

Rozdział 2

Problem generowania optymalnej trasy bezzałogowego statku powietrznego stosowanego do detekcji obiektów niebezpiecznych w systemach autonomicznej nawigacji morskiej

Jolanta Koszelew

Wydział Informatyki, Politechnika Białostocka

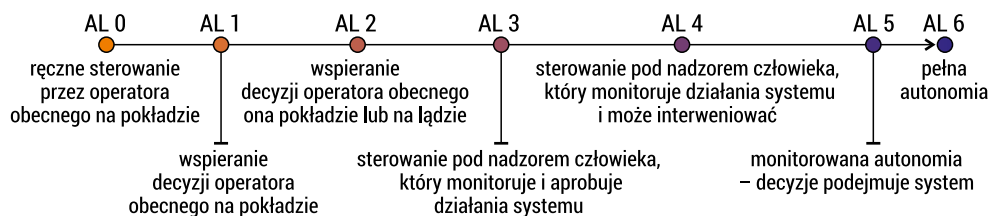
Streszczenie: Rozważany w pracy problem został zdefiniowany i rozwiązany w ramach projektu badawczo-rozwojowego o akronimie AVAL [1], dotyczącego systemu autonomicznej nawigacji morskiej wspomaganej przez analizę obrazu rejestrowanego przez bezzałogowe statki powietrzne (BSP). Dron wykorzystywany w systemie AVAL, będący na wyposażeniu statku morskiego, realizuje autonomiczną misję zgodnie z wygenerowaną trasą. Celem misji BSP jest wykonanie rejestracji video obiektów niebezpiecznych. Obraz zarejestrowany w czasie misji umożliwia detekcję, identyfikację i geolokalizację obiektów niebezpiecznych, które są trudno wykrywalne albo w ogóle niewykrywalne przez standardowe urządzenia nawigacyjne, takie jak radar czy AIS (Automatic Identification System). Problem generowania optymalnej trasy BSP w kontekście opisanego zastosowania jest oryginalną odmianą Orienteering Problem (OP) w wersji, która nie została dotąd zdefiniowana w literaturze. W ramach pracy przedstawiono definicję problemu oraz wyniki działania algorytmu heurystycznego opracowanego w wyniku projektu. Ze względu na konieczność zachowania poufności w zakresie wyników projektu B+R, w ramach którego rozwiązanie powstało, nie jest możliwe przedstawienie pseudokodu problemu ani szczegółów implementacyjnych algorytmu.

Słowa kluczowe: bezzałogowy statek powietrzny, autonomiczna nawigacja morska, optymalna trasa lotu, Orienteering Problem

Wprowadzenie

Autonomia pojazdów, w tym wodnych, to jeden z najsilniejszych trendów rozwoju innowacyjnych technologii XXI wieku. Od kilku lat, na całym świecie, realizowanych jest wiele projektów B+R, mających na celu podniesienie poziomu autonomiczności

statków morskich [2]. Jednym z najbardziej istotnych elementów autonomicznych systemów statkowych jest obserwacja wizyjna, prowadzona aktualnie przez człowieka (nawigatora pełniącego wachtę na statku). W celu zwiększenia autonomiczności pojazdów praca człowieka będzie stopniowo zastępowana obserwacją zdalną, aby ostatecznie pozostać w pełni autonomiczna. Oczywiście nawigatora zastąpione mają być m.in. obserwacją w obszarze potencjalnego zagrożenia (definiowanego obecnie jako występującego w odległości około 8 Mm na podstawie międzynarodowych przepisów prawa drogi morskiej – MPDM [3]) Ponadto, oprócz obserwacji wizyjnej, reakcja nawigatora na zauważone w polu widzenia niebezpieczeństwa będzie zastąpiona w technologii statków autonomicznych automatyczną detekcją, klasyfikacją i geolokalizacją wykrytych w obrazie obiektów, zwłaszcza w sytuacji gdy zdalny dostęp do systemu sterowania statkiem będzie niepewny lub utracony. Prognozowany harmonogram wprowadzania poszczególnych poziomów autonomiczności statków morskich, z którego wynikają najważniejsze wyzwania badawcze technologii o okresie następnych 15 lat przedstawiono na rysunku 2.1.



Kolejne kroki

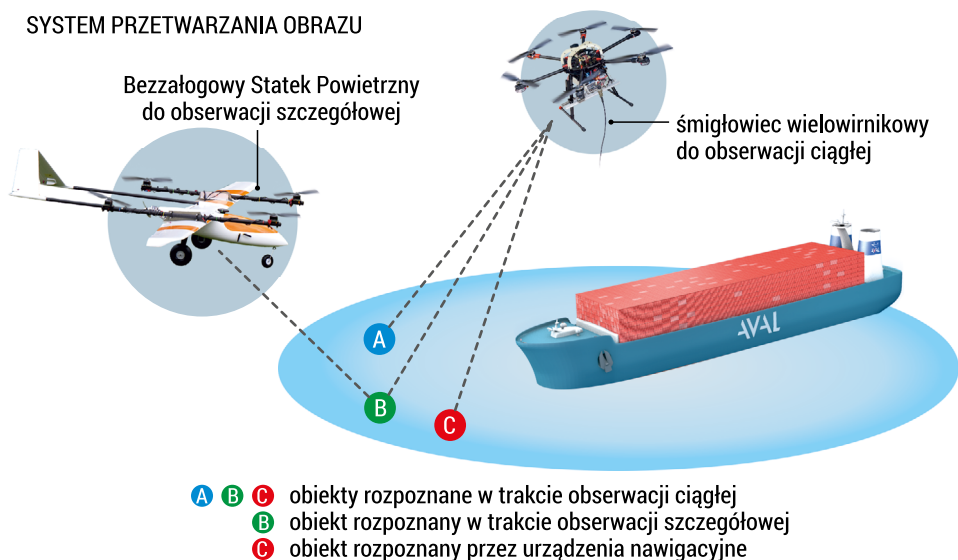
Statki bezzałogowe najprawdopodobniej zaczną od lokalnych aplikacji



RYSUNEK 2.1. Prognozowany harmonogram wprowadzania autonomicznej nawigacji morskiej [4]

Jednym z projektów związanych z autonomicznym statkiem jest AVAL (*Autonomous Vessel with an Air Look*), który zakłada wykorzystanie dwóch typów bezzałogowych statków powietrznych (BSP) do wykrycia niebezpieczeństw na morzu (rysunek 2.2). Pierwszy typ to śmigłowiec wielowirnikowy na uwięzi (zasilany przewodowo), unoszący się stale nad pokładem statku na wysokości do 50 m, który służy do ciągłej obserwacji wizyjnej (dzięki zainstalowanym kamerom), detekcji, klasyfikacji i geolokalizacji obiektów w odległości do 3 Mm od statku. System wizyjny wielowirnikowca jest w stanie wykonać detekcję obiektów znajdujących się nawet w odległości do 8 Mm, jednak w zakresie powyżej 3 Mm, klasyfikacja i geolokalizacja nie jest możliwa, ze względu chociażby na rozdzielczość obrazu.

SYSTEM PRZETWARZANIA OBRAZU

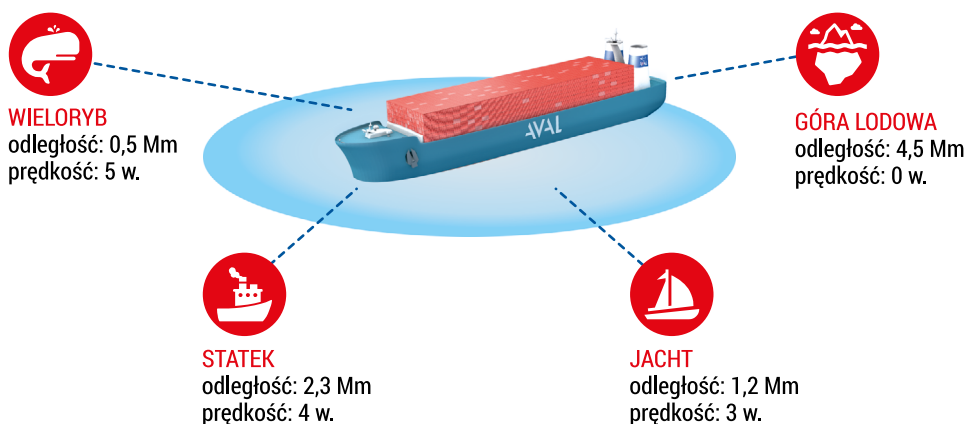


RYSUNEK 2.2. Dwa typy BSP stosowane w technologii AVAL

Przedstawiając obrazowo sytuację, wielowirnikowiec jest w stanie wykryć obiekty ale nie jest w stanie stwierdzić jaki jest to typu obiektu – czy jest to np. okręt marynarki wojennej, jacht, wieloryb, dryfujący kontener czy góra lodowa (rysunek 2.3). Dlatego niezbędne jest zastosowanie drugiego drona (typu VTOL – ang. *Vertical Take Off and Landing*), który wykonuje misję mającą na celu zbliżenie się do obiektów na odległość niezbędną do wykonania poprawnej klasyfikacji obiektów i potwierdzenie parametrów wektora ruchu (prędkość i kurs) obiektów wykrytych przez kamery wielowirnikowca.

SYSTEM PRZETWARZANIA OBRAZU

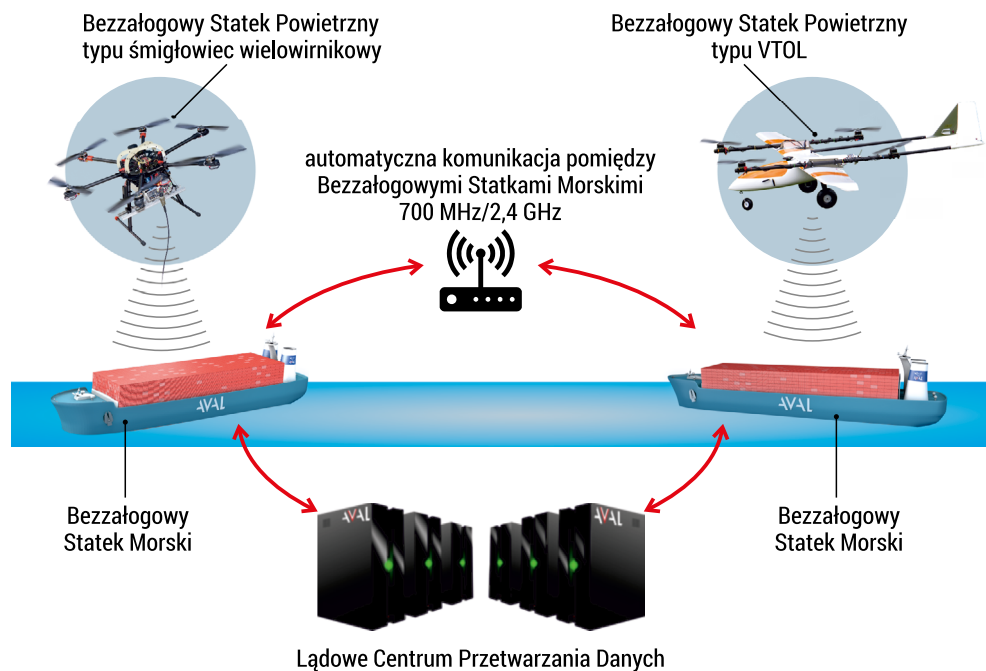
Jak to działa?



RYSUNEK 2.3. Klasyfikacja obiektów przez system wizyjny technologii AVAL

Uzyskane parametry ruchu sklasyfikowanych obiektów są podstawą do podjęcia decyzji przez autonomiczny system nawigacji, który generuje bezpieczną trajektorię antykolizyjną dla statku własnego, proponując jednocześnie trajektorie innym statkowi/statkom. W sytuacji nadmiernego zbliżenia system rozpoczyna autonomiczne negocjacje ze drugim statkiem. Ma to miejsce w przypadku wymagającym wykonania manewru ostatniej chwili (gdy obydwie statki, które znalazły się w sytuacji kolizyjnej muszą manewrować). Komponenty technologii przedstawiono na rysunku 2.4.

ROZWIĄZANIE



RYSUNEK 2.4. Komponenty technologii AVAL

Niniejsza praca dotyczy problemu optymalizacji trasy BSP typu VTOL, który wykonuje misję szczegółową (rysunek 2.2). Bardzo ważne jest aby, po pierwsze, decyzja o wykonaniu misji była podjęta tylko w sytuacji, gdy ryzyko jej niepowodzenia (zbyt długi czas trwania misji czy niski współczynnik poprawności klasyfikacji i geolokalizacji) było możliwie najniższe i akceptowalne. Po drugie, zbiór obiektów uwzględnionych w misji zawierał tylko te obiekty, które mają wysoki współczynnik zagrożenia dla statku.

W kolejnych rozdziałach pracy zostały opisane: problemy pokrewne do rozważanego (rozdział 2.1) opisane w literaturze, specyfikacja problemu misji BSP typu VTOL (rozdział 2.2), wyniki realizacji algorytmu planowania misji uzyskane na danych dwóch rzeczywistych sytuacji kolizyjnych (rozdział 2.3). W podsumowaniu zostały przedstawione dalsze kierunki pracy nad rozwiązaniem przedmiotowego problemu.

2.1. Przegląd literatury

Projektowanie algorytmów niezbędnych do wykorzystania w procesie realizacji efektywnej misji autonomicznych bezzałogowych statków powietrznych BSP jest od 10 lat prężnie rozwijającym się zagadnieniem badawczym w dziedzinie problemów optymalizacji wielokryterialnej.

1. Problem routingu BSP interesuje wielu naukowców ze względu na wysoką aplikacyjność badań w tym obszarze. Bezzałogowe statki powietrzne są coraz częściej stosowane w sytuacjach zagrażających życiu i środowisku, w wielu dziedzinach wojskowych i cywilnych. W poniższym przeglądzie literatury uwzględnione są te warianty problemu, które nie zawierają warunków pogodowych lotu, a koncentrują się na wyborze optymalnej kolejności i puli odwiedzanych w trasie obiektów. Wzięcie pod uwagę warunków środowiskowych w wynikowej trasie jest bowiem oddzielnym zagadnieniem, wykraczającym poza zakres niniejszej monografii.
2. Najczęstszym wariantem problemu jest pojedynczy routing BSP, co oznacza, iż mamy do dyspozycji tylko jeden bezzałogowy statek do realizacji misji [5], który startuje i ląduje po realizacji trasy w tym samym punkcie. Celem standardowego pojedynczego routingu jest odwiedzenie każdego obiektu z danego zbioru, co najmniej raz, w celu wykonania założonej operacji i powrót do miejsca startu. Misja nie jest realizowana z założenia, jeżeli czas jej trwania przekracza czas maksymalny związany zazwyczaj z pojemnością baterii. Wówczas algorytm stwierdza, że ścieżka misji nie istnieje. Problem w tej wersji jest modelowany przy wykorzystaniu MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) i rozwiązywany przez algorytm aproksymacyjny [6]. Inna wersja problemu zakłada, że obiekty przewidziane do odwiedzenia w trasie mają określone priorytety a algorytm, w sytuacji, kiedy odwiedzenie wszystkich obiektów nie jest możliwe, przy danych ograniczeniach, wybiera te, dla których suma priorytetów odwiedzonych obiektów będzie największa. Często w tej wersji problemu są uwzględnione parametry dynamiki drona, a także ograniczenia związane z zasięgiem i prędkością BSP [7].
3. Inny wariant wielokryterialnej trasy pojedynczego BSP jest rozważany w [8, 9]. W tej pracy jest zdefiniowana wersja problemu, w której BSP odwiedza wszystkie cele i wraca do punktu startowego misji, wybierając trasę, która jest możliwie najmniej narażona na detekcję radaru o określonym zasięgu i lokalizacji.
4. Zagadnienie multi-routingu BSP, które jest definiowane przy założeniu dostępności wielu dronów gotowych do inspekcji obiektów, pojawiło się po raz pierwszy w [10], wówczas w wersji zagadnienia teoretycznego, gdyż nie istniały wtedy rzeczywiste konstrukcje tzw. roju dronów. W wersji multi-routing BSP zbiór wszystkich obiektów ma być z założenia odwiedzony przez zbiór dronów, z których każdy ma narzucone ograniczenia takie jak maksymalny czas lotu i zasięg. W [11] pojawiło się dodatkowo kryterium minimalizacji ryzyka nieukończenia misji przez którykolwiek BSP z roju.

5. W [12], multi-routing BSP trasy został zdefiniowany jako klasyczny problem VRP (ang. *Vehicle Routing Problem*) czyli taki, w którym na inspekcję danej puli obiektów jest wysyłana możliwie najmniejsza liczba BSP, a suma czasu długości wszystkich tras jest również minimalna.
6. W rozwiązaniach przytoczonych wyżej problemów zostały zastosowane algorytmy dokładne w przypadku małej liczby obiektów (do 10) oraz aproksymacyjne (heurystyczne) dla liczby obiektów powyżej kilkunastu.
7. W pracy [13] zakładana jest dla multi-routing BSP możliwość przerw w trasie z powodu konieczności zasilenia BSP, a funkcją celu jest odwiedzenie wszystkich obiektów jak najniższym kosztem mierzonym długością trasy nie tylko między obiektami ale również między obiektami i miejscami zasilania drona. Rozwiązanie zostało w tej pracy oparte na metodach VNS (ang. *Variable Neighborhood Search*) i VND (ang. *Variable Neighborhood Descent*).
8. W [13] został przedstawiony Min-Max algorytm mrówkowy, który rozwiązuje taką wersję problemu BSP routing, w której funkcją celu jest maksymalizacja liczby odwiedzonych obiektów
9. W [14] problem planowania misji BSP został pierwszy raz zdefiniowany jako Orienteering Problem w wersji Team czyli w takiej, w której dostępnych jest kilka dronów. Przedstawionym rozwiązaniem był algorytm mrówkowy.
10. Należy zaznaczyć iż nie znaleziono w literaturze specyfikacji dynamicznej wersji problemu planowania trasy ani w wersji pojedynczego BSP ani dla multi- BSP. We wszystkich analizowanych źródłach literaturowych, opisywaną wersją problemu generowania trasy drona był zbiór statycznych obiektów będących celem obserwacji dokonanej przez BSP.

2.2. Specyfikacja problemu

Problem generowania optymalnej trasy BSP z celem wykonania rejestracji video obiektów niebezpiecznych dla statku morskiego to nowa, niezdefiniowana dotąd w literaturze odmiana problemu komiwojażera z profitami i ograniczeniami długości trasy, znana z literatury pod nazwą Orienteering Problem (OP), [15]. W klasycznej wersji OP dany jest:

Graf pełny z wagami i z wyróżnionym wierzchołkiem startowym. Wartość wag to czas realizacji elementarnego odcinka trasy między wierzchołkami definiującymi krawędź grafu. Wartość wag (czas realizacji elementarnego odcinka trasy między wierzchołkami grafu) jest stały. Wszystkie wierzchołki grafu mają przypisane stałe wartości priorytetów dla węzłów grafu. Czas całkowity realizacji wynikowej trasy nie może przekroczyć zadanego ograniczenia. Wierzchołek startowy jest jednocześnie wierzchołkiem końcowym trasy. Rozwiązaniem OP jest trasa, która rozpoczyna

się w wybranym wierzchołku startowym, której łączny czas realizacji nie przekracza zadanego ograniczenia, a trasa wynikowa zawiera węzły, których suma priorytetów jest możliwie największa.

W przedmiotowej wersji problemu, który będziemy nazywali Dynamic Orienteering Problem (DOP), węzłami grafu są lokalizacje, do których musi dotrzeć BSP, aby wykonać efektywną rejestrację video pojedynczego obiektu lub grupy obiektów. Bardzo ważne jest to, że w odróżnieniu od założeń dla OP, lokalizacje węzłów grafu nie są stałe w czasie i każdy węzeł grafu (łącznie z węzłem startowym, który jest jednocześnie węzłem końcowym trasy) ma przypisany wektor ruchu. Zmienność położenia węzłów grafu wynika z faktu przemieszczania się obserwowanych obiektów na morzu, które poddane są obserwacji video przez BSP. Przemieszcza się również statek morski, z którego BSP wystartował czyli punkt startowy i końcowy trasy. Wagami krawędzi pełnego grafu lokalizacji jest czas lotu BSP między lokalizacjami. Ograniczenie długości trasy wynika z maksymalnego zasięgu BSP wynikającego z pojemności akumulatorów, które stanowią zasilanie drona. Priorytety węzłów są wyznaczane przez system nawigacyjny i zależą od poziomu ryzyka kolizji z danym obiektem lub podzbiorem obiektów. Na rysunku 2.5 została zaprezentowana przykładowa, pogładowa sytuacja rozmieszczenia obiektów potencjalnie niebezpiecznych dla statku. Zostały również zaznaczone pozycje wyjściowe statku i BSP. Zakłada się dla uproszczenia, że kursy i prędkości obiektów obserwowanych, drona i statku są stałe. Zakłada się także, że znane są wektory ruchu obiektów i priorytety wynikające z ryzyka kolizji statku z tymi obiektami. Obiekty oraz ich wektory ruchu zostały wykryte przez system wizyjny zainstalowany na dronie na uwięzi. Wektory ruchu i lokalizacje obiektów zostały również przesłane do systemu nawigacyjnego. Z kolei, system nawigacyjny wyznaczył, na podstawie danych wizyjnych oraz danych ze standardowych urządzeń nawigacyjnych, takich jak AIS i radar, priorytety obserwacji obiektów. Priorytety zależą od ryzyka kolizji z obiektem.

Sytuacja przedstawiona na rysunku 2.5 w praktyce morskiej może zdarzyć się niezwykle rzadko. Dwanaście statków, które mają zbieżne kursy na niewielkim obszarze to jednak prawdopodobny układ, który musi być uwzględniony w rozwiązaniu.

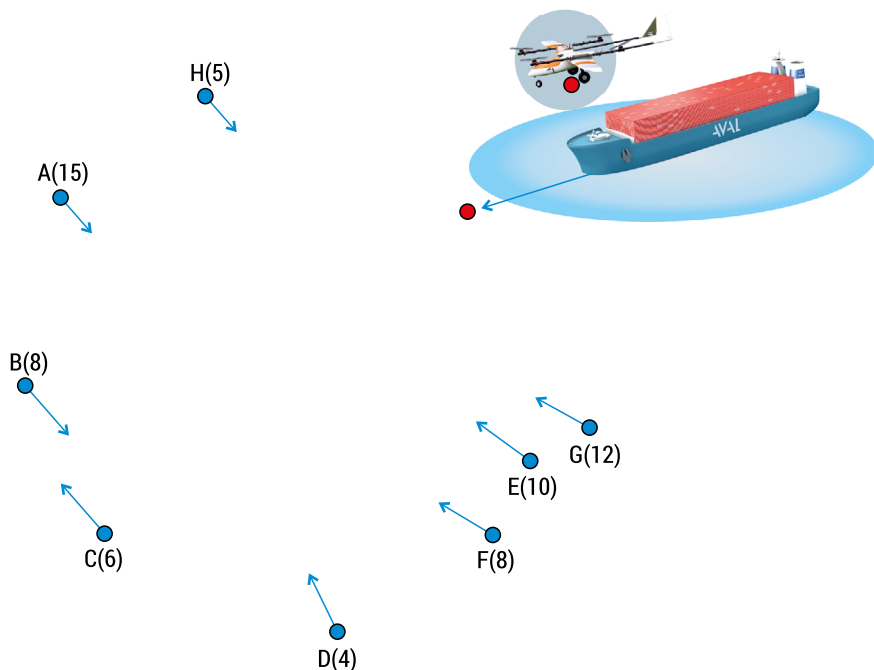
Wynikiem rozwiązania problemu DOP jest podzbiór obiektów wybranych do obserwacji przez BSP typu (gdyby obserwacja wszystkich obiektów nie była możliwa ze względu na ograniczenia) oraz kolejność odwiedzania tych obiektów. Wynikowa trasa ma spełniać kryterium ograniczenia jakim jest czas realizacji trasy i osiągnąć wynik w postaci największej sumy priorytetów obiektów wybranych do trasy.

Dokładna specyfikacja problemu przedstawia się następująco.

Dane wejściowe:

- Zbiór $O\{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ obiektów niebezpiecznych dla statku własnego W . Każdy z obiektów o_i ma znany wektor ruchu, znaną stałą prędkość v_i i priorytet p_i .
- Trajektorja t_w statku własnego W . Trajektorja to ciąg wektorów ruchu statku własnego, na podstawie której można wyznaczyć lokalizację W w dowolnej chwili czasu. Zakładamy, że prędkość W wynosi v_w i jest stała w trakcie realizacji trasy BSP.

- Max – maksymalny czas lotu BSP, który jest jednocześnie maksymalnym czasem realizacji trasy.
- V – prędkość lotu BSP.



RYSUNEK 2.5. Przykład układu statków i obiektów niebezpiecznych dla statku, oznaczonych literami od A do H

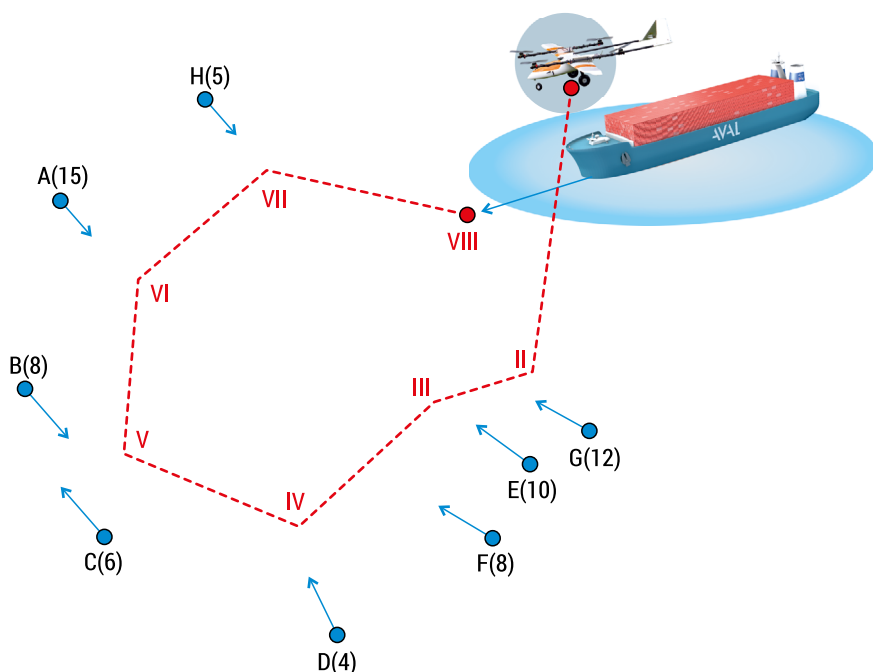
Dane wynikowe:

- Trasa R BSP, zdefiniowana jako ciąg obiektów ze zbioru O , których suma priorytetów jest możliwie największa. Trasę R rozpoczyna punkt startowy, w którym BSP rozpoczyna misję, startując z lądowiska statku własnego i punkt końcowy W , w którym BSP ląduje na statku, po zakończeniu misji. Czas realizacji (czas lotu BSP) nie może przekroczyć Max .

Założenia:

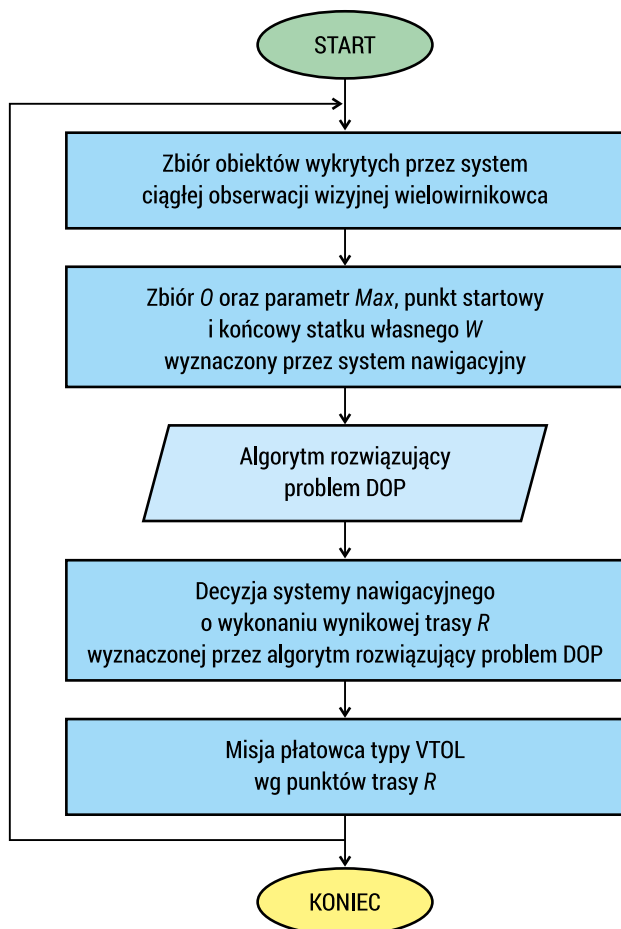
- Odległość BSP od obiektu, który jest obserwowany jest pomijana i wynosi 0.
- Czas rejestracji video jest pomijany i wynosi 0.
- Prędkość W jest stała.
- Wektory ruchu obiektów ze zbioru O są niezmiennie w czasie.
- Czas startu i lądowania BSP jest pomijany i nie zmniejsza ograniczenia Max .
- Punkty trasy R mają lokalizację, które wynikają z wektorów ruchu obiektów zbioru O oraz punktu startowego i końcowego W .

- Łączny profit trasy R jest sumą priorytetów obiektów ze zbioru O , dla których może być wykonana efektywna rejestracja video wszystkich obiektów wybranych do trasy R . Efektywna rejestracja video zapewnia możliwość klasyfikacji obiektu niebezpiecznego oraz ustalenie jego wektora ruchu z błędem nie większym niż 20%.
- Priorytety obiektów niebezpiecznych są ustalane przez system nawigacyjny i mają wartości odwrotnie proporcjonalne do wartości współczynnika ryzyka kolizji, który może być wyznaczany dowolną metodą [16] niezależną od algorytmu rozwiązującego DOP.



RYSUNEK 2.6. Wynikowa trasa R dla danych wejściowych z Rys. 5. Trajektoria złożona punktów I-VIII daje możliwość efektywnej rejestracji wizyjnej wszystkich obiektów od A do H, przy czym punkt III trasy zapewnia efektywną rejestrację obiektów E i F a punkt V – obiektów C i B

Na schemacie 2.1 zostały zawarte główne etapy wykrywania obiektów niebezpiecznych przy wykorzystaniu wielowirnikowca i płatuwa. Projekt AVAL jest aktualnie na etapie komercjalizacji wyników. Poszczególne elementy technologii AVAL: system autonomicznej nawigacji morskiej, system wizyjny oraz konstrukcje dronów morskich zostały przetestowane w warunkach laboratoryjnych, quasirzeczywistych i rzeczywistych [17].



SCHEMAT 2.1. Etapy procesu wykrywania obiektów niebezpiecznych dla statków morskich przez system wizyjny zamontowany na BSP wykorzystywanych w projekcie AVAL

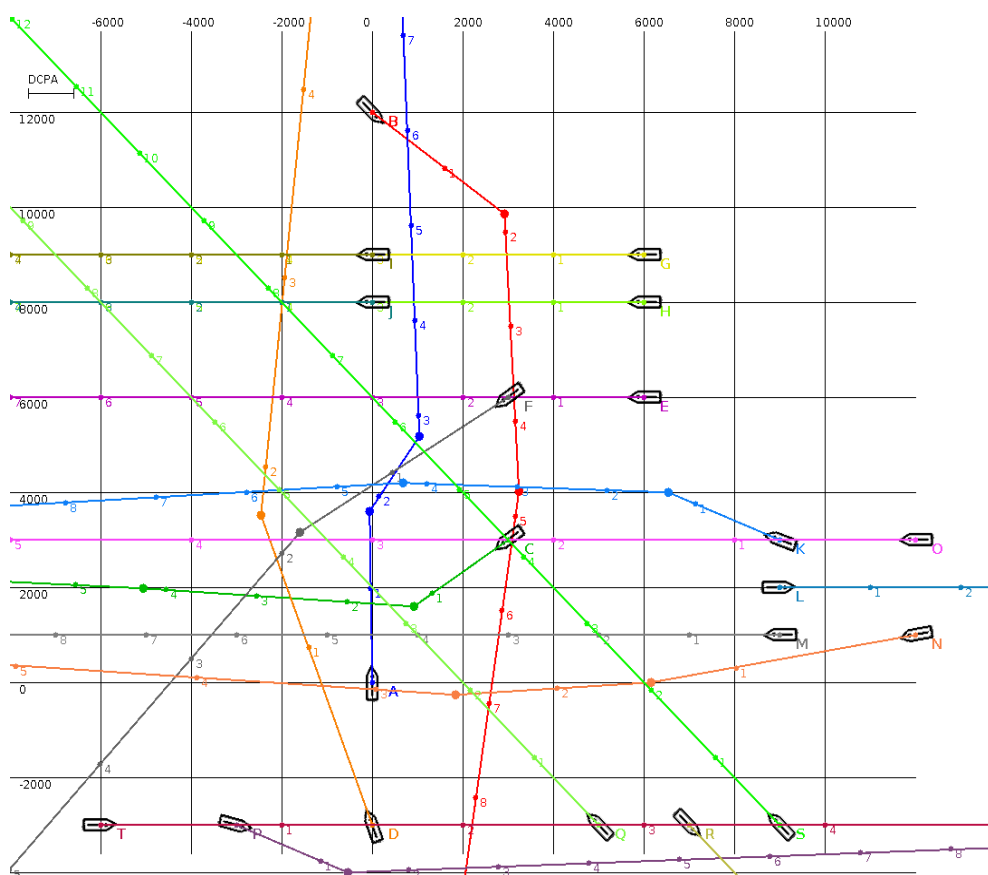
Ze względu na konieczność ochrony własności intelektualnej, która w obszarze algorytmów jest w praktyce niepatentowalna, w niniejszej pracy zostaną przedstawione jedynie wyniki testów algorytmu rozwiązującego problem DOP (rozdział 3).

2.3. Wyniki testów algorytmu w warunkach rzeczywistych

Testy algorytmu rozwiązującego problem DOP zostały przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych oraz quasi – rzeczywistych, na danych historycznych pochodzących z rejsu promem Wolin, w czasie którego testowana była komunikacja między statkami autonomicznymi.

Warunki laboratoryjne testów polegały na ustaleniu wszystkich danych wejściowych, które mają niezerowe prawdopodobieństwo wystąpienia na morzu, w sytuacjach zagrożenia kolizją. Na rysunku 2.7 został przedstawiony przykładowy układ wyniku symulacji 20 statków, który zawiera liczne sytuacje kolizyjne. Założono w czasie testu, że wszystkie obiekty należą do zbioru obiektów wymagających obserwacji *O*. Założono również, że statkiem własnym jest statek *B* a priorytety obiektów zbioru *O* zostały wyznaczone wg algorytmu zaprezentowanego w [18], który w pierwszej kolejności uwzględnia wartość CPA a w drugiej TCPA względem statku własnego. Natomiast Max wynosi 8 minut a prędkość BSP – V wynosi 120 km/h.

Na rysunku 2.7 widoczne są wynikowe trajektorie antykolizyjne statków z układu świadczące o tym, że rozwiązanie wszystkich sytuacji jest możliwe, o ile wszystkie obiekty będą na czas wykryte i określone co do lokalizacji i wektora prędkości.



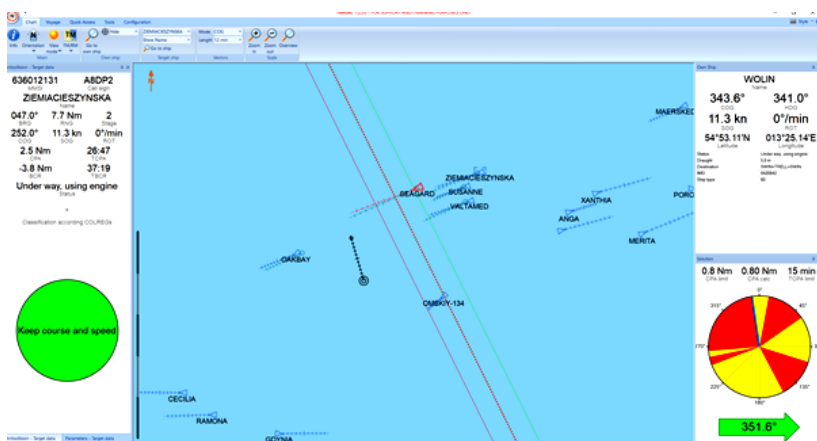
RYSUNEK 2.7. Układ 20 statków w sytuacji kolizyjnej

W tabeli 2.1 zostały umieszczone dane wejściowe i wynikowe układu z rysunku 2.7. Przedstawiona sytuacja jest przykładem bardzo dużego zagęszczenia ruchu statków morskich np. w ciśnieniu. Charakterystyczne są małe odległości między jednostkami.

TABELA 2.1. Dane wejściowe i wynikowe laboratoryjne dla sytuacji z rysunku 2.7

Statek	Wektor ruchu (x, y , kurs, prędkość)	Priorytet	Pozycja w trasie R
A	(0, 0, 000, 5)	1	8
B=W	(0, 12000, 180, 5)	-	1=9
C	(3000, 3000, 270, 5)	2	0
D	(0, -3000, 000, 10)	3	0
E	(6000, 6000, 270, 5)	15	4
F	(6000, 6000, 270, 5)	4	0
G	(6000, 9000, 270, 5)	17	2
H	(6000, 8000, 270, 5)	16	3
I	(0, 0, 9000, 270, 5)	14	0
J	(0, 8000, 270, 5)	13	0
K	(3000, 9000, 270, 5)	8	5
L	(2000, 9000, 270, 5)	6	0
M	(1000, 9000, 270, 5)	7	7
N	(1000, 120000, 270, 10)	11	0
O	(3000, 9000, 270, 5)	12	0
P	(0, -3000, 000, 10)	9	0
Q	(5000, -3000, 315, 5)	20	0
R	(7000, -3000, 315, 5)	5	0
S	(9000, -3000, 315, 5)	19	6
T	(-6000, -3000, 090, 10_	10	0

Wartość 0 jako pozycja w trasie R oznacza, że obiekt nie należy do wynikowej trasy, gdyż jego dodanie spowodowałoby przekroczenie limitu czasu realizacji lotu.



RYСУNEK 2.8. Przykładowe rzeczywiste dane testowe pochodzące z systemu NAVDEC [18, 19].

W tabeli 2.2 zostały umieszczone dane wejściowe i wynikowe układu z rysunku 2.8. Założono, że statkiem własnym *W* jest Wolin, maksymalny czas misji BSP wynosi $Max = 10$ minut a prędkość $V = 130$ km/h. W tym przypadku priorytety wynikają wprost z przepisów MPDM oraz wartości CPA. Przedstawiona sytuacja jest charakterystyczna dla sytuacji kolizyjnych na wodach otwartych: jednostek jest niewiele i są od siebie rozmieszczone stosunkowo daleko. Z jednej strony daje to możliwość realizacji misji z małą liczbą obserwowanych obiektów, ale z drugiej misja ma dużą długość.

TABELA 2.2. Dane wejściowe i wynikowe algorytmu rozwiązującego problem DOP

Statek	Wektor ruchu ($x(latitude)$, $y(and\ longitude)$, kurs (COG) , prędkość (kn))	Priorytet	Pozycja w trasie wynikowej <i>R</i>
ZIEMIA CIESZYŃSKA	(54° 58' 68"N , 013° 36' 79"E, 252, 11.3)	3	3
SEAGARD	(54° 58' 20"N , 013° 32' 42"E, 154, 248, 17.2)	4	2
OAKBAY	(54° 54' 76"N , 013° 21' 09"E, 239, 9.7)	1	0
SUSANNE	(54° 57' 89"N , 013° 35' 02"E, 253, 8.2)	5	5
VALTAMED	(54° 57' 33"N , 013° 35' 64"E, 251, 10.6)	2	4
WOLIN = W	(54° 53' 11"N , 013° 25' 14"E, 341, 11.3)	-	1=6

We wszystkich testach laboratoryjnych oraz przeprowadzonych na danych pozyskanych w warunkach quasi-rzeczywistych wynikowa trasa była możliwa do realizacji ze względu na ograniczenia związane z czasem trwania misji oraz czasem realizacji samego algorytmu, który nie przekroczył 10 sekund.

Podsumowanie

Największym wyzwaniem dla przedstawionego algorytmu jest fakt, że punkt startu BSP nie jest jednocześnie punktem końca jego trasy tak jak opisano to w wyżej cytowanej literaturze. Jest to również największe osiągnięcie badawcze. Jednocześnie należy zwrócić uwagę, że przyjęte założenie o zachowaniu obecnych kursów i prędkości, znacznie ułatwia rozwiązanie problemu. Dlatego w ramach kolejnych badań zostaną opracowane algorytmy, które uwzględnią zmieniające się parametry ruchu jednostek na akwenie, a w dalszej przyszłości również predykcję ich ruchu.

Obecne badania mają na celu wykorzystanie faktu iż punkt końcowy trasy (statek własny) zbliża się do innych obiektów niebezpiecznych. Daje to w efekcie relatywne zwiększenie zasięgu BSP. Teoretycznie jako ostatni obiekt do obserwacji można by wybrać statek, którego odległość minięcia ze statkiem własnym wynosi 0 Mm. Wtedy nijako BSP zostanie „przywieziony” do punktu końcowego. Jednakże to rozwiązanie nie jest akceptowalne z punktu widzenia unikania kolizji. Nie eliminuje

to możliwości wykorzystania zbliżania się obiektów, do optymalizacji trasy. Można przy tym wziąć pod uwagę przepisy MPDM. Przyjmując wysoki poziom uogólnienia, statki obce znajdujące się z prawej burty statku własnego, mają pierwszeństwo drogi. Innymi słowy, statek własny powinien im ustąpić z drogi, a obcy powinien zachować parametry ruchu. W sytuacji, gdy z lewej burty statku własnego są inne statki, to właśnie one powinny podjąć manewr w celu uniknięcia kolizji. Tak jak wspomniano jest to duże uogólnienie. Przepisy MPDM są bardziej skomplikowane. W celu ich automatycznej interpretacji, można wykorzystać np. system NAVDEC. Natomiast uogólnienie służyło w tym kontekście do zobrazowania potencjalnych rozwiązań i algorytmów, które można by zastosować w celu optymalizacji trasy. Wydaje się, że najpierw należałoby „odwiedzić” obiekty znajdujące się z lewej burty statku własnego. Potem (zgodnie z przepisami w odległości pomiędzy 8, a 3 Mm) zmieniać one parametry ruchu, co może utrudnić dotarcie do nich, czy też nadmiernie wydłużyć trasę. Należy pamiętać, że obiekty te nie posiadają transpondera AIS, są trudno wykrywalne dla radaru, więc ich bieżące monitorowanie jest bardzo utrudnione. Po obserwacji obiektów lewej burty, można weryfikować obiekty w prawej burty, które dłużej zachowują parametry swojego ruchu, gdyż są zobligowane do tego przez przepisy MPDM. Jednakże, aby nadmiernie nie nadwyreżać cierpliwości jednostek zobowiązanych do zachowania swojego kursu i prędkości, wypadałoby podjąć manewr uniknięcia kolizji najpóźniej w odległości 3-4 Mm. W ten sposób, nijako od końca, można by planować trasę BSP.

W kolejnych podejściach zostaną również uwzględnione relacje między statkami obcymi. Mogą one rozpocząć manewry uniknięcia kolizji, które nie są związane ze statkiem własnym, co dodatkowo komplikuje planowanie trasy BSP.

Opracowany w ramach projektu badawczego i przedstawiony powyżej algorytm to pierwszy krok w kierunku pełnego rozwiązania problemu planowania trasy BSP współpracującego z autonomiczną jednostką nawodną – MASS (*Maritime Autonomous Surface Ship*). MASS jest obecnie głównym tematem obrad Komitetu Bezpieczeństwa Morskiego Międzynarodowej Organizacji Morskiej (Maritime Safety Committee (MSC) of International Maritime Organization (IMO)). W świetle przedstawionej na rysunku 2.1 perspektywy wprowadzenia zdalnie sterowanych, a ostatecznie autonomicznych jednostek, właściwym pytaniem jest nie czy, ale kiedy oko nawigatora na statku zostanie zastąpione okiem kamery? Dlatego tak ważne jest rozwiązanie problemu planowania trasy, aby w momencie, gdy IMO powie „tak” autonomicznym jednostkom, mieć gotowe propozycje produktów.

Bibliografia

- [1] avalproject.pl [dostęp:24.01.2021]
- [2] Felski A., Zwolak K., *The Ocean-Going Autonomous Ship – Challenges and Threats*, “Journal of Marine Science and Engineering” 2015, DOI: 10.3390/jmse8010041
- [3] Rymarz W., *Międzynarodowe prawo drogi morskiej – w zarysie*. wyd. II, 2015, ISBN: 978-83-62227-56-3
- [4] <https://www.septentrio.com/en/insights/top-3-positioning-challenges-autonomous-marine-navigation> [dostęp 24.01.21]
- [5] Levy D., Sundar K., Rathinam S., *Heuristics for Routing Heterogeneous Unmanned Vehicles with Fuel Constraints*, “Mathematical Problems in Engineering”, 2014, vol. 2014, Article ID 131450
- [6] Ousingsawat J., *UAV Path Planning for Maximum Coverage Surveillance of Area with Different Priorities*, “The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 2006
- [7] Hernández-Hernández L., Tsourdos A., Shin H.-S., Waldock A., *Multi-objective UAV routing*, “International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)”, 2014, s. 534–542
- [8] Tezcaner D., Köksalan M., *An Interactive Algorithm for Multi-objective Route Planning*, “Journal of Optimization Theory and Applications”, 2011, 150, s. 379–394
- [9] Tezcaner Öztürk D., Köksalan M., *An interactive approach for biobjective integer programs under quasiconvex preference functions*, “Annals of Operations Research”, 2016, 244, s. 677–696
- [10] Korkmaz Y., İyibilgin O., Fındık F., *Geçmişten günümüze insansız hava araçlarının gelişimi*, “SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg”, 2015, nr 20
- [11] Lamont G.B., Slear J.N., Melendez K., *UAV Swarm Mission Planning and Routing using Multi-Objective Evolutionary Algorithms*, “IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making”, 2007, s. 10–20
- [12] Peng X., Gao X., *A Multi-objective Optimal Approach for UAV Routing in Reconnaissance Mission with Stochastic Observation Time*, Foundations of Intelligent Systems, ISMIS 2008, 2008, s. 246–255
- [13] Levy D., Sundar K., Rathinam S., *Heuristics for Routing Heterogeneous Unmanned Vehicles with Fuel Constraints*, “Mathematical Problems in Engineering, Special Issue: High-Performance Computing Strategies for Complex Engineering Optimization Problems”, 2014
- [14] Karakaya M., *UAV Route Planning for Maximum Target Coverage*, “Computer Science & Engineering: An International Journal (CSEIJ)”, 2014, 4/1, s. 27–34
- [15] Yakıcı E., *Solving location and routing problem for UAVs*, “Computers & Industrial Engineering, December 2016, 102, s. 294–301
- [16] Karbowska-Chilińska J., Koszelew J., Ostrowski K., Zabielski P. *Genetic Algorithm vs. Local Search Methods Solving Orienteering Problem in Large Networks*, “16th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems : KES Springer-Verlag, (Lecture Notes in Computer Science; Vol. : Lecture Notes in Artificial Intelligence), 2012, s. 28-38
- [17] <https://www.youtube.com/channel/UCvAmbMmtxEKr6XMOslCq0DA> [dostęp 24.01.21]
- [18] Cunlong F., Wróbel K., Montewka J., Gil M., Wan C., Zhang D., *A framework to identify factors influencing navigational risk for Maritime Autonomous Surface Ships*, “Ocean Engineering”, 2020, 4/15, s. 107-188

- [19] Koszelew J., Karbowska-Chilińska J., Ostrowski K., Kuczyński P., Kulbiej E., Wolejsza, Beam Search Algorithm for Anti-Collision Trajectory Planning for Many-to-Many Encounter Situations with Autonomous Surface Vehicles, "Sensors, the Special Issue Sensors and Sensor's Fusion in Autonomous Vehicles, 2020, nr 20(15)
- [20] navdec.com [dostęp: 24.01.21]
- [21] Wolejsza P., Koszelew J., *Implementation of Anti-collision System on M/F WAWEL*, „Annual od Navigation” 2017, 24, s. 327-346.

Abstract

The problem of UAV optimal route generation used for dangerous objects detection in autonomous maritime navigation systems

The problem which is considered in the paper was defined and resolved as part of the AVAL R&D project [1], concerning the autonomous maritime navigation system supported by the image analyzes recorded by UAV vision system. The UAV used in the AVAL system will be an equipment of autonomous vessel. The UAV will perform an autonomous mission to execute video registration of dangerous objects. The image registered during the mission allows detection, identification and geolocation of hazardous objects, which are difficult to detect or not incompatible by standard navigation devices, such as radar or AIS (Automatic Identification System). The problem the UAV optimal route generation in the context of the described application is an original orienteering problem (OP) in a version that has not been defined in the literature yet. As part of the work, the definition of the problem and the results of the heuristic algorithm developed as a result of the project are presented. Due to the need to maintain confidentiality in the scope of the results of the R & D project, in which the solution was created, it is not possible to present a pseud-code of the solution or detail description.

Keywords: UAV, autonomous maritime navigation, optimal video registration route, orienteering problem.