

PORÓWNANIE BEZPIECZNYCH TRAJEKTORII STATKU Z UWZGLĘDNIENIEM WARUNKÓW STEROWANIA OPTYMALNEGO I ROZGRYWAJĄCEGO

COMPARISON OF SHIP SAFE TRAJECTORY INCLUDING THE TERMS OF OPTIMAL AND GAME CONTROL

Józef Lisowski

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

Streszczenie: W artykule opisano sześć spośród dziewięciu przedstawionych metod wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku w sytuacji mijania się na morzu ze spotkanymi statkami. Badaniom symulacyjnym, na przykładzie nawigacyjnej sytuacji mijania się z 18 spotkanymi statkami, poddano algorytmy: wieloetapowej gry pozycyjnej niekooperacyjnej i kooperacyjnej, wielokrokowej gry macierzowej niekooperacyjnej i kooperacyjnej, programowania dynamicznego z neuronowymi ograniczeniami stanu oraz programowania liniowego. Dla każdego z algorytmów porównano bezpieczne trajektorie statku w warunkach dobrej i ograniczonej widzialności na morzu.

Słowa kluczowe: transport morski, elektroautomatyka okrętowa, sterowanie optymalne, sterowanie rozgrywające.

Abstract: The paper describes six of the nine kinds of methods for determining safe trajectory of the ship passing the encountered ships at sea. Simulation research on the example of the navigation situation, the passing of 18 ships have encountered, were algorithms: multi-stage positional game non-cooperative and cooperative, multi-step matrix game non-cooperative and cooperative, dynamic programming with neural state constraints and linear programming. For each of the algorithms compared safe ship trajectories in conditions of good and restricted visibility at sea.

Keywords: maritime transport, ship electro-automation, optimal control, game control.

1. WSTĘP

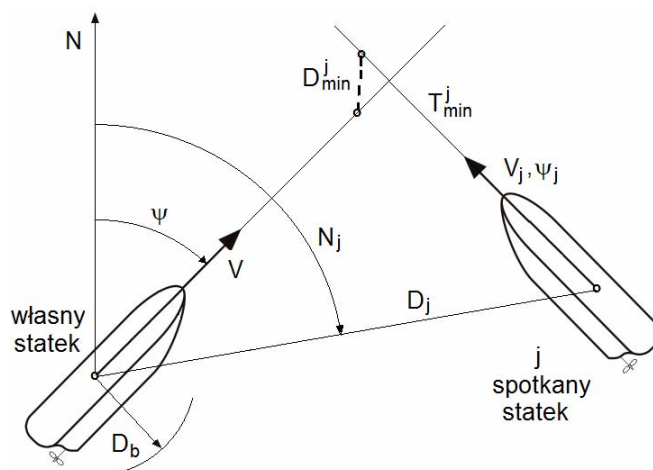
Do istotnych zadań nawigacji morskiej należy bezpieczne sterowanie statkiem w sytuacjach mijania się ze spotkanymi innymi statkami na morzu. Sformułowanie zadania uniknięcia kolizji wydaje się całkiem oczywiste, ale oprócz niepewności informacji, jaka wynikać może zarówno z oddziaływania zakłóceń, jak i niepre-

czyjnego charakteru reguł Międzynarodowego Prawa Drogi Morskiej (MPDM), istotna jest subiektywność nawigatora w ocenie sytuacji i podejmowanej decyzji manewrowej.

2. PROCES BEZPIECZNEGO STEROWANIA STATKIEM

Ruch własnego statku z prędkością V i kursem ψ względem spotkanego j -tego statku poruszającego się z prędkością V_j i kursem ψ_j tworzy pewną sytuację na morzu. Wielkości charakteryzujące tę sytuację w postaci odległości D_j i namiaru N_j do j obiektu mierzone są za pomocą radarowego systemu antykolizyjnego ARPA (*Automatic Radar Plotting Aids*).

System ARPA umożliwia automatyczne śledzenie do 20 obiektów, wyznaczanie ich prędkości i kursu oraz elementów zbliżenia w postaci najmniejszej odległości zbliżenia $D_{\min}^j = \text{DCPA}_j$ (ang. *Distance of the Closest Point of Approach*) i czasu pozostającego do jej osiągnięcia $T_{\min}^j = \text{TCPA}_j$ (ang. *Time to the Closest Point of Approach*) (rys. 1).



Rys. 1. Sytuacja nawigacyjna mijania się własnego statku z j spotkanym statkiem

Fig. 1. Navigational situation of the own ship passing j met ship

Zadaniem układu sterowania jest uniknięcie kolizji, które polega na sterowaniu własnym statkiem w taki sposób, aby najmniejsza odległość zbliżenia D_{\min}^j stała się większa od ustalonej w danych warunkach nawigacyjnych bezpiecznej odległości mijania D_b . Osiąga się to najpierw poprzez wybór bezpiecznego

manewru kursem $\Delta\psi$ lub/i prędkością ΔV bądź bezpiecznej trajektorii statku $T(\Delta\psi, \Delta V)$ jako sekwencji kolejnych zmian kursu i prędkości według wcześniej przyjętego algorytmu komputerowego wspomaganie sterowania.

3. METODY WYZNACZANIA BEZPIECZNEJ TRAJEKTORII STATKU

Podstawowym modelem procesu mijania się statku z j spotkanymi statkami jest model gry różniczkowej j obiektów sterowania. Uwzględniając dużą złożoność takiego modelu, do praktycznej syntezy metod sterowania formułuje się modele uproszczone, z jednoczesnym zastosowaniem sztucznej inteligencji [Engwerda 2006; Millington i Funge 2009].

Poszczególnym modelom procesu można przyporządkować odpowiednie metody wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku w sytuacji kolizyjnej (tab. 1).

Tabela 1. Metody wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku w sytuacji kolizyjnej

Table 1. Methods of determining the safe ship trajectory in collision situation

Model procesu	Metoda optymalizacji	Algorytm	Trajektoria
Wieloetapowa gra pozycyjna niekooperacyjna	Programowanie liniowe potrójne	wgpnk	T1
Wieloetapowa gra pozycyjna kooperacyjna	Programowanie liniowe potrójne	wgpk	T2
Wielokrokowa gra macierzowa niekooperacyjna	Programowanie liniowe dualne	wgmnk	T3
Wielokrokowa gra macierzowa kooperacyjna	Programowanie liniowe dualne	wgmk	T4
Optymalizacja dynamiczna z neuronowymi ograniczeniami stanu	Programowanie dynamiczne Sztuczna sieć neuronowa	odn	T5
Optymalizacja dynamiczna z rozmytą funkcją przynależności [Mohamed-Seghir 2014]	Programowanie dynamiczne rozmyte	odr	T6
Optymalizacja statyczna	Programowanie liniowe	os	T7
Optymalizacja stochastyczna [Szląpczyński 2014]	Algorytm ewolucyjny	ose	T8
Optymalizacja stochastyczna [Lazarowska 2015]	Algorytm mrówkowy	osm	T9

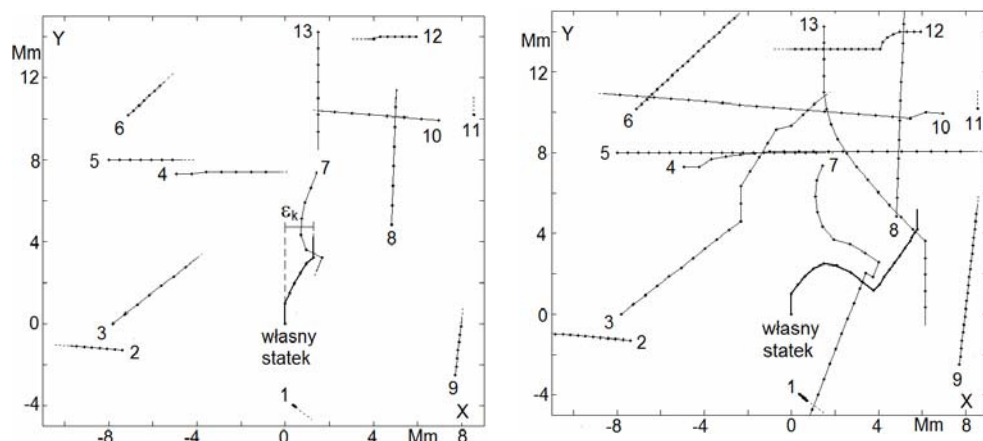
4. SYMULACJA WYBRANYCH ALGORYTMÓW WYZNACZANIA BEZPIECZNEJ TRAJEKTORII STATKU

4.1. Algorytm wgpnk

Optymalne sterowanie własnym statkiem u_0 określa się, wyznaczając zbiory dopuszczalnych strategii spotkanych statków u_j względem własnego statku oraz zbiory dopuszczalnych strategii własnego statku względem każdego ze spotkanych statków u_0^j z warunku:

$$I^* = \min_{u_0} \max_{u_j} \min_{u_0^j} I[x_0] = S_0^* \quad (1)$$

Kryterium optymalnej trajektorii rozgrywającej statku T1 sprowadza się do wyznaczenia jego kursu i prędkości zapewniających najmniejszą odległość S_0 własnego statku do najbliższego punktu zwrotu na zadanej trasie rejsu, podczas mijania statków w odległości D_b . Istotne jest końcowe odchylenie trajektorii ε_k od zadanego kursu własnego statku (rys. 2).



Rys. 2. Bezpieczne trajektorie statku T1 w sytuacji mijania się z $j = 13$ statkami w dobrej widzialności na morzu przy $D_b = 0,5$ Mm, $\varepsilon_k = 1,3$ Mm (z lewej) oraz ograniczonej przy $D_b = 2$ Mm, $\varepsilon_k = 5,8$ Mm (z prawej)

Fig. 2. Safe ship trajectories T1 in situation of passing $j = 13$ met ships in good visibility at sea with $D_b = 0,5$ Nm, $\varepsilon_k = 1,3$ Nm (left) and in restricted visibility with $D_b = 2,0$ Nm, $\varepsilon_k = 5,8$ Nm (right)

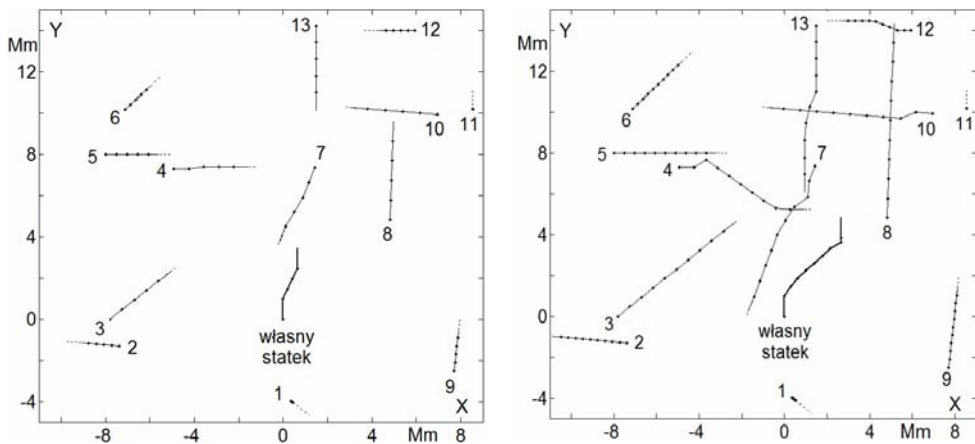
4.2. Algorytm wgpk

Kryterium sterowania (1) dla trajektorii rozgrywającej T2 w grze pozycyjnej kooperacyjnej przyjmie następującą postać (rys. 3):

$$I^* = \min_{u_0} \min_{u_j} \min_{u'_0} I[x_0] = S_0^* \quad (2)$$

4.3. Algorytm wgmnk

W grze macierzowej niekooperacyjnej statek (gracz A) oraz j spotkane statki (gracze B) mają do dyspozycji strategie czyste. Najczęściej gra nie ma punktu siodłowego w zakresie jej rozwiązania dla strategii czystych. Do wyznaczenia trajektorii rozgrywającej T3 można wykorzystać dualne programowanie liniowe. W zagadnieniu dualnym gracz A dąży do minimalizacji ryzyka kolizji, natomiast gracze B dążą do maksymalizacji ryzyka kolizji. Składowe strategie mieszanej wyrażają rozkład prawdopodobieństwa użycia przez graczy ich strategii czystych.



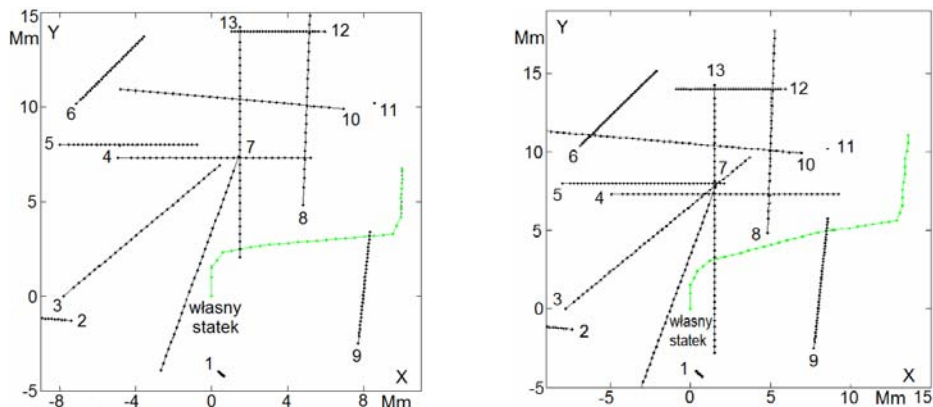
Rys. 3. Bezpieczne trajektorie statku T2 w sytuacji mijania się z $j = 13$ statkami w dobrej widzialności na morzu przy $D_b = 0,5$ Mm, $\epsilon_k = 0,7$ Mm (z lewej) oraz ograniczonej przy $D_b = 2$ Mm, $\epsilon_k = 2,7$ Mm (z prawej)

Fig. 3. Safe ship trajectories T2 in situation of passing $j = 13$ met ships in good visibility at sea with $D_b = 0,5$ Nm, $\epsilon_k = 0,7$ Nm (left) and in restricted visibility with $D_b = 2,0$ Nm, $\epsilon_k = 2,7$ Nm (right)

W rezultacie dla kryterium sterowania uwzględniającego ryzyko kolizji r_j :

$$I^* = \min_{u_0} \max_{u_j} r_j \quad (3)$$

otrzymuje się macierz prawdopodobieństwa użycia strategii czystych (rys. 4).



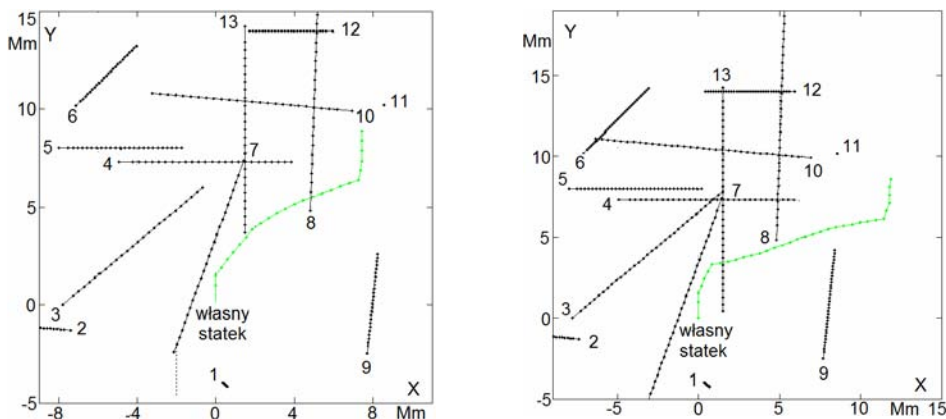
Rys. 4. Bezpieczne trajektorie statku T3 w sytuacji mijania się z $j = 13$ statkami w dobrej widzialności na morzu przy $D_b = 0,5$ Mm, $\epsilon_k = 9,2$ Mm (z lewej) oraz ograniczonej przy $D_b = 2$ Mm, $\epsilon_k = 13,8$ Mm (z prawej)

Fig. 4. Safe ship trajectories T3 in situation of passing $j = 13$ met ships in good visibility at sea with $D_b = 0,5$ Nm, $\epsilon_k = 9,2$ Nm (left) and in restricted visibility with $D_b = 2,0$ Nm, $\epsilon_k = 13,8$ Nm (right)

4.4. Algorytm wgmk

Kryterium sterowania (3) dla trajektorii rozgrywającej statku T4 w grze macierzowej kooperacyjnej przyjmie następującą postać (rys. 5):

$$I^* = \min_{u_0} \min_{u_j} r_j \quad (4)$$



Rys. 5. Bezpieczne trajektorie statku T4 w sytuacji mijania się z $j = 13$ statkami w dobrej widzialności na morzu przy $D_b = 0,5$ Mm, $\epsilon_k = 7,4$ Mm (z lewej) oraz ograniczonej przy $D_b = 2$ Mm, $\epsilon_k = 12,1$ Mm (z prawej)

Fig. 5. Safe ship trajectories T4 in situation of passing $j = 13$ met ships in good visibility at sea with $D_b = 0,5$ Nm, $\epsilon_k = 7,4$ Nm (left) and in restricted visibility with $D_b = 2,0$, $\epsilon_k = 12,1$ Nm (right)

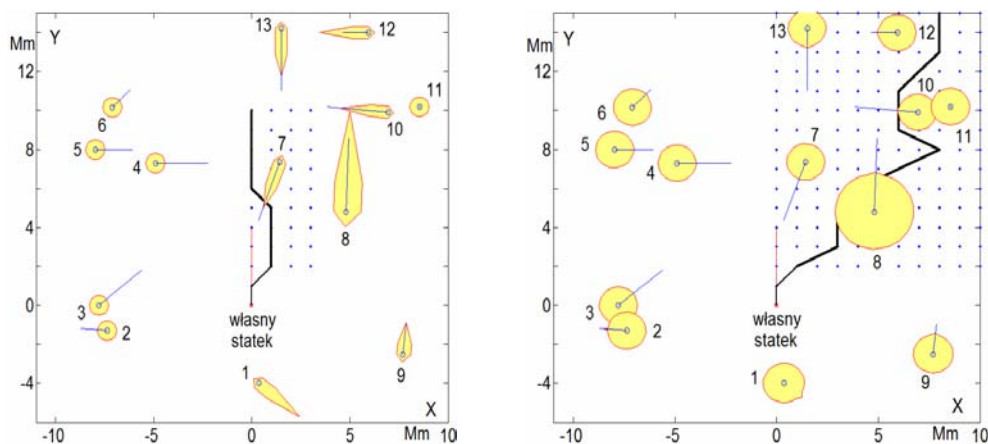
4.5. Algorytm odn

Kryterium bezpiecznej i optymalnej trajektorii nierozgrywającej statku T5 jest spełnienie ograniczenia w postaci ruchomej domeny przyporządkowanej spotkanemu statkowi:

$$g_j(x_j, t) \leq 0 \tag{5}$$

Domena w postaci koła, sześciokąta, elipsy lub paraboli jest generowana przez sztuczną sieć neuronową *Neural Network Toolbox* MATLAB, wcześniej nauczoną przez grupę kapitanów. Stosując programowanie dynamiczne Bellmana, kryterium optymalnego sterowania sprowadza się do zapewnienia najmniejszych strat drogi na bezpieczne wymijanie spotkanych statków, co przy stałej prędkości ruchu sprowadza się do sterowania czasooptymalnego (rys. 6):

$$I^* = \int_0^{t_k} V dt \cong V \int_0^{t_k} dt \rightarrow \min \tag{6}$$



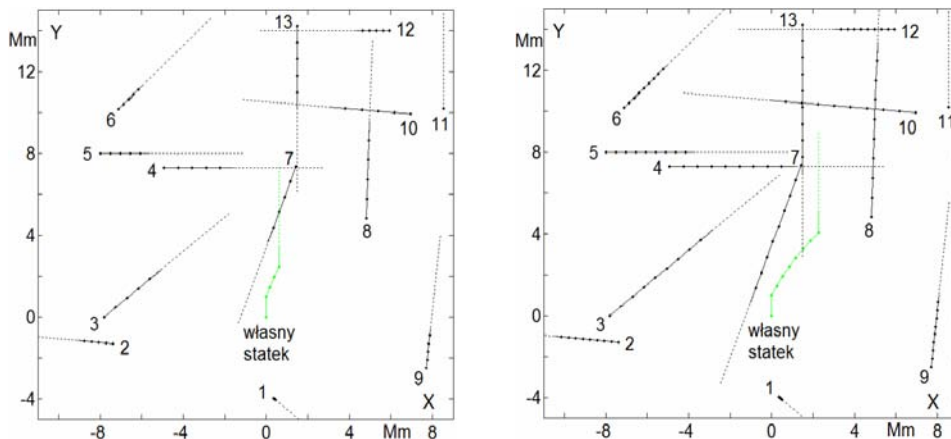
Rys. 6. Bezpieczne trajektorie statku T5 w sytuacji mijania się z $j = 13$ statkami w dobrej widzialności na morzu przy $D_b = 0,5$ Mm, $\varepsilon_k = 0$ Mm (z lewej) oraz ograniczonej przy $D_b = 2$ Mm, $\varepsilon_k = 0$ Mm (z prawej)

Fig. 6. Safe ship trajectories T5 in situation of passing $j = 13$ met ships in good visibility at sea with $D_b = 0,5$ Nm, $\varepsilon_k = 0$ Nm (left) and in restricted visibility with $D_b = 2,0$ Nm, $\varepsilon_k = 0$ Nm (right)

4.6. Algorytm os

Kryterium (1) trajektorii optymalnej nierozgrywającej T7 ma postać (rys. 7):

$$I^* = \min_{u_0} I[x_0] = S_0^* \tag{7}$$



Rys. 7. Bezpieczne trajektorie statku T7 w sytuacji mijania się z $j = 13$ statkami w dobrej widzialności na morzu przy $D_b = 0,5$ Mm, $\varepsilon_k = 0,7$ Mm (z lewej) oraz ograniczonej przy $D_b = 2$ Mm, $\varepsilon_k = 2,3$ Mm (z prawej)

Fig. 7. Safe ship trajectories T7 in situation of passing $j = 13$ met ships in good visibility at sea with $D_b = 0,5$ Nm, $\varepsilon_k = 0,7$ Nm (left) and in restricted visibility with $D_b = 2,0$ Nm, $\varepsilon_k = 2,3$ Nm (right)

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione programy komputerowe mogą być zastosowane w systemie komputerowego wspomaganie nawigatora przy podejmowaniu decyzji manewrowej w sytuacjach kolizyjnych. Programy rozgrywające **wgpnk**, **wgpk**, **wgmnk** i **wgnk** uwzględniają ewentualne manewry spotkanych statków w warunkach kooperacji lub braku kooperacji z naszym statkiem. Program **odn** uwzględnia subiektywność kapitana własnego statku w podejmowaniu decyzji manewrowej na podstawie wcześniej nauczonego przez kilkuset kapitanów na kursach ARPA modelu sztucznej sieci neuronowej. Program **os** stanowi najprostszy i najszybszy algorytm wyznaczenia bezpiecznej trajektorii własnego statku w stosunku do większej liczby spotkanych statków.

LITERATURA

- Engwerda, J.C., 2005, *LQ Dynamic Optimization and Differential Games*, John Wiley & Sons, West Sussex.
- Lazarowska, A., 2015, *Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation*, Journal of Navigation, vol. 68, no. 2, s. 291–307.
- Millington, I., Funge, J., 2009, *Artificial Intelligence for Games*, Elsevier, Amsterdam-Tokyo.

- Mohamed-Seghir, M., 2014, *The Branch-and-bound Method, Genetic Algorithm, and Dynamic Programming to Determinate a Safe Trajectory in Fuzzy Environment*, 18th International Conference in Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems KES 2014, Gdynia, no. 35, s. 348–357.
- Szłapczyński, R., 2014, *Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories With Speed Reduction Manoeuvres within Traffic Separation Schemes*, Polish Maritime Research, vol. 21, no. 1(81), s. 20–27.