

Paweł ZALEWSKI

AKADEMIA MORSKA, CENTRUM INŻYNIERII RUCHU MORSKIEGO
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin

Dokładność wyznaczenia pozycji umownej wodnicy statku w Pilotowym Systemie Nawigacyjno-Dokującym

Dr inż. Paweł ZALEWSKI

Dyrektor Centrum Inżynierii Ruchu Morskiego w Akademii Morskiej w Szczecinie. Nawigator morski z wieloletnim stażem na statkach floty handlowej. Kierownik i wykonawca projektów infrastrukturalnych i naukowo-badawczych, które doprowadziły do powstania w Akademii Morskiej zespołu symulatorów nawigacyjno-maneurowych statku oraz innowacyjnych systemów nawigacyjnych w polskich portach morskich. Od 2008 roku ekspert delegacji polskiej w podkomitecie NAV Międzynarodowej Organizacji Morskiej.



e-mail: p.zalewski@am.szczecin.pl

Streszczenie

Nawigacyjny System Pilotowo-Dokujący (PNDS) zaprojektowany w Akademii Morskiej w Szczecinie wykorzystuje pomiary odległości pomiędzy głowicami laserowymi a burtą statku w celu wyliczenia położenia umownej wodnicy (obwiedni) kadłuba. Badania objęły przypadek trzech dalmierzy laserowych ustawionych w linii prostej na nabrzeżu. Takie usytuowanie oraz parametry techniczne czujników powodują niepewność wyznaczenia położenia kadłuba w przyjętym układzie współrzędnych. Wymiary obszaru niepewności można określić metodami probabilistycznymi na przyjętym poziomie prawdopodobieństwa. W przypadku współrzędnych płaskich można przyjąć, że obszar niepewności położenia statku opisują punkty, których współrzędne wyznacza się, jako sumę współrzędnych kolejnych punktów opisujących obwiednię kadłuba statku i odpowiadających im niepewności. W artykule przedstawiono metodę określenia dokładności umownej wodnicy statku wyznaczonej poprzez dopasowanie wzorcowej – modelowej wodnicy do pomierzonych trzech punktów.

Słowa kluczowe: aproksymacja krzywymi sklejanymi, laserowy pomiar odległości, system dokujący, system pilotowy, obszar niepewności.

The accuracy of ship's horizontal plane position determination in the Pilot Navigation-Docking System

Abstract

The Pilot Navigation-Docking System designed in the Maritime University of Szczecin utilizes the range measurements between laser heads and ship's side to determine the position of ship's horizontal plane presented on a mobile computer or tablet display. The study comprises the case in which three networked range finders were deployed on the berth side in a line. Such location of sensors causes the uncertainty in determining the ship's outline contour in relation to the assigned coordinate reference system. The paper presents a method for evaluation of this uncertainty. Three sensors measure distances y_1 , y_2 , y_3 to the ship's board with a preset frequency. Basing on the known sensor positions, in the adopted reference system, the parameters of measurement points are calculated. The next step is finding the ship's position and heading via such rotation and translation of the measurement points that result in the best fit to model a ship horizontal plane contour. This is achieved via equations (2) and (3). Finally, the uncertainty area is determined basing on coordinates equations (4) and (5). The analytically developed formula for the error matrix is most sensitive to the rotation transformation parameter – its minimum value has to be fixed according to preset accuracy criteria and the given ship's horizontal plane.

Keywords: spline approximation, laser range measurement, docking system, pilot system, uncertainty area.

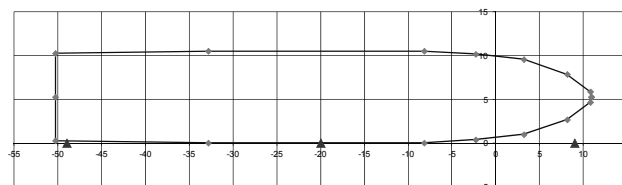
1. Wstęp

Pilotowo-dokujące systemy nawigacyjne PNDS [1] mogą uzyskać 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 jednoznacznie identyfikację położenia kadłuba na akwenu. Najpierw na podstawie znanych pozycji głowic laserowych w przyjętym układzie odniesienia wyznaczone 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. Podobną metodykę przyjęto dla pomiarów pojazdów drogowych wykonywanych jedną głowicą systemu LIDAR w [4].

2. Aproksymacja umownej wodnicy statku

Wzorcowa, umowna wodnica statku szkolno-badawczego „Nawigator XXI” zastosowana w badaniach systemu PNDS składała się z 16 punktów znaczących. Przyjętym układem odniesienia został dwuwymiarowy kartezjański układ współrzędnych o centrum w pozycji współrzędnej punktu dowodzenia po osi X i współrzędnej skrajnych punktów prawej burty (linii odbijaczy na nabrzeżu) po osi Y. Na rys. 1, w przyjętym układzie odniesienia, przedstawiono pozycje głowic laserowych przesunięte wektorowo do linii nabrzeża przy pomocy symboli trójkątnych, a pozycje punktów znaczących wodnicy przy pomocy rombów.



Rys. 1. Wzorcowa, umowna wodnica statku m/s „Nawigator XXI” i przyjęty układ odniesienia

Fig. 1. The model horizontal plane contour of the m/s “Nawigator XXI” and adopted system of coordinates.

Stosując aproksymację punktów znaczących kubicznymi krzywymi sklejanymi (splajnami) [2, 3] otrzymano zadane przedziałami wielomiany 3-go stopnia, reprezentujące prawo-burtową połowę wzorcowej, umownej wodnicy statku. Tab. 1 zawiera $C_{i,k}$ współczynników ($k = 1, 2, \dots, 4$) i -tych ($i = 1, 2, \dots, 8$) przedziałów uszeregowanych od rufy do dziobu.

Tab. 1. Współczynniki wielomianów zadanych przedziałami (1) opisujących połowę wzorcowej, umownej wodnicy m/s „Nawigator XXI”

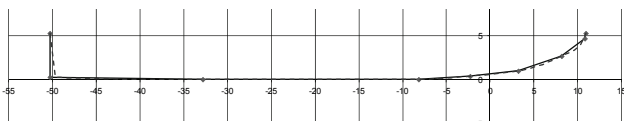
Tab. 1. Coefficients of polynomials in specified intervals (1) describing the half of the model horizontal plane contour of the m/s “Nawigator XXI”

$k \backslash i$	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

Równanie funkcji opisującej połowę wzorcowej, umownej wodnicy m/s „Nawigator XXI” zamieszczono w zależności (1).

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

Rys. 2 przedstawia wodnicę aproksymowaną funkcją sklejaną $s(x)$ złożoną ze 100 punktów (linia kreskowana) na tle wodnicy wzorcowej (linia ciągła).

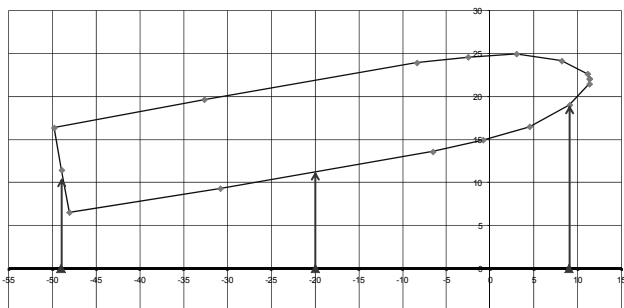


Rys. 2. Aproksymacja funkcją sklejaną połowy wzorcowej, umownej wodnicy m/s „Nawigator XXI”

Fig. 2. Spline approximation of the model horizontal half-plane contour of m/s „Nawigator XXI”

3. Wyznaczenie pozycji i kursu umownej wodnicy statku na akwenu

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 $(x_1, 0), (x_2, 0), (x_3, 0)$ wyliczane są parametry mierzonych punktów (rys. 3). W następnym etapie znajdowane są: 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. Zasada pomiaru trzema dalmierzami laserowymi w systemie PNDS
Fig. 3. Principle of measurement by three laser range finders in PNDS

Założenia i algorytm wyznaczenia położenia umownej wodnicy statku na akwenu z trzech pomiarów laserowych poprzez ich dopasowanie do krzywej wodnicy wzorcowej zaprezentowano w [5]. Analityczna zależność definiująca pozycje poszczególnych

i -punktów aproksymowanej wodnicy (x_{wi}, y_{wi}) oraz kurs ψ w układzie współrzędnych kartezjańskich (rys. 3), przy założeniu dokonywanych transformacji względem głowicy laserowej $(x_2, 0)$, wynosi:

$$[x_{wi}, y_{wi}] = \left(\begin{bmatrix} \cos(l \times r_D) & \sin(l \times r_D) \\ -\sin(l \times r_D) & \cos(l \times r_D) \end{bmatrix} \cdot ([x_i, s(x_i)] - [x_2, 0])^T \right)^T + [x_2, 0] - [j \times t_D, -y_2]$$

$$\psi = 90^\circ - l \times r_D \quad (2)$$

gdzie:

- i – numer punktu w aproksymowanej umownej połowie wodnicy wzorcowej ($i = 1, 2, \dots, 100$);
- j – bezwymiarowa całkowita wartość zmierzonego przesunięcia wektorowego w stosunku do wodnicy wzorcowej ($j = -200, -199, \dots, 199, 200$);
- l – bezwymiarowa całkowita wartość zmierzonego obrotu w stosunku do wodnicy wzorcowej ($l = -300, -299, \dots, 299, 300$);
- r_D – założona jednostka obrotu $[\circ]$, dyskretyzacja obrotu: przykładowo $r_D = 0,1^\circ$
- t_D – założona jednostka translacji [m], dyskretyzacja długości przesunięcia wektorowego: przykładowo $t_D = 0,01$ m
- x_i – współrzędna osi odciętej i -tego punktu umownej połowy wodnicy wzorcowej;
- $s(x_i)$ – aproksymowana współrzędna osi rzędnej i -tego punktu umownej połowy wodnicy wzorcowej,
- T – oznacza transpozycję macierzy,

przy czym wartości j, l wyznaczone są w wyniku najlepszego dopasowania krzywej obwodni wzorcowej do pomierzonych trzech punktów zgodnie z kryterium:

$$g_{l,j} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^3 (s(x_{TOL,j,m}) - s(x_m))^2}{3}} \leq g_{\min} \quad (3)$$

gdzie:

- $g_{l,j}$ – średni błąd kwadratowy (RMSE) dopasowania transformowanych pomiarów do wzorca,
- $x_{TOL,j,m}$ – współrzędne odcięte pomierzonych trzech punktów kadłuba po transformacji,
- x_m – współrzędne odcięte mierzonych punktów kadłuba wzorcowego (umownej wodnicy wzorcowej).

Praktycznie wartość g_{\min} jest szacowaną niepewnością dopasowania krzywej umownej wodnicy do pomiarów. Dla zachowania bezpieczeństwa manewru podejścia do nabrzeża g_{\min} nie powinno przekraczać 10 cm.

4. Dokładności wyznaczenia pozycji umownej wodnicy statku w PNDS

Dokładność stosowanego systemu nawigacyjnego można określić analitycznie na podstawie znanych parametrów niepewności:

- współrzędnych wyznaczonej w dwóch wymiarach pozycji (punktu) w przyjętym układzie współrzędnych (kartezjański 0XY, UTM WGS 84, Lat./Lon. WGS 84),
- kursu rzeczywistego,
- wynikającej z zastosowania modelu aproksymacji kształtu obwodni statku,
- transformacji do innego układu współrzędnych.

Obszar niepewności położenia statku jest to obszar płaski prawdopodobnego położenia kadłuba statku, a jego wymiary można określić metodami probabilistycznymi na przyjętym poziomie prawdopodobieństwa.

W pomiarach położenia statku, każda współrzędna opisujących go punktów obarczona jest błędem. W przypadku współrzędnych płaskich można przyjąć, że obszar niepewności położenia statku opisują punkty, których współrzędne wyznacza się, jako sumę współrzędnych kolejnych punktów opisujących obwiednię statku i odpowiadających im niepewności:

$$x'_{Wi} = x_{Wi} \pm c \alpha_{Wi}, \quad (4)$$

$$y'_{Wi} = y_{Wi} \pm c \sigma y_{Wi} \quad (5)$$

gdzie:

- x'_{Wi}, y'_{Wi} – współrzędne płaskie punktów opisujących obszar niepewności położenia statku,
- x_{Wi}, y_{Wi} – współrzędne płaskie punktów opisujących statek,
- $\alpha_{Wi}, \sigma y_{Wi}$ – niepewność współrzędnych punktów opisujących statek,
- c – współczynnik rozszerzenia: $c \approx 2$ dla 95% poziomu ufności,

Współrzędne punktów obwiedni $P_{Wi}(x_{Wi}, y_{Wi})$ dla kolejno zarejestrowanych trzech punktów odniesienia z pomiarów laserowych oraz kurs ψ wyznaczone są w systemie PNDS na podstawie zależności (2). W układzie dwu współrzędnych, właściwości błędów określa funkcja rozkładu normalnego dwuwymiarowego. Niepewność wyznaczenia punktów tworzących obwiednię statku można określić poprzez macierz kowariancji wektora przyrostu współrzędnych tych punktów. Korzystając z ogólnej postaci prawa przeniesienia błędów, nie uwzględniając błędów aproksymacji wzorcowej wodnicy statku, kowariancję σ_F błędów funkcji obserwacji x_{Wi}, y_{Wi} wyznaczyć można z następującej zależności:

$$\sigma_F = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{Wi}}{\partial x_i} & \frac{\partial x_{Wi}}{\partial y} & \frac{\partial x_{Wi}}{\partial \alpha_r} \\ x_i & y & \alpha_r \\ \frac{\partial y_{Wi}}{\partial x_i} & \frac{\partial y_{Wi}}{\partial y} & \frac{\partial y_{Wi}}{\partial \alpha_r} \\ x_i & y & \alpha_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma x_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \alpha_r^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{Wi}}{\partial x_i} & \frac{\partial y_{Wi}}{\partial x_i} \\ x_i & x_i \\ \frac{\partial x_{Wi}}{\partial y} & \frac{\partial y_{Wi}}{\partial y} \\ y & y \\ \frac{\partial x_{Wi}}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial y_{Wi}}{\partial \alpha_r} \\ \alpha_r & \alpha_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie:

- α_r^2 – wariancja przesunięcia wektorowego podczas dopasowania krzywej wodnicy, $x_r = j \times t_D$; $\sigma x_i = t_D$
- σy^2 – wariancja pomiaru odległości y przez dalmierz laserowy, będąca maksymalną z wariancji pomiarów y_1, y_2, y_3 ;
- $\sigma \alpha_r^2$ – wariancja obrotu podczas dopasowania krzywej wodnicy, $\alpha_r = l \times r_D$; $\sigma \alpha_r = r_D$

Podstawiając do (6) pochodne cząstkowe z zależności (2) otrzymujemy:

$$\sigma_F = \begin{bmatrix} -1 & 0 & s(x_i) \cos \alpha_r - (x_i - x_2) \sin \alpha_r \\ 0 & 1 & -s(x_i) \sin(\alpha_r) - (x_i - x_2) \cos \alpha_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma x_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \alpha_r^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ s(x_i) \cos \alpha_r - (x_i - x_2) \sin \alpha_r & -s(x_i) \sin(\alpha_r) - (x_i - x_2) \cos \alpha_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

Po przemnożeniu macierzy w zależności (7) powstaje macierz błędów współrzędnych postaci:

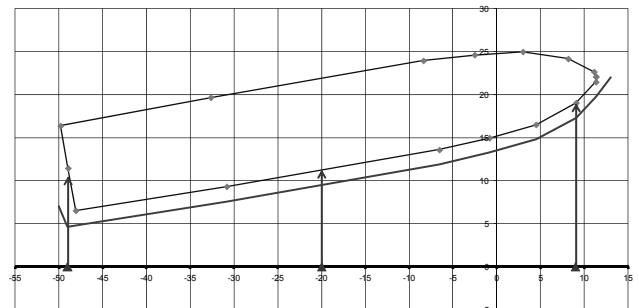
$$\sigma_F = \begin{bmatrix} \alpha_{Wi}^2 & \alpha_{Wi} y_{Wi} \\ \alpha_{Wi} y_{Wi} & \sigma y_{Wi}^2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

w której wyróżnić można poszczególne niepewności standardowe wyznaczonych punktów obwiedni kadłuba i ich kowariancje. Z zależności (4) i (5) można natomiast wyznaczyć współrzędne punktów opisujących obszar niepewności położenia statku w przyjętym układzie kartezjańskim. Badania symulacyjne wykazały największą wrażliwość uzyskiwanej dokładności na zmianę niepewności $\sigma \alpha_r$. Praktycznie, aby uzyskać zakładaną wartość dopasowania g_{min} w granicach 10cm, która wraz z założoną niepewnością pomiaru odległości dalmierzem laserowym σy wpływa na wypadkowy obszar niepewności położenia umownej wodnicy, należy przyjąć $\sigma \alpha_r = r_D < 0,01^\circ$.

Przykładowe parametry uzyskanej macierzy błędów przy parametrach $\alpha_r = 0,01$ m, $\sigma y = 0,05$ m, $\sigma \alpha_r = 0,1^\circ$ dla punktu wodnicy o współrzędnych (-30 m, 7 m) to:

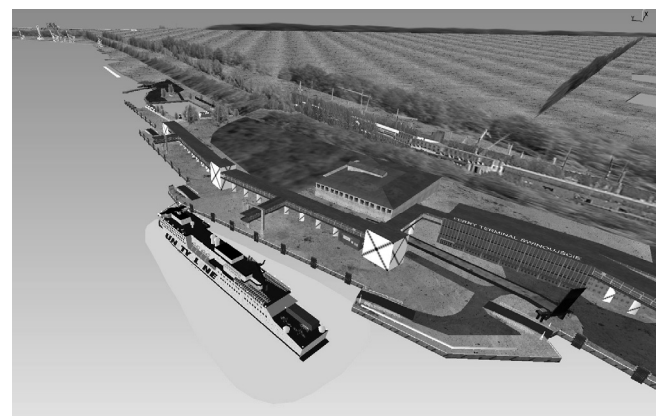
$$\sigma_F = \begin{bmatrix} 0.745 & 0.745 \\ 0.745 & 0.748 \end{bmatrix}$$

Rezultat implementacji algorytmu dla podchodzącego do nabrzeża „Nawigatora XXI” przy parametrach $\alpha_r = 0,01$ m, $\sigma y = 0,05$ m, $\sigma \alpha_r = 0,1^\circ$ i odniesieniu do środkowej głowicy laserowej przedstawia rys. 4, a w środowisku symulatora manewrowego ruchu statku w AM w Szczecinie dla umownej wodnicy promu „Piast” i odniesieniu do dziobowej głowicy laserowej prezentuje rys. 5.



Rys. 4. Obszar niepewności położenia m/s „Nawigatora XXI” podchodzącego do nabrzeża w AM w Szczecinie

Fig. 4. The area of uncertainty of the m/s “Nawigator XXI” coming to MUS berth in Szczecin



Rys. 5. Obszar niepewności położenia promu podchodzącego do nabrzeża w Świnoujściu – symulacja komputerowa

Fig. 5. The area of uncertainty of the ferry berthing in Świnoujście harbour – computer simulation

5. 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. Ze względu na różnorodność kształtów wodnic występuje czasem brak możliwości określenia funkcji ciągłej w tożsamej dziedzinie dla burty, obła rufowego i dziobu, co powoduje konieczność podziału wodnicy wzorcowej na części. W każdym przypadku uzyskaną dokładność położenia umownej wodnicy na akwencie cechuje największa wrażliwość na zmianę jednostkowego kąta obrotu podczas dopasowania pomierzonych punktów do krzywej wzorcowej.

W kolejnym etapie przeprowadzone badania rzeczywiste i symulacyjne będą uzupełnione o analizę dokładności stosowanych zestawów laserowych w różnorodnych warunkach zewnętrznych (pogoda, kołysania mierzonego statku).

6. Literatura

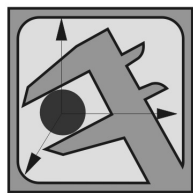
- [1] Bąk A.: Zintegrowany system wizualizacji parametrów nawigacyjnych w PNDS, Proceedings of 14th International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering, Edited by L. Gućma, Świnoujście, 12-14 Oct. 2011, pp. 41-48, Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2011.
- [2] Chapra S. C.: Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineers and Scientists, 2nd Ed., McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2006.
- [3] Kincaid D., Cheney W.: Numerical Analysis. Mathematics of Scientific Computing, Wadsworth Group, 3rd Ed., 2002; (in Polish by WNT, Warszawa 2006).
- [4] 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.
- [5] Zalewski P.: Problematyka wyznaczenia położenia umownej wodnicy statku w pilotowym systemie nawigacyjno-dokującym, Technika Transportu Szynowego 12/2012, EMI-PRESS, Łódź 2012.

otrzymano / received: 18.03.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE



CONTROL-TECH

Targi Przemysłowej Techniki Pomiarowej
oraz Badań Nieniszczących

25-27 IX 2013, Kielce

SZEROKI WYBÓR URZĄDZEŃ NDT

* **CENY PROMOCYJNE
DO 15 CZERWCA**

mechaniK MM Magazyn Przemysłowy **PAR** TAM Technologia Inżynieria Montażu

Patronat medialny:



Wkrótce otwarcie!

NOWE CENTRUM KONGRESOWE

TARGI KIELCE

