

Nr 98/2017, 116–121  
ISSN 1644-1818  
e-ISSN 2451-2486

## ZASTOSOWANIE GRAFU WIDOCZNOŚCI W PLANOWANIU TRASY PRZEJŚCIA STATKU

### APPLICATION OF A VISIBILITY GRAPH IN SHIP'S PATH PLANNING

**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

W artykule przedstawiono propozycję rozwiązania problemu wyznaczania trasy przejścia statku przy zastosowaniu jednej z metod teorii grafów. Celem pracy była ocena możliwości zastosowania wybranej metody teorii grafów w planowaniu globalnej trasy przejścia statku, uwzględniającej statyczne ograniczenia nawigacyjne (łądy, mielizny). Środowisko nawigacyjne zostało zamodelowane w postaci grafu widoczności przy zastosowaniu algorytmu obrotowego zamiatania płaszczyzny. Najkrótsza trasa przejścia statku wyznaczono następnie za pomocą algorytmu Dijkstry.

**Słowa kluczowe:** algorytm Dijkstry, graf widoczności, planowanie trasy przejścia, teoria grafów, unikanie kolizji.

**Abstract:** The article presents a proposal for solving the problem of determining a ship's safe path using one of the graph theory methods. The aim of the study was to evaluate the possibility of the selected graph theory method application in planning a ship's global route, taking into account the static navigational restrictions (lands, shallows). The navigational environment was modelled as a visibility graph using a rotational plane sweep algorithm. The shortest ship's path is then determined using a Dijkstra's algorithm.

**Keywords:** Dijkstra's algorithm, visibility graph, ship's path planning, graph theory, collision avoidance.

## 1. WSTĘP

Unikanie kolizji jest aktualnym problemem występującym w wielu dziedzinach, m.in. w robotyce oraz transporcie lądowym, powietrznym i morskim. W transporcie morskim w procesie nawigacji statku występuje problem unikania kolizji z przeszkodami statycznymi (łądy, mielizny) oraz dynamicznymi (spotkane statki).

W celu rozwiązania tego problemu opracowywane są różne algorytmy wyznaczania bezpiecznej trasy przejścia statku. Problem ten można podzielić na dwa zagadnienia: wyznaczanie globalnej i lokalnej trasy przejścia statku. W zadaniu wyznaczania globalnej trasy przejścia uwzględniane są statyczne ograniczenia nawigacyjne. Wyznaczanie lokalnej trasy przejścia polega na obliczeniu bezpiecznej trajektorii pomiędzy aktualnym położeniem statku a kolejnym punktem zwrotu przy uwzględnieniu występujących w środowisku ograniczeń statycznych oraz dynamicznych. Zadanie wyznaczania globalnej trasy przejścia jest często określane jako tryb *off-line* ze względu na to, że realizowane jest przed rozpoczęciem procesu sterowania statkiem po zadanej trajektorii i uwzględnia tylko znane przeszkody występujące w środowisku. Natomiast zadanie wyznaczania lokalnej trasy przejścia definiowane jest jako praca w trybie *on-line* ze względu na to, że polega na modyfikacji zadanej globalnej trasy przejścia w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego na podstawie informacji o przeszkodach statycznych i dynamicznych znajdujących się w najbliższym otoczeniu statku [Kuczkowski i Śmierchalski 2013].

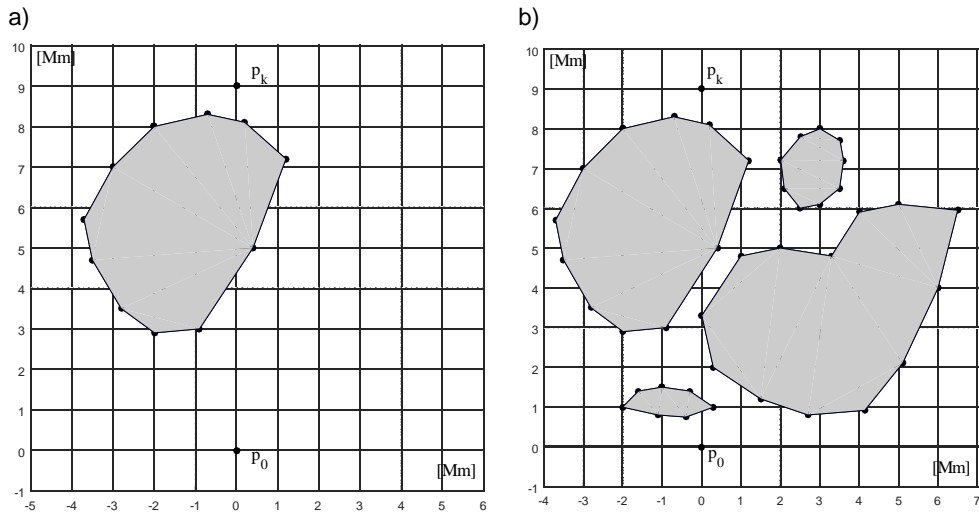
Celem tej pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania wybranej metody teorii grafów w planowaniu globalnej trasy przejścia statku.

## 2. REPREZENTACJA ŚRODOWISKA

Wyznaczanie globalnej trasy przejścia statku może zostać zdefiniowane jako problem obliczania ścieżki przejścia pomiędzy określonym położeniem początkowym statku  $p_0$  a określonym położeniem końcowym  $p_k$ , która nie przekracza żadnego ze statycznych ograniczeń nawigacyjnych (łądy, mielizny), znajdujących się w otoczeniu (rys. 1) i minimalizuje funkcję celu, zdefiniowaną jako długość trasy. Statyczne ograniczenia nawigacyjne są modelowane w postaci wielokątów wklęsłych oraz wypukłych. Optymalną globalną trasę przejścia statku można zatem zdefiniować za pomocą równania (1).

$$Trasa_{opt} = \{p_0 = [x_0, y_0, \psi_0], p_1 = [x_1, y_1, \psi_1], \dots, p_k = [x_k, y_k, \psi_k]\} \quad (1)$$

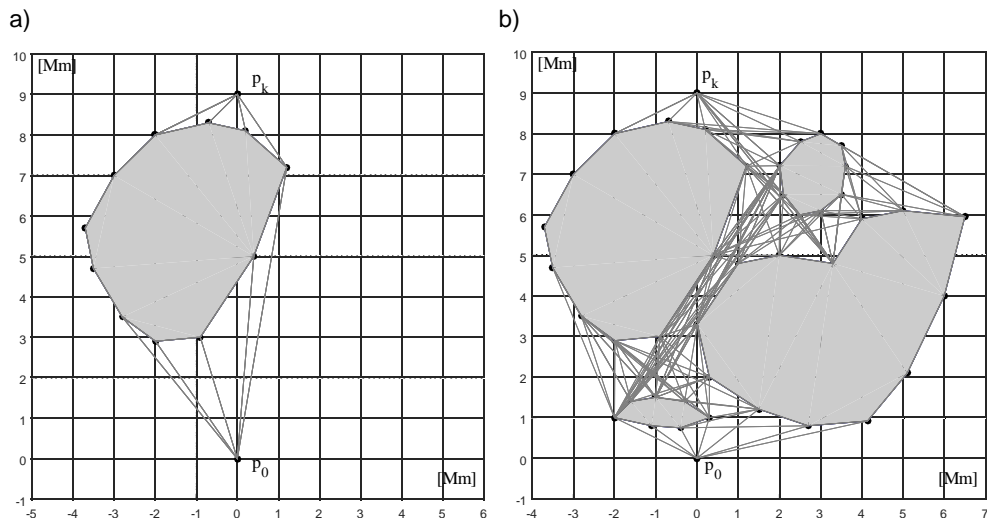
Pierwszym etapem opracowywania metody wyznaczania bezpiecznej trasy przejścia statku jest zdefiniowanie sposobu modelowania środowiska nawigacyjnego. Do metod opisu środowiska należą m.in. metoda diagramu Woronoja (ang. *Voronoi diagram*), grafu widoczności (ang. *visibility graph*), dekompozycji komórkowej (ang. *cell decomposition*).



**Rys. 1.** Graficzne przedstawienie problemu planowania trasy przejścia statku  
**Fig. 1.** Graphical presentation of the ship's safe path planning problem

W tej pracy zastosowano metodę grafu widoczności. Graf widoczności jest to graf złożony z pewnej liczby wierzchołków oraz krawędzi łączących wierzchołki „widzące się wzajemnie”. Wierzchołki „widzą się wzajemnie”, jeśli krawędź łącząca te wierzchołki nie przekracza żadnej z przeszkód znajdujących się w środowisku. Wierzchołkami grafu widoczności są wierzchołki wielokątów reprezentujących przeszkody występujące w środowisku oraz punkt początkowy i punkt końcowy poszukiwanej trasy przejścia statku. Krawędziami grafu widoczności są także odcinki, stanowiące boki poszczególnych wielokątów (przeszkód). Definiowanie grafu widoczności polega na sprawdzeniu dla każdej pary wierzchołków, czy łączący je odcinek nie przekracza żadnego z ograniczeń.

W celu skrócenia czasu obliczeń w procesie wyznaczania grafu widoczności dla danego środowiska nawigacyjnego stosuje się algorytm obrotowego zamiatania płaszczyzny (ang. *rotational plane sweep algorithm*) [Berg i in. 2008]. Metoda ta jest podobna do algorytmu zamiatania płaszczyzny (ang. *plane sweep algorithm*), stosowanego do wyznaczania par przecinających się odcinków, w którym przesuwana jest po płaszczyźnie od góry do dołu pozioma prosta. W algorytmie obrotowego zamiatania płaszczyzny, zamiast poziomej prostej, obracana jest na płaszczyźnie półprosta wokół wierzchołka  $p$ , dla którego sprawdza się widoczność innych wierzchołków grafu. Metoda ta polega na sprawdzaniu wierzchołków posortowanych według kolejności występowania kątów, jakie tworzą odcinki pomiędzy poszczególnymi wierzchołkami i wierzchołkiem  $p$  a dodatnią półosią osi odciętych. Graf widoczności otrzymany przy zastosowaniu algorytmu obrotowego zamiatania płaszczyzny dla dwóch przykładowych sytuacji nawigacyjnych został przedstawiony na rysunku 2.



**Rys. 2.** Reprezentacja środowiska nawigacyjnego w postaci grafu widoczności  
**Fig. 2.** Representation of the navigational environment in the form of a visibility graph

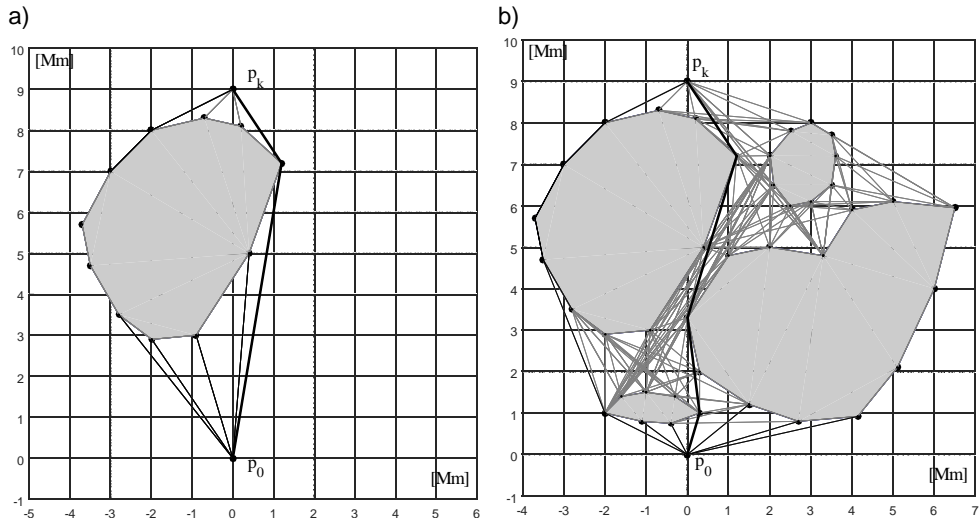
### 3. ALGORYM WYZNACZANIA TRASY PRZEJŚCIA

Wyznaczanie bezpiecznej trasy przejścia statku polega na zastosowaniu jednej z metod teorii grafów, stosowanej do wyznaczania najkrótszej ścieżki w grafie. Do takich metod należą algorytm Bellmana-Forda, Dijkstry, Floyda-Warshalla, A\* [Cormen i in. 2001]. W artykule zastosowano algorytm Dijkstry, który w każdym kroku działania minimalizuje funkcję  $g(n)$  zdefiniowaną jako droga pomiędzy aktualnie rozpatrywanym wierzchołkiem  $n$  a wierzchołkiem początkowym [Wojciechowski i Pieńkosz 2013]. Dla porównania, w każdym kroku działania algorytmu A\* realizowana jest minimalizacja funkcji  $f(n)$ , stanowiącej sumę funkcji  $g(n)$  oraz  $h(n)$ , gdzie funkcja  $h(n)$  jest funkcją heurystyczną, oszacowującą drogę od aktualnie rozpatrywanego wierzchołka  $n$  do wierzchołka docelowego.

W przedstawionym tutaj rozwiązaniu w wyniku obliczeń grafu widoczności otrzymywany jest nieskierowany graf ważony, w którym wagą krawędzi jest odległość pomiędzy łączącymi ją wierzchołkami. W algorytmie Dijkstry stosowana jest metoda relaksacji krawędzi. Dla danej krawędzi  $(x, y)$  metoda ta polega na sprawdzeniu, czy przechodząc przez wierzchołek  $x$  do wierzchołka  $y$ , zyska się krótszą drogę do wierzchołka  $y$  od dotychczas otrzymanej najkrótszej drogi. W wyniku działania otrzymuje się drogę ważoną, która jest sumą wag krawędzi ją stanowiących.

Wyznaczone przez algorytm trasy przejścia statku dla dwóch przykładowych sytuacji nawigacyjnych zostały pokazane na rysunku 3. Dla sytuacji, przedsta-

wionej na rysunku 3a, czas obliczeń wyniósł 0,0785 s, a wyznaczona trasa przejścia o długości 9,0496 Mm składała się z trzech wierzchołków (punktów zwrotu statku). Natomiast dla sytuacji, pokazanej na rysunku 3b, została wyznaczona trasa przejścia o długości 9,603 Mm, składająca się z pięciu punktów zwrotu, w czasie 0,2955 s.



**Rys. 3.** Trasa przejścia statku wyznaczona przez algorytm Dijkstry  
**Fig. 3.** The ship's safe path determined by a Dijkstra's algorithm

W tabeli 1 zostały zestawione wyniki obliczeń dla kilku przykładowych sytuacji nawigacyjnych, przy występowaniu od 1 do 4 statycznych ograniczeń w otoczeniu. Obliczenia zostały wykonane na komputerze PC z procesorem *Intel Core i5 M450* 2,27 GHz, 2GB RAM, z 32-bitowym systemem *Windows 7 Professional*.

**Tabela 1.** Przykładowe wyniki obliczeń otrzymane z zastosowaniem proponowanej metody  
**Table 1.** The exemplary results of calculations with the use of the proposed method

Liczba ograniczeń statycznych	Liczba wierzchołków ograniczeń	Czas obliczeń [s]	Długość trasy [Mm]	Liczba odcinków trasy
1	7	0,0618	9,0496	2
1	11	0,0785	9,4626	2
2	24	0,1367	9,5408	3
3	33	0,1965	9,5408	3
4	40	0,2955	9,603	4

## 4. PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano metodę wyznaczania bezpiecznej trasy przejścia statku, opartą na zastosowaniu teorii grafów. Za pomocą przedstawionego podejścia może zostać wyznaczona globalna trasa przejścia statku, uwzględniająca statyczne ograniczenia nawigacyjne. Wyniki obliczeń otrzymane dla przykładowej sytuacji nawigacyjnej dowodzą, że metoda może stanowić skuteczne rozwiązanie rozpatrywanego problemu. Metoda oparta na reprezentacji środowiska za pomocą grafu widoczności charakteryzuje się tym, że wyznaczona trasa przejścia może stykać się z ograniczeniami, przez co jest metodą bardzo dokładną. Jednakże cecha ta może być też traktowana jako ograniczenie stosowalności metody, dlatego w docelowym zastosowaniu praktycznym należałoby uwzględnić dodatkowe strefy bezpieczeństwa wokół przeszkód, wymuszające zachowanie określonej odległości bezpiecznej podczas ruchu statku po wyznaczonej trasie przejścia. Zaletami przedstawionej metody są: krótki czas obliczeń, a także uzyskiwanie powtarzalnego, optymalnego rozwiązania.

W dalszych pracach planowane jest zastosowanie do wyznaczania globalnej trasy przejścia statku innych istniejących metod teorii grafów, takich jak np. algorytm A\*, innych sposobów reprezentacji środowiska (diagram Woronoja, dekompozycja komórkowa) oraz porównanie otrzymanych wyników. Ponadto dalsze badania mogą dotyczyć zastosowania metod teorii grafów do wyznaczania lokalnej trasy przejścia statku.

## LITERATURA

- Berg, M., Cheong, O., Kreveld, M., Overmars, M., 2008, *Computational Geometry: Algorithms and Applications*, Springer-Verlag.
- Cormen, T.H., Stein, C., Rivest, R.L., Leiserson, C.E., 2001, *Introduction to Algorithms*, McGraw-Hill Higher Education.
- Kuczkowski, Ł., Śmierzchalski, R., 2013, *Zastosowanie wielopopulacyjnego algorytmu ewolucyjnego do problemu wyznaczania ścieżki przejścia*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 36.
- Wojciechowski, J., Piękosz, K., 2013, *Grafy i sieci*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.