

Marcin Mąka, Mariusz Dramski

Propozycja algorytmu wykrywania zmian kursu i prędkości śledzonego obiektu

JEL: O18 DOI: 10.24136/atest.2018.498
 Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

Proces wyboru drogi w obszarze ograniczonym wymaga znajomości nie tylko samego obszaru, ale także bieżącego oraz przyszłego położenia innych poruszających się w nim obiektów. Zagadnienie to jest stosunkowo proste w przypadku gdy śledzone obiekty nie zmieniają kierunku ruchu oraz prędkości. Często jednak śledzone obiekty manewrują, co skutkuje koniecznością korekty wyznaczonej trajektorii obiektu własnego. Takie informacje pozwalają na minimalizację ryzyka ewentualnej kolizji. Jest to istotne zarówno ze względów bezpieczeństwa jak i z uwagi na czynniki ekonomiczne. W niniejszym artykule zaproponowano algorytm detekcji zmian kierunku ruchu oraz prędkości śledzonego obiektu. Proponowane w artykule rozwiązania są rozwinięciem poprzednich badań uwzględniających poszukiwanie optymalnej trasy obiektu na obszarze ograniczonym. Autorzy proponują tu algorytm dla zastosowań w systemach wspomaganie decyzji dla nawigacji morskiej, ale może być on z powodzeniem zastosowany również w innych obszarach transportu.

Słowa kluczowe: wykrywanie manewru, predykcja, obszar ograniczony, nawigacja, transport, najkrótsza droga, trajektoria optymalna.

Wstęp

Przewidywanie trajektorii obiektu jest bardzo ważnym czynnikiem w zarządzaniu ruchem [1]. Pozwala nam oszacować możliwy przebieg (kierunek) ruchu innych poruszających się pojazdów, np. statków w żegludze morskiej. Dzięki temu proces transportu staje się o wiele bezpieczniejszy i szybszy. Zasadniczo w transporcie morskim stosowane są systemy VTS, ale można je wspierać również innymi narzędziami. Poza tym należy uwzględnić obecność mniejszych statków (jachty, łodzie itp.), które mogą poruszać się poza kontrolą VTS.

Obliczanie trajektorii obiektu własnego, w danym momencie czasu odbywa się prawidłowo, tylko w przypadku, jeśli założymy, że żaden inny ruchomy obiekt nie przekracza ani nie zbliża się do naszego kursu na odległość mniejszą od przyjętego marginesu bezpieczeństwa (np. minimalne CPA w przypadku obiektów pływających). W kolejnych krokach czasowych istnieje konieczność śledzenia trajektorii obiektów obcych, ponieważ sytuacja zmienia się dynamicznie w czasie i przypadku, gdy zmieniają one prędkość i/lub kierunek wyznaczone wcześniej trajektorie ruchu obiektu własnego mogą okazać się niedozwolone lub wymagać korekty.

W niniejszym artykule podano propozycję algorytmu wykrywania zmian kierunku ruchu oraz prędkości obiektów poruszających się w obszarach ograniczonych. Składa się on z kilku kroków:

- określenie położenia obiektu własnego (statku) na mapie,
- przetwarzanie danych z mapy nawigacyjnej w celu uzyskania jej reprezentacji w postaci siatki trapezów, która pozwala na określenie obszarów ograniczonych i dozwolonych,
- wyznaczenie grafu przejść reprezentującego wszystkie możliwe ścieżki w danym obszarze,
- obliczenie optymalnej trasy w oparciu o aktualną pozycję obiektu własnego,

- śledzenie parametrów ruchu obiektów obcych i jeśli wykryte zostaną zmiany, ponowna predykcja ruchu śledzonego obiektu, a następnie modyfikacja grafu przejść i wyznaczenie nowej trajektorii dla obiektu własnego.

Zagadnienia dotyczące przetwarzania danych z mapy nawigacyjnej, ich reprezentacji w postaci siatki oraz algorytmów wyboru drogi opisano we wcześniejszych publikacjach [3]. Niniejszy artykuł poświęcono zagadnieniom wykrywania zmian parametrów ruchu śledzonych obiektów obcych.

1. Detekcja zmian parametrów ruchu

1.1. Zmiana kursu

Do wyznaczenia przyszłej pozycji śledzonego obiektu poruszającego się torem prostoliniowym wykorzystać można regresję liniową (liniową funkcję trendu) [5], [6]. Zakładając, że znanych jest kilka jego poprzednich pozycji w określonych chwilach czasowych. Funkcja przyjmie wówczas postać (metoda LSQ):

$$\hat{y} = bx + a \quad (1)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3)$$

gdzie:

x_i – współrzędne x kolejnych, znanych punktów drogi,
 y_i – współrzędne y kolejnych, znanych punktów drogi,
 \bar{x} – średnia arytmetyczna współrzędnych x,
 \bar{y} – średnia arytmetyczna współrzędnych y.

Jeśli kierunek i prędkość obiektu są stałe wystarczy wyznaczenie jednej linii regresji. Można założyć, że współczynniki a i b równania regresji nie zmieniają się znacząco i wyznaczona linia jest modelem ruchu obiektu.

Jeżeli obserwowany obiekt zmieni swoją trajektorię, kolejne punkty jego drogi zaczną się odchyłać od wyznaczonej linii trendu. Sytuację tą można rozpoznać analizując wartości przyjmowane przez współczynnik korelacji Pearsona r , wyrażony zależnością:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

Jest on przydatny, jeśli chcemy stwierdzić, czy zależność między dwiema analizowanymi zmiennymi jest liniowa. Wartość współczynnika r jest zawsze w przedziale $<-1,1>$. Jeśli $r = 1$ lub $r = -1$ albo też jego wartość zbliża się do tych liczb, możemy założyć, że zależność jest liniowa lub można ją opisać za pomocą modelu liniowego z niewielkim średnim błędem.

Jeżeli obserwowany obiekt zmieni swoją trajektorię, zaczną się zmieniać wartości współczynnika korelacji. Im większy będzie kąt nachylenia prostej przeprowadzonej przez dwa ostatnie punkty drogi

obiektu w stosunku do wyznaczonej linii regresji, tym większa będzie różnica:

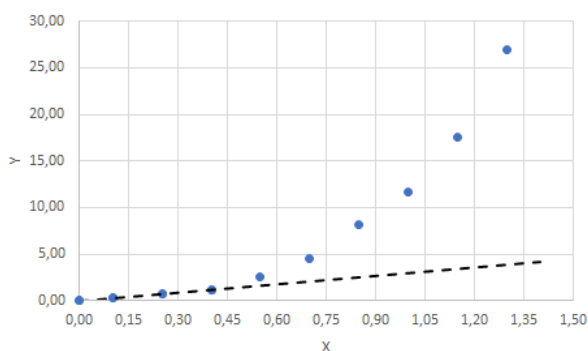
$$\Delta r = 1 - r \quad (5)$$

Przeprowadźmy prosty eksperyment. Wyznaczono 10 punktów drogi obserwowanego obiektu. Na podstawie pierwszych czterech punktów wyznaczamy linię regresji. Zaczynając od drugiego punktu obserwujemy współczynnik korelacji. Następnie dodajemy kolejne punkty i obserwujemy, jak zmienia się współczynnik korelacji. Wyniki tego prostego eksperymentu podano w poniższej tabeli:

Tab. 1. Zmiana współczynnika korelacji Pearsona r

Numer punktu drogi	X	Y	r	Δr
1	0,00	0,00	-	-
2	0,10	0,30	1	0
3	0,25	0,75	1	0
4	0,40	1,20	1	0
5	0,55	2,50	0,9642	0,0358
6	0,70	4,50	0,9439	0,0561
7	0,85	8,20	0,9178	0,0822
8	1,00	11,70	0,9272	0,0728
9	1,15	17,60	0,9229	0,0771
10	1,30	27,18	0,9068	0,0932

Współczynnik wyznaczony dla punktów 2, 3 oraz 4 jest równy jedności, co oznacza, że śladowy obiekt porusza się torem prostoliniowym. Dla punktu 5 i kolejnych wartość współczynnika Pearsona maleje. Trend zmian różnicy Δr w kolejnych punktach jest rosnący, co oznacza, że trajektoria obiektu coraz bardziej odbiega od wyznaczonej linii regresji – obiekt manewruje (rys. 1).



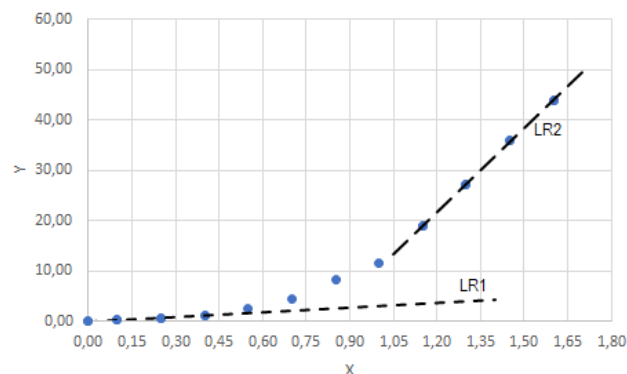
Rys. 1. Trajektoria ruchu analizowanego obiektu, linią przerywaną oznaczono prostą regresji wyznaczoną na podstawie czterech pierwszych punktów drogi

Po wykryciu manewru pojawia się kolejny problem – detekcja momentu, w którym zostanie on zakończony i obiekt porusza się po nowej, prostoliniowej trajektorii. Należy w tym celu wyznaczać kolejne linie regresji, na bazie kilku ostatnich punktów drogi obiektu i badać wartość współczynnika Pearsona dla pojawiających się, nowych punktów drogi obiektu.

Jeżeli wartości współczynnika r dla kolejnych, obserwowanych punktów dążą do 1 (lub -1) osiągając w trzech-czterech kolejnych punktach wartość $r \approx 1$ lub $r \approx -1$ można założyć, że śladowy obiekt zakończył wykryty wcześniej manewr (tab. 2, rys. 2).

Tab. 2. Wykrywanie zakończenia manewru

Numer punktu drogi	X	Y	r
1	0,00	0,00	-
2	0,10	0,30	-
3	0,25	0,75	-
4	0,40	1,20	-
5	0,55	2,50	-
6	0,70	4,50	-
7	0,85	8,20	-
8	1,00	11,70	-
9	1,15	18,87	1,0000
10	1,30	27,20	0,9999
11	1,45	35,88	0,9999
12	1,60	43,89	0,9999



Rys. 2. Trajektoria ruchu analizowanego obiektu, widoczna linia regresji LR2, na podstawie której wykryto zakończenie manewru

W przypadku, gdy współrzędne x lub y kilku kolejnych punktów będą takie same, wyznaczona dla nich linia trendu będzie równoległa do osi OX lub OY. W takim przypadku wartość współczynnika Pearsona będzie równa nieskończoności. Sytuacja taka występuje, ponieważ jedno z wyrażeń: $x_i - \bar{x}$ lub $y_i - \bar{y}$ występujące w mianowniku równania 4 będzie równe zero. Sytuacja taka jest również interpretowana jako ruch obiektu po linii prostej (brak manewrów).

Kompletny algorytm wykrywania manewrów śladowego obiektu przedstawiono na rysunku 3.

1.2. Zmiana prędkości

Do wykrywania zmian prędkości śladowego obiektu zaproponowano wykorzystanie podobnej metody jak w przypadku detekcji zmian kursu. Analizie poddaje się prędkości obiektu pomiędzy poszczególnymi punktami drogi zdefiniowane jako ilorazy przyrostów drogi pomiędzy poszczególnymi punktami i różnicy czasu między nimi:

$$v_{i+1} = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{t_{i+1} - t_i} \quad (6)$$

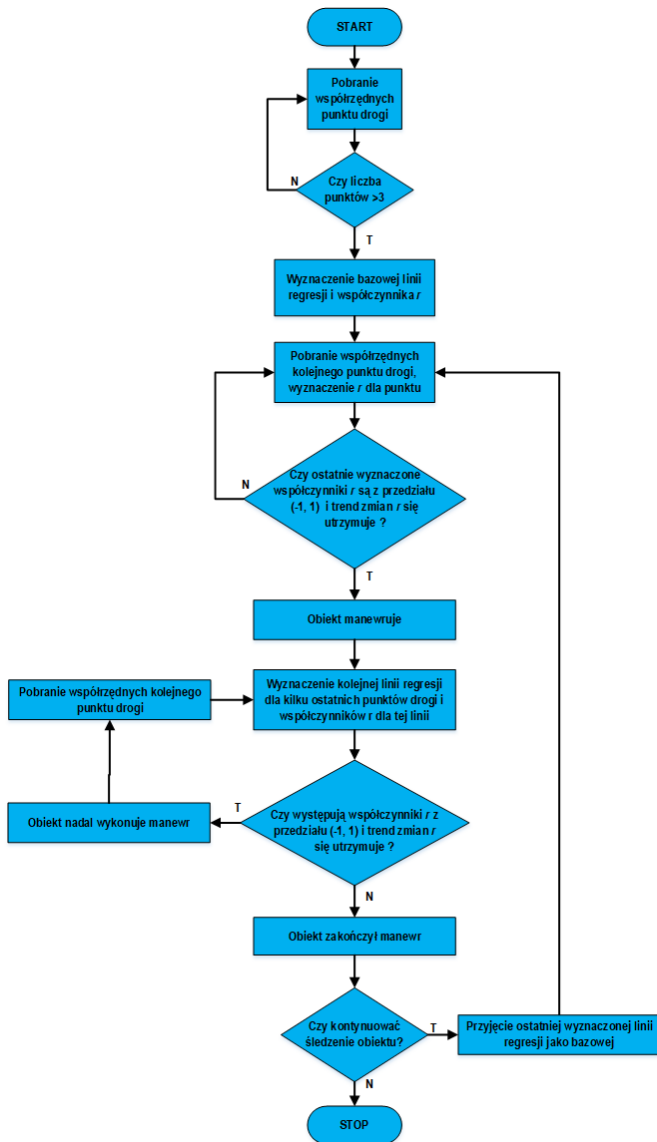
W przypadku gdy prędkość jest stała linia trendu wyznaczona na charakterystyce $v = f(t)$ będzie równoległa do osi OX, a współczynnik Pearsona równy nieskończoności $r = \infty$.

Wartość współczynnika r różna od nieskończoności oznacza, że śladowy obiekt zmienia prędkość.

tą sytuację jako zakończenie manewrowania przez śledzony obiekt. Wyznaczona linia regresji jest jednocześnie linią bazową dla detekcji kolejnych manewrów.

Tab. 3. Pozycje statku i współczynniki r dla linii regresji: przed i po wykonaniu manewru

Numer punktu drogi	φ	λ	r_1	r_2
1	54,121960	14,133150	-	-
2	54,121960	14,133280	∞	-
3	54,121960	14,133420	∞	-
4	54,121960	14,133560	∞	-
5	54,121960	14,133700	∞	-
6	54,121960	14,133830	∞	-
7	54,121960	14,133970	∞	-
8	54,121960	14,134110	∞	-
9	54,121960	14,134240	∞	-
10	54,121963	14,134380	0,5219	-
11	54,121965	14,134520	0,6653	-
12	54,121970	14,134650	0,7102	-
13	54,121980	14,134790	0,7165	1,0000
14	54,121990	14,134930	0,7485	1,0000
15	54,122000	14,135060	0,7806	0,9998
16	54,122010	14,135200	0,8099	0,9999
17	54,122020	14,135330	0,8340	0,9999
18	54,122030	14,135470	0,8549	0,9999
19	54,122050	14,135700	0,8705	0,9995
20	54,122060	14,135730	0,8800	0,9959
21	54,122080	14,135910	0,8876	0,9934
22	54,122090	14,136100	0,8999	0,9952



Rys. 3. Algorytm wykrywania zmian trajektorii śledzonego obiektu

2. Analiza ruchu obiektu rzeczywistego

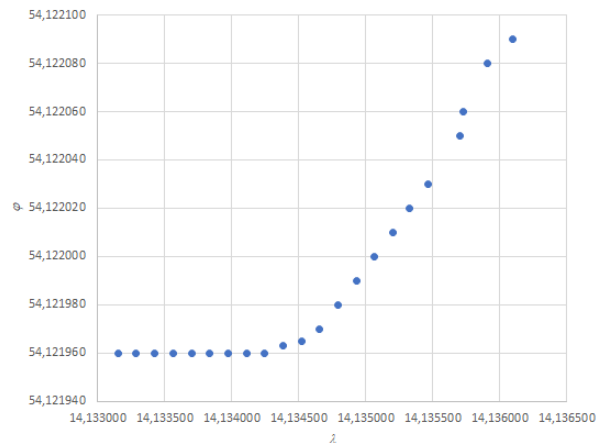
Przedstawione wyżej algorytmy są rozwiązaniem ogólnym przedstawionego problemu. Celowo pominięto w nich zagadnienia dotyczące m.in. wartości zmian współczynnika r które będą interpretowane jako sygnalizacja zmiany parametrów ruchu obiektu gdyż zależą one będą od rodzaju i dynamiki obiektu, którego ruch analizujemy.

W zaprezentowanym niżej przykładzie przeanalizowano proces wykrywania zmiany prędkości statku poruszającego się po Zatoce Pomorskiej na podstawie zarejestrowanych pozycji (tab. 3, rys. 4).

Pierwsza, bazowa krzywa regresji jest równoległa do osi poziomej układu współrzędnych. Wartość współczynnika Pearsona r dla zarejestrowanych punktów drogi od 2 do 9 jest równa nieskończoności. Sytuacja ta jest interpretowana jako ruch po linii prostej. Od punktu 10 współczynnik r jest z przedziału $(0, 1)$ i zmienia się. Trend zmian jest rosnący, utrzymuje się w kolejnych pozycjach. W punkcie 11 algorytm interpretuje sytuację jako manewr.

Po uzyskaniu dalszych pozycji obiektu wyznaczane są kolejne linie regresji i sprawdzana jest dla nich wartość współczynnika Pearsona. Jeżeli wartość r się zmienia sytuacja jest interpretowana jako kontynuacja manewru.

Dla linii regresji wyznaczonej od punktu numer 12 (współczynnik Pearsona obliczany od punktu 13) wartość r dla kolejnych pozycji obiektu jest w przybliżeniu równa jedności. Algorytm zinterpretował



Rys. 4. Kolejne punkty drogi śledzonego obiektu

Począwszy od punktu 15 wartości współczynnika r dla kolejnych pozycji nie są równe jedności. Powstaje tutaj problem interpretacji niewielkich zmian r , które mogą wynikać z błędnego określenia pozycji, czy też myśzkowania śledzonego statku. Jak już wcześniej wspomniano jednym z kryteriów jest tutaj kontynuacja trendu zmian r dla kolejnych pozycji. Drugim, wyznaczenie wartości granicznej zmian współczynnika Pearsona Δr_{gr} interpretowanej jako manewr i umożliwiającej jednocześnie ograniczenie wpływu czynników zakłócających na jego wykrywanie.

Czynnikami decydującymi są w tym przypadku odstępy czasu w jakich dostarczane są kolejne pozycje śledzonego obiektu oraz prędkość kątowna, z jaką wykonywany jest manewr. Zgodnie z prawidłem 8 MPDM zmiana powinna być dostatecznie duża, aby była łatwo widoczna dla innego statku obserwującego wzrokowo lub za pomocą radaru. Parametry te determinują czas potrzebny systemowi na wykrycie zmian parametrów ruchu śledzonego statku.

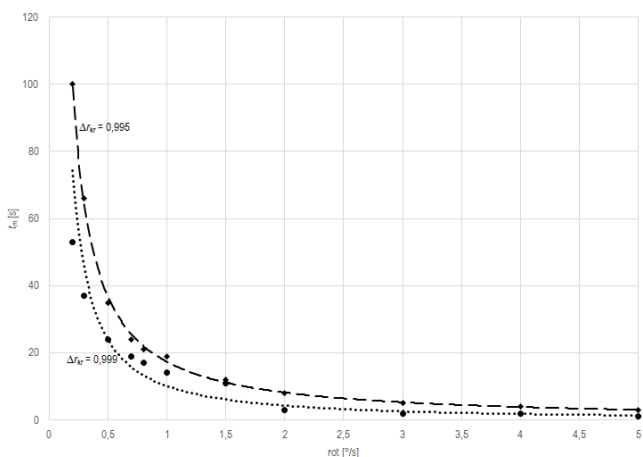
Zakładając, że pozycje obserwowanego obiektu dostarczane są do systemu śledzącego co jedną sekundę czasu wyrzycia manewru

dla dwóch różnych, przykładowych wartości Δr_{gr} przedstawiono w tabeli 4.

Krzywe przedstawiające zależność czasu detekcji manewru od prędkości kątowej obiektu przedstawiono na rysunku 5. Na tej podstawie dla analizowanej wyżej trajektorii, przedstawionej w tabeli 3 przyjęto $\Delta r_{gr} = 0,995$.

Tab. 4. Czas detekcji manewru dla różnych prędkości kątowych i wartości współczynnika Δr_{gr}

		$\Delta r_{gr} = 0,999$	$\Delta r_{gr} = 0,995$
rot [°/s]	rot [°/min]	t_m [s]	t_m [s]
0,2	12	53	100
0,3	18	37	66
0,5	30	24	35
0,7	42	19	24
0,8	48	17	21
1	60	14	19
1,5	90	11	12
2	120	3	8
3	180	2	5
4	240	2	4
5	300	1	3



Rys. 4. Zależność czasu detekcji manewru od prędkości kątowej dla dwóch różnych wartości współczynnika Δr_{gr}

Podsumowanie

W artykule przedstawiono propozycję algorytmu detekcji zmian parametrów ruchu śledzonego obiektu z wykorzystaniem regresji liniowej oraz analizy zmian wartości współczynnika korelacji Pearsona r .

Proponowane w artykule rozwiązania są rozwinięciem poprzednich badań uwzględniających poszukiwanie optymalnej trasy obiektu na obszarze ograniczonym które zostały opisana m.in. w [2], [4]. Autorzy proponują tu algorytm dla zastosowań w systemach wspomagania decyzji dla nawigacji morskiej, ale może być on z powodzeniem zastosowany również w innych obszarach transportu.

Należy wziąć pod uwagę fakt, że współczynnik r jest wrażliwy na dostępne dane, ponieważ nie jest to typowe narzędzie do wykrywa-

nia zależności między zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi. Zagadnienie to wymaga przeprowadzenia dalszych analiz w celu m.in. dobrania optymalnego modelu regresji oraz metod ograniczenia wpływu myśzkowania i błędów w określaniu pozycji na czas wykrycia manewru śledzonego obiektu jednakże wyniki dotychczasowych badań są bardzo obiecujące.

Bibliografia:

1. Borkowski P., „Ship course stabilization by feedback linearization with adaptive object model”, Polish Maritime Research vol. 21, no. 1(81) 2014, (14-19)
2. Dramski M., Missing Data Problem in the Event Logs of Transport Processes, Smart Solutions in Today's Transport: 17th International Conference on Transport Systems Telematics, TST 2017, Katowice – Ustroń, Poland, April 5-8, 2017
3. Dramski M., Mąka M.: „Algorithm of solving collision problem of two objects in restricted area” Transport System Telematics TST 2013 (Communications in Computer and Information Science 395 - Activities of Transport Telematics, 2013, str. 251 - 257).
4. Dramski M., Mąka M., Uchacz W., „Network model of the shortest path selection in transport”, Communications in Computer and Information Science Volume 471, 2014, pp 369-375
5. Greń J., Statystyka matematyczna. Modele i zadania, PWN 1978
6. Sobczyk M., Statystyka, PWN 2018

Proposition of algorithm for detecting changes of course and speed of the tracked object

The process of choosing a trajectory in a restricted area requires knowing not only the area itself, but also the current and future location of other objects moving within it. This issue is relatively simple in case when the objects being tracked do not change the direction of movement and speed. Often, however, the objects being tracked have a nuanced effect, which results in the necessity to correct the determined trajectory of the own object. Such information allows to minimize the risk of a possible collision. This is important both for security reasons and due to economic factors. This article proposes an algorithm for the detection of changes in the direction of motion and the speed of the object being tracked. The solutions proposed in the article are a development of previous studies, including the search for the optimal object route in a restricted area. The authors propose an algorithm for applications in decision support systems for sea navigation, but it can also be successfully used in other areas of transport.

Keywords: maneuver detection, prediction, restricted area, navigation, transport, shortest path, optimal route.

Autorzy:

dr inż. **Marcin Mąka** – Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, e-mail: m.maka@am.szczecin.pl

dr inż. **Mariusz Dramski** – Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, e-mail: m.dramski@am.szczecin.pl