



Paweł ZALEWSKI

PROBLEMATYKA WYZNACZENIA POŁOŻENIA UMOWNEJ WODNICY STATKU W PILOTOWYM SYSTEMIE NAWIGACYJNO-DOKUJĄCYM

Streszczenie

Współczesne pilotowe systemy nawigacyjne wyzyskują pomiary GNSS (pozycja plus kurs z kompasu satelitarnego) lub GNSS i statkowego urządzenia kursowego (najczęściej żyrokompasu) do wyznaczenia położenia kadłuba statku. Założeniem pilotowych systemów nawigacyjno-dokujących (PNDS) jest wykorzystanie alternatywnej – dodatkowej w stosunku do GNSS metody wyznaczenia położenia kadłuba w fazie cumowania - zbliżania się jednostki do nabrzeża. W artykule zaprezentowano algorytm wyliczenia położenia umownej obwiedni (konturu) kadłuba na podstawie pomiarów odległości pomiędzy głowicami laserowymi a burtą statku. Badania objęły przypadek trzech dalmierzy laserowych ustawionych w linii prostej na nabrzeżu. Takie usytuowanie czujników powoduje niepewność wyznaczenia położenia kadłuba i prędkości w przyjętym układzie współrzędnych – stąd konieczność identyfikacji przypadków niedookreślonych i ustalenia warunków brzegowych.

WSTĘP

Pilotowo-dokujące systemy PNDS [1] mogą wyzyskiwać pomiary odległości od kilku dalmierzy laserowych usytuowanych na nabrzeżu w celu autonomicznego określenia położenia umownej wodnicy jednostki pływającej. Zastosowanie trzech lub większej ilości czujników pomiarowych umożliwia jednoznaczną identyfikację położenia kadłuba na akwenie.

Najpierw na podstawie znanych pozycji głowic laserowych w przyjętym układzie odniesienia wyznaczane są współrzędne mierzonych punktów. Następnie wyliczana jest pozycja ustalonego punktu kadłuba i kurs poprzez taką translację i obrót zmierzonych punktów, wynikiem której jest ich najlepsze dopasowanie do wzorcowej (modelowej) umownej wodnicy lub obwiedni kadłuba. W tym celu musi zostać przyjęty wspólny układ odniesienia współrzędnych dla punktów pomiarowych i umownej wodnicy wzorcowej, a wodnica wzorcowa, zbudowana zazwyczaj z kilkunastu punktów znaczących, musi zostać aproksymowana ciągłą funkcją sklejaną. Alternatywną metodę optymalizacji gradientowej przedstawiono w [3]. Możliwość identyfikacji parametrów przestrzennych mierzonej bryły (w przypadku zastosowania skanerów laserowych) przedstawiono natomiast w [5].

1. APROKSYMACJA UMOWNEJ OBWIEDNI STATKU

Ogólnie i -ta funkcja sklejana przechodząca przez dwa punkty umownej wodnicy wzorcowej statku może być aproksymowana wielomianem 3 stopnia [2], [4]:

$$s_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (1)$$

Dla n danych punktów istnieje $n-1$ przedziałów i stąd $4(n-1)$ niewiadomych w celu określenia wszystkich współczynników a_i, b_i, c_i, d_i takiej funkcji. Pierwszy z warunków wymaga, aby funkcja sklejana przechodziła przez początkowy i końcowy punkt (węzeł) każdego przedziału. Warunek ten może zostać sformułowany za pomocą $2(n-1)$ równań:

$$\begin{aligned} s_i(x_i) &= a_i \\ s_i(x_{i+1}) &= a_i + b_i(x_{i+1} - x_i) + c_i(x_{i+1} - x_i)^2 + d_i(x_{i+1} - x_i)^3 \end{aligned} \quad (2)$$

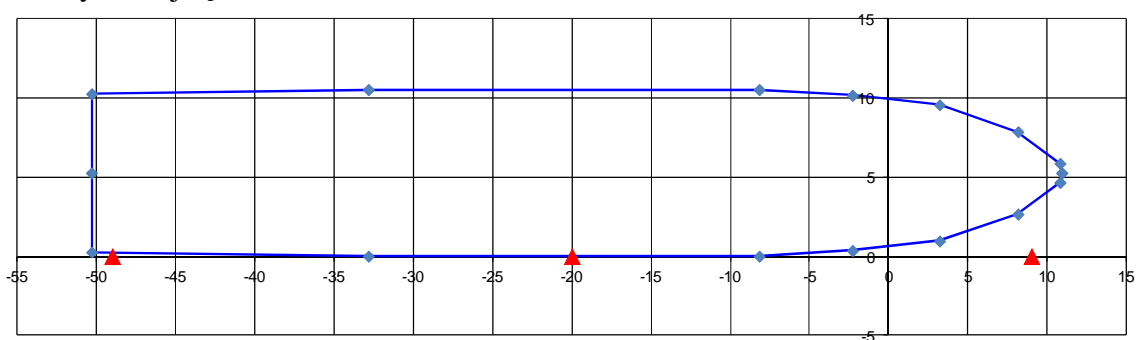
Aby uzyskać wymaganą gładkość funkcji kolejne warunki wymagają, aby jej pierwsza i druga pochodna zachowywała ciągłość w każdym z punktów tworzących wewnętrzne przedziały, co daje $2(n-2)$ równań:

$$s_i'(x_{i+1}) = s_{i+1}'(x_{i+1}) \Rightarrow b_i + 2c_i(x_{i+1} - x_i) + 3d_i(x_{i+1} - x_i)^2 = b_{i+1} \quad (3)$$

$$s_i''(x_{i+1}) = s_{i+1}''(x_{i+1}) \Rightarrow 2c_i + 6d_i(x_{i+1} - x_i) = 2c_{i+1} \quad (4)$$

Razem otrzymujemy $4n-6$ równań. Dwa dodatkowe równania wyznaczane są zakładając warunki brzegowe wielomianu interpolacyjnego Hermite'a dla pierwszego i ostatniego przedziału – ustalone wartości pierwszych pochodnych lub inaczej nachylenia krzywych w początkowym i końcowym punkcie aproksymacji (praktycznie również warunek ciągłości drugiej pochodnej w punktach tworzących wewnętrzne przedziały może być zastąpiony warunkiem znajomości nachylenia krzywych i monotoniczności $s_i(x)$).

Rys. 1 i tab. 1 przedstawiają umowną wodnicę statku m/s „Nawigator XXI” (statek szkolno-badawczy Akademii Morskiej w Szczecinie) w przyjętym dwuwymiarowym kartezjańskim układzie odniesienia współrzędnych o centrum w pozycji współrzędnej punktu dowodzenia po osi X i współrzędnej skrajnych punktów prawej burty (linii odbijaczy na nabrzeżu) po osi Y. Wzorcową, umowną wodnicę statku „Nawigator XXI” zastosowaną w badaniach PNDS składa się z 16 punktów znaczących (oznaczonych zielonymi rombami na rys. 1). Pozycje głowic laserowych, przesunięte wektorowo do linii nabrzeża, oznaczono czerwonymi trójkątami.



Rys. 1. Wzorcową, umowną wodnicę statku m/s „Nawigator XXI” i przyjęty układ odniesienia

Współrzędne punktów znaczących wzorcowej wodnicy statku zamieszczono w tab. 1, a współrzędne punktów pomiarowych, od których liczona jest odległość po osi Y, w tab. 2.

Tab. 1. Wzorcowa, umowna wodnica statku m/s „Nawigator XXI” zbudowana z 16 punktów w przyjętym układzie odniesienia współrzędnych

No.	x	$f(x)$
1	10,91	5,26
2	10,8	4,66
3	8,15	2,66
4	3,2	0,96
5	-2,3	0,36
6	-8,18	0
7	-32,84	0
8	-50,3	0,26
9	-50,31	5,26
10	-50,3	10,26
11	-32,84	10,52
12	-8,18	10,52
13	-2,3	10,16
14	3,2	9,56
15	8,15	7,86
16	10,8	5,86

Tab. 2. Pozycje czujników laserowych w przyjętym układzie odniesienia współrzędnych

No.	x	y
1	-49	0
2	-10	0
3	9	0

Stosując aproksymację 16 punktów z tab. 1 kubicznymi krzywymi sklejanymi (splajnami w środowisku MATLAB) otrzymano zadane przedziałami wielomiany 3-go stopnia, reprezentujące prawo-burtową połowę wzorcowej, umownej wodnicy statku. Tab. 3 zawiera $k=4$ współczynników i -tych ($i=8$) przedziałów uszeregowanych od rufy do dziubu. Zadany przedziałami wielomian $k-1$ stopnia przyjmuje postać (uogólnienie równania (1)):

$$s_i(x) = c_{i,k}x^{k-1} + c_{i,k-1}x^{k-2} + \dots + c_{i,2}x + c_{i,1} \quad (5)$$

Tab. 3. Współczynniki wielomianów zadanych przedziałami (5) przedstawiających połowę wzorcowej, umownej wodnicy m/s „Nawigator XXI”

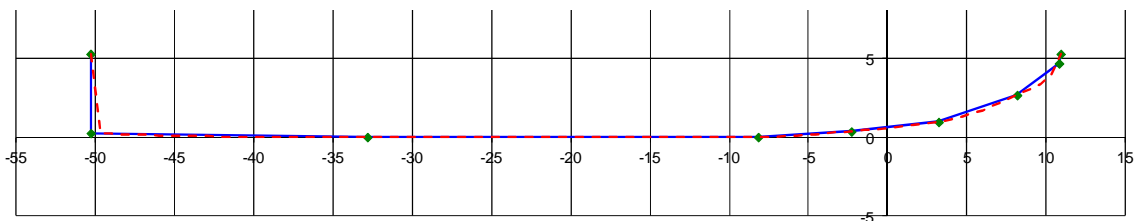
$i \backslash k$	4	3	2	1
1	4996692	-49938.3	-500.286	5.26
2	0.000049	0.002555	-0.04465	0.26
3	0	0	0	0
4	-0.00127	0.017856	0	0
5	0.000912	0.000512	0.078677	0.36
6	-0.00119	0.041516	0.167103	0.96
7	0.100834	-0.16754	0.490593	2.66
8	-292.586	66.07165	1.726949	4.66

Ostatecznie równanie funkcji opisującej połowę wzorcowej, umownej wodnicy m/s „Nawigator XXI” wyniesie:

$$s(x) = \begin{cases} c_{1,4}x^3 + c_{1,3}x^2 + c_{1,2}x + c_{1,1}, & x < -50.3 \\ c_{2,4}x^3 + c_{2,3}x^2 + c_{2,2}x + c_{2,1}, & -50.3 \leq x < -32.84 \\ c_{3,4}x^3 + c_{3,3}x^2 + c_{3,2}x + c_{3,1}, & -32.84 \leq x < -8.18 \\ c_{4,4}x^3 + c_{4,3}x^2 + c_{4,2}x + c_{4,1}, & -8.18 \leq x < -2.3 \\ c_{5,4}x^3 + c_{5,3}x^2 + c_{5,2}x + c_{5,1}, & -2.3 \leq x < 3.2 \\ c_{6,4}x^3 + c_{6,3}x^2 + c_{6,2}x + c_{6,1}, & 3.2 \leq x < 8.15 \\ c_{7,4}x^3 + c_{7,3}x^2 + c_{7,2}x + c_{7,1}, & 8.15 \leq x < 10.8 \\ c_{8,4}x^3 + c_{8,3}x^2 + c_{8,2}x + c_{8,1}, & x \geq 10.8 \end{cases} \quad (6)$$

gdzie $c_{i,k}$, $i=1,2,\dots,8$, $k=1,2,\dots,4$ zostały zamieszczone w tab. 3.

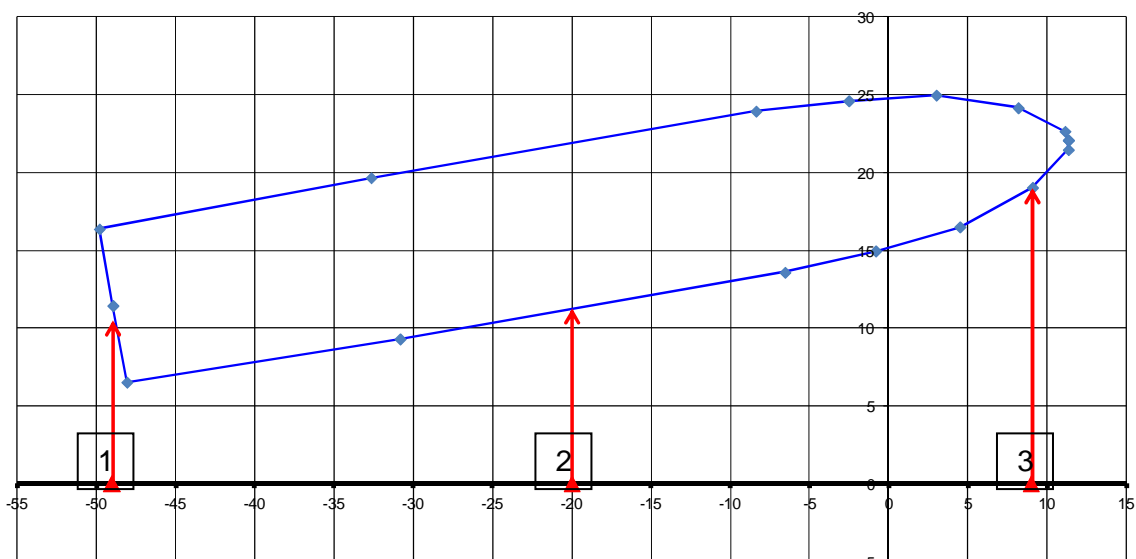
Aproksymację 100 punktów funkcją sklejaną $s(x)$ przedstawiono na rys. 2 czerwoną kreskowaną linią.



Rys. 2. Aproksymacja funkcją sklejaną połowy wzorcowej, umownej wodnicy m/s “Nawigator XXI”

2. OKREŚLENIE POZYCJI I KURSU NA PODSTAWIE POMIARÓW DALMIERZAMI LASEROWYMI

Trzy dalmierze laserowe dokonują pomiarów odległości y_1 , y_2 , y_3 do burty statku z ustaloną częstotliwością. Na podstawie znanych pozycji głowic laserowych w przyjętym układzie odniesienia współrzędnych (rys. 1) wyliczane są parametry mierzonych punktów. W następnym etapie znajdują się: pozycja statku i kurs poprzez taką transformację zmierzonych punktów (translację wektorową i obrót), która doprowadzi do ich najlepszego dopasowania do wzorcowej umownej wodnicy. Ustalenie widocznych krawędzi wodnicy może być konieczne w przypadku nieokreśloności funkcji $s(x)$ w pierwszym przedziale (płaszczyzna rufy może być prostopadła do płaszczyzny burty uniemożliwiając aproksymację wzorcowej wodnicy położonej równoległe do nabrzeża). Należy wtedy zastosować dwie wzorcowe umowne wodnice odpowiadające: 1) śledzeniu przez trzy czujniki burty albo 2) śledzeniu przez dwa czujniki burty i przez jeden rufy (rys. 3).



Rys. 3. Zasada pomiaru trzema dalmierzami laserowymi w systemie PNDS

Założenia algorytmu określenia pozycji i kursu są następujące:

- podchodzenie do nabrzeża i cumowanie prawą burtą (określenie położenia statku podczas podchodzenia do nabrzeża lewą burtą może być dokonane analogicznie wykorzystując symetryczne zależności funkcyjne),
- ustalone parametry dokładności aproksymacji pozycji i kursu w kartezjańskim układzie współrzędnych: $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0,1^\circ$.

Przebieg algorytmu przedstawiono poniżej.

Po pierwsze następuje sprawdzenie, czy 1) wszystkie trzy dalmierze, 2) dwa, 3) tylko jeden lub 4) żaden wykonują pomiary.

W przypadku 4) następuje stop z ostrzeżeniem „brak śledzenia – statek poza zasięgiem” (“no tracking – vessel outside sensors range”).

W przypadku 3) wyliczane są współrzędne mierzonego punktu (x dalmierza i y - zmierzona odległość), następuje wyświetlenie punktu oraz trzech ostrzeżeń: a) „niedookreślony pomiar jednym dalmierzem – statek za daleko do tyłu” (“underdetermined tracking by one sensor - vessel too far aft”), jeżeli pomiary wykonuje dalmierz nr 1, b) „niedookreślony pomiar jednym dalmierzem – statek za daleko do przodu” (“underdetermined tracking by one sensor - vessel too far forward”), jeżeli pomiary wykonuje dalmierz nr 3 i c) „niedookreślony pomiar tylko środkowym dalmierzem – zbyt duży kąt podejścia” (“underdetermined tracking by one mid sensor – angle of approach too high”), jeżeli pomiary wykonuje dalmierz nr 2.

W przypadku 2) wyliczane są współrzędne dwóch mierzonych punktów, następuje wyświetlenie punktów oraz dwóch ostrzeżeń: a) „niedookreślony pomiar dwoma dalmierzami – statek za daleko do tyłu” (“underdetermined tracking by two sensors - vessel too far aft”), jeżeli pomiary wykonują dalmierze 1 i 2, b) „niedookreślony pomiar dwoma dalmierzami – statek za daleko do przodu” (“underdetermined tracking by two sensors - vessel too far forward”), jeżeli pomiary wykonują dalmierze 2 i 3.

W przypadku 1), aby otrzymać najlepsze dopasowanie do wzorcowej umownej wodnicy statku $s(x)$ (6), po wyznaczeniu pomierzonych punktów z trzech dalmierzy (x_m, y_m), $m=1,2,3$; ich parametry muszą być poddane transformacjom – przesunięciom wektorowym i obrotom dookoła przyjętego środka obrotu.

W drugim etapie następuje wobec powyższego przesunięcie wektorowe (translacja) trzech wyznaczonych punktów o wektor $v_j=[j \times 0.01, -y_2]$, gdzie: $j=-200, -199, \dots, 200$:

$$[x_{-t_{j,m}}, y_{-t_{j,m}}] = [x_m, y_m] + v_j \quad (7)$$

Wartości j są dla danego statku arbitralnie ograniczone i ustalone z rozdzielczością odpowiadającą założonej dokładności pomiarów: 1cm. Wartości j przyjęte dla „Nawigatora XXI” oznaczają, że może on być śledzony przez trzy czujniki (dalmierze), jeżeli przesunięcie w stosunku do położenia wzorcowej wodnicy nie przekracza do przodu i do tyłu 2m. Ponieważ kolejne obroty wykonywane będą dokoła punktu $(x_2, 0)$ (wspólny punkt burty i odniesienia pomiaru dalmierzem nr 2) przesunięcie po osi rzędnych wynosi $-y_2$.

W trzecim etapie analizowane są trzy alternatywy pomiarowe prowadząc do dalszej redukcji niezbędnych transformacji:

a) $y_2 < y_1 \leq y_3$

b) $y_1 \leq y_2 < y_3$

c) $y_3 \leq y_2 < y_1$

Jeżeli funkcja sklejana $s(x)$ aproksymująca połowę wzorcowej umownej wodnicy statku ma jednoznaczne wartości, czyli jest określona w całej dziedzinie po długości statku, co ma miejsce, gdy płaszczyzna rufy jest nieprostokątna do płaszczyzny burty (przy uwzględnieniu ograniczeń arytmetyki skończonej precyzji), to wszystkie trzy warianty a), b), c) można odnieść do wzorcowej umownej wodnicy statku położonej równoległe do nabrzeża. Jeżeli funkcja sklejana $s(x)$ aproksymująca połowę wzorcowej umownej wodnicy statku nie jest określona w całej dziedzinie to powyższe trzy warianty należy odnieść do innej wzorcowej umownej wodnicy i innej funkcji sklepanej (6) spełniającej warunek określoności – dla „Nawigatora XXI” spełni ten warunek np. wodnica obrócona o 10° na lewą burtę i przesunięta do punktu $(x_2, 0)$.

Po przesunięciu wektorowym (7) każdego z $m=3$ punktów następuje ich kolejna transformacja – obrót o założony kąt ψ_l dokoła punktu $(x_2, 0)$. Obrót taki jest złożeniem dwóch translacji wektorowych i obrotu zgodnie z równaniem:

$$[x_{-tr_{l,j,m}}, y_{-tr_{l,j,m}}] = (C(\psi_l) \cdot ([x_{-t_{j,m}}, y_{-t_{j,m}}] - [x_2, 0])^T)^T + [x_2, 0] \quad (8)$$

gdzie $C(\psi_l)$ jest macierzą obrotu, a T operatorem transpozycji macierzy:

$$C(\psi_l) = C(l \times 0.1^\circ) = \begin{bmatrix} \cos(l \times 0.1^\circ) & -\sin(l \times 0.1^\circ) \\ \sin(l \times 0.1^\circ) & \cos(l \times 0.1^\circ) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Wartości l są dla konkretnego statku ograniczone w zależności od wariantów a), b), c) oraz przyjęte z rozdzielczością odpowiadającą założonej dokładności $0,1^\circ$. W przypadku a) „Nawigator XXI” może być śledzony przez trzy dalmierze, jeżeli obrót statku w stosunku do położenia wzorca nie przekracza ok. $\pm 10^\circ$, skąd $l = -100, -99, \dots, 100$. W przypadku b) obrót może być tylko o kąt dodatni (w stronę lewej burty) skąd $l = 0, 1, \dots, 300$ - „Nawigator XXI” może być śledzony przez trzy dalmierze, jeżeli obrót statku w stosunku do położenia wzorca nie przekracza ok. $+30^\circ$. W przypadku c) obrót może być tylko o kąt ujemny (w stronę prawej burty), czyli $l = -300, -299, \dots, 0$.

Ostatecznie wyznaczana jest zależność (10) (średni błąd kwadratowy RMSE pomiarów po transformacji w stosunku do wzorca) w celu znalezienia najlepszego dopasowania:

$$g_{l,j,m} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^3 (s(x_{-tr_{l,j,m}}) - y_{-tr_{l,j,m}})^2}{m}} \quad (10)$$

Funkcja celu przyjmuje postać: $\min(g_{l,j,m})$ lub spełnienia kryterium dokładnościowego np.:

$$g_{l,j,m} \leq 0,02 \quad (11)$$

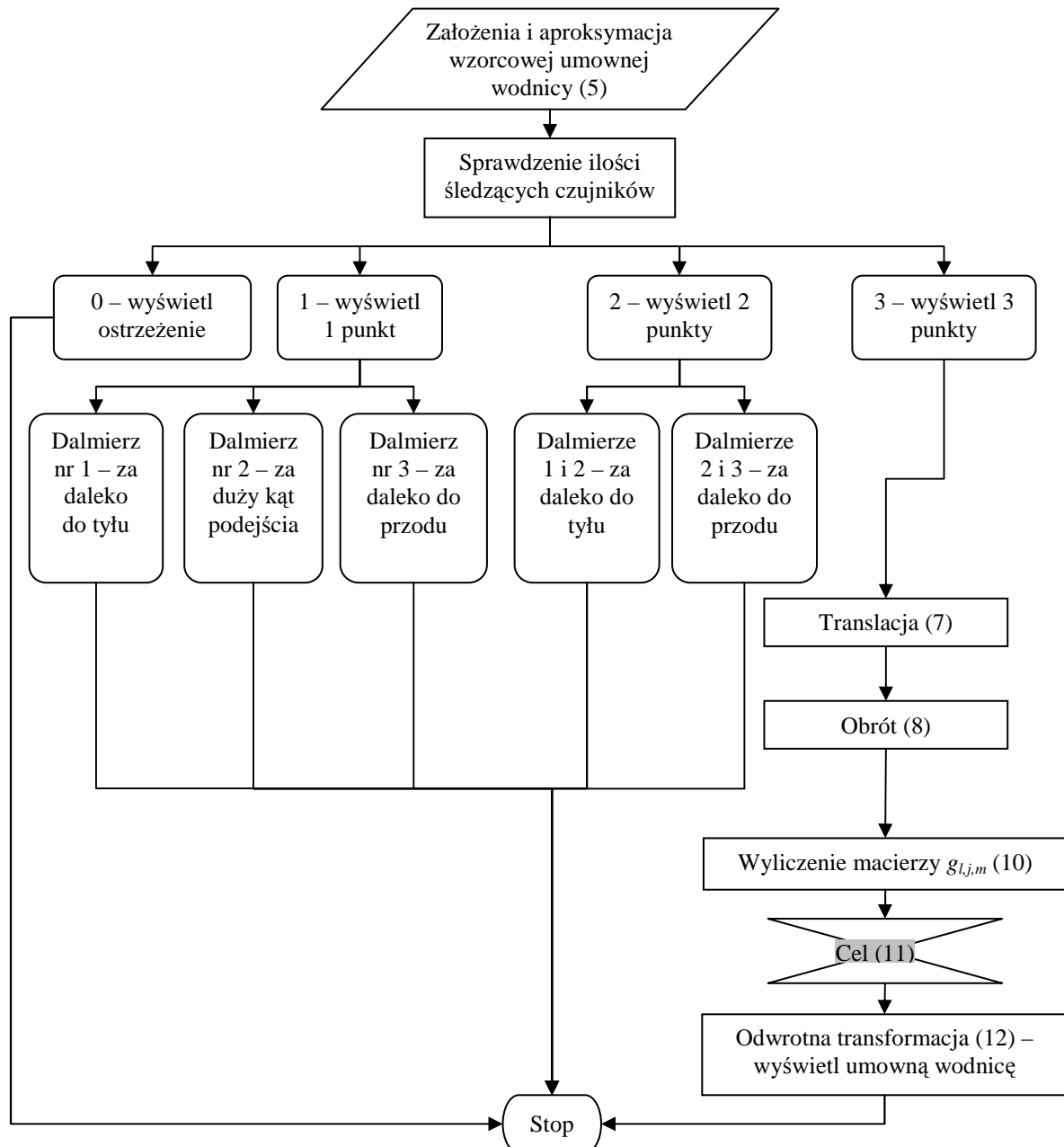
w przypadku, gdy średni błąd kwadratowy dopasowania nie powinien przekroczyć 2cm.

Ostatnim krokiem jest wyznaczenie współrzędnych 2D umownej wodnicy oraz kursu statku na akwenu, spełniających kryterium (11), poprzez odwrotną transformację (przesunięcia i obrót):

$$[x_{-f_i}, y_{-f_i}] = (C(-\psi_l) \cdot ([x_i, s(x_i)] - [x_2, 0])^T + [x_2, 0] - v_j) \quad (12)$$

$$\psi = 90^\circ - \psi_l$$

Schemat blokowy algorytmu przedstawiony jest na rys. 4:



Rys. 4. Algorytm wyznaczenia położenia umownej wodnicy statku na akwenu z pomiarów trzech dalmierzy laserowych w PNDS

Przedstawiony algorytm może być udoskonalony wprowadzając ograniczenia wynikające z własności geometrycznych kadłuba statku, tym samym redukując wpływ błędów

pomiarowych na rezultat dopasowania. Przykładowo własność wypukłości wzorcowej umownej wodnicy statku opisana w układzie współrzędnych kartezjańskich Y-X (lub $s(x)-x$) będzie dana warunkiem (13).

$$s\left(\frac{x_0 + x_1}{2}\right) \geq \frac{s(x_0) + s(x_1)}{2} \quad (13)$$

Przeprowadzona analiza symulacyjna dokładności dopasowania (kryterium (11)) zostanie uściślona w wyniku planowanych badań rzeczywistych (pomiarów dla różnych zestawów / głowic laserowych i zakłóceń zewnętrznych np. pogody i kołysań mierzonego statku).

PODSUMOWANIE

Pomiary odległości minimum trzema dalmierzami laserowymi usytuowanymi w określonych pozycjach na nabrzeżu umożliwiają autonomiczne określenie i śledzenie położenia umownej wodnicy jednostki pływającej. Występującym podczas pomiarów problemem numerycznym jest dopasowanie wyznaczonych punktów do przyjętej umownej wodnicy statku oraz prezentacja położenia wodnicy statku w przypadkach niedookreślonych, gdy kadłub statku jest śledzony przez mniejszą od wymaganej liczbę czujników. W zastosowanym prototypie systemu PNDS, skonstruowanym w Akademii Morskiej w Szczecinie, zaimplementowano algorytm prezentujący pomiary niedookreślone wraz z odpowiednimi ostrzeżeniami oraz kontur umownej wodnicy kadłuba statku (w formie graficznej) w przypadku pomiarów wystarczających do uzyskania jednoznacznego wyznaczenia niewiadomych kursu i współrzędnych położenia wodnicy na akwenu.

Ze względu na różnorodność kształtów wodnic i brak możliwości określenia funkcji ciągłej w tożsamej dziedzinie dla burty, obła rufowego i dziobu przyjęto, że: gdy rufa jest nieprostopadła do burty (przy uwzględnieniu ograniczeń arytmetyki skończonej precyzji) to pomierzone punkty można dopasować do kubicznej funkcji sklepanej wzorcowej umownej wodnicy statku położonej równolegle do nabrzeża; w innym wypadku pomierzone punkty należy dopasować do obróconej o niewielki kat od nabrzeża ($\approx 10^\circ$) wzorcowej umownej wodnicy i jej funkcji sklepanej spełniającej warunek określoności.

W kolejnym etapie przeprowadzone badania symulacyjne będą uzupełnione o analizę dokładności w warunkach rzeczywistych (dla różnych zestawów laserowych i zakłóceń zewnętrznych np. pogody, kołysań mierzonego statku).

PROBLEMS OF SHIP'S HORIZONTAL PLANE DETERMINATION IN PILOT NAVIGATION-DOCKING SYSTEM

Abstract

The presumption in the pilot navigation and docking system (PNDS) is to use an alternative to GNSS method of determining the position of the ship's horizontal plane while approaching the quay and docking. The paper presents an algorithm of calculation of the ship's horizontal plane on the basis of distance measurements between the laser heads ashore and the ship's side. The study comprised three laser rangefinders arranged in a straight line on the quay. Such an arrangement of sensors creates uncertainty in position and velocity determination - hence the need to identify underdetermined cases and to define boundary conditions.

BIBLIOGRAFIA

1. Bąk A.: *Zintegrowany system wizualizacji parametrów nawigacyjnych w PNDS*, Proceedings of 14th International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering, Edited by L. Gucma, Świnoujście, 12-14 Oct. 2011, pp. 41-48, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2011.
2. Chapra Steven C.: *Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists*, 2nd Ed., McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2006.
3. Duczkowski M., Gucma L.: *The Ship Waterplane Determination Method by Gradient Optimization for Multiple Laser Based Positioning System*, Proceedings of 14th International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering, Edited by L. Gucma, Świnoujście, 12-14 Oct. 2011, pp. 95-104, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2011.
4. Kincaid D., Cheney W.: *Numerical Analysis. Mathematics of Scientific Computing*, Wadsworth Group, 3rd Ed., 2002; (in Polish by WNT, Warszawa 2006).
5. Steinemann P. et al: *Determining the Outline Contour of Vehicles in 3D-LIDAR-Measurements*, 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011.

Autorzy:

dr inż. Paweł ZALEWSKI – Akademia Morska w Szczecinie