

Nr 98/2017, 167–172
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

ALGORYTM STEROWANIA RUCHEM RÓWNOLEGLYM DWÓCH STATKÓW Z UŻYCIEM REGULATORA PREDYKCYJNEGO

SHIP CONTROL ALGORITHM DURING UNDERWAY REPLENISHMENT

Anna Miller

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

Streszczenie: Sterowanie ruchem równoległym dwóch statków wymaga dużej wiedzy i doświadczenia załóg, jest bowiem manewrem uznawanym za niebezpieczny. W związku z tym zaproponowano algorytm sterowania automatycznego ruchem pary statków wykorzystujący regulator predykcyjny. Algorytm uwzględnia wyznaczenie parametrów ruchu względnego jednostek oraz ich zmianę w czasie rzeczywistym. Bazuje on na idei zmiany parametrów ruchu względnego po zmianie globalnego układu odniesienia na układ odniesienia związaną ze środkiem ciężkości statku prowadzącego.

Słowa kluczowe: transport morski, przeładunek w ruchu, sterowanie predykcyjne MPC, sterowanie statkiem.

Abstract: Traffic control parallel two ships requires a lot of knowledge and crews experience. It is recognized as dangerous. So an automatic control algorithm for pair of the vessels participating in the UNREP operation is proposed. It incorporates Model Predictive Controller. The algorithm takes into account the determination of the relative motion parameters and their change in real time. Its idea is based on the relative motion parameters change after transition between global and local coordinate system associated with the center of gravity of the ship to be lightered.

Keywords: Underway Replenishment, UNREP, Model Predictive Control MPC, ship control.

1. WSTĘP

Sterowanie równoległe parą statków jest wykorzystywane w szczególności podczas przeładunku w ruchu, który jest domeną marynarek wojennych całego świata. Taki sposób przeładunku stosuje się również podczas przeładunku ropy i produktów ropopochodnych między dużymi tankowcami a tankowcami dowozowymi [Shimizu, Pedersen i Takano 2010]. W operacji przeładunku uczestniczą dwie

jednostki, jedna z nich, z reguły większa, nazywana STBL (ang. *Ship To Be Lightered*), utrzymuje kurs i prędkość. Mniejszy statek, który podchodzi do STBL, a następnie utrzymuje równoległość ruchu, nazywany jest SS (ang. *Service Ship*). W warunkach rzeczywistych manewr jest przeprowadzany przy sterowaniu ręcznym i wizyjnej ocenie odległości prowadzonej przez obserwatora [Department of the Navy Office of the Chief of Naval Operations 2001]. Ocena wzajemnego położenia statków jest wspomagana odczytami z urządzeń pokładowych takich jak GPS, AIS, żyrokompas oraz radar [Husjord i Pedersen 2010; Shimizu, Pedersen i Takano 2010]. W związku z występowaniem wysokiego ryzyka kolizji przy sterowaniu ręcznym podczas przeładunku w ruchu zaproponowano algorytm sterowania ruchem równoległym dwóch statków. Badania przeprowadzone przez Pedersena i innych [Pedersen, Shimizu i Berg 2008] oraz analiza wrażliwości sterowania na niepoprawne dane pochodzące z systemu ARPA, przeprowadzona przez Lisowskiego [Lisowski 2012], dowodzą, że dla poprawnego wykonania manewru konieczna jest precyzyjna znajomość odległości pomiędzy manewrującymi statkami, pochodząca z innego źródła niż statkowe urządzenia elektro-nawigacyjne (AIS, GPS, radar).

2. STEROWANIE RUCHEM RÓWNOLEGLYM DWÓCH STATKÓW

W manewrze przeładunku w ruchu można wyróżnić trzy fazy: podejście, ruch równoległy oraz odejście, co zostało szczegółowo opisane w [Miller 2013]. Podczas wszystkich trzech faz konieczne jest zachowanie bezpieczeństwa manewru. Ponadto zostało przyjęte, że podczas drugiej fazy – ruchu równoległego istnieje możliwość wykonania niewielkich manewrów kursem i prędkością pary statków. Manewr ten musi uwzględniać zdolności manewrowe większego (cięższego) statku STBL oraz możliwości reakcji na tę zmianę statku SS.

Istotnym elementem przy tworzeniu algorytmu sterowania jest dobór wielkości sterujących. Podczas sterowania ruchem równoległym występuje konieczność wyznaczenia wartości względnych przesunięcia wzdłużnego Δx , poprzecznego Δy oraz różnicy kursów $\Delta\psi$, co ilustruje rysunek 1.

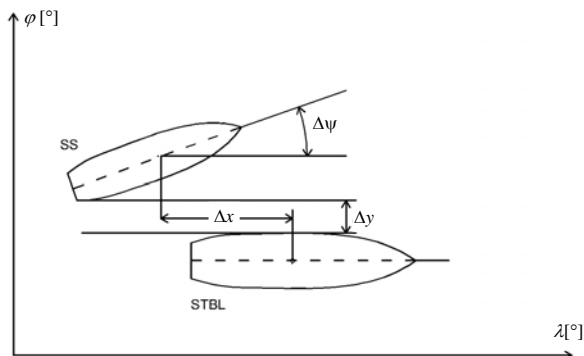
Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy opracowano algorytm automatycznego sterowania ruchem równoległym dwóch jednostek, wykorzystujący regulator predykcyjny do bezpośredniego sterowania wartościami przesunięć pozycji (Δx , Δy) oraz różnicą kursów $\Delta\psi$. Zaletą wykorzystania takiego regulatora jest możliwość bezpośredniego sterowania pędnikami, przy zachowaniu minimalnych i maksymalnych wartości nastaw i kątów obrotów, ich szybkości zmian, jak również możliwość ograniczenia wartości sygnałów wyjściowych do założonych granic:

$$\begin{aligned} -L_{OA} &\leq \Delta x \leq L_{OA} \\ 0,5B &\leq \Delta y \leq 1,5B \\ -10^\circ &\leq \Delta \psi \leq 10^\circ \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

L_{OA} – długość całkowita statku STBL,

B – szerokość statku STBL.



Rys. 1. Wzajemne ustawienie jednostek w odniesieniu do globalnego układu współrzędnych

Fig. 1. Relative ships position in global coordinate system

Opracowany algorytm, przedstawiony na rysunku 2, uwzględnia kolejność działań, która została zachowana w predykcyjnym układzie sterującym dzięki odpowiedniemu doborowi współczynników wagowych następującej funkcji celu:

$$J = \sum_{p=N_1}^N \left\| Mx(k+p|k) - y(k+p) \right\|_{Q(p)}^2 + \sum_{p=0}^{N_u-1} \left\| \Delta u(k+p) \right\|_{R(p)}^2 \quad (2)$$

gdzie:

M – macierz wyjścia C , dla modelu obiektu w przestrzeni stanów,

y – sygnał wyjściowy,

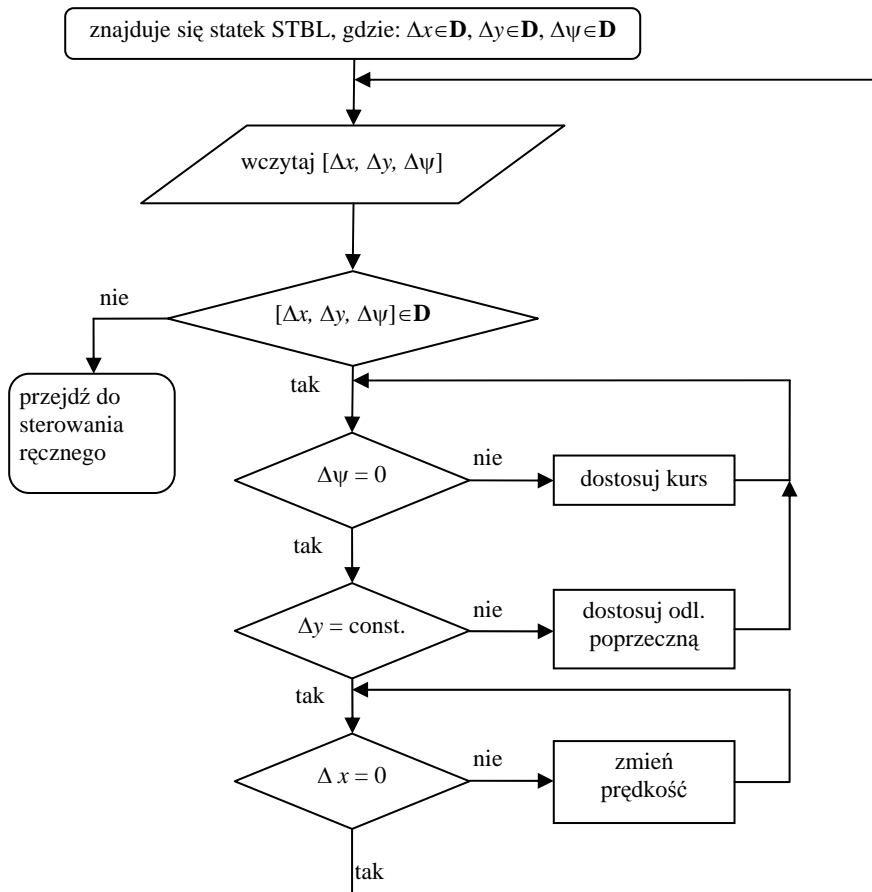
Δu – zmiana sygnału sterującego,

Q – macierz wag sygnałów wyjściowych,

R – macierz wag przyrostów sygnałów sterujących.

W pierwszym kroku dokonuje się sprawdzenia, czy wartości $\Delta x, \Delta y$ oraz $\Delta \psi$ nie naruszają obszarów ograniczeń zmiennych wyjściowych (na rysunku 1 oznaczonych jako \mathbf{D} – zbiór rozwiązań dopuszczalnych) opisanych zależnością (1). Następnie, jeśli możliwe jest uruchomienie algorytmu sterowania ruchem równoległym, sprawdza się, czy istnieje i ewentualnie jak duża jest różnica pomiędzy kursami obu statków. Powyższy warunek jest sprawdzany jako pierwszy, ze względu na zachowanie bezpieczeństwa manewru. Gdyby statki poruszały się różnymi kursami, istnieje duże ryzyko kolizji. Jeśli statki płyną równolegle, dokonywana

jest weryfikacja odległości poprzecznej między ich burtami. Dokonuje się sprawdzenia, czy jest ona równa stałej wartości zadanej przez użytkownika. Jeśli nie – istnieje konieczność jej korekcji. Niemniej jednak nie ma możliwości przesunięcia poprzecznego statku bez zmiany jego kursu, dlatego po zmianie odległości poprzecznej dokonuje się ponownego sprawdzenia różnicy $\Delta\psi$. W ostatnim kroku sprawdza się, czy środki ciężkości obu jednostek znajdują się w jednej płaszczyźnie. W przypadku gdy $\Delta x \neq 0$, dokonuje się zmiany prędkości statku podchodzącego SS przy jednoczesnym zachowaniu stałego kursu.



Rys. 2. Algorytm UNREP sterowania ruchem równoległym dwóch statków

Fig. 2. UNREP control algorithm

Algorytm działa cyklicznie, ze względu na ciągłą zmianę pozycji obu statków, po uzyskaniu wartości sygnałów wyjściowych: $\Delta\psi = 0$, $\Delta x = 0$ oraz $\Delta y = \text{const}$ ponownie zostają wyznaczone wartości odchyłek. W celu uniemożliwienia pozosta-

nia w jednej z pętli wewnętrznych, gdy po 10 obiegach nie zostanie uzyskana wartość konieczna do przejścia do kolejnego warunku, a wartość sygnału wyjściowego nie narusza ograniczeń – zapewnia bezpieczeństwo ruchu statku, sprawdzany jest kolejny warunek.

3. IDEA REGULACJI PREDYKCYJNEJ W STEROWANIU RUCHEM RÓWNOLEGLYM STATKÓW

Ideą sterowania predykcyjnego jest cykliczne rozwiązywanie zadania sterowania optymalnego. W wyniku optymalizacji funkcji celu otrzymuje się ciąg sterowań, z którego tylko pierwsze jest aplikowane do obiektu. Sterowania te są wyznaczone w taki sposób, aby umożliwić jak najszybsze pokrycie się sygnału wyjściowego z zadanym sygnałem odniesienia. W przypadku regulatorów MPC, wykorzystywanych w sterowaniu ruchem równoległym statków, sygnałem odniesienia jest stabilizacja odchyłki kursowej ($\Delta\psi = 0$), odległości poprzecznej ($\Delta y = \text{const}$) oraz wzdłużnej ($\Delta x = 0$). W algorytmie sterowania predykcyjnego, podczas wyznaczania bieżącego sterowania bierze się pod uwagę zarówno informacje z bieżącej chwili, jak i przyszłe przewidywane zachowanie układu sterowania. Jest ono wyznaczone na podstawie informacji o obiekcie sterowania zawartych w jego modelu, wiedzy o występujących ograniczeniach i przewidywanych zakłóceniach, zamodelowanych na etapie projektowania układu sterowania. W celu wyznaczenia przewidywanego sygnału wyjściowego wyznaczone są przewidywane wartości sygnałów sterujących, które tworzą wektor: $u(k) = u(k/k), u(k + 1/k), \dots, u(k + Nu - 1/k)$, gdzie Nu jest to horyzont sterowania.

Statek jest silnie nieliniowym wielowymiarowym obiektem sterowania. Układy regulacji typu MPC pracują na podstawie adekwatnego modelu obiektu. W omawianym przypadku wykorzystano zlinearyzowany model przyrostowy, szczegółowo opisany w [Miller 2013]. Model ten musi być adekwatny do zadania regulacji, w związku z czym w powyższym zastosowaniu wykorzystano model, w którym sygnałami wejściowymi są zmiana nastawy i kąta wychylenia pędnika azymutalnego w okolicy punktu pracy, a sygnałami wyjściowymi odchyłka przemieszczenia wzdłużnego, poprzecznego oraz kursu. Zadaniem regulatora MPC jest minimalizacja uchybu danego zależnością (3), gdzie $e(k)$ jest wartością uchybu, a $y(k)$ jest wartością sygnału wyjściowego w chwili k .

$$\begin{bmatrix} e_{\Delta\psi}(k) \\ e_{\Delta y}(k) \\ e_{\Delta x}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{const} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_{\Delta\psi}(k) \\ y_{\Delta y}(k) \\ y_{\Delta x}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Uchyb jest minimalizowany na podstawie jasno określonego kryterium [Husjord i Pedersen 2010], które w układach wielowymiarowych dane jest zależnością (2). W przypadku regulatorów, które mogą mieć zastosowanie w pracy z obiektami pływającymi, bierze się pod uwagę zarówno wartość uchybu $e(t)$, jak i zmienność sygnału sterującego. Na etapie projektowania regulatora predykcyjnego konieczne jest dokonanie wyboru długości horyzontów predykcji, sterowania oraz współczynników wagowych w funkcji celu. Ich wartości wiążą się z narzuceniem kary w sytuacji wystąpienia uchybu lub zmiany sygnału sterującego.

4. PODSUMOWANIE

Proponowany algorytm sterowania ruchem równoległym dwóch statków opiera się na cyklicznej minimalizacji uchybu sygnałów sterujących, które są wartościami względnymi przemieszczeń i kursów liczonymi w odniesieniu do pozycji statku STBL. W związku z łatwością implementacji do sterowania w układzie rzeczywistym został zastosowany regulator predykcyjny. Sam proces sterowania ruchem równoległym wymaga przede wszystkim zachowania bezpieczeństwa ruchu, a co za tym idzie, unikania możliwości zderzenia. W związku z tym zwraca się szczególną uwagę na wartość różnicy pomiędzy kursami statków, a dopiero w następnych krokach dostosowuje się wzajemne położenie jednostek tak, aby operacja przeładunku w ruchu mogła zostać wykonana.

LITERATURA

- Department of the Navy Office of the Chief of Naval Operations, 2001, Naval Warfare Publication, Underway Replenishment, Norfolk.
- Husjord, D., Pedersen, E., 2010, *On Guidance and Decision-Support Displays in Ship-to-Ship Lightering Operations*, Systems Man and Cybernetics Society, IEEE, eNewsletter, no. 31.
- Kerrigan, E.C., Maciejowski, J.M., 1999, *Fault-tolerant Control of a Ship Propulsion System Using Model Predictive Control*, European Control Conference, Karlsruhe, Germany.
- Lisowski, J., 2012, *The Sensitivity of Safe Ship Control in Restricted Visibility at Sea*, TransNav International Journal of Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 6, no 1.
- Miller, A., 2013, *Ruch równoległy dwóch jednostek – zjawiska fizyczne i ich wpływ na proces sterowania, sposoby określania wzajemnego położenia statków*, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, nr 78, s. 76–85.
- Miller, A., 2016, *Identification of a Multivariable Incremental Model of the Vessel*, MMAR 2016, Międzyzdroje.
- Pedersen, E., Shimizu, E., Berg, T.E., 2008, *On the Development of Guidance System Design for Ships Operating in Close Proximity*, no. 7052, s. 966–971.
- Shimizu, E., Pedersen, E., Takano, Y., 2010, *Field Observation on Actual Lightering Operations*, Oceans 2010 IEEE Conference, Sydney, May, s. 1–4.