

PLANOWANIE TRASY PRZEJŚCIA STATKU Z ZASTOSOWANIEM ALGORYTMU MRÓWKOWEGO

W artykule zaprezentowano wyniki pracy badawczej, dotyczącej zastosowania jednej z metod sztucznej inteligencji w nawigacji morskiej. W pracy tej algorytmy mrówkowe zostały użyte do wyznaczania bezpiecznej, optymalnej trasy przejścia statku pomiędzy portami. Koncepcja ta stanowi innowacyjne podejście do problemu wyznaczania bezpiecznej, optymalnej trajektorii statku. W procesie wyznaczania trasy przejścia uwzględniane są statyczne ograniczenia nawigacyjne, takie jak lądy, kanały, pły-cizny, tory wodne. Przedstawiony Podsystem Planowania Trasy Przejścia Statku stanowi element Systemu Wspomagania Decyzji Nawigacyjnych na Morzu. Celem systemu jest zwiększenie bezpieczeństwa nawigacji morskiej przy jednoczesnej minimalizacji kosztów eksploatacyjnych statku.

Słowa kluczowe: planowanie trasy przejścia, wspomaganie decyzji, algorytm mrówkowy, sztuczna inteligencja.

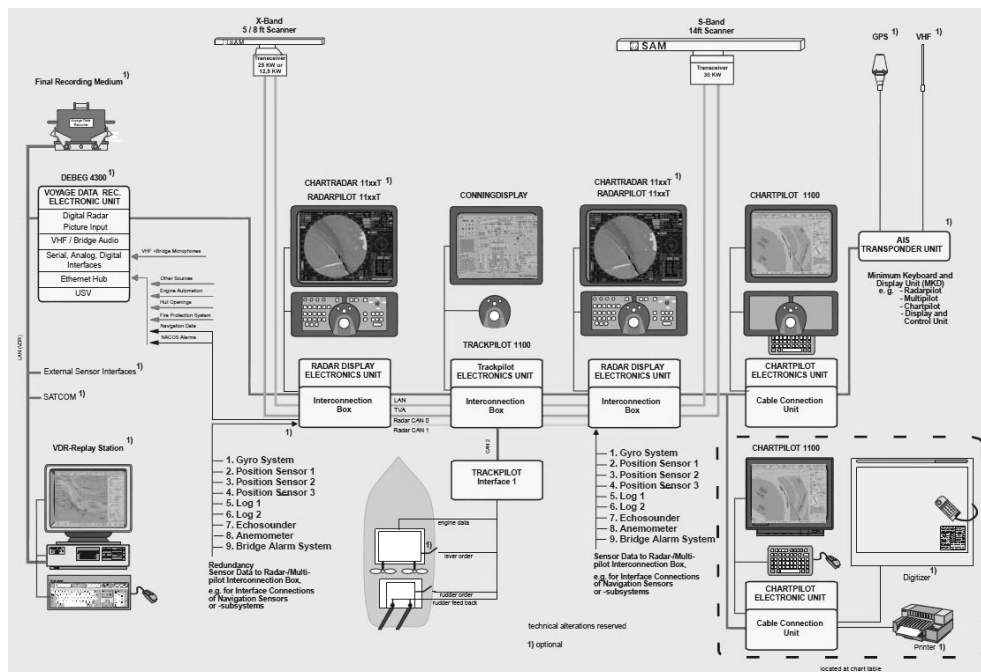
WSTĘP

Nawigacja morska jest procesem skomplikowanym, gdyż wymaga od nawigatora prowadzącego statek umiejętności analizowania dużej ilości informacji w krótkim czasie. Jej głównym celem jest zagwarantowanie bezpiecznej żeglugi z portu wyjścia do portu docelowego przy jednoczesnym zapewnieniu jak najniższych kosztów eksploatacyjnych statku. Dynamiczny rozwój technologiczny doprowadził do stworzenia wielu urządzeń i systemów, mających na celu ułatwienie procesu prowadzenia nawigacji. Zalicza się do nich:

- urządzenie do automatycznego prowadzenia nakresów radarowych ARPA (*Automatic Radar Plotting Aid*);
- autopilota;
- system automatycznej identyfikacji AIS (*Automatic Identification System*);
- system obrazowania map elektronicznych i informacji nawigacyjnych ECDIS (*Electronic Chart Display and Information System*) [3].

Urządzenia te stanowią elementy zintegrowanego mostka nawigacyjnego – IBS (ang. *Integrated Bridge System*), który łączy funkcjonalnie działanie systemu radarowego, ECDIS i autopilota. Przykładem takiego systemu jest zintegrowany system dowodzenia i nawigacji NACOS (*Navigation and Command System*) firmy SAM Electronics, przedstawiony na rysunku 1. System ten ułatwia nawigatorowi analizowanie aktualnej sytuacji nawigacyjnej poprzez czytelne zobrazowanie

informacji z wielu źródeł na jednym ekranie. Dalszym etapem rozwoju jest dążenie w kierunku stworzenia systemu wspomagania decyzji nawigacyjnych, którego działanie polegałoby na proponowaniu rozwiązań na podstawie dostępnych informacji nawigacyjnych.



Rys. 1. Zintegrowany system dowodzenia i nawigacji NACOS 35-4
(Navigation and Command System) firmy SAM Electronics [11]

Fig. 1. SAM Electronics Integrated Navigation and Command System NACOS 35-4 [11]

Jednym z zadań wchodzących w skład procesu nawigacji morskiej jest planowanie trasy przejścia statku pomiędzy portami. Zadanie to polega na wyznaczeniu kolejnych punktów zwrotu (ang. *waypoint*) od portu początkowego do portu docelowego przy uwzględnieniu statycznych ograniczeń nawigacyjnych między innymi takich jak lądy, płytkowodzia, kanały, tory wodne, kotwiczowiska. Rozwój technik komputerowych stymuluje powstawanie nowoczesnych metod obliczeniowych. Zastosowanie tych metod umożliwia stworzenie systemu wspomagającego nawigatora w zadaniu wyznaczania bezpiecznej optymalnej trajektorii statku pomiędzy portami. W pracy tej zaproponowano zastosowanie do tego celu jednej z metod sztucznej inteligencji – AI (ang. *artificial intelligence*), jaką stanowią algorytmy mrówkowe [3, 6].

1. ALGORYTMY MRÓWKOWE

Algorytmy mrówkowe należą do metod inteligencji roju – SI (ang. *swarm intelligence*). Metody te czerpią inspiracje ze zbiorowych zachowań owadów społecznych, takich jak mrówki, pszczoły, termity. Ich działanie oparte jest na populacji osobników oddziałujących ze sobą oraz ze środowiskiem, zwanych agentami. Z perspektywy badań operacyjnych algorytmy mrówkowe, podobnie jak algorytmy ewolucyjne, symulowane wyżarzanie (ang. *simulated annealing*) czy algorytm poszukiwania z tabu (*Tabu Search*), należą do grupy metod heurystycznych. Algorytmem heurystycznym nazywany jest algorytm, który nie gwarantuje znalezienia rozwiązania optymalnego. Umożliwia jednak znalezienie rozwiązania dostatecznie dobrego w akceptowalnym czasie dla problemów, w których zastosowanie tradycyjnych algorytmów optymalizacji nie pozwala na uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów.

Koncepcja algorytmów mrówkowych została przedstawiona na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku przez Dorigo, Coloni i Maniezzo. W 1992 roku Marco Dorigo opublikował swoją rozprawę doktorską pod tytułem „*Optimization, Learning and Natural Algorithms*”, w której zaprezentował pierwsze zastosowanie algorytmów mrówkowych do rozwiązywania problemu komiwojażera (ang. *travelling salesman problem*). Zadanie to polega na znalezieniu najkrótszej drogi pomiędzy miastami, które ma odwiedzić wędrowny sprzedawca, przy czym każde z miast może być odwiedzane tylko raz. Jest to zagadnienie z zakresu teorii grafów. Problem polega na znalezieniu minimalnego cyklu Hamiltona w pełnym grafie ważonym. Graf jest strukturą, składającą się z wierzchołków wzajemnie połączonych ze sobą za pomocą krawędzi. Cyklem Hamiltona nazywa się ścieżkę w grafie, która przechodzi przez wszystkie jego wierzchołki tylko raz i wraca do wierzchołka początkowego. Pełny graf ważony to graf, w którym każdy wierzchołek jest połączony krawędziami ze wszystkimi innymi wierzchołkami, a łączące krawędzie mają przypisane wagi. Znalezienie minimalnego cyklu Hamiltona w pełnym grafie ważonym polega na znalezieniu w grafie cyklu Hamiltona o minimalnej sumie wag.

Inspiracją do powstania algorytmów mrówkowych była obserwacja zachowania mrówek w procesie poszukiwania pożywienia. Naukowcy badający ten proces odkryli, że mrówki, początkowo poruszające się w sposób przypadkowy w poszukiwaniu pożywienia, bardzo szybko potrafią odnaleźć najkrótszą trasę pomiędzy mrowiskiem a źródłem pokarmu. Dalsze obserwacje pozwoliły na odkrycie pewnego sposobu pośredniej komunikacji pomiędzy mrówkami, która służy do wyboru najkrótszej ścieżki. Odkryto, że mrówki w czasie poruszania się pomiędzy mrowiskiem a źródłem pożywienia pozostawiają na podłożu pewną substancję chemiczną, nazywaną śladem feromonowym. Kolejne mrówki wyczuwają ten ślad i wybierają tę drogę, na której stężenie tej substancji chemicznej jest większe. Powoduje to jeszcze większe wzmocnienie śladu na danej drodze i wkrótce wszystkie mrówki zaczynają podążać najkrótszą trasą. Zjawisko to określane jest jako stygmurgia.

Działanie algorytmu mrówkowego składa się z dwóch etapów – tworzenia rozwiązania i aktualizacji śladu feromonowego. W problemie komiwojażera mrówka znajdująca się w mieście 'i' wybiera kolejne miasto 'j' z prawdopodobieństwem zależnym od ilości wirtualnego śladu feromonowego na krawędzi łączącej miasto 'i' z miastem 'j' oraz od pewnej informacji heurystycznej, zwanej widocznością, którą często przyjmuje się jako odwrotność długości krawędzi łączącej miasto 'i' z miastem 'j'.

W zależności od sposobu aktualizacji śladu feromonowego wyróżnia się następujące rodzaje algorytmu mrówkowego:

- algorytm gęstościowy (ang. *ant density*);
- algorytm ilościowy(ang. *ant quantity*);
- algorytm cykliczny (ang. *ant cycle*).

W dwóch pierwszych rodzajach mrówki aktualizują ilość substancji chemicznej bezpośrednio po przejściu z miasta 'i' do miasta 'j'. W algorytmie gęstościowym na każdej krawędzi użytej przez mrówkę odkładana jest taka sama ilość wirtualnego śladu feromonowego, natomiast w odmianie ilościowej wielkość śladu feromonowego jest odwrotnie proporcjonalna do długości danej krawędzi. W algorytmie cyklicznym aktualizacja śladu następuje po ukończeniu całej trasy przez wszystkie mrówki, a ilość śladu pozostawionego przez każdą mrówkę zależy od jakości trasy.

W celu poprawy uzyskiwanych rozwiązań wprowadzano również kolejne modyfikacje metody podstawowej. Dorigo i inni zaproponowali zastosowanie tzw. strategii elitarnej EAS (ang. *Elitist Ant System*). W koncepcji tej aktualizacja śladu feromonowego jest realizowana dla wszystkich rozwiązań otrzymanych w danej iteracji oraz dla najlepszego otrzymanego do tej pory rozwiązania.

Bullnheimer i inni zaproponowali z kolei tzw. *Rank-based Ant System* (RAS), w którym mrówki szeregowane są według wzrastającej długości trasy. Następnie ilość śladu odkładanego przez każdą z mrówek jest określana na podstawie zajmowanej przez nią pozycji w rankingu.

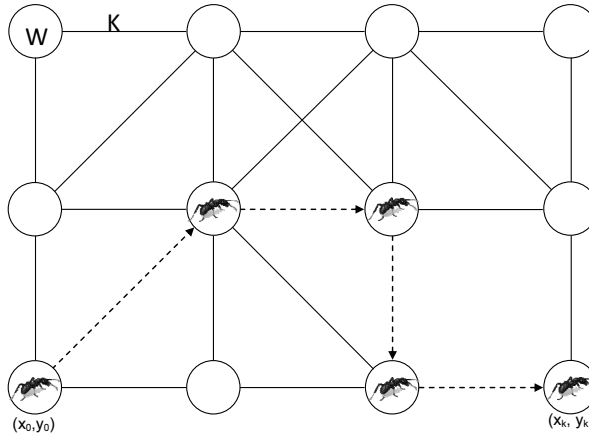
Jeszcze inne podejście przedstawili Stutzle i Hoos. W proponowanym przez nich *MAX-MIN Ant System* (MMAS) tylko najlepsza mrówka w danej iteracji może odłożyć ślad feromonowy. Kolejną modyfikacją jest ograniczenie wartości śladu feromonowego do pewnego zakresu. Oprócz tego początkowa wartość śladu feromonowego na wszystkich krawędziach jest ustawiana na wartość maksymalną. Dodatkowo proponują tzw. *trail smoothing mechanism*, który polega na mniejszym wzmacnianiu mocniejszych śladów feromonowych niż śladów słabszych.

Obecnie algorytmy mrówkowe oprócz wyznaczania najkrótszej drogi pomiędzy miastami w problemie komiwojażera znalazły wiele innych zastosowań, między innymi do znajdowania rozwiązań w:

- problemie marszrutyzacji pojazdów – VRP (ang. *vehicle routing problem*);
- kwadratowym zadaniu przydziału – QAP (ang. *quadratic assignment problem*);
- problemie routingu w sieciach telekomunikacyjnych [1, 2, 4, 5].

2. PLANOWANIE TRASY PRZEJŚCIA STATKU

Planowanie trajektorii statku pomiędzy portami można zdefiniować w postaci grafu (W, K) co przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Prezentacja problemu w postaci grafu o wierzchołkach W i krawędziach K

Fig. 2. Problem representation in a form of a graph with nodes W and edges K

Wierzchołki W tego grafu znajdują się w dozwolonych punktach zwrotu statku (ang. *waypoint*). Natomiast połączenia pomiędzy wierzchołkami, dla których nie zostaną przekroczone ograniczenia, stanowią krawędzie K . W zastosowanym algorytmie mrówkowym na początku każda mrówka umieszczana jest w punkcie początkowym o współrzędnych x_0, y_0 . Następnie przemieszcza się po kolejno wybieranych wierzchołkach, aż osiągnie punkt końcowy o współrzędnych x_k, y_k .

Prawdopodobieństwo wyboru przez mrówkę kolejnego węzła wyrażone jest zależnością:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} \quad (1)$$

w której:

- $\tau_{ij}(t)$ jest ilością wirtualnego śladu feromonowego na krawędzi łączącej wierzchołek 'i' z wierzchołkiem 'j';
- η_{ij} jest informacją heurystyczną, zwaną widocznością;
- α i β określają wpływ śladu feromonowego i informacji heurystycznej na zachowanie mrówki;
- N_i^k stanowi zbiór wierzchołków, których mrówka k jeszcze nie odwiedziła, znajdując się na wierzchołku 'i'.

Ślad feromonowy odzwierciedla doświadczenie zdobyte przez mrówkę podczas rozwiązywania problemu. Natomiast jako widoczność przyjęta została odwrotność długości krawędzi pomiędzy węzłami 'i' i 'j'.

Po ukończeniu trasy przez wszystkie mrówki następuje aktualizacja śladu feromonowego według wzoru:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad (2)$$

w którym ρ jest współczynnikiem odpowiadającym za tempo ulatniania feromonu. Wartość wzmocnienia śladu feromonowego $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ na krawędziach należących do trasy przebytej przez mrówkę zależy od długości danej krawędzi.

Statyczne ograniczenia nawigacyjne modelowane są w postaci wielokątów. Wokół zamodelowanego obszaru lądu proponuje się stworzenie pewnego zapasu – odległości bezpiecznej w celu wyeliminowania możliwości nadmiernego zbliżenia się statku do ograniczenia.

Przykład zastosowania dodatkowego zapasu bezpieczeństwa przy modelowaniu ograniczenia statycznego przedstawiono na rysunku 3. Obrazuje on zamodelowaną mapę Australii wraz ze strefą bezpieczeństwa wynoszącą 45 mil morskich.



Rys. 3. Zamodelowana mapa Australii wraz z dodatkową strefą bezpieczeństwa wynoszącą 45 mil morskich

Fig. 3. Modeled map of Australia with additional safety zone of 45 nautical miles

Trasę przejścia statku z portu wyjścia do portu docelowego określają współrzędne geograficzne (x_i – szerokość geograficzna, y_i – długość geograficzna) kolejnych punktów zwrotu oraz w postaci kursu statku na danym odcinku drogi.

W tabeli 1 przedstawione zostały poszczególne punkty zwrotu wyznaczonej trasy, tabela 2 zaś zawiera opis wyznaczonej trasy w postaci kursu statku na danym odcinku oraz odległości danego odcinka drogi [2, 4, 6, 10].

Rysunek 4 prezentuje wyznaczoną trasę przejścia statku.

Tabela 1. Zestawienie wyznaczonych punktów zwrotu trasy przejścia statku [1]

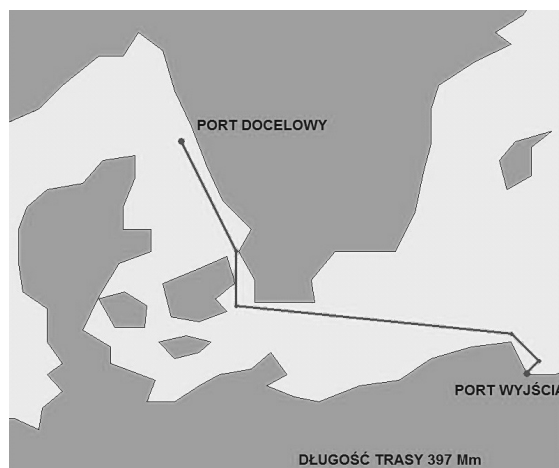
Table 1. Geographic coordinates of waypoints for the determined ship's route of passage [1]

Punkt drogi	Szerokość geograficzna x_i [°N]	Długość geograficzna y_i [°E]
1	54.3520	18.6605
2	54.5391	18.9187
3	54.9532	18.3354
4	55.3581	12.6081
5	56.1884	12.6081
6	57.7808	11.4607

Tabela 2. Zestawienie kursu statku oraz długości odcinków wyznaczonej trasy przejścia [2]

Table 2. Course of the ship and distances between waypoints for the determined ship's route of passage [2]

Odcinek drogi	Kurs statku [°]	Gługość odcinka [Mm]
1-2	38	14
2-3	320	32
3-4	277	198
4-5	0	50
5-6	338	103



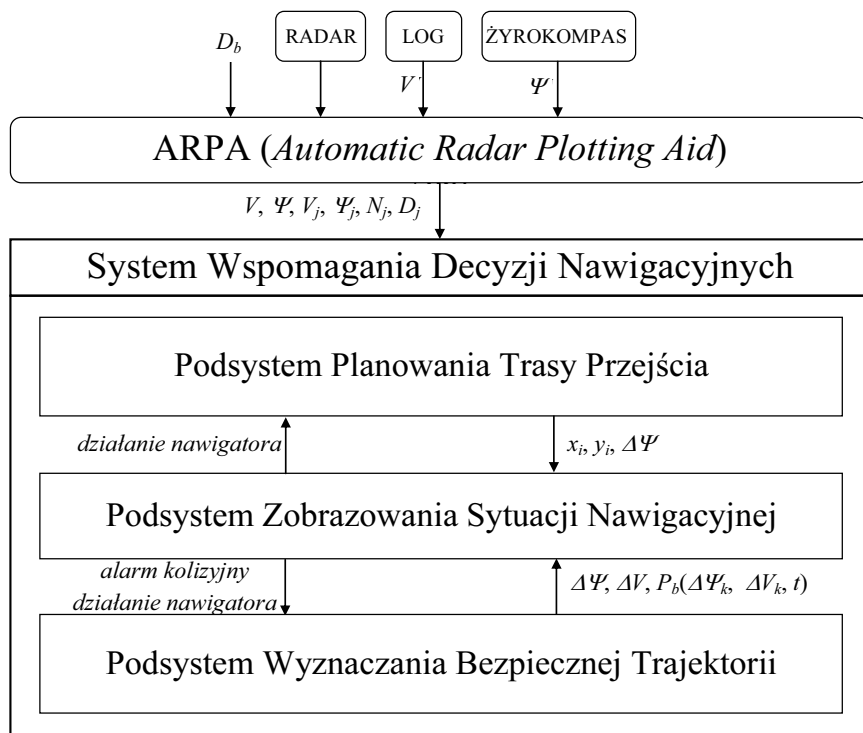
Rys. 4. Wyznaczona trasa przejścia statku

Fig. 4. Example of a determined ship's route of passage

3. SYSTEM WSPOMAGANIA DECYZJI NAWIGACYJNYCH

Przedstawiony system wyznaczania trasy przejścia statku stanowi jeden z podsystemów proponowanego Systemu Wspomagania Decyzji Nawigacyjnych.

Schemat blokowy systemu pokazano na rysunku 5. Pozostałymi elementami tego systemu są Podsystem Zobrazowania Sytuacji Nawigacyjnej oraz Podsystem Wyznaczania Bezpiecznej Trajektorii. Pierwszy z wymienionych systemów służy do prezentowania aktualnej sytuacji nawigacyjnej w sposób czytelny dla nawigatora prowadzącego statek.



Rys. 5. Schemat blokowy systemu wspomagania decyzji nawigacyjnych;

D_b – odległość bezpieczna mijania się statków, Ψ – kurs statku własnego,
 V – prędkość statku własnego, Ψ_j – kurs spotkanego obiektu, V_j – prędkość spotkanego
 obiektu, N_j – namiar na obiekt, D_j – odległość obiektu od statku własnego,
 x_i, y_i – współrzędne geograficzne punktu zwrotu, $\Delta\Psi$ – zmiana kursu,
 ΔV – zmiana prędkości, $P_b(\Delta\Psi_k, \Delta V_k, t)$ – bezpieczna trajektoria statku

Fig. 5. Block diagram of navigational decision support system;

D_b – safe distance of ships passing, Ψ – course of own ship, V – speed of own ship,
 Ψ_j – course of the met object, V_j – speed of the met object, N_j – bearing on the met object,
 D_j – distance of the met object from own ship, x_i, y_i – geographic coordinates of the waypoint,
 $\Delta\Psi$ – course alteration, ΔV – speed alteration, $P_b(\Delta\Psi_k, \Delta V_k, t)$ – safe trajectory of the ship

Danymi wejściowymi tego podsystemu są informacje pochodzące z urządzenia do automatycznego prowadzenia nakresów radarowych ARPA. Zadaniem Podsystemu Wyznaczania Bezpiecznej Trajektorii jest wyznaczanie lokalnej trasy przejścia statku przy uwzględnieniu zarówno statycznych, jak i dynamicznych ograniczeń nawigacyjnych w postaci spotkanych statków. System ten określa trajektorię statku w postaci zmian kursu i/lub prędkości w momencie wystąpienia zagrożenia kolizyjnego. Sytuacja taka występuje wtedy, gdy zostanie aktywowany alarm kolizyjny przez urządzenie ARPA (ang. *dangerous target alarm*). Do wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku w sytuacji kolizyjnej proponuje się zastosowanie metody programowania dynamicznego przedstawionej przez Lisowskiego [7]. Metoda ta uwzględnia Międzynarodowe Przepisy o Zapobieganiu Zderzeniom na Morzu COLREGS (ang. *International Regulations for Preventing Collisions at Sea*) oraz właściwości dynamiczne statku własnego [8, 9].

PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że zastosowana metoda, wykorzystująca algorytmy mrówkowe, umożliwia wyznaczanie tzw. globalnej trasy przejścia z portu wyjścia do portu docelowego. Stanowi ona innowacyjne podejście do rozwiązywania rozpatrywanego problemu. Proponowany System Wspomagania Decyzji Nawigacyjnych będzie dużą pomocą w prowadzeniu nawigacji. Dzięki jego zastosowaniu poziom bezpieczeństwa na morzach wzrośnie. Jednocześnie zmniejszą się koszty eksploatacyjne statków, na których będzie wykorzystywany.

LITERATURA

1. Blum C., *Ant colony optimization: Introduction and recent trends*, Physics of Life Reviews, 2005, No. 2(4), s. 353–373.
2. Blum C., Dorigo M., *Ant colony optimization theory: A survey*, Theoretical Computer Science, 2005, No. 344, s. 243–278.
3. *Documents for Operators and Engineers: Operating Instructions RADARPILOT 1100, CHARTRADAR 1100, MULTIPLOT 1100, CONNINGPILOT 1100*, SAM Electronics 2005.
4. Dorigo M., Di Caro G., Gambardella L.M., *Ant Algorithms for Discrete Optimization*, Artificial Life, 1999, No. 5(2), s. 137–172.
5. Grzymkowski R., Kaczmarek K., Kiełtyka S., Nowak I., *Wybrane algorytmy optymalizacji. Algorytmy genetyczne. Algorytmy mrówkowe*, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2008.
6. Jurdziński M., *Podstawy nawigacji morskiej*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2003.
7. Lisowski J., *Computational intelligence methods in the safe ship control process*, Polish Maritime Research, Vol. 8, 2001, nr 1, s. 18–24.

8. Lisowski J., Pachciarek A., *Transmisja danych nawigacyjnych w układzie komputerowego wspomagania decyzji nawigatora w sytuacji kolizyjnej*, Przegląd Telekomunikacyjny, 2009, nr 1, s. 33–35.
 9. Pachciarek A., *Projekt układu wspomagania decyzji nawigatora z zastosowaniem algorytmów wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku*, praca magisterska, Akademia Morska w Gdyni, 2008.
 10. Wiśniewski B., *Programowanie tras statków na oceanach*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, 2004, nr 2(74), s. 395–406.
- Źródła internetowe:
11. <http://www.sam-electronics.de/>.

ANT ALGORITHMS FOR SHIP ROUTE PLANNING

Summary

The paper presents results of research concerning application of artificial intelligence method in marine navigation. Ant algorithms are proposed to determine safe optimal route of passage between harbours. The idea constitutes an innovative approach to the problem of determining safe optimal trajectory of own ship. Static navigational constraints such as lands, canals, shallows, fairways are considered in this process. Presented path planning system constitutes an element of Navigational Decision Support System. The purpose of the system is to increase safety of navigation with the minimization of operating costs.

Keywords: path planning, decision support, ant algorithm, artificial intelligence.