

WAŻ Mariusz¹
NAUS Krzysztof²

Wykorzystanie obrazów sonarowych do wyznaczania pozycji pojazdów podwodnych

nawigacja podwodna
sonar
hydrografia

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki badań wykorzystania tzw. „porównawczych” metod wyznaczania pozycji w prowadzeniu nawigacji pojazdu podwodnego. Metody te cechują się autonomią i mogą być stosowane pod wodą gdzie jest ograniczona możliwość zastosowania innych metod pozycjonowania. Podstawą do przeprowadzenia badań były obrazy sonarowe dna morskiego pozyskane w wyniku symulacji komputerowej

USAGE OF SONAR IMAGES IN UNDERWATER NAVIGATION

Abstract

The paper presents results of the research on application of the so-called comparative methods in underwater navigation. The very useful properties of these methods are autonomy and applicability in underwater conditions where other positioning methods cannot usually be used. Throughout the experiments simulated sonar images of the sea bottom were applied.

1. WSTĘP

Pojazdy podwodne to urządzenie bezzałogowe lub załogowe przystosowane do poruszania się w toni wodnej, z własnym napędem lub bez napędu, sterowane zdalnie lub automatycznie. Stanowią one mobilną platformę montażową dla różnych urządzeń pokładowych dzięki którym, mogą realizować różne zadania tj: inspekcja obiektów podwodnych, badania naukowe, prace ratownicze, wspomaganie pracy nurka, działania militarne, itp.

Do realizacji tych funkcji konieczne jest określenie współrzędnych pozycji pojazdu podwodnego w toni wodnej.

Podstawową metodą wyznaczania pozycji pod wodą jest zliczenie drogi, czyli tzw. prowadzenie nawigacji zliczeniowej. Do systemów wykorzystujących tą metodę zaliczamy INS (System Nawigacji Inercyjnej). Daje on doskonałe rezultaty dzięki zastosowaniu nowoczesnych czujników mierzących przyspieszenia we wszystkich kierunkach. Zastosowanie trzech akcelerometrów w krótkich odstępach czasu pozwala na precyzyjne wyznaczenie pozycji. Niestety z biegiem czasu błąd pozycji szybko przyrasta. Wymagane jest zatem zastosowanie innych metod i systemów. Do takich należą hydroakustyczne systemy wyznaczania pozycji. Systemy te dzielą się na: systemy ultra krótkiej linii bazowej (USBL - Ultra Short BaseLine), systemy krótkiej linii bazowej (SBL - Short BaseLine) oraz systemy długiej linii bazowej (LBL - Long Baseline). W systemach tych do określenia pozycji wykorzystuje się różnice odległości pomiędzy antenami odbiorczymi poszczególnych przetworników a anteną nadawczą transpondera umieszczonego na pojeździe podwodnym.

W projektowaniu nowych systemów dąży się tego aby posiadały one cechę autonomności, czyli niezależność od zewnętrznych źródeł informacji. Możliwe jest to np. stosując do wyznaczania pozycji metody nawigacji porównawczej.

2. BADANIA SYMULACYJNE

Badania nad możliwością wykorzystania porównawczych metod wyznaczania pozycji w nawigacji pojazdów podwodnych przeprowadzono na opierając się na danych symulowanych. Spowodowane to było brakiem możliwości testowania rzeczywistych systemów sonarowych (ograniczenia finansowe, czasowe, brak możliwości przeprowadzenia testów morskich). Celem badań było określenie przydatności ww. metod do określania pozycji pojazdów podwodnych oraz określenie kierunku dalszych badań w tym zakresie.

Do testów wykorzystano Symulator Obrazów Sonarowych opracowany w INiHM i opisany w [1] [4] [5] [6].

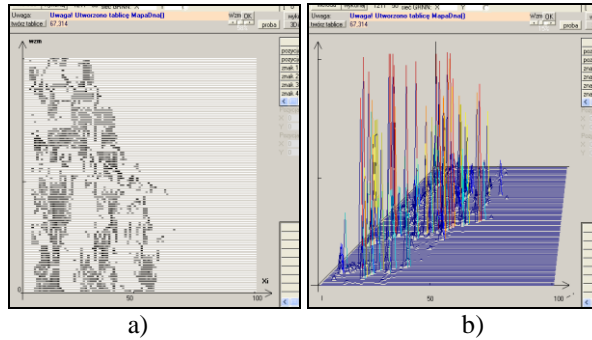
Obrazy sonarowe powstają podczas prowadzenia sondażu akwenu, który polega na określeniu odległości od przetwornika hydroakustycznego do poszczególnych elementów dna morskiego. Wszystkie wykryte obiekty są identyfikowane pod względem siły celu i przedstawione graficznie w postaci echogramu. Odległość od wykrytego elementu dna obliczana jest na podstawie pomiaru różnicy czasu pomiędzy wysłaniem sygnału, a jego odebraniem. Siła celu zależy od kąta pod jakim pada wiązka na powierzchnię obiektu i od rodzaju dna. W symulatorze uwzględnia się rodzaj dna morskiego,

¹Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 61.
Tel: +48 58 626 26 58, E-mail: m.waz@amw.gdynia.pl;

²Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte, Instytut Nawigacji i Hydrografii Morskiej; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 61.
Tel: +48 58 626 29 50, E-mail: k.naus@amw.gdynia.pl;

jego ukształtowanie w stosunku do płaszczyzny przetwornika hydroakustycznego, częstotliwość sondowania, prędkość przejścia jednostki sondującej oraz parametry techniczne sonaru, takie jak kąt nachylenia przetwornika sonaru względem pionu, moc wysyłanego sygnału, zasięg, szerokość wiązki w pionie i poziomie, płynną regulację wzmocnienia odebranego sygnału. Wyniki pomiarów rejestrowane są cyfrowo.

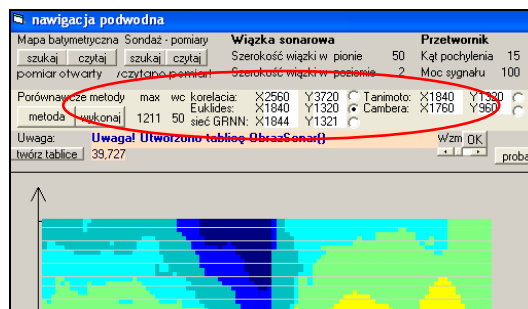
Przed generowaniem obrazów sonarowych specjalnie dobiera się model przestrzennego dna. Dalszy ciąg tworzenia obrazów sonarowych polega na wprowadzeniu algorytmu, który oblicza wartość natężenia sygnału zwrotnego, powracającego do przetwornika urządzenia hydroakustycznego i następnie na tej podstawie oblicza odległość do poszczególnych „oświetlonych” elementów dna morskiego. Po tym etapie następuje wizualizacja danych wejściowych. Polega ona na prezentacji profili odebranych sygnałów w postaci sonogramu.



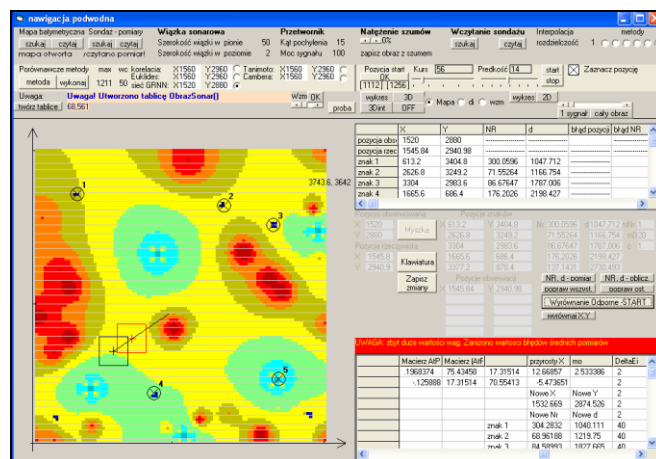
Rys. 1. Kanał wizualizacji pracy sonaru bocznego (sonogram „klasyczny” – a), sonogram 3D – b)) [6]

W badaniach symulacyjnych sprawdzano szereg metod porównawczych. W algorytmach wzajemnego dopasowania obrazów wykorzystują one tzw. funkcje podobieństwa, które określają wzajemną zależność między badanymi obrazami. Opisane są one szczegółowo w [2] [3] [4]. Do badań wykorzystano:

- A. Funkcje odległości: Odległość Euklidesa, Odległość Camberra;
- B. Funkcje bliskości: bliskość Tanimoto;
- C. Funkcja korelacji liniowej Pearsona.



Rys. 2. Fragment interfejsu programu „nawigacja podwodna” obejmujący obiekt do wyznaczenia pozycji obserwowanej metodami porównawczymi



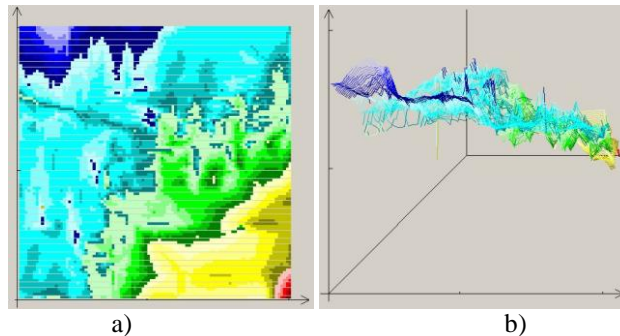
Rys. 3. Interfejs operatora (użytkownika) programu „nawigacja podwodna” [11]

Dla potrzeb ćwiczenia opracowano dwa numeryczne modele terenu (mapy dna):

- Akwen A o wymiarach 5,0×5,0 mil morskich, który obejmuje fragment Zatoki Gdańskiej w rejonie ujścia Przekopu Wisły, ujścia Wisły śmiałej oraz tor podejściowy do Portu Północnego i wyznaczone punkty o następujących współrzędnych geograficznych:

- 1) $\varphi = 54^{\circ}21,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}45,0'E$
- 2) $\varphi = 54^{\circ}26,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}45,0'E$
- 3) $\varphi = 54^{\circ}21,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}53,58'E$
- 4) $\varphi = 54^{\circ}26,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}53,58'E$

Akwen charakteryzuje się zróżnicowaną rzeźbą dna. Minimalna głębokość to 4,4 m, a maksymalna 40,8 m.

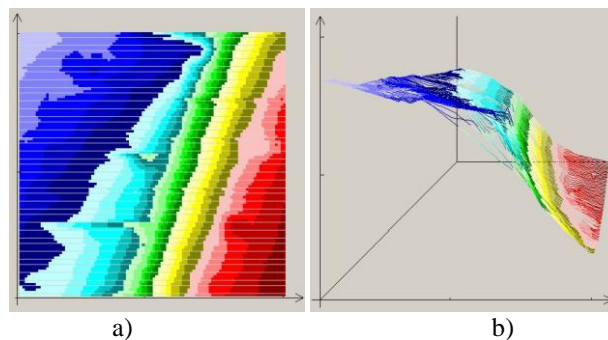


Rys. 4. Akwen A – obraz modelu dna; a) 2D; b) 3D

- Akwen B o wymiarach 5,0×5,0 mil morskich, obejmujący fragment Zatoki Gdańskiej na północ od m. Jastarnia i wyznaczone punkty o następujących współrzędnych geograficznych:

- 1) $\varphi = 54^{\circ}44,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}38,0'E$
- 2) $\varphi = 54^{\circ}49,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}38,0'E$
- 3) $\varphi = 54^{\circ}44,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}46,64'E$
- 4) $\varphi = 54^{\circ}49,0'N$; $\lambda = 018^{\circ}46,64'E$

Akwen charakteryzuje się rzeźbą dna w kształcie charakterystycznego stoku. Minimalna głębokość to 14,9 m, a maksymalna 87,8 m.



Rys. 5. Akwen B – obraz modelu dna; a) 2D; b) 3D

3. WYNIKI BADAŃ

Jak wspomniano powyżej przyjęto że badania zostaną przeprowadzone na dwóch akwenach. Akweny różnią się od siebie pod względem charakteru ukształtowania dna. Nad każdym dnem operator przeprowadzi po dziesięć przebiegów na wszystkich trasach. Opracowano cztery scenariusze przejść, w których określono następujące parametry:

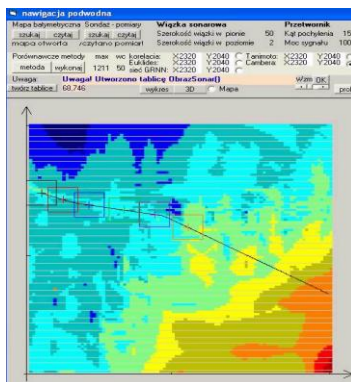
- model dna;
- pozycję startową (współrzędne lokalne X, Y);
- kurs początkowy pojazdu podwodnego;
- prędkość początkową pojazdu podwodnego;
- zakres zmian prędkości;
- trasę przejścia (współrzędne lokalne X, Y punktów zwrotu).

Powyzsze parametry dla lepszej organizacji pracy opracowano w formie arkusza Excel.

Tab. 1. Arkusz scenariuszy testowych

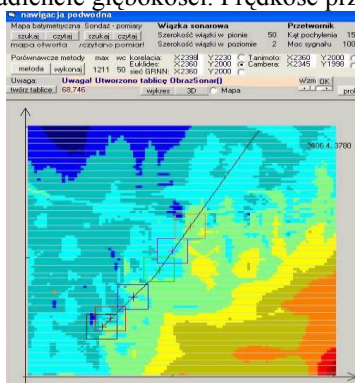
scenariusz	A/1	A/2	B/1	B/2
model dna	Dno A	Dno A	Dno B	Dno B
pozycja X start	200	1000	3530	1400
pozycja Y start	2910	800	2000	380
kurs start	110	40	270	30
prędkość max	8	15	8	12
prędkość min	8	15	5	10
waypoint_1	669,25; 1560,29	1292,19; 3436,08	3291,67; 2371,06	1953,41; 3309,68
waypoint_2	1011,41; 1646,93	1579,88; 3093,22	2973,08; 2361,91	2026,13; 2725,2
waypoint_3	1473,45; 1728,4	1920,48; 2656,03	2469,52; 2343,07	2256,93; 2319,75
waypoint_4	1878,75; 1799,86	2097,96; 2348,63	2058,03; 2335,89	2312,96; 2233,46
waypoint_5	2313,23; 2005	2321,75; 1961,02	1687,68; 2329,43	2352,19; 2173,06

Trasa przejeżdż pojazdów podwodnych według pierwszego scenariusza (A/1) przebiega w akwenie A nad torem podejściowym do Portu Północnego. Charakterystyczne jest tu pogłębienie dna na długim i wąskim odcinku. Prędkość przejeżdż jest stała i wynosi 8 węzłów.



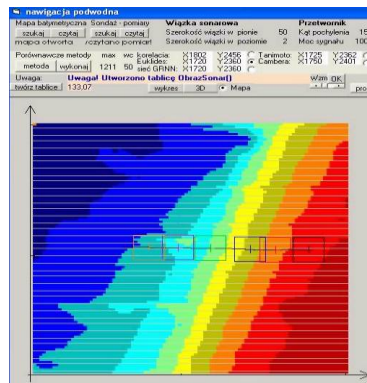
Rys. 6. Trasa przejeżdż pojazdów podwodnych w czasie realizacji scenariusza A/1

Trasa drugiego scenariusza (A/2) również została poprowadzona po akwenie A jednak w ten sposób by swoim przebiegiem objąć dno o zróżnicowanym gradientie głębokości. Prędkość przejeżdż jest stała i wynosi 15 węzłów.



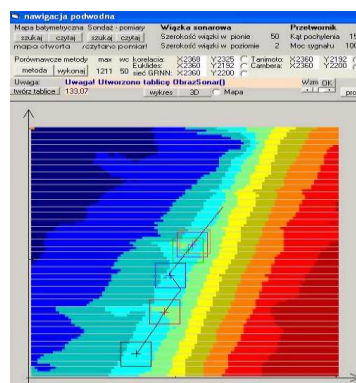
Rys. 7. Trasa przejeżdż pojazdów podwodnych w czasie realizacji scenariusza A/2

Trasa trzeciego scenariusza (B/1) przebiega w akwenie B. Została tak zaplanowana, aby pojazd podwodny przeszedł z małej głębokości na dużą, prostopadłe do izobat. Prędkość przejeżdż w granicach od 5 do 8 węzłów.



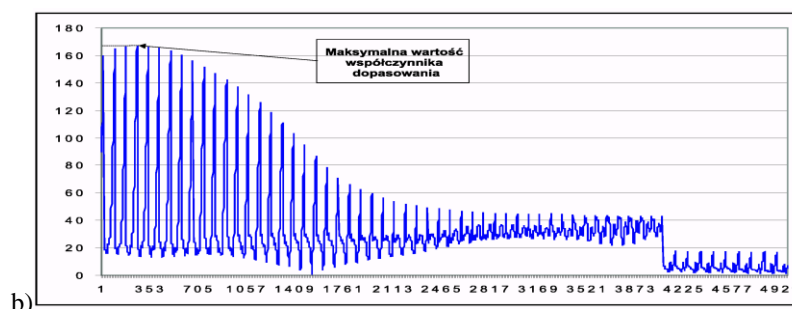
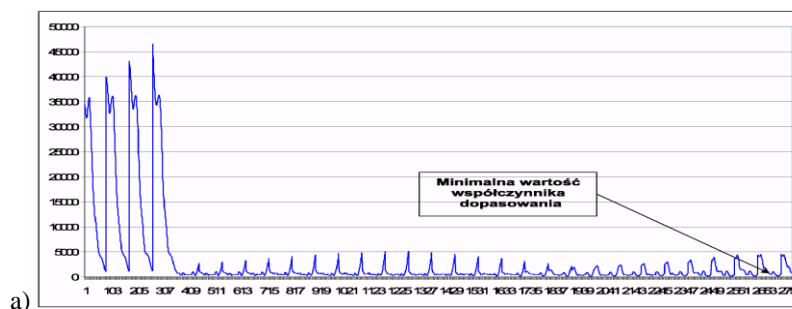
Rys. 8. Trasa przejść pojazdu podwodnego w czasie realizacji scenariusza B/1

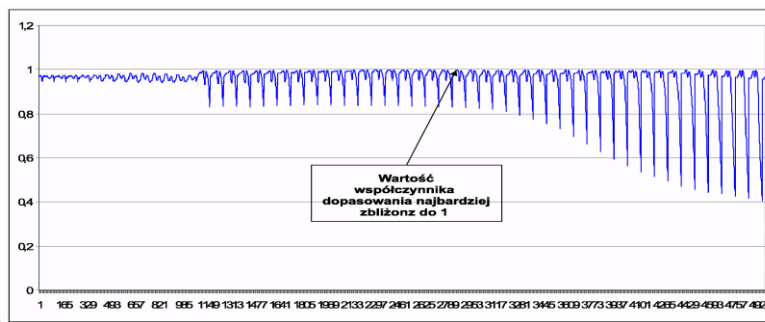
Trasa czwartego scenariusz (B/2) przebiega w akwenu B równoległe do izobat w taki sposób by gradient głębokości był najmniejszy. W punkcie 2 wykonano zwrot na charakterystyczny obiekt znajdujący się na obrazie dna. Następnie w punktach 3,4,5 określono pozycje w krótkich odstępach czasu tak ,ze zarejestrowane pozycje obserwowane są blisko siebie.



Rys. 9. Trasa przejść pojazdu podwodnego w czasie realizacji scenariusza B/2

Pozycje obserwowane są określane zawsze w tych samych punktach pomiarowych. Każdy pomiar pozycji przeprowadzono przy wykorzystaniu różnych algorytmów dopasowania. Jak wspomniano wyżej narzędziem analizy zależności pomiędzy obrazami była funkcja odległościową Euklidesa, znormalizowana funkcja Camberra oraz funkcję bliskości Tanimoto. Wartość współczynnika dopasowania klasyfikuje dany obraz sonarowy jako rozpoznany. Dla funkcji Euklidesa będzie to najmniejsza wartość współczynnika dopasowania, dla Funkcji Camberra największa, a dla funkcji Tanimoto jak najbardziej zbliżona do jedności (rys. 10).





c)

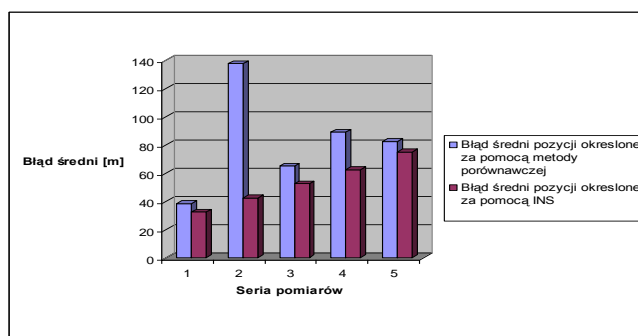
Rys. 10. Wartości współczynników dopasowania określone za pomocą: a) funkcji odległościowej Euklidesa, b) funkcji Camberra, c) funkcji bliskości Tanimoto

Poniżej przedstawiono wykresy charakteryzujące wartości współczynników wzajemnego dopasowania pomiędzy obrazem rzeczywistym a obrazem sonarowym w tych funkcjach.

Wyniki uzyskane z dziesięciokrotnej serii pomiarów uśredniono i opracowano w formie tabel osobno dla każdego ze scenariuszy. Błędy średnie przedstawiono w postaci wykresów.

Tab. 2. Uśrednione wyniki pomiarów według scenariusza A/I

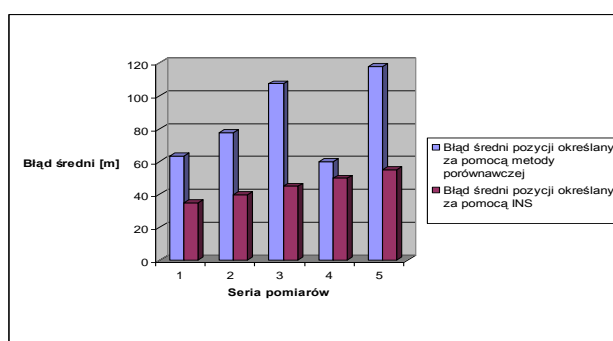
scenariusz a/1	pozycja „rzeczywista”		kurs	prędkość [w]	Δt [min]	błąd ins [m]	pozycja obserwowana				
	x	y					euklides, tanimoto		camberr		błąd średni [m]
							x	y	x	y	
pozycja startowa	200	2910	110°	8	-		—	—	—	—	—
waypoint 1	669,25	1560,29	105°	8	13	32,5	682	1573	680	1569	38,46
waypoint 2	1011,41	1646,93	100°	8	17	42,5	1008	1598	1022	1567	137,92
waypoint 3	1473,45	1738,4	100°	8	21	52,5	1501	1730	1499	1730	65,21
waypoint 4	1878,75	1799,86	120°	8	25	62,5	1844	1785	1839	1805	89,26
waypoint 5	2313,23	2005	120°	8	30	75	2320	2040	2320	2040	82,53



Rys. 11. Błędy średnie pozycji obserwowanych w seriach pomiarów według scenariusza A/I

Tab. 3. Uśrednione wyniki pomiarów według scenariusza A/2

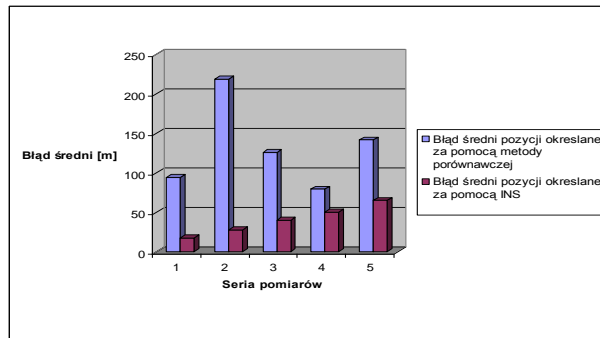
scenariusz a/2	pozycja „rzeczywista”		kurs	prędkość [w]	Δt [min]	błąd ins [m]	pozycja obserwowana				
	x	y					euklides, tanimoto		camberr		błąd średni [m]
							x	y	x	y	
pozycja startowa	1000	800	040°	-	-	-	—	—	—	—	—
waypoint 1	1292,19	3436,08	040°	13	14	35	1320	3440	1313	3452	63,57
waypoint 2	1579,88	3093,22	030°	17	16	40	1600	3120	1600	3120	77,54
waypoint 3	1920,48	2656,03	040°	21	18	45	1960	2680	1960	2681	107,41
waypoint 4	2097,96	2348,63	040°	25	20	50	2120	2360	2125	2357	60,12
waypoint 5	2321,73	1961,02	040°	30	22	55	2360	2000	2345	1998	118,02



Rys. 12. Błędy średnie pozycji obserwowanych w seriach pomiarów według scenariusza A/2

Tab. 4. Uśrednione wyniki pomiarów według scenariusza B/1

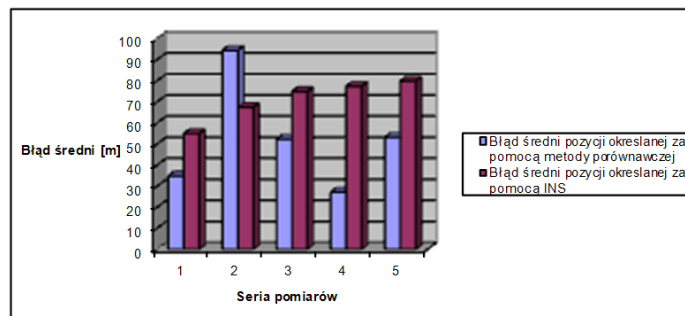
scenariusz b/1	pozycja „rzeczywista”		kurs	prędkość [w]	Δt [min]	błąd ins [m]	pozycja obserwowana				
	x	y					euklides, tanimoto		camberr		błąd średni [m]
							x	y	x	y	
pozycja startowa	3530	2000	270°	5	-	-	—	—	—	—	—
waypoint 1	3291,67	2371,06	271°	5	7	17,5	3320	2400	3325	2395	94,17
waypoint 2	2973,08	2361,91	268°	8	11	27,5	3025	2452	3032	2410	219,16
waypoint 3	2469,52	2343,07	270°	8	16	40	2431	2305	2431	2382	125,85
waypoint 4	2058,03	2335,89	270°	5	20	50	2080	2360	2072	2371	79,50
waypoint 5	1687,68	2329,43	270°	5	26	65	1720	2360	1750	2401	141,89



Rys. 13. Błędy średnie pozycji obserwowanych w seriach pomiarów według scenariuszu B/1

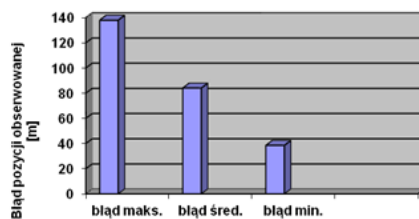
Tab. 5. Uśrednione wyniki pomiarów według scenariusza B/2

scenariusz b/1	pozycja „rzeczywista”		kurs	prędkość [w]	Δt [min]	błąd ins [m]	pozycja obserwowana				
	x	y					euklides, tanimoto		camberr		błąd średni [m]
							x	y	x	y	
pozycja startowa	1400	380	030°	10	-*	-	—	—	—	—	—
waypoint t 1	1953,4 1	3309,6 8	028°	10	22	55	1960	3320	1972	3319	34,95
waypoint t 2	2026,1 3	2725,2	328°	10	27	67,5	2040	2760	2039	2771	94,53
waypoint t 3	2256,9 3	2319,7 5	030°	10	30	75	2280	2320	2278	2325	52,36
waypoint t 4	2312,9 6	2233,4 6	032°	12	31	77,5	2320	2240	2323	2246	27,22
waypoint t 5	2352,1 9	2173,0 6	033°	10	32	80	2360	2192	2360	2200	53,26



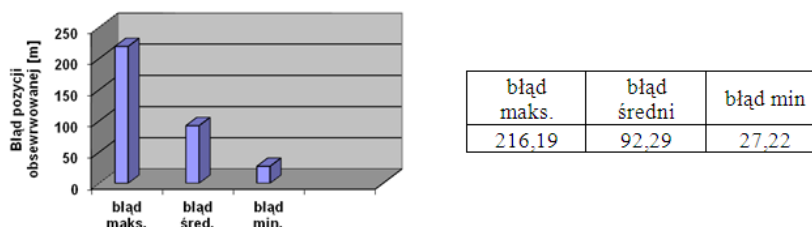
Rys. 14. Błędy średnie pozycji obserwowanych w seriach pomiarów według scenariuszu B/2

Poniżej przedstawione wykresy charakteryzują dokładność pozycji obserwowanych uzyskiwanych metodą porównawczą oddzielnie dla akwenu A oraz akwenu B.



błąd maks.	błąd średni	błąd min
137,92	84	38,46

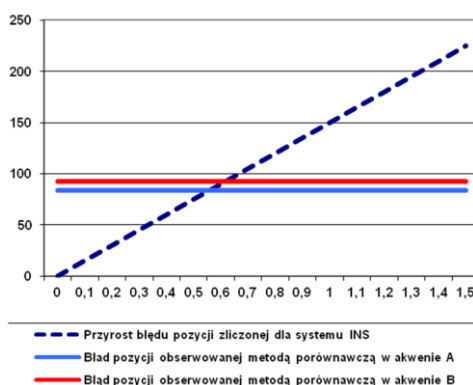
Rys. 15. Dokładność pozycji obserwowanej metodą porównawczą dla akwenu A



Rys. 16. Dokładność pozycji obserwowanej metodą porównawczą dla akwenu B

4. WNIOSKI

Analizując systemu nawigacji inercyjnej INS można stwierdzić, że przyrost błędu pozycji zliczonej przy zadanych błędach pracy kształtował się na poziomie 150 [m/h]. Poniższy wykres przedstawia zestawienie średnich błędów pozycji otrzymanych w wyniku symulacji.



Rys. 17. Porównanie błędów średnich pozycji wyznaczonych za pomocą systemu INS z pozycjami obserwowanymi uzyskanymi metodą porównawczą oddzielnie dla akwenu A i akwenu B

Systemy działające w oparciu o metody porównawcze mogą stanowić uzupełnienie systemów INS w przypadku długotrwałego przebywania pojazdu pod wodą. Błąd wyznaczania pozycji w tych systemach nie jest zależny od czasu. Dla czasu pracy pojazdu podwodnego powyżej 40 minut systemy te powinny dostarczyć dokładniejszą pozycję obserwowaną.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Felski A., Czapplewski K., Wąż M., "The New Concept of Autonomous Underwater Vehicle Navigation" - European Navigation Conference 2006, ENC 2006 Manchester, UK (7-10 May 2006).
- [2] Stateczny A., Metody Nawigacji Porównawczej, Gdynia 2004.
- [3] Stateczny A., Nawigacja Porównawcza, Gdańsk 2001.
- [4] Wąż M., Czapplewski K., Precise tracking positions of a submarine vehicle. Annual of Navigation 13/2008, str. 35-48
- [5] Wąż M., Czapplewski K., The conception of underwater navigation simulator. The Proceedings of 6th Russian Scientific – Technical Conference "The Present-Day State and Problems of Navigation and Oceanography", Rosja, St. Petersburg 2007.
- [6] Wąż M., Szulc D. Wstępne założenia do budowy symulatora systemów sonarowych. Zeszyty naukowe AMW, 2002 nr 1, Gdynia 2002.