

WIELOKRYTERIALNA OPTIMALIZACJA WIELOKROKOWEJ GRY MACIERZOWEJ STATKÓW

MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF A MULTISTEP SHIPS MATRIX GAME

Józef LISOWSKI

j.lisowski@we.umg.edu.pl

Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Elektryczny
Katedra Automatyki Okrętowej

STRESZCZENIE

W artykule sformułowano model matematyczny gry macierzowej procesu bezpiecznego sterowania statkiem zawierający: zmienne stanu i sterowanie, definicję ryzyka kolizji oraz postać macierzy ryzyka kolizji. Przedstawiono wielokryterialną optymalizację gry macierzowej prowadzącą do algorytmów sterowania rozgrywającego niekooperacyjnego i kooperacyjnego oraz sterowania nierozgrywającego. Porównano na drodze badań symulacyjnych, bezpieczne trajektorie własnego statku dla różnych rodzajów sterowania, na przykładzie rzeczywistej sytuacji na morzu.

SUMMARY

The article formulates a mathematical model of the matrix game of the safe ship control process containing: state variables and control, collision risk definition and the form of a collision risk matrix. Multicriteria optimization of the matrix game was introduced, leading to non-cooperative and cooperative game control algorithms and non-game control. Simulation safe trajectories of own ship for various types of control were compared on the example of the real situation at sea.

Słowa kluczowe: transport, logistyka, optymalizacja, automatyka okrętowa

Keywords: transport, logistics, optimization, ships control engineering

WSTĘP

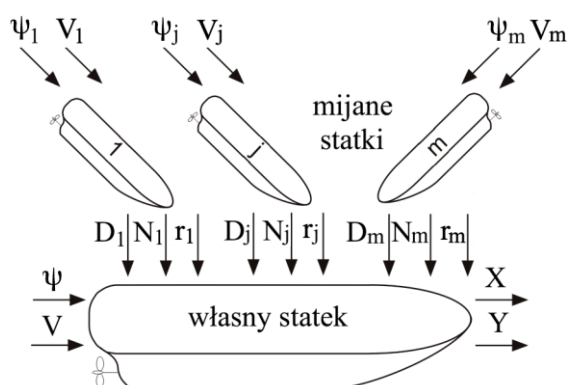
Bezpieczne prowadzenie statku handlowego w sytuacjach mijania się z większą liczbą spotkanych statków polega na zachowaniu najmniejszego ryzyka kolizji z każdym z nich. Źródłem informacji o bieżącym stanie procesu sterowania ruchem statku i ocenie ryzyka kolizji jest pokładowy radarowy system antykolizyjny ARPA, który umożliwia prowadzącemu statek poprzez funkcję *TRIAL MANOEUVRE* wyznaczenie manewru antykolizyjnego w stosunku do najbardziej niebezpiecznego statku, z uwzględnieniem reguł prawa drogi morskiej MPDM. Reguły MPDM dotyczą tylko dwóch spotkanych statków, oddzielnie dla warunków dobrej i ograniczonej widzialności na morzu.

Ponad 80% kolizji statków spowodowanych jest przez *czynnik ludzki (human factor)*, podczas subiektywnej oceny sytuacji nawigacyjnej i podejmowania decyzji manewrowej w środowisku rozgrywającym (Engwerda, 2005), (Kun, 2001), (Millington i Funge, 2009). Zakłada się, że około połowę tych strat można uniknąć stosując programy komputerowego wspomagania decyzji manewrowej nawigatora, wykorzystujące metody sztucznej inteligencji, teorii gier i optymalizacji (Bist, 2000), (Isaacs, 1965), (Miloh, 1974), (Perez, 2005).

Celem artykułu jest przedstawienie algorytmu wielokrokowej gry macierzowej, zawierającej ryzyko kolizji statków, wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku w ujęciu wielokryterialnej optymalizacji, umożliwiającej uwzględnienie stopnia kooperacji statków w uniknięciu kolizji (Kouemou, 2009), (Lisowski, 2017), (Olsder i Walter, 1977).

1. MODEL MATEMATYCZNY GRY MACIERZOWEJ

Na rysunku 1 przedstawiono schemat gry macierzowej procesu sterowania własnym statkiem w sytuacji mijania się ze spotkanymi statkami na morzu.



Rys. 1. Gra macierzowa statków
Źródło: Opracowanie własne.

1.1. Zmienne stanu i sterowania

Zmienne stanu procesu reprezentowane są przez odległość między statkami D_j , namiar N_j i ryzyko kolizji r_j oraz współrzędne pozycji własnego statku (X, Y) na zadanej trajektorii ruchu. Wielkościami sterującymi własnego statku są: kurs ψ i prędkość V , zaś wielkościami sterującymi spotkanego j -tego statku są: jego kurs ψ_j i prędkość V_j .

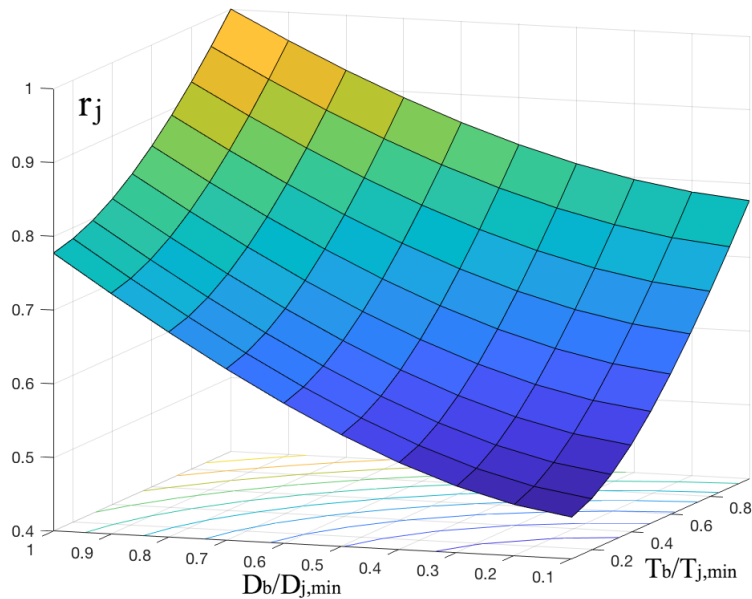
1.2. Ryzyko kolizji

Formułuje się ryzyko kolizji r_j własnego statku z j -tym spotkanym statkiem, jako średniokwadratową miarę odniesienia sytuacji bezpiecznej określonej przez wartość założonej bezpiecznej odległości D_b i czasu bezpiecznego zbliżenia T_b do aktualnej sytuacji

zbliżenia statków określonej przez najmniejszą spodziewaną odległość zbliżenia $D_{j,min}$ i czas do największego zbliżenia $T_{j,min}$ oraz odległość między statkami D_j :

$$r_j(s_w, s_j) = \sqrt{a_1 \left[\frac{D_b}{D_{j,min}} \right]^2 + a_2 \left[\frac{T_b}{T_{j,min}} \right]^2 + \left[\frac{D_b}{D_j} \right]^2} \quad (1)$$

gdzie współczynniki a_1 i a_2 określają: rodzaj widzialności na morzu – dobrą lub ograniczoną oraz rodzaj rejonu żeglugi – otwarty lub zamknięty (Modarres, 2006) (Rysunek 2).



Rys. 2. Charakterystyka ryzyka kolizji przy: $a_1=a_2=0,4$ oraz $D_b/D_j=0,2$

Źródło: Opracowanie własne.

1.3. Macierz ryzyka kolizji

Macierz gry R , w której uczestniczy własny statek dysponujący czystymi strategiami s_w oraz m spotkanych statków dysponujących czystymi strategiami u_j każdy, można przedstawić w następującej postaci:

$$R = \left[r_j(s_w, s_j) \right] = \begin{vmatrix} r_1(s_{w1}, s_{11}) & r_1(s_{w1}, s_{12}) & \dots & r_j(s_{w1}, s_{j1}) & r_j(s_{w1}, s_{j2}) & \dots \\ r_1(s_{w2}, s_{11}) & r_1(s_{w2}, s_{12}) & \dots & r_j(s_{w2}, s_{j1}) & r_j(s_{w2}, s_{j2}) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_1(s_{ww}, s_{11}) & r_1(s_{ww}, s_{12}) & \dots & r_j(s_{ww}, s_{j1}) & r_j(s_{ww}, s_{j2}) & \dots \end{vmatrix} \quad (2)$$

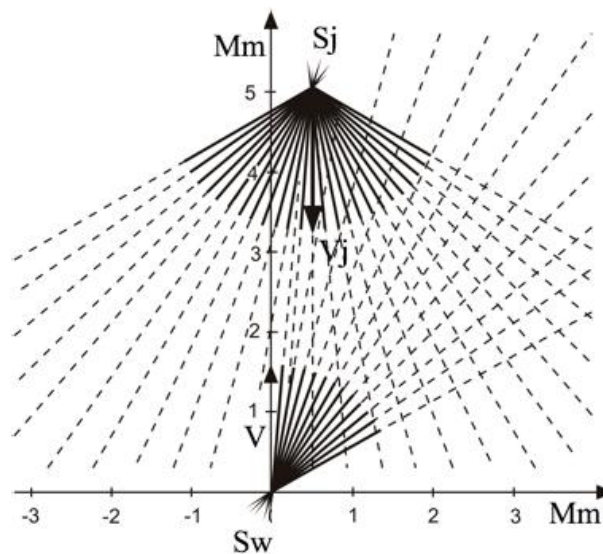
Ilości wierszy odpowiada ilość W dopuszczalnych strategii własnego statku w zbiorze S_w , w postaci zmian jego kursu $\Delta\psi$ i prędkości ΔV w celu uniknięcia kolizji (Mesterton-Gibbons, 2001):

$$S_w(s_{wi}) = (s_{w1} = 0, s_{w2} = \pm Dy, s_{w3} = \pm DV, \dots, s_{wW}), i = 1, 2, \dots, W \quad (3)$$

Ilości kolumn odpowiada łączna ilość $K=m \cdot W_j$ dopuszczalnych strategii wszystkich m spotkanych statków w zbiorze S_j , w postaci zmian ich kursów $\Delta\psi_j$ i prędkości ΔV_j w celu uniknięcia kolizji:

$$S_j(s_{ji}) = (s_{j1} = 0, s_{j2} = \pm Dy_j, s_{j3} = \pm DV_j, \dots, s_{jW_j}), i = 1, 2, \dots, W_j \quad (4)$$

Ograniczenia dopuszczalnych strategii $G(s_{wi}, s_{ji})$ wynikają z reguł prawa drogi morskiej *MPDM* (rysunek 3).



Rys. 3. Zbiory dopuszczalnych strategii rozgrywających własnego statku S_w i spotkanego j -tego statku S_j

Źródło: Opracowanie własne.

2. WIELOKRYTERIALNA OPTYMALIZACJA GRY MACIERZOWEJ

W większości rzeczywistych procesów transportowo-logistycznych gra macierzowa nie osiąga punktu siodłowego i nie posiada rozwiązania przy zastosowaniu strategii czystej.

Dlatego przybliżonym rozwiązaniem gry jest zastosowanie ciągu strategii mieszanych jako prawdopodobieństwa użycia strategii czystych (Ehrgott, 2005), (Ehrgott i Gandibleux, 2002). Najpierw określa się macierz prawdopodobieństwa użycia strategii czystych:

$$\left[p_j(s_w, s_j) \right] = \begin{pmatrix} p_1(s_{w1}, s_{11}) & p_1(s_{w1}, s_{12}) & \dots & p_j(s_{w1}, s_{j1}) & p_j(s_{w1}, s_{j2}) & \dots \\ p_1(s_{w2}, s_{11}) & p_1(s_{w2}, s_{12}) & \dots & p_j(s_{w2}, s_{j1}) & p_j(s_{w2}, s_{j2}) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1(s_{ww}, s_{11}) & p_1(s_{ww}, s_{12}) & \dots & p_j(s_{ww}, s_{j1}) & p_j(s_{ww}, s_{j2}) & \dots \end{pmatrix} \quad (5)$$

Wówczas do optymalnego sterowania własnym statkiem wykorzystuje się strategię o największym prawdopodobieństwie (Eshenauer i inni, 1990), (Osborne, 2004):

$$u_w^* = u_w \left[\max_j p_j(s_w, s_j) \right] \quad (6)$$

2.1. Gra macierzowa niekooperacyjna

Algorytm *AWGM_{nk}* wielokrokowej gry macierzowej niekooperacyjnej wykorzystuje następujące kryterium optymalizacji (Nisan i inni, 2007), (Straffin, 2001):

$$Q_{nc}^* = \min_{s_w} \max_{s_j} p_j(s_w, s_j) \quad (7)$$

2.2. Gra macierzowa kooperacyjna

Algorytm *AWGM_k* wielokrokowej gry macierzowej kooperacyjnej wykorzystuje następujące kryterium optymalizacji (Basar i Bernhard, 2008), (Wells, 2013):

$$Q_n^* = \min_{s_w} \min_{s_j} p_j(s_w, s_j) \quad (8)$$

2.3. Sterowanie nierozgrywające

Algorytm *AWS_{nr}* wielokrokowego sterowania nierozgrywającego wykorzystuje następujące kryterium optymalizacji:

$$Q_{nr}^* = \min_{S_w} p_j^{S_w} \quad (9)$$

Algorytmy *AWGM_nk*, *AWGM_k* oraz *AWS_nr* wyznaczania bezpiecznej trajektorii statku w sytuacji kolizyjnej opracowano wykorzystując funkcję *linprog* z pakietu *Optimization Toolbox* oprogramowania *Matlab/Simulink* (Breton i Szajowski, 2010).

Sposób wprowadzenia danych początkowych do obliczeń opisujących sytuację nawigacyjną przedstawia rysunek 4, a postać wyników obliczeń bezpiecznej trajektorii statku ilustruje rysunek 5.

Dane własnego statku

Kurs	Prędkość	Prędkość maksymalna
80	11	11

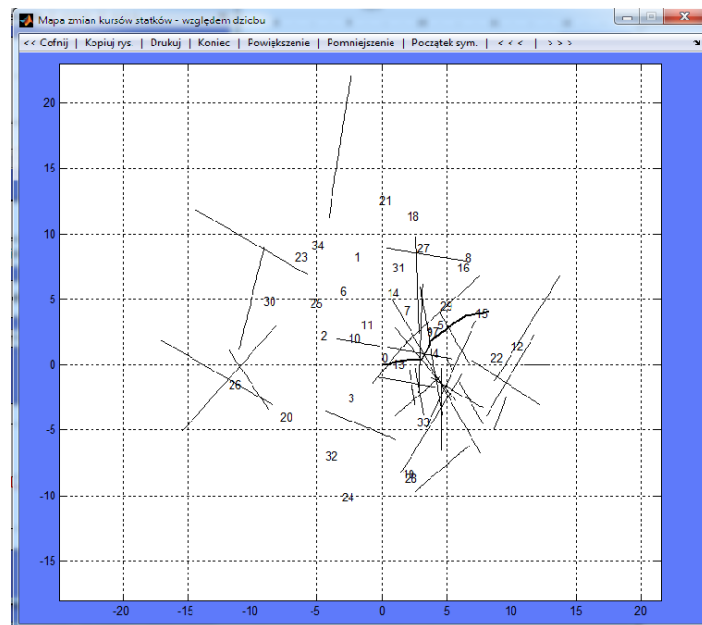
Dane symulacji

Czas bezpieczny	Odległość bezpieczna	Czas wyprzedzenia	Ilość statków	Czas manewru	Ilość manewrów
3	0.35	3	34	3	0

Dane spotkanych statków

	Odległość	Kurs	Namiar	Prędkość		Odległość	Kurs	Namiar	Prędkość		Odległość	Kurs	Namiar	Prędkość
1.	8	205	65	10	15.	8	0	145	7	29.	6	350	129	11
2.	5	150	10	15	16.	9	330	120	4	30.	10.1	178	15	8.2
3.	4	100	300	10	17.	4	350	140	3	31.	6.9	123	87	7
4.	4	50	165	5	18.	11	90	90	2	32.	8.7	222	290	12
5.	5	350	140	4	19.	9	300	250	11	33.	5.6	112	231	6.5
6.	6	150	48	5	20.	9	300	320	11	34.	10.1	228	48	8.8
7.	4	120	105	5	21.	12	211	79	8					
8.	10	20	120	3	22.	8.4	32	170	9.9					
9.	4	350	140	2	23.	10.2	279	39	6.8					
10.	3	140	20	8	24.	11.1	14	276	8.9					
11.	3	220	47	5	25.	6.9	182	27	9.2					
12.	10	50	165	6	26.	12	8.9	340	12.1					
13.	1	100	200	5	27.	8.8	32	98	10.5					
14.	5	150	85	1	28.	9.4	326	249	6					

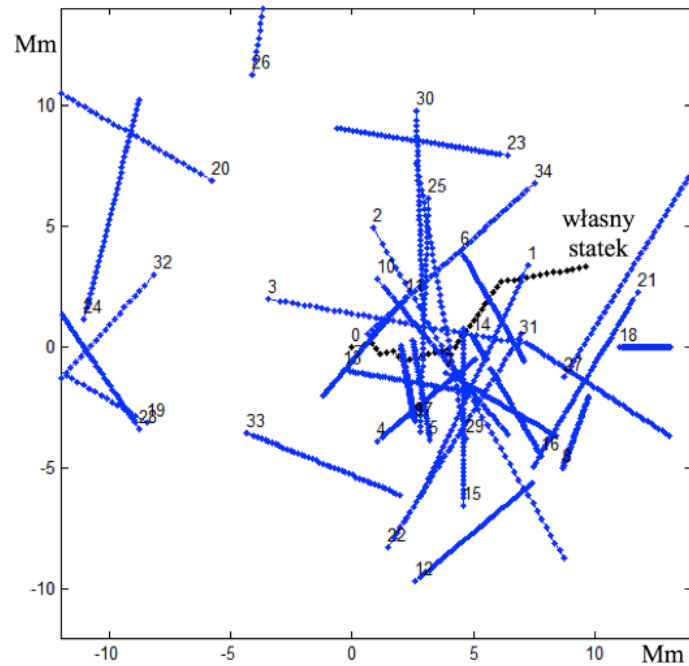
Rys. 4. Okno algorytmu z danymi początkowymi sytuacji nawigacyjnej
Źródło: Opracowanie własne.



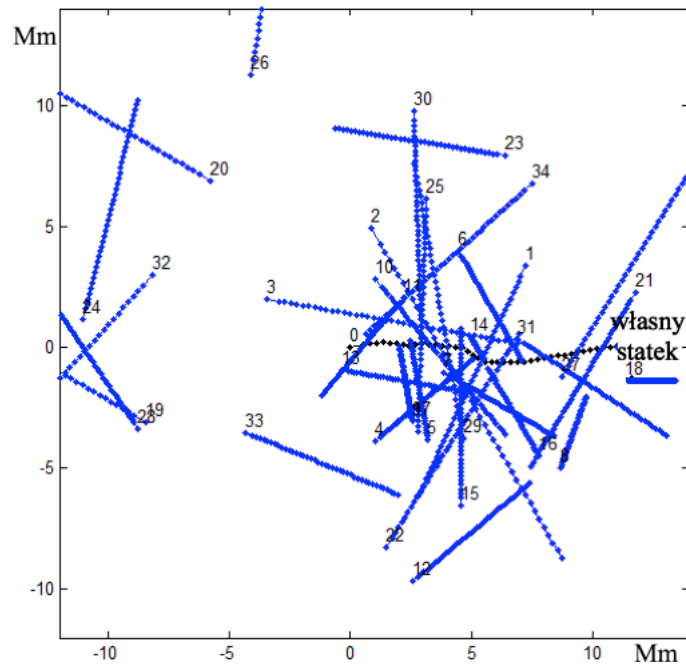
Rys. 5. Okno algorytmu z wynikami obliczeń bezpiecznej trajektorii statku
Źródło: Opracowanie własne.

3. BADANIA SYMULACYJNE ALGORYTMU

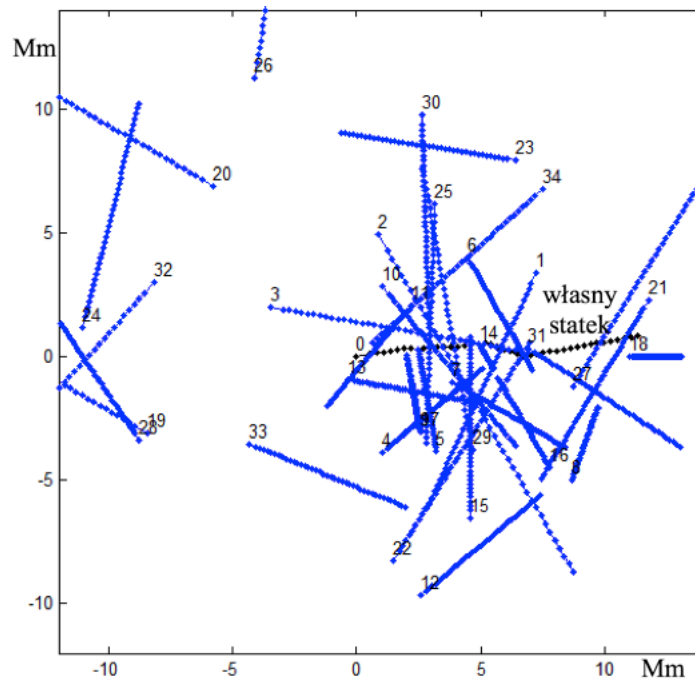
Trajektorie bezpieczne własnego statku w sytuacji 34 spotkanych statków w Cieśninie Kattegat, w warunkach ograniczonej widzialności na morzu przy $D_b=2,6$ Mm, wyznaczone według algorytmów optymalizacji wielokryterialnej: $AWGM_{nk}$, $AWGM_k$ i AWS_{nr} , przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 8.



Rys. 6. Trajektoria bezpieczna własnego statku w grze macierzowej niekooperacyjnej
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 7. Trajektoria bezpieczna własnego statku w grze macierzowej kooperacyjnej
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 8. Trajektoria bezpieczna własnego statku przy sterowaniu nierozgrywającym
 Źródło: Opracowanie własne.

4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie modelu gry macierzowej z ryzykiem kolizji do syntezy algorytmów komputerowego wspomaganie decyzji manewrowej nawigatora umożliwia uwzględnienie stopnia nieokreśloności sytuacji nawigacyjnej spowodowanej niedoskonałością przepisów prawa drogi morskiej oraz subiektywności nawigatora podejmującego decyzję manewrową uniknięcia kolizji.

Wielokryterialne ujęcie zadania optymalizacji bezpiecznego kierowania ruchem statku pozwala na uwzględnienie zarówno sterowania rozgrywającego niekooperacyjnego, jak i kooperacyjnego oraz sterowania nierozgrywającego statków. Otrzymane bezpieczne trajektorie statku różnią się przede wszystkim wartością końcowego odchylenia od zadanej trajektorii ruchu.

LITERATURA

- Basar, T., Bernhard, P. (2008). *H-Infinity optimal control and related mini-max design problems: A dynamic game approach*. Berlin: Springer.
- Bist, D.S. (2000). *Safety and security at sea*. Oxford-New Delhi: Butter Heinemann.
- Breton, M., Szajowski, K. (2010). *Advances in dynamic games: theory, applications, and numerical methods for differential and stochastic games*. Boston: Birkhauser.
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriterial optimization*. Berlin: Springer.

- Ehrgott, M., Gandibleux, X. (2002). *Multiple criteria optimization: state of the art annotated bibliographic surveys*. New York: Kluwer Academic Press.
- Engwerda, J.C. (2005). *LQ dynamic optimization and differential games*. New York: John Wiley & Sons.
- Eshenauer, H., Koski, J., Osyczka, A. (1990). *Multicriteria design optimization: procedures and application*. Berlin: Springer-Verlag.
- Isaacs, R. (1965). *Differential games*. New York: John Wiley & Sons.
- Kouemou, G. (2009). *Radar technology*. Chapter 4 by Józef Lisowski: Sensitivity of safe game ship control on base information from ARPA radar. Croatia, In-tech, 61-86.
- Kun, G. (2001). *Stabilizability, controllability, and optimal strategies of linear and nonlinear dynamical games*. PhD. Thesis. Aachen: RWTH.
- Lisowski, J. (2017). *Metody optymalizacji*. Gdynia: Wydawnictwo Akademii Morskiej, 228-237.
- Mesterton-Gibbons, M. (2001). *An introduction to game theoretic modeling*. Providence: American Mathematical Society.
- Millington, I., Funge, J. (2009). *Artificial intelligence for games*. Amsterdam-Tokyo: Elsevier.
- Miloh, T. (1974). *Determination of critical manoeuvres for collision avoidance using the theory of differential games*. Hamburg: Inst. Fur Schiffbau.
- Modarre, M. (2006). *Risk analysis in engineering*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, E., Vazirani, V.V. (2007). *Algorithmic game theory*. New York: Cambridge University Press.
- Olsder, G.J., Walter, J.L. (1977). A differential game approach to collision avoidance of ships. *Proc. of the 8th IFIP Symp. on Optimization Techniques*, Novosibirsk, 264-271.
- Osborne, M.J. (2004). *An introduction to game theory*. New York: Oxford University Press.
- Perez, T. (2005). *Ship motion control*. London: Springer.
- Straffin, P.D. (2001). *Game theory and strategy*. Warszawa: Scholar.
- Wells, D. (2013). *Games and mathematics*. Cambridge: Cambridge University Press.