

Piotr T. KANIEWSKI¹, Paweł W. KANIEWSKI²

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

²Wojskowy Instytut Łączności, Zegrze

WYBRANE PROBLEMY ZWIĄZANE Z WYKORZYSTYWANIEM AUV DO MONITOROWANIA AKWENÓW, OBIEKTÓW I INSTALACJI PODWODNYCH

Abstract

The paper presents the most important problems of use of autonomous underwater vehicles in monitoring water basins, objects and installations. Subsequently, it describes a solution to the problem of precise position estimation of the vehicle with use of an integrated positioning system designed by the authors. The structure of this system and its algorithm of navigation data processing are presented. The paper contains also chosen simulation results and conclusions.

Streszczenie

W referacie omówiono wybrane problemy związane z wykorzystywaniem autonomicznych pojazdów podwodnych do monitorowania akwenów, obiektów i instalacji podwodnych. Przedstawiono sposób rozwiązania problemu dokładnego wyznaczania położenia pojazdu, prezentując własne opracowanie zintegrowanego systemu pozycjonującego. Omówiono m.in. strukturę systemu i algorytm przetwarzania danych nawigacyjnych. Przedstawiono także wybrane wyniki badań symulacyjnych opracowanego systemu i wpływające z tych badań wnioski.

1. WPROWADZENIE

Autonomiczne pojazdy podwodne AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) stanowią jeden z kilku typów stosowanych obecnie niewielkich bezzałogowych pojazdów podwodnych. Znajdują one coraz szersze zastosowanie w badaniach oceanograficznych, obejmujących między innymi tworzenie map podwodnych, zbieranie informacji na temat prądów morskich, ukształtowania dna morskiego, temperatury, stopnia zasolenia wód itp. Używa się ich także do wykonywania prac podwodnych, przeprowadzania podwodnych inspekcji obiektów pływających, zatopionych lub osadzonych na dnie oraz w poszukiwaniach wraków, kabli i rurociągów [1-4, 6, 10, 11]. Dzięki szczególnym własnościom AUV

znajdują również liczne zastosowania wojskowe, m.in. do poszukiwania i niszczenia min podwodnych oraz do ochrony portów [2, 6, 10, 11].

Długość typowego AUV wynosi kilka metrów, a jego masa to na ogół kilkaset kilogramów. Rozwiązania stosowane przez producentów tego typu pojazdów i ośrodki badawcze zajmujące się konstruowaniem ich prototypów są jednak bardzo zróżnicowane [3, 11]. Atrakcyjność AUV polega między innymi na ich dużym zasięgu oraz możliwości wykonywania misji ze stosunkowo dużą prędkością. Zasięg operacyjny typowych AUV wynosi ponad 1000 km i w miarę rozwoju techniki stale rośnie, zaś osiągana przez te pojazdy prędkość względem wody jest rzędu 6-7 km/h. Maksymalna głębokość zanurzenia AUV wynosi zwykle do 6 km, co sprawia, że większość głębiny oceanów staje się dla tych pojazdów dostępna. Ostatnie doniesienia wskazują, że niektóre AUV są w stanie pracować nawet przy zanurzeniu dochodzącym do rekordowej obecnie głębokości 11 km [3].

Obecnie najpoważniejszymi wyzwaniami technicznymi związanymi z eksploatacją AUV jest zapewnienie efektywnego źródła zasilania systemów pokładowych oraz możliwości dokładnego pozycjonowania i nawigacji pojazdu. Zasilanie jest zwykle realizowane z akumulatorów, np. litowo-jonowych, o dużej pojemności i wydajności. Na pokładzie AUV stosuje się wiele urządzeń elektrycznych o stosunkowo niewielkim, lecz ciągłym poborze mocy oraz niewielką liczbę urządzeń o znacznym poborze mocy, sięgającym 1 kW, które pracują jedynie okresowo [3]. Najpoważniejszym obciążeniem zasilania jest zwykle zespół napędowy AUV. Znacznym poborem mocy charakteryzują się również manipulatory stosowane w niektórych AUV do wykonywania prac, pomiarów lub zbierania próbek na zewnątrz pojazdu, a także elementy oświetlenia.

Dokładna znajomość własnego położenia stanowi jedno z najważniejszych wymagań podczas realizacji misji przez AUV. Ma ona bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo samego AUV oraz innych pojazdów, infrastruktury podwodnej, ekosystemu itd. W badaniach oceanograficznych, dokładne określenie położenia pojazdu w czasie wykonywania pomiarów za pomocą specjalistycznej aparatury naukowo-badawczej AUV często decyduje o wartości zebranych danych, natomiast w aplikacjach przemysłowych i wojskowych jest kluczowa dla skuteczności wykonywanych prac lub misji.

2. METODY POZYCJONOWANIA AUV

Pozycjonowanie AUV jest zadaniem szczególnie skomplikowanym, ponieważ niewielkie wymiary pojazdu, ograniczone możliwości zasilania urządzeń z pokładowych źródeł energii oraz względy ekonomiczne narzucają istotne ograniczenia na możliwe do wykorzystania pokładowe urządzenia i systemy pozycjonujące. Jednym z zasadniczych problemów

występujących w pozycjonowaniu pojazdów podwodnych jest brak możliwości wykorzystania sygnałów systemów GNSS podczas zanurzenia. Konieczne jest zatem poszukiwanie alternatywnych sposobów określania położenia.

Typowymi urządzeniami stosowanymi do pozycjonowania pojazdów podwodnych są systemy nawigacji inercyjnej INS lub inercjalne jednostki pomiarowe IMU, hydroakustyczne systemy pozycjonujące bardzo krótkiej linii bazowej USBL (*Ultra-Short Base Line*), krótkiej linii bazowej SBL (*Short Base Line*) i długiej linii bazowej LBL (*Long Base Line*), logi Dopplera, girokompasy i kompasy magnetyczne, inklinometry oraz ciśnieniomierze i wysokościomierze akustyczne [5, 10]. Podejmowane są również próby wykorzystania obserwacyjno-porównawczej metody pozycjonowania [9, 10], w której położenie pojazdu jest ustalane na podstawie porównania obrazu otoczenia z cyfrową mapą dna morskiego.

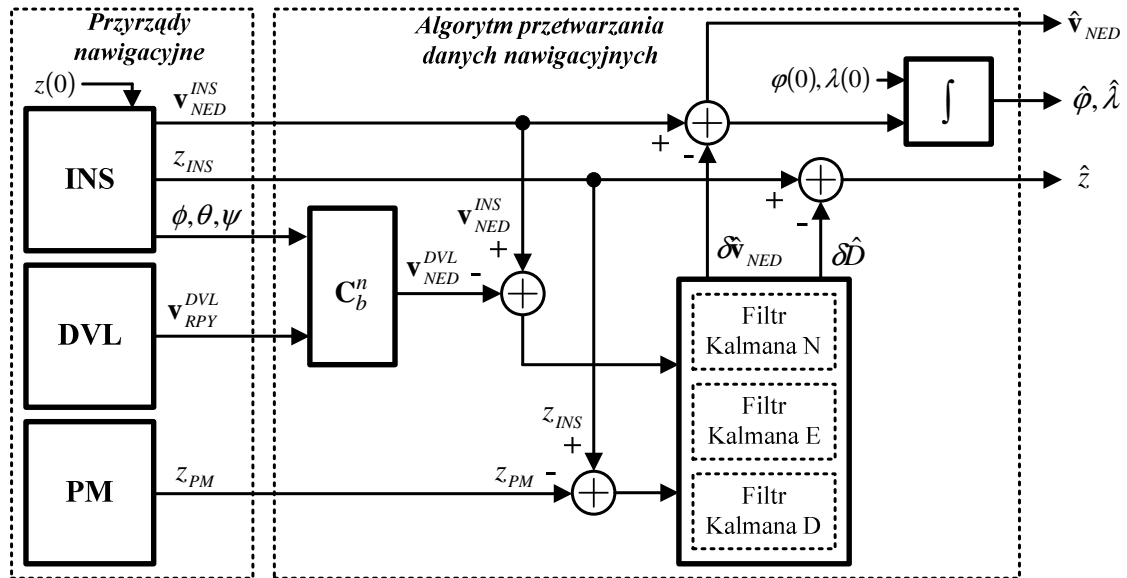
Zaletą nawigacji inercyjnej jest możliwość jej zastosowania w dowolnym, nawet nieznanym akwenie. Nawigacja hydroakustyczna jest nieco bardziej kłopotliwa, ponieważ wymaga rozmieszczenia w rejonie działania AUV transponderów lub nadajników hydroakustycznego systemu pozycjonującego. Elementy systemu mogą być umieszczone pod dnem statku zapewniającego wsparcie AUV z powierzchni, na dnie akwenu lub pod bojami rozmieszczonymi na powierzchni wody.

Zastosowanie metody obserwacyjno-porównawczej wymaga posiadania odpowiednich map dna morskiego, które są dostępne jedynie dla niewielkiej części akwenów. Z tego względu rozwijającą się wersją metody pozycjonowania obserwacyjno-porównawczego jest równoczesne tworzenie mapy otoczenia i jej wykorzystywanie do wyznaczania położenia. Problem ten, określany jako SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) oraz CML (*Concurrent Mapping and Localization*) [12].

3. SYSTEM POZYCJONUJĄCY AUV

3.1. Struktura systemu

Opisany w referacie system pozycjonowania autonomicznego pojazdu podwodnego AUV, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1, składa się z czterech przyrządów nawigacyjnych oraz algorytmu przetwarzania pochodzących z nich danych. Grupa przyrządów nawigacyjnych zawiera INS, log Dopplera DVL (*Doppler Velocity Log*), ciśnieniowy miernik głębokości zanurzenia pojazdu PM (*Pressure Meter*) oraz odbiornik GNSS.



Rys. 1 Zintegrowany system pozycjonujący INS/DVL/PM

Jako podstawowe urządzenie pozycjonujące (urządzenie referencyjne) wykorzystano INS, którego dane korygowano pomiarami prędkości z DVL i głębokości z PM. Zmiany położenia obliczane przez INS odnoszono do położenia początkowego $\phi(0), \lambda(0), z(0)$, określanego przed zanurzeniem za pomocą odbiornika GNSS. Odbiornika GNSS nie uwidocznilo na rys. 1, ponieważ jego rola ograniczała się do inicjalizacji położenia.

System INS/DVL/PM służy do określania położenia pojazdu (ϕ, λ) w układzie współrzędnych ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed*) [7], głębokości zanurzenia z oraz prędkości $\mathbf{v}_{NED} = [v_N \ v_E \ v_D]^T$ w układzie współrzędnych NED (*North-East-Down*) [7]. Wymienione elementy nawigacyjne są wyznaczone w wyniku przetwarzania:

1. trzech składowych prędkości $\mathbf{v}_{NED}^{INS} = [v_N^{INS} \ v_E^{INS} \ v_D^{INS}]^T$ z INS, wyrażonych w układzie współrzędnych NED,
2. głębokości zanurzenia pojazdu z_{INS} z systemu inercyjnego,
3. trzech kątów orientacji przestrzennej (przechylenia ϕ , pochylenia θ i kursu ψ) z INS,
4. trzech składowych prędkości $\mathbf{v}_{RPY}^{DVL} = [u \ v \ w]^T$ z logu Dopplera, wyrażonych w układzie współrzędnych RPY (*Roll-Pitch-Yaw*) [7],
5. głębokości zanurzenia pojazdu z_{PM} z głębokościomierza.

3.2. Algorytm przetwarzania danych

Zasadniczą część algorytmu przetwarzania danych nawigacyjnych w systemie pozycjonowania AUV stanowią trzy filtry Kalmana (N, E, D),

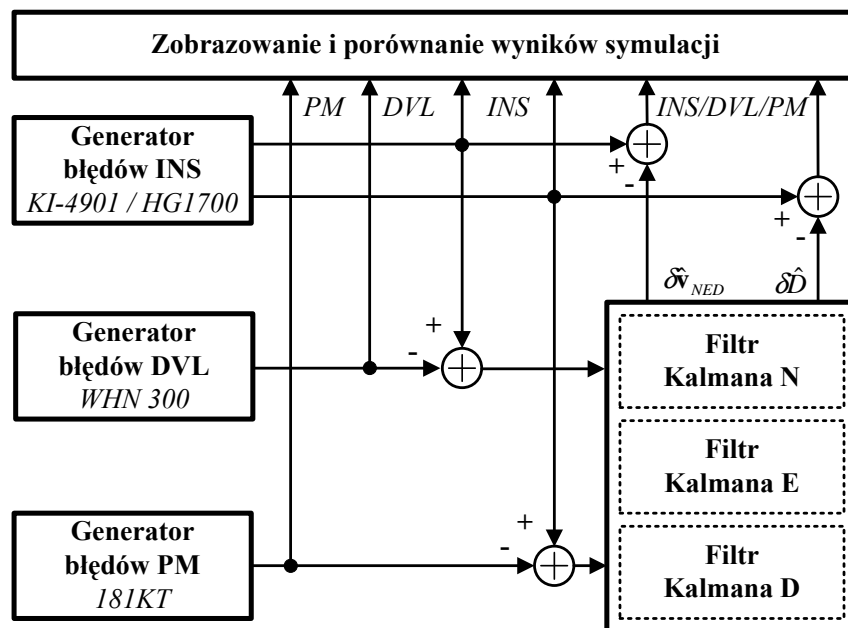
estymujące błędy prędkości $\hat{\delta}\mathbf{v}_{NED} = [\hat{\delta}v_N \quad \hat{\delta}v_E \quad \hat{\delta}v_D]^T$ oraz błąd składowej pionowej położenia (głębokości) $\hat{\delta}D$ systemu nawigacji inercyjnej [7]. Estymacja błędów INS odbywa się w wyniku wspólnego przetwarzania danych z INS, DVL i PM.

Ze względu na komplementarność charakterystyk statystycznych błędów INS i przyrządów korekcyjnych (błędy INS są wolnozmiennie i rosną w sposób nieograniczony, natomiast błędy DVL i PM są szybkozmiennie i ograniczone), integrację wymienionych urządzeń przeprowadzono metodą kompensacji [7]. W systemie zintegrowanym tą metodą wektory pomiarowe na wejściach filtrów Kalmana są tworzone przez odjęcie od pomiarów przyrządu referencyjnego (INS) pomiarów przyrządów korekcyjnych DVL i PM. W wyniku tej operacji wektory pomiarowe zawierają wyłącznie kombinacje błędów pomiarowych INS i DVL oraz PM. Rola filtrów Kalmana polega na estymacji błędów INS (wydzielenia tych błędów z kombinacji błędów poszczególnych przyrządów) w celu korekcji INS.

Oprócz filtracji Kalmana, algorytm przetwarzania danych systemu zintegrowanego wykonuje transformację prędkości z logu Dopplera \mathbf{v}_{RPY}^{DVL} z układu współrzędnych RPY do układu NED oraz oblicza położenie pojazdu (φ, λ) w wyniku całkowania prędkości z INS, skorygowanej z wykorzystaniem danych z logu Dopplera. Obliczenie prędkości \mathbf{v}_{NED}^{DVL} w układzie NED na podstawie wektora \mathbf{v}_{RPY}^{DVL} wyrażonego w układzie RPY jest konieczne w celu umożliwienia wspólnego przetwarzania prędkości \mathbf{v}_{NED}^{INS} z INS i \mathbf{v}_{NED}^{DVL} z logu Dopplera za pomocą filtrów Kalmana. Przekształcenie współrzędnych jest wykonywane w wyniku pomnożenia wektora \mathbf{v}_{RPY}^{DVL} przez macierz transformacji współrzędnych \mathbf{C}_b^n [7].

4. BADANIA SYMULACYJNE

System INS/DVL/PM poddano badaniom symulacyjnym zgodnie z metodyką przedstawioną na rys. 2. Badania miały na celu ocenę i porównanie dokładności systemu zintegrowanego wyposażonego w INS o różnych dokładnościach. Polegały one na wygenerowaniu błędów urządzeń nawigacyjnych INS, DVL i PM, a następnie na ich przetworzeniu za pomocą trzech filtrów Kalmana, osobno dla kanału N, E i D systemu pozycjonowania AUV. Podczas badań nie zachodziła potrzeba generacji trajektorii pojazdu, ponieważ w systemie efektywnie przetwarzane są wyłącznie błędy przyrządów nawigacyjnych, które dla przyjętego modelu systemu są niezależne od pełnych zmiennych stanu, tj. położenia, prędkości i orientacji przestrzennej pojazdu.

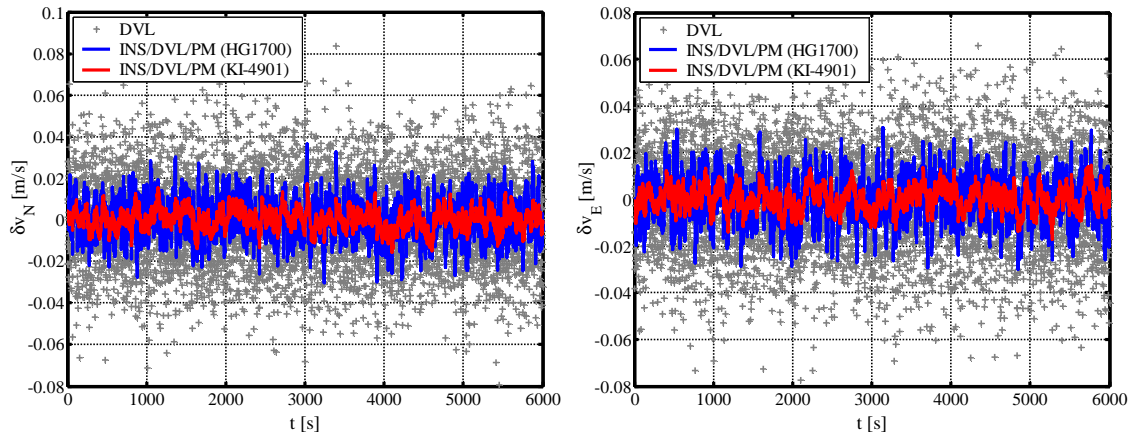


Rys. 2 Metodyka badań systemu INS/DVL/PM

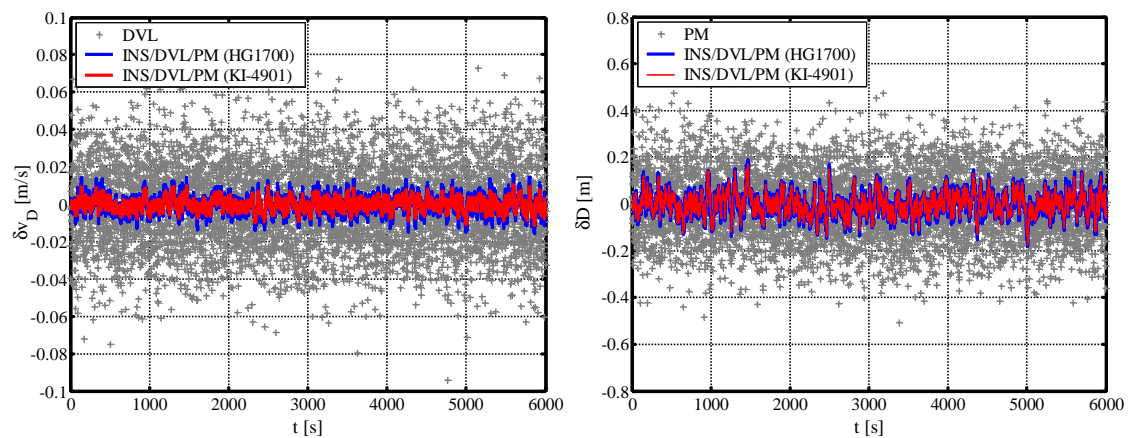
Parametry modeli służących do generacji błędów INS, DVL i PM, związane z dokładnością wymienionych przyrządów, wyznaczono na podstawie specyfikacji wybranych urządzeń, powszechnie stosowanych we współczesnych AUV. Założono, że system zawiera log Dopplera typu Workhorse Navigator WHN 300, firmy Teledyne RD Instruments oraz ciśnieniowy miernik głębokości typu Digiquartz Depth Sensors 181KT, firmy Paroscientific. Wymienione przyrządy są stosowane w najbardziej znanych współczesnych pojazdach AUV, m.in. HUGIN [5], NEREUS [3], MORPHEUS [4] oraz MARIDAN [8].

W celu oceny wpływu dokładności INS na dokładność systemu zintegrowanego, założono, że mogą w nim być wykorzystywane dwa, znacznie różniące się dokładnością, systemy nawigacji inercyjnej. Do porównań wybrano INS typu KI-4901 firmy Kearfott oraz znacznie mniej dokładny INS typu HG1700 firmy Honeywell. Oba urządzenia są stosowane w pojazdach podwodnych. Systemy INS firmy Kearfott znalazły zastosowanie m.in. w AUV MARIDAN [8], natomiast HG1700 firmy Honeywell – w AUV MORPHEUS [4].

Wybrane wyniki badań symulacyjnych systemu INS/DVL/PM przedstawiono na rys. 3-... . Rys. 3 i 4 zawierają porównanie błędów prędkości oraz błędów składowej pionowej położenia (głębokości) z systemu INS/DVL/PM oraz błędów prędkości z DVL i głębokości z PM, dla systemów zintegrowanych zawierających oba typy INS.



Rys. 3 Błędy prędkości w kanałach N i E



Rys. 4 Błędy prędkości w kanale D oraz błędy głębokości zanurzenia

5. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych systemu INS/DVL/PM pozwalają na stwierdzenie, że dzięki korekcji składowych horyzontalnych prędkości z INS pomiarami prędkości z DVL wyeliminowano narastające w czasie błędy prędkości INS i znacznie zredukowano szybkozmienne błędy logu Dopplera. Stopień redukcji błędów DVL był tym większy, im dokładniejszy INS stosowano w systemie i wynosił ponad 50% w systemie z HG1700 oraz ponad 70% w systemie zawierającym KI-4901.

Można zauważyć, że błędy prędkości są niemal dwukrotnie mniejsze w kanale pionowym niż w kanałach horyzontalnych systemu INS/DVL/PM. Wynika to z faktu, że korekcja tego błędu odbywa się z wykorzystaniem pomiarów DVL i PM, podczas gdy w kanałach horyzontalnych dostępne są wyłącznie dane korekcyjne z DVL.

Ponadto, dostępność pomiarów głębokości zanurzenia pojazdu z PM pozwoliła na eliminację narastających błędów głębokości określonej przez INS. Wspólne przetwarzanie danych INS, DVL i PM umożliwiło przy tym znaczące zmniejszenie błędów przypadkowych głębokościomierza.

Literatura

1. An E.: A comparison of AUV navigation performance: a system approach, *IEEE Oceans Conference*, **2003**, s. 654-662.
2. Bovio E., Cecchi D., Baralli F.: Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations, *Annual Reviews in Control* **30**, **2006**, s. 117-130.
3. Bowen A.D. et al.: The Nereus Hybrid Underwater Robotic Vehicle for Global Ocean Science Operations to 11,000m Depth, *IEEE Oceans Conference*, **2008**.
4. Grenon G. et al.: Enhancement of the Inertial Navigation System for the Morpheus Autonomous Underwater Vehicles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, **2001**, s. 548-560.
5. Hegrenaes O., Berglund E., Hallingstad O.: Model-Aided Inertial Navigation for Underwater Vehicles, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **2008**, s. 1069-1076.
6. Jalving B. et al.: A Toolbox of Aiding Techniques for the HUGIN AUV Integrated Inertial Navigation System, *IEEE Oceans Conference*, **2003**, s. 1146-1153.
7. Kaniewski P.: *Struktury, modele i algorytmy w zintegrowanych systemach pozycjonujących i nawigacyjnych*, Wyd. WAT, Warszawa, 2010.
8. Larsen M.B.: High Performance Doppler-Inertial Navigation-Experimental Results, *IEEE Oceans Conference*, **2000**, s. 1449-1456.
9. Oliveira P.: MMAE Terrain Reference Navigation for Underwater Vehicles using Eigen Analysis, *IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, **2005**.
10. Stutters L. et al.: Navigation Technologies for Autonomous Underwater Vehicles, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, Vol. 38, No. 4, **2008**, s. 581-589.
11. Wernli R.L.: AUVs – A Technology Whose Time Has Come, *International Symposium on Underwater Technology*, **2002**, s. 309-314.
12. West M.E., Syrmos V.L.: Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Using Robust SLAM, *IEEE International Conference on Control Applications*, **2006**, s. 1801-1806.