

Anna Miller

Akademia Morska w Gdyni

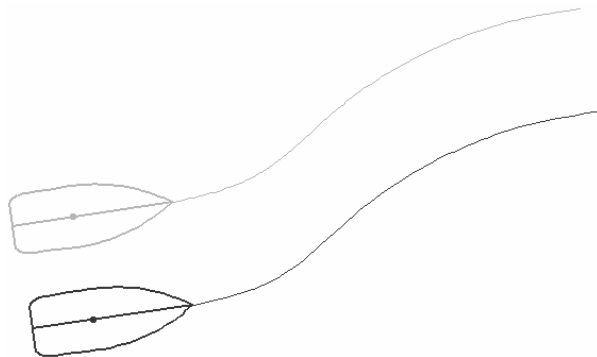
RUCH RÓWNOLEGŁY DWÓCH JEDNOSTEK – ZJAWISKA FIZYCZNE I ICH WPŁYW NA PROCES STEROWANIA, SPOSOBY OKREŚLANIA WZAJEMNEGO POŁOŻENIA STATKÓW

W artykule omówiono manewr ruchu równoległego dwóch statków, jak również praktyczne sposoby jego wykorzystania. Zwrócono uwagę zarówno na manewr jako całość, jak i na jego poszczególne fazy oraz występujące w nich oddziaływania hydrodynamiczne pomiędzy statkami. Wyszczególniono najbardziej newralgiczne momenty, w których działanie układu regulacji automatycznej powinno być szczególnie sprawne, a sam układ sterowania bardzo czuły na niewielkie zmiany rzeczywistych (mierzonych i obliczanych) wielkości sterujących. W pracy wskazano i omówiono przykładowe bezстыkowe metody pomiaru wzajemnego położenia jednostek na wodzie, z podkreśleniem ich wad i zalet. Na tej podstawie dokonano wyboru metody najmniej czulej na zakłócenia zewnętrzne, a przez to najbardziej wiarygodnej i najkorzystniejszej do zastosowania w projektowanym układzie regulacji. Ponadto zostały omówione podstawowe zależności funkcjonalne, wykorzystywane w układzie regulacji wzajemnego położenia dwóch jednostek, będących w ruchu równoległym. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacji występujących oddziaływań hydrodynamicznych. Zwrócono uwagę na korelację pomiędzy parametrami jakościowymi sprzętu pomiarowego a dokładnością wyznaczania odległości i kąta pomiędzy dwoma statkami.

Słowa kluczowe: ruch równoległy dwóch statków, oddziaływania hydrodynamiczne.

WSTĘP

Konieczność dokonywania przeładunku niektórych towarów na morzu, wykonywania prac podwodnych, hydrograficznych, badań oraz trałowania w parze wykonywanych przez dwa statki znajdujące się w bliskiej odległości od siebie wymaga ustawienia dwóch jednostek równoległe do siebie w określonej odległości. Niekiedy konieczne jest, aby taka para jednostek nawodnych, pracująca wspólnie, była w stanie dokonać również prostych manewrów, takich jak: zwrot o niewielki kąt, zwolnienie, przyspieszenie, zatrzymanie, co pokazano na rysunku 1. Powyższe manewry, bardzo proste do wykonania dla każdego ze statków osobno, w znaczący sposób ulegają komplikacji, gdy są wykonywane przez dwie jednostki ściśle współpracujące. Powodem tego są oddziaływania hydrodynamiczne występujące pomiędzy statkami, związane ze zmianą prędkości przepływu strumienia wody pomiędzy nimi.



Rys. 1. Podstawowe manewry wykonywane przez statki poruszające się równolegle w parze

Fig. 1. Basic maneuvers carried out by pair of ships moving in parallel

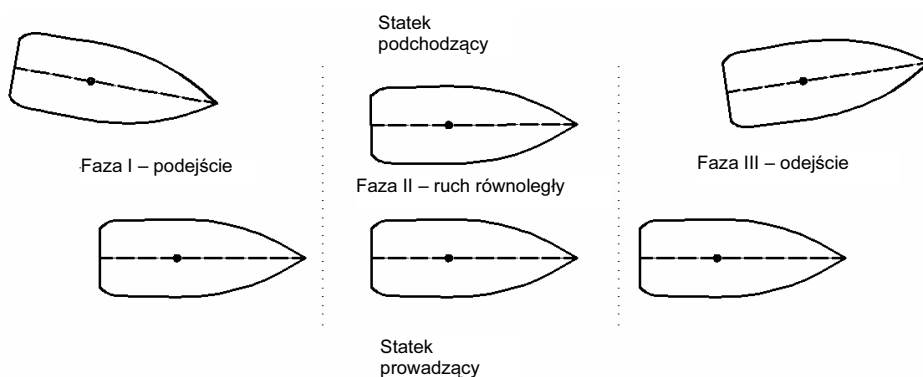
Dla zachowania bezpieczeństwa podczas wykonywania manewru, którym jest ruch równoległy, należy rozpatrzyć, jakie siły i momenty występują w poszczególnych fazach ruchu oraz jaki mają one wpływ na zachowanie każdego ze statków w danej fazie manewru. Ponadto kluczowe jest określenie dokładnego wzajemnego położenia obu statków. Bardzo ważny element stanowi również, poza dużą dokładnością, ciągłość ustalania wzajemnej pozycji dwóch jednostek. Dodatkowo nie bez znaczenia jest czułość układu sterowania na zmiany zmiennych sterujących, takich jak odległość, różnica kursów oraz prędkość, szczególnie w najbardziej newralgicznych momentach, czyli takich, w których występują największe siły ssące i momenty skręcające [7].

1. RUCH RÓWNOLEGŁY DWÓCH JEDNOSTEK, FAZY RUCHU

Dwa statki poruszające się równoległe przede wszystkim nie powinny się zderzyć, jak również nie powinno dojść między nimi do sytuacji w inny sposób zagrażającej bezpieczeństwu załóg i urządzeń przeładunkowych, samego ładunku oraz innych urządzeń badawczych lub trału, znajdujących się między burtami statków podczas wykonywania określonych zadań. Z powyższych powodów ważne jest rozpatrzenie poszczególnych faz manewru.

Cały manewr ruchu równoległego można podzielić na trzy etapy: podejścia, ruchu właściwego oraz odejścia, co ilustruje rysunek 2. W pierwszej fazie konieczne jest dostosowanie prędkości dwóch jednostek w taki sposób, żeby statek podchodzący (ang. *approaching ship*) do statku prowadzącego (ang. *guide ship*) poruszał się z niewiele większą prędkością, w tym samym kierunku. Należy monitorować ich wzajemne położenie i reagować w taki sposób, aby nie zbliżały się zbyt szybko do siebie oraz żeby różnica ich kursów malała do zera. W drugiej fazie – ruchu właściwym ważne jest zachowanie równoległości statków oraz równych prędkości. Należy również doprowadzić do sytuacji, w której śródkręcia obu

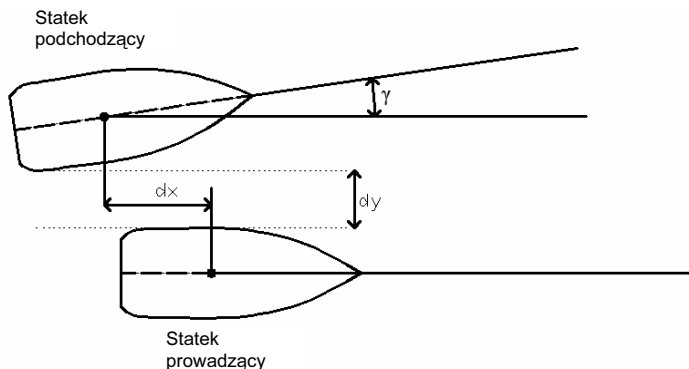
jednostek znajdują się na jednej linii. W trzeciej fazie oba statki powinny powrócić na swój pierwotny bądź też inny określony kurs. Ważne jest zachowanie odpowiedniej odległości pomiędzy jednostkami i uwagi na środek obrotu statku podchodzącego, co uniemożliwia im zderzenie lub otarcie. Na tym etapie konieczne jest zachowanie prędkości i kursu statku prowadzącego, a manewrowanie jedynie kursem i prędkością statku odchodzącego.



Rys. 2. Fazy ruchu równoległego dwóch statków: podejście, ruch właściwy oraz odejście

Fig. 2. Three phases of the ships parallel motion: approaching, proper motion, departure

Parametry ruchu, które są wykorzystywane w procesie sterowania, można podzielić na dwie grupy. Pierwsze odnoszą się do poszczególnych jednostek i są to: prędkość oraz kurs. W skład drugiej grupy wchodzi takie parametry ruchu, jak: odległość poprzeczna pomiędzy elementami statków znajdującymi się najbliżej siebie (dy), odległość wzdłużna pomiędzy śródkręciami (dx) oraz różnica kursów obu statków (γ), co ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Wzajemne ustawienie statków podczas manewru ruchu równoległego, parametry charakteryzujące względne ustawienie jednostek

Fig. 3. Alignment between ships during parallel motion, parameters characterizing the units setting

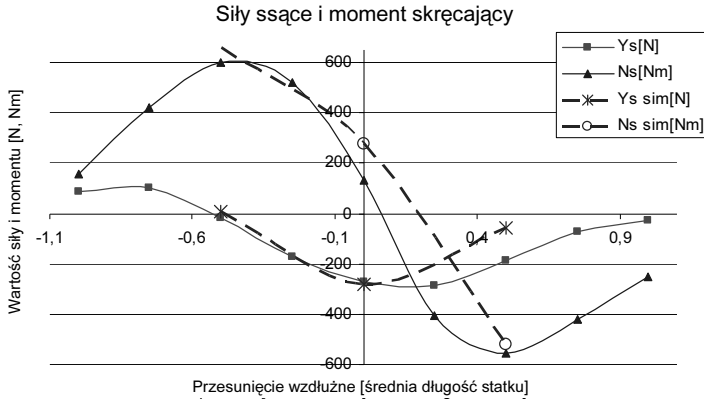
Obie grupy parametrów są równie ważne i wykorzystywane w procesie sterowania równoległego parą statków. Takie podejście wynika z przyjętych następujących założeń: statek prowadzący porusza się z ustaloną prędkością, ustalonym kursem, i jest on inicjatorem wszystkich manewrów. Natomiast statek podchodzący jest jednostką, która powinna się dostosować do zmian prędkości i kursu oraz podejść i odejść od statku prowadzącego (w fazie I oraz III) z zachowaniem warunków bezpieczeństwa. Parametry z pierwszej grupy są to dane pochodzące ze statkowych urządzeń elektronawigacyjnych, takich jak GPS, log oraz żyrokompas. W przypadku parametrów wspólnych, dotyczących pary statków (II grupa), istnieje konieczność obliczania ich, z wykorzystaniem złożonych algorytmów, w czasie rzeczywistym oraz przesyłania na bieżąco do układu sterowania automatycznego.

Zadaniem układu sterowania automatycznego ruchem dwóch statków jest utrzymanie stałej odległości poprzecznej (dy), zbliżonej do zera odległości wzdłużnej pomiędzy śródkrećmi statków (dx), jak również bliskiej zeru różnicy kursów (γ). Korekty wyżej wymienionych parametrów układ sterowania automatycznego może dokonać poprzez zmianę nastaw silnika głównego oraz wychylenia płetwy sterowej, przeprowadzanych niezależnie na każdym ze statków.

2. ODDZIAŁYWANIA HYDRODYNAMICZNE MIĘDZY KADŁUBAMI ORAZ ICH WPŁYW NA PROCES STEROWANIA

Statek porusza się na granicy dwóch ośrodków, jakimi są woda i powietrze. Zachowuje pływalność dzięki równoważącym się siłom ciężkości oraz wyporu, które są zależne między innymi od masy jednostki oraz gęstości wody. Statek musi zachować pływalność zupełnie niezależnie od dopuszczalnego stanu załadowania oraz rodzaju wód, po których się porusza. Stąd wynika konieczność odpowiedniego rozkładu masy w jego kadłubie. W wypadku, gdy jednostka nie porusza się, np. stoi na kotwicy lub jest przycumowana do nabrzeża, rozważane są jedynie zależności hydrostatyczne. W przypadku kadłuba poruszającego się po wodzie ważną rolę odgrywają również zależności hydrodynamiczne, związane z przepływem cieczy wokół kadłuba. Ciecżą opływającą kadłub jest zarówno woda (w części podwodnej), jak i powietrze (w części nawodnej). Oddziaływania międzycząsteczkowe w powietrzu są znacznie słabsze niż w wodzie ze względu na zdecydowanie mniejszą gęstość i lepkość powietrza. Gdy dwa statki poruszają się w niedużej odległości od siebie, to występują między nimi siły ssące i momenty skręcające. Są one wynikiem nieregularnego rozkładu ciśnienia wokół kadłuba poruszającego się statku [9].

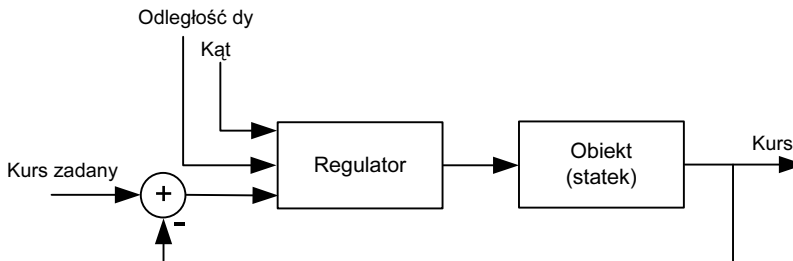
Badania symulacyjne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem modeli statków wykonanych w skali 1:24, których właścicielem jest Fundacja Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska. Wartość i kierunek oddziaływań są uzależnione od wzajemnego położenia jednostek [4, 7], co przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Siły ssące i momenty skręcające oddziaływujące na kadłuby statków znajdujących się w ruchu równoległym [7]

Fig. 4. Suction forces and yaw moment acting on the hulls of ships in parallel motion [7]

Liniami ciągłymi zaznaczono siłę przysysającą poprzeczną (Y_s) oraz moment skręcający (N_s), wyznaczone na podstawie zależności analitycznych opracowanych przez Brixę w [4]. Natomiast liniami przerywanymi zostały zaznaczone wyniki symulacji CFD (*Computer Fluid Dynamics*) z wykorzystaniem metody MES [7]. Jak widać, wyniki są zbliżone i największa siła ssąca występuje, gdy jednostki są ustawione równolegle, a odległość wzdłużna między ich środkami ciężkości (dx) jest zbliżona do zera. Natomiast największy moment skręcający jest obserwowany, gdy statki są przesunięte wzdłużnie względem siebie o około pół długości kadłuba. Wartości bezwzględne siły ssącej nie przekraczają 300 N, a momentu skręcającego – 600 Nm. Wyznaczono je dla pary modeli statków o długościach 13,5 m i 9,64 m oraz wypornościach 22,84 t i 4,89 t. Nie są to duże wartości w porównaniu z wartościami siły wzdłużnej generowanej przez pędniki, jednak nie można stwierdzić, że nie mają wpływu na proces sterowania. Są one powodem zmieniających się w czasie trwania procesu sterowania: odległości pomiędzy burtami obu statków (dy) oraz kąta, będącego różnicą kursów obu statków (γ). Im większe są wartości sił ssących i momentów skręcających, tym szybsze będą zmiany parametrów wejściowych zamkniętego układu sterowania, przedstawionego na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat blokowy zamkniętego układu sterowania ruchem równoległym dwóch statków

Fig. 5. Two vessels parallel motion closed loop control system block diagram

Jest to zamknięty układ regulacji, który został zbudowany przy założeniu stałej prędkości ruchu statku prowadzącego. Ideą budowanego układu sterowania jest dopasowanie parametrów ruchu statku śledzącego do kursu i prędkości statku prowadzącego, przy zachowaniu równoległości kursów obu jednostek oraz stałej (ustalonej) odległości pomiędzy ich burtami. W zamkniętym układzie regulacji automatycznej oprócz uchybu kursu zadanego podawane są również równolegle obliczane odległość oraz kąt.

3. METODY OKREŚLANIA WZAJEMNEGO POŁOŻENIA DWÓCH STATKÓW

W zastosowaniach morskich najpowszechniej wykorzystywanym urządzeniem do określania położenia statków w przestrzeni jest GPS. Minimalna dokładność wskazań dedykowanych odbiorników morskich do zastosowań cywilnych waha się w granicach od 3 do 10 m [5]. Z reguły dokładność ta jest dużo większa i sięga kilkudziesięciu centymetrów. Biorąc pod uwagę możliwość sumowania się błędów, jak również powstawanie większych niepewności związanych z wielodrogowością sygnału dochodzącego do odbiornika, pojawiającą się w wyniku obecności drugiego statku w pobliżu, nie ma możliwości zastosowania odbiornika GPS jako jedyne pewnego urządzenia wykorzystywanego do określenia wzajemnego położenia dwóch jednostek.

Oba statki poruszają się w trzech stopniach swobody, niezależnie od siebie, ponieważ nie są w żaden sposób ze sobą sztywno połączone. W związku z tym istnieje możliwość zastosowania jedynie bezstykowych metod pomiaru kąta i odległości. Pomiar w tych metodach są wykonywane z wykorzystaniem fal dźwiękowych, świetlnych lub mikrofal [8]. Jako urządzenia mogą zostać zastosowane dalmierze ultradźwiękowe, dalmierze laserowe i radar. A za niezależne metody, możliwe do wykorzystania, uznaje się: triangulację laserową, projekcję światła strukturalnego oraz metody fotogrametryczne. Dalmierze laserowe są urządzeniami bardzo precyzyjnymi, dokładność pomiaru jest rzędu milimetra. Niemniej jednak na to, czy światło odbite zostanie odebrane, duży wpływ ma kolor powierzchni, występowanie zabrudzeń oraz zarysowań. Te czynniki są nie do wyeliminowania w przypadku statków, których burty są w różnych, często ciemnych kolorach. Dodatkowo na powierzchni kadłuba zawsze występują rysy i zabrudzenia, powstające w wyniku codziennej eksploatacji statku. W związku z tym istnieje konieczność stosowania ekranów, będących gładką, matową, białą powierzchnią. Dodatkowym problemem jest stożkowy kształt dziobu, który nie daje możliwości oceny, do której burty dokonywany jest pomiar, gdy różnica kursów statków jest duża. Ponadto, gdy zostaną zebrane punkty pomiarowe w celu dokonania skomplikowanej analizy komputerowej, istnieje konieczność dokładnej znajomości kształtu kadłuba. Pomiar z wykorzystaniem światła strukturalnego posiadają ograniczenia zastosowania z powodów fizycznych, takich jak: silne światło słoneczne, ciemny

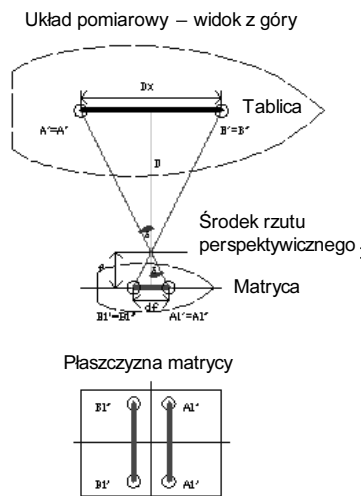
lub porysowany kadłub statku, co wynika z założeń teoretycznych metody [2]. Pomiar radarowy są narzędziem powszechnie wykorzystywanym do oceny wzajemnego położenia jednostek w warunkach morskich. Niemniej jednak w przypadku, gdy statki znajdują się w nieznaczonej odległości od siebie, należy wziąć pod uwagę występowanie sektorów cienia, niezdrowe dla ludzi promieniowanie mikrofalowe, odbicia od wody, jak również skończoną rozdzielczość kątową radaru [3], co dyskwalifikuje możliwość określenia kąta γ i odległości dy za jego pomocą.

Ciekawą metodą dokonywania bezstykowych pomiarów odległości, opierającą się na zdjęciach i stosowaną w systemach wizyjnych, jest fotogrametria. Wykorzystywana jest w niej zasada działania ludzkiego oka. Uwzględniając fizyczne zjawisko paralaksy i perspektywy oraz rzut perspektywiczny, na podstawie odległości pomiędzy dwoma punktami na matrycy aparatu (df) oraz znanej odległości między tymi punktami w rzeczywistości (D_x) oraz znanej wartości ogniskowej obiektywu (f) można określić odległość między obiektem a matrycą aparatu (D), co ilustruje rysunek 6 i opisuje zależność (1). W tej metodzie istnieje możliwość obliczania odległości na podstawie pojedynczego zdjęcia w trybie *off-line* po jego wykonaniu, jak również analizy poszczególnych klatek filmu występujących po sobie w czasie rzeczywistym.

$$\frac{D}{D_x} = \frac{f}{df} \Rightarrow D = \frac{D_x f}{df} \quad (1)$$

gdzie:

- D – odległość między burtami statków [m],
- D_x – odległość rzeczywista między dwoma punktami charakterystycznymi na statku prowadzącym [m],
- df – odległość między punktami w obrazie (na matrycy aparatu) [m],
- f – ogniskowa obiektywu [m].



Rys. 6. Zasada obliczania odległości z wykorzystaniem pomiarów fotogrametrycznych
Fig. 6. The rule for distance calculation with use of the photogrammetric measurements

Zależność, na podstawie której dokonywane są obliczenia, jest bardzo prosta. Dzięki takiemu rozwiązaniu jedynym czasochłonnym elementem algorytmu jest znalezienie charakterystycznych punktów w obrazie wizyjnym. Metoda fotogrametryczna pozwala na wyznaczenie odległości z dokładnością do 2 cm w przypadku odległości pomiędzy matrycą i obiektem wynoszącej 2 m [11]. Algorytm został przetestowany dla odległości od 0 do 2 m, ponieważ, biorąc pod uwagę rozmiary modeli statków, jest to zakres odległości, w których powinien działać poprawnie. W przypadku układu automatycznego sterowania parą statków poruszających się ruchem równoległym taka dokładność jest wystarczająca. Metoda ta jest stosunkowo nieczuła na zmienne oświetlenie (często występujące w sytuacji pomiarów dokonywanych na zewnątrz). Porównując ją z innymi metodami, w których istnieje ryzyko utracenia możliwości pomiaru na czas dłuższy niż jedna sekunda, jest to metoda najbardziej wiarygodna i najkorzystniejsza do zastosowania w projektowanym układzie regulacji.

4. ZALEŻNOŚCI FUNKCJONALNE WYKORZYSTYWANE W UKŁADZIE REGULACJI WZAJEMNEGO POŁOŻENIA DWÓCH JEDNOSTEK, BĘDĄCYCH W RUCHU RÓWNOLEGLYM

Statki poruszające się równoległe, traktowane jako para, powinny przemieszczać się w sposób skoordynowany, zależny od założonych parametrów takich jak przesunięcie wzdłużne środków ciężkości (dx) oraz odległości między burtami (dy). W zależności od tego, jakie pędniki są wykorzystywane w procesie sterowania ruchem statku, generowane są siły wzdłużne i poprzeczne oraz momenty skręcające. Na przykładzie modelu matematycznego statku treningowego „Blue Lady” (VLCC w skali 1:24, długość 13,5 m) opracowanego przez Gierusza w [6] widać, że siły wzdłużna, poprzeczna oraz moment skręcający pochodzą od śruby napędu głównego (X_{prop} , Y_{prop} , N_{prop}), płetwy sterowej (X_{rud} , Y_{rud} , N_{rud}), sterów strumieniowych dziobowego i rufowego (X_{sstb} , Y_{sstb} , N_{sstb} , X_{sstr} , Y_{sstr} , N_{sstr}) oraz od wiatru działającego na kadłub (X_w , Y_w , N_w). Równania dynamiki wykorzystywane w procesie sterowania dla pary statków muszą zostać uzupełnione przez siły ssące i moment skręcający (X_s , Y_s , N_s). Zmodyfikowane równania dynamiki [11] zostały opisane zależnościami (2, 3, 4).

$$m(\dot{u} - rv) = X_h + X_{prop} + X_{rud} + X_{sstb} + X_{sstr} + X_w + X_s [N] \quad (2)$$

$$m(\dot{v} - ru) = Y_h + Y_{prop} + Y_{rud} + Y_{sstb} + Y_{sstr} + Y_w + Y_s [N] \quad (3)$$

$$I_z \dot{r} = N_h + N_{prop} + N_{rud} + N_{sstb} + N_{sstr} + N_w + N_s [Nm] \quad (4)$$

gdzie:

u – prędkość wzdłużna [m/s],

v – prędkość poprzeczna [m/s],

- r – prędkość kątowna,
- m – masa statku [kg],
- I_z – masowy moment pędu [kgm^2].

Oprócz zmiany sił wzdłużnych i poprzecznych oraz momentów skręcających poprzez zadawanie odpowiednich nastaw poszczególnych pędników oraz odpowiedniego wychylenia steru, konieczna jest kontrola wzajemnego położenia dwóch statków. Wykonywana jest ona przy wykorzystaniu systemu wizyjnego odnajdującego charakterystyczne punkty w obrazie. Odległości pomiędzy jednostkami oraz różnicę między ich kursami oblicza się z zastosowaniem metody fotogrametrycznej. Dzięki występowaniu zjawiska perspektywy odległości między pikselami w obrazie ulegają zmianom w zależności od odległości między płaszczyzną matrycy a obiektem. Są one zależne również od kąta, pod którym płaszczyzna obiektu jest widziana.

Dokonując oceny odległości z wykorzystaniem algorytmów wizyjnych, duży nacisk należy położyć na wady optyki. Wyeliminowanie błędów stałych, pochodzących od wadliwej optyki, takich jak dystorsja, może dodatkowo poprawić wyniki pomiaru o kilka procent [10].

PODSUMOWANIE

Układ sterowania automatycznego ruchem równoległym pary statków powinien uwzględniać występowanie sił przysysania i momentów skręcających, wynikających z nierównomiernego rozłożenia ciśnienia wokół statków znajdujących się w bliskiej odległości. Ważna jest znajomość pozycji, w których oddziaływania te są największe, ponieważ najłatwiej o kolizję dwóch jednostek, gdy działanie systemu sterującego będzie zbyt wolne. Konieczność ciągłej znajomości wzajemnego ustawienia statków, a przy tym brak możliwości wykorzystania jedynie pozycji z GPS, sugeruje wykorzystanie metod pomiaru odległości na podstawie analizy wizyjnej. Metody fotogrametryczne dają błąd nieprzekraczający 1,5%, co jest jak najbardziej wynikiem akceptowalnym.

LITERATURA

1. Amann M.C., Bosch T., Lescure M., Myllylä R., *Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement*, Optical Engineering, Vol. 40, 2001.
2. Atkinson K.B., *Close range photogrammetry and machine vision*, Whittles 2001.
3. Bole A., Dineley B., Wall A., *Radar and ARPA manual*, Elsevier, Amsterdam-Tokyo 2006.
4. Brix J., *Manoeuvring Technical Manual*, Seehafen Verlag, Hamburg 1993.
5. Furuno, *GP-150 MARINE GPS NAVIGATOR. Broszura informacyjna*, www.furuno.pl, 2010.

6. Gierusz W., *Synteza wielowymiarowych układów sterowania precyzyjnego ruchem statku z wykorzystaniem wybranych metod projektowania układów odpornych*, Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia 2004.
7. Gierusz W., Waszkiel A., *Determination of suction forces and moment on parallel manoeuvring vessels for a future control system*, Solid State Phenomena, Trans Tech Publications, Switzerland 2012.
8. Kupiec M., *Optyczno-stykowa metoda pomiarów współrzędnościowych*, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Kraków 2007.
9. Newman J.N., *The Force and Moment on a slender body of revolution moving near a wall*, David Taylor Basin, Washington 1965.
10. Tos C., *Non-metric cameras use for cost-estimate survey at civil works*, Czasopismo Techniczne S, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
11. Waszkiel A., *Measuring system for parallel moving ships*, PMR 2012.

TWO SHIPS MOVING IN PARALLEL – PHYSICAL PHENOMENA AND THEIR EFFECTS ON CONTROL PROCESS, METHODS OF RELATIVE VESSELS POSITIONS ESTIMATION

Summary

The article discusses the parallel motion of the pair of chips, as well as its practical applications. Attention is paid both to maneuver as a whole, as well as for its individual phases, and hydrodynamic effects which occur between vessels. The most critical moments in which the effect automatic control system should be particularly efficient, and the control system is very sensitive to small changes in the actual (measured or calculated) control values are listed. The study identified and discussed examples of non-contact method of measuring relative positions of units on the water, as well as highlighted their advantages and disadvantages. On this basis, was chosen the method least sensitive to external interference, and thus the most reliable and best for application in the proposed control system. In addition, the article covers the basic functional dependencies used in the control system of mutual positions of two bodies in parallel motion. Exemplary results of simulated hydrodynamical interactions also were shown. A correlation between the quality parameters of the measuring equipment and the accuracy of determining the distance and angle between two ships was noted in the article.

Keywords: ships parallel movement, hydrodynamic effects.