

Nr 98/2017, 109–115  
ISSN 1644-1818  
e-ISSN 2451-2486

## WYZNACZANIE BEZPIECZNEJ TRAJEKTORII PRZY ZASTOSOWANIU ALGORYTMU MRÓWKOWEGO Z UWZGLĘDNIENIEM CHARAKTERYSTYKI MANEWROWEJ STATKU

### DETERMINATION OF A SAFE TRAJECTORY WITH THE USE OF AN ANT ALGORITHM AND CONSIDERATION OF THE SHIP'S MANEUVERING CHARACTERISTIC

**Agnieszka Lazarowska**

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny,  
Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: a.lazarowska@we.am.gdynia.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono propozycję rozwiązania problemu wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku przy zastosowaniu jednej ze stochastycznych metod optymalizacji, jaką jest algorytm mrówkowy. W procesie obliczania bezpiecznej trasy przejścia statku uwzględnione zostały wszystkie najważniejsze wymagania i ograniczenia, do których należą Międzynarodowe Prawo Drogi Morskiej (MPDM), ograniczenia statyczne (łądy, mielizny) i dynamiczne (spotkane statki), odległość bezpieczna pomiędzy statkami, warunki pogodowe (widzialność) oraz właściwości dynamiczne statku. Dynamika statku własnego została uwzględniona w postaci czasu realizacji manewru, którego wartość wynika z charakterystyki manewrowej danej jednostki.

**Słowa kluczowe:** algorytm mrówkowy, czas manewru, trajektoria bezpieczna, unikanie kolizji.

**Abstract:** The article presents a proposal for solving the problem of determining a ship's safe trajectory using one of the stochastic optimization methods, which is an ant algorithm. In the process of ship's safe path planning all of the most important requirements and limitations were taken into account, which include the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), static (lands, shoals) and dynamic (target ships) obstacles, a safe distance between ships, weather conditions (visibility) and dynamic properties of the ship. The dynamics of an own ship were taken into account in the form of maneuver time, the value of which is indicated by the maneuvering characteristic of a vessel.

**Keywords:** ant algorithm, maneuver time, safe trajectory, collision avoidance.

## 1. WSTĘP

Obserwowany w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat dynamiczny rozwój technologii informacyjnej oraz metod optymalizacji ułatwia poszukiwanie i testowanie nowych sposobów automatyzacji procesów przemysłowych, biznesowych, a także nowych rozwiązań w zakresie automatyzacji sterowania statkiem. Krokiem w kierunku automatyzacji nawigacji morskiej jest opracowanie systemu wspomagania decyzji nawigatora w procesie unikania kolizji na morzu.

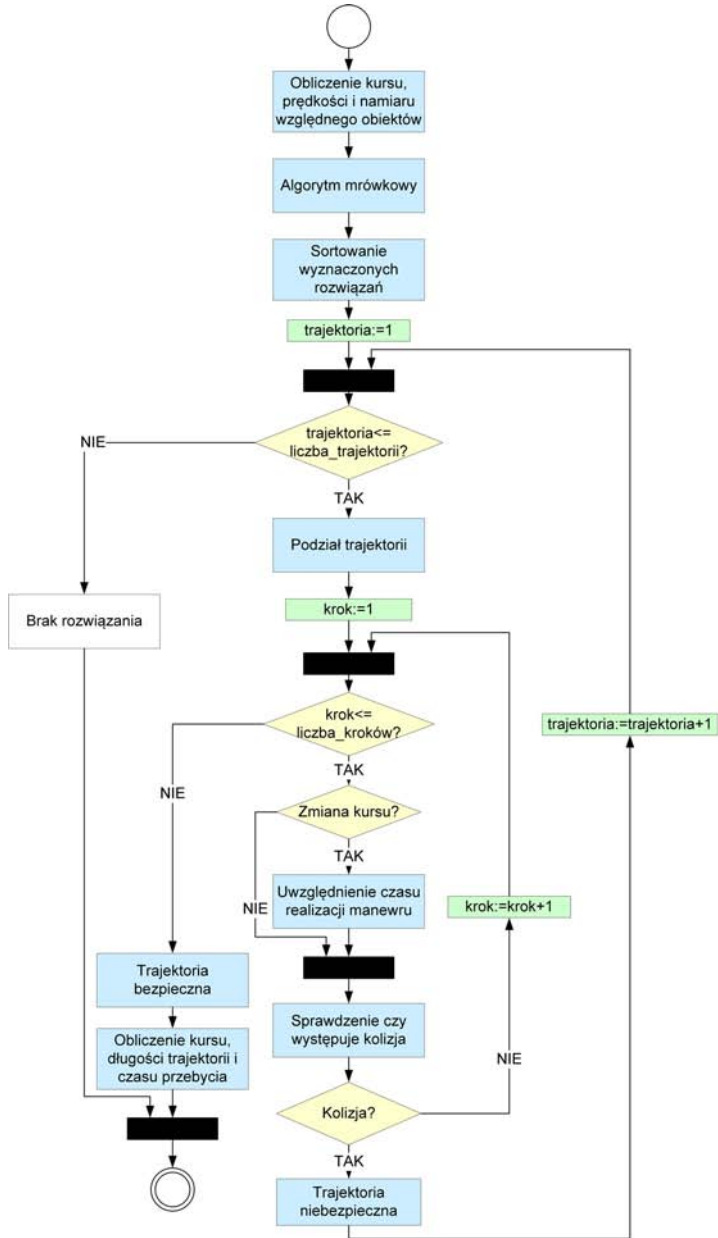
Dotychczas zaproponowane algorytmy wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku obejmują zastosowanie metod takich: jak programowanie dynamiczne [Lisowski 2010], gry różniczkowe [Lisowski 2014], algorytm ewolucyjny [Kuczkowski i Śmierchalski 2014], algorytm mrówkowy [Lazarowska 2015; Tsou i Hsueh 2010], metoda podziału i ograniczeń (ang. *branch-and-bound*) [Mohamed-Seghir 2012], logika rozmyta [Perera, Carvalho i Guedes Soares 2011] oraz sztuczne sieci neuronowe [Ahn, Rhee i You 2012]. W ciągu ostatnich kilku lat rozwinęło się nowe podejście oparte na wykorzystaniu autonegocjacji manewrów [Szląpczyńska 2015]. Takie rozwiązanie, określane jako system agentowy, zostało zaproponowane w pracach [Hornauer i Hahn 2013; Szląpczyński i Szląpczyńska 2012].

## 2. ALGORYTM WYZNACZANIA BEZPIECZNEJ TRAJEKTORII STATKU

W prezentowanym rozwiązaniu do optymalizacji bezpiecznej trajektorii statku zastosowano algorytm mrówkowy. Metoda ta powstała z inspiracji zachowaniem mrówek w procesie poszukiwania pożywienia. Działanie metody polega na iteracyjnym przeszukiwaniu przestrzeni rozwiązań przez kolonię sztucznych mrówek. Mrówki, wyznaczając swoje rozwiązanie, pozostawiają na przebytych odcinkach trasy pewien ślad (ang. *pheromone trail*). Prawdopodobieństwo kolejnego ruchu mrówki zależy od zgromadzonego na rozpatrywanych odcinkach śladu, pozostawionego przez inne mrówki, oraz od pewnej wielkości heurystycznej. Tutaj jest nią odwrotność długości danego odcinka.

W wyniku obliczeń z zastosowaniem algorytmu mrówkowego wyznaczany jest zbiór rozwiązań (trajektorii), spełniających statyczne i dynamiczne (spotkane statki) ograniczenia nawigacyjne. Statyczne ograniczenia nawigacyjne (łądy, mielizny) modelowane są w postaci wklęsłych lub wypukłych wielokątów z uwzględnieniem dodatkowej strefy bezpieczeństwa. Odległość bezpieczna pomiędzy statkami zapewniona jest poprzez zastosowanie sześciokątnej domeny wokół spotkanych statków. Kształt i rozmiar domeny zapewnia też zgodność wyznaczonych trajektorii z Międzynarodowym Prawem Drogi Morskiej (MPDM). Wymusza wyznaczenie manewrów o odpowiednio dużych wartościach zmian kursu (zgodność z prawidłem 8b MPDM) oraz na odpowiednią burtę (zgodność

z prawidłem 14 oraz 15 MPDM). Na tym etapie wyznaczania zbioru rozwiązań uwzględniany jest kinematyczny model ruchu statków.



Rys. 1. Algorytm wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku z uwzględnieniem czasu realizacji manewru

Fig. 1. The ship's safe trajectory determination algorithm considering the maneuver time

Następnie zbiór trajektorii oceniany jest pod kątem spełnienia kryterium optymalizacyjnego. Funkcja celu zdefiniowana jest jako suma długości ( $w$ ) odcinków ( $e_1, e_2, \dots, e_k$ ), stanowiących daną trajektorię – wzór (1). Następnie trajektorie wyznaczone przez algorytm mrówkowy segregowane są zgodnie z kryterium minimalizacji funkcji.

$$f(s) = \sum_{i=1}^k w(e_i) \rightarrow \min \quad (1)$$

W kolejnym kroku z wyznaczonego zbioru trajektorii pobierana jest trajektoria o najmniejszej wartości funkcji celu. Następnie sprawdzane jest spełnienie przez tę trajektorię ograniczeń procesu sterowania przy uwzględnieniu czasu realizacji manewru. Jeżeli sprawdzana trajektoria spełnia wszystkie ograniczenia, oznacza to, że stanowi ona rozwiązanie danej sytuacji nawigacyjnej. Dalsze obliczenia są przerywane i program przechodzi do graficznej oraz numerycznej prezentacji wyniku. Jeśli sprawdzana trajektoria nie spełnia wszystkich ograniczeń, oznaczana jest jako niebezpieczna, po czym ze zbioru rozwiązań pobierana jest do oceny kolejna trajektoria.

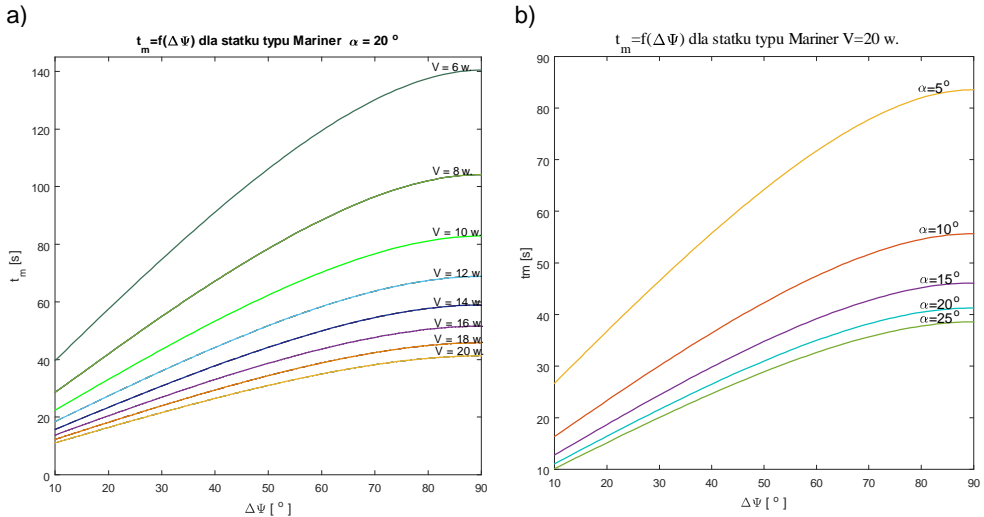
### 3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE STATKU

Właściwości dynamiczne statku w trakcie manewru zmiany kursu zależą od kąta wychylenia płetwy steru, prędkości statku oraz stanu załadowania. W obliczeniach bezpiecznej trajektorii statku uwzględniane są za pomocą parametru, jakim jest czas realizacji manewru. Określenie właściwości dynamicznych statku w warunkach eksploatacyjnych opiera się na wykonaniu prób manewrowych.

$$t_m = T + \frac{\Delta\Psi}{\omega} - \frac{1}{\omega} \operatorname{tg}\left(\frac{\Delta\Psi}{2}\right) \quad (2)$$

Właściwości dynamiczne statku własnego, zastosowane w obliczeniach z wykorzystaniem algorytmu wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku, przedstawionego w tym artykule, opierają się na obliczeniach próby cyrkulacji dla wybranego przykładowego statku. Próba cyrkulacji polega na wykonaniu manewru zwrotu o  $360^\circ$  z zastosowaniem zdefiniowanego kąta wychylenia płetwy steru.

Rysunek 2a przedstawia zależność czasu realizacji manewru w funkcji zmiany kursu dla różnych wartości prędkości statku, a 2b dla różnych wartości kąta wychylenia płetwy steru.



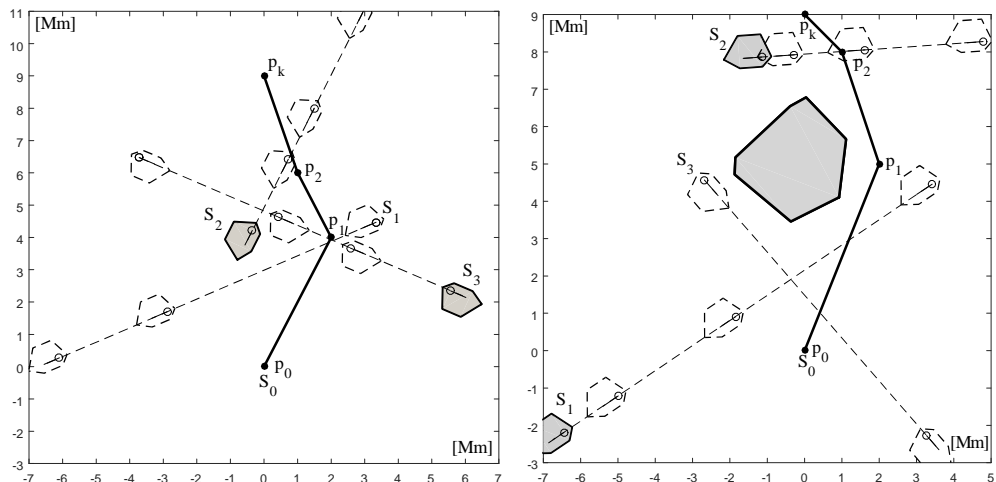
**Rys. 2.** Czas realizacji manewru w funkcji zmiany kursu  
**Fig. 2.** The maneuver time as a function of a course change

Czas realizacji manewru zdefiniowano jako wartość złożoną z dwóch składowych – części liniowej zależnej od właściwości inercyjnych statku (stała czasowa  $T$ ) oraz ruchu krzywoliniowego na cyrkulacji o ustalonej prędkości kątowej. Czas ten jest opisany wzorem (2), gdzie  $T$  jest stałą czasową,  $\omega$  jest prędkością kątową statku, a  $\Delta\Psi$  jest rozważaną zmianą kursu.

W badaniach symulacyjnych, których wyniki prezentowane są w tej pracy, właściwości dynamiczne obliczono dla przykładowego statku towarowego typu Mariner o długości 160,93 m przy wykorzystaniu *Marine Systems Simulator* – biblioteki środowiska Matlab, opisanej w [Fossen 2011].

#### 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Przedstawiony tutaj algorytm wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku został zrealizowany w postaci programu komputerowego w środowisku Matlab. Poniżej na rysunku 3 przedstawiono wyniki obliczeń, otrzymane dla dwóch przykładowych sytuacji nawigacyjnych: spotkania z trzema statkami oraz z trzema statkami i lądem. Punkty od  $p_0$  do  $p_k$  przedstawiają chwilowe położenia statku własnego podczas jego ruchu wzdłuż wyznaczonej trajektorii. Natomiast zaznaczone linią przerywaną kontury sześciokątnych domen prezentują chwilowe położenia spotkanych statków. Na podstawie analizy chwilowych położenia statku własnego oraz spotkanych obiektów można zauważyć, że wyznaczone przez algorytm rozwiązania stanowią trajektorie bezpieczne, nieprzekraczające w żadnej chwili czasu statycznych oraz dynamicznych ograniczeń nawigacyjnych.



**Rys. 3.** Trajektorie wyznaczone przez algorytm dla przykładowych sytuacji nawigacyjnych  
**Fig. 3.** Trajectories determined by the algorithm for exemplary navigational situations

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono algorytm wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku, uwzględniający w obliczeniach dynamikę statku własnego w postaci czasu realizacji manewru. Prezentowane wyniki dowodzą skuteczności zaproponowanej metody w rozwiązywaniu rozpatrywanego problemu. Opracowaną metodę uwzględniania właściwości dynamicznych statku własnego można w łatwy sposób zastosować w obliczeniach dla innego statku oraz przy wykorzystaniu innej metody optymalizacji.

## LITERATURA

- Ahn, J.H., Rhee, K.P., You, Y.J., 2012, *A Study on the Collision Avoidance of a Ship Using Neural Networks and Fuzzy Logic*, Applied Ocean Research, vol. 37.
- Fossen, T.I., 2011, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Hornauer, S., Hahn, A., 2013, *Towards Marine Collision Avoidance Based on Automatic Route Exchange*, 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, vol. 46(33), Osaka, Japan.
- Kuczkowski, L., Śmierzchalski, R., 2014, *Comparison of Single and Multi-population Evolutionary Algorithm for Path Planning in Navigation Situation*, Solid State Phenomena, vol. 210.
- Lazarowska, A., 2015, *Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation*, Journal of Navigation, vol. 68(02).

- Lisowski, J., 2010, *Optimization Decision Support System for Safe Ship Control*, [w:] Brebbia, C.A., Brooks C.N., (eds.) *Risk Analysis VII*, WIT Transactions on Information and Communication Technologies, vol. 43, WIT Press.
- Lisowski, J., 2014, *Comparison of Dynamic Games in Application to Safe Ship Control*, Polish Maritime Research, vol. 21, 3(83).
- Mohamed-Seghir, M., 2012, *The Branch-and-Bound Method and Genetic Algorithm in Avoidance of Ships Collisions in Fuzzy Environment*, Polish Maritime Research, vol. 19, S1(74).
- Perera, L., Carvalho, J., Guedes Soares, C., 2011, *Fuzzy Logic Based Decision Making System for Collision Avoidance of Ocean Navigation under Critical Collision Conditions*, Journal of Marine Science and Technology, vol. 16(1).
- Szłapczyńska, J., 2015, *Data Acquisition in a Manoeuver Auto-negotiation System*, TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 9, no. 3.
- Szłapczyński, R., Szłapczyńska, J., 2012, *Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories: Evaluation of Individuals*, TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 6, no. 3.
- Tsou, M.-Ch., Hsueh, Ch.-K., 2010, *The Study of Ship Collision Avoidance Route Planning by Ant Colony Algorithm*, Journal of Marine Science and Technology, vol. 18, no. 5.