorzystywane w budowie dynamicznych macierzy podróży*, "Logistyka" 2011, nr 4, strony 1026-1036

## Selected methods of optimization in solving the collision situation on the sea

*Solving the collision situation at sea requires a safe trajectory to be determined, taking into account the ship's maneuverability, hydrometeorological conditions and the reservoir parameters. The economic criteria are also taken into account. The problem of route selection is an example of an optimization task. Various optimization method are proposed in the literature to determine the safe trajectory. The article presents selected algorithms for optimizing the choice of path in different transport sectors. It was considered possible to use potential field method to solve conflicts at sea.*

Autorzy:

mgr Sylwia Mielniczuk – Akademia Morska w Szczecinie