

dr inż. Piotr Szymak
Akademia Marynarki Wojennej

UPROSZCZONY MODEL MATEMATYCZNY POJAZDU PODWODNEGO I JEGO SYSTEMU STEROWANIA

Wykorzystanie metod neuroewolucyjnych do sterowania pojazdem podwodnym wiąże się z przeprowadzeniem wielu czasochłonnych obliczeń. Do symulowania ruchu pojazdu podwodnego stosuje się najczęściej model nieliniowy. Wykorzystanie tego typu modelu związane jest z skomplikowanymi obliczeniami, co w połączeniu z czasochłonnymi obliczeniami neuroewolucyjnymi może uniemożliwić otrzymanie rozwiązania w rozsądnym czasie. Dlatego też w niniejszej pracy proponuje się zastosowanie modelu uproszczonego automatycznie sterowanego pojazdu podwodnego.

SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL OF UNDERWATER VEHICLE AND ITS CONTROL SYSTEM

Using neuro-evolutionary methods to control of an underwater vehicle is connected with time consuming calculations. Usually a nonlinear mathematical model is used to simulate movement of the underwater vehicle. Using the nonlinear model is connected with complicated calculations, which in connection with time consuming neuro-evolutionary calculations can make impossible receiving a solution in reasonable time. Therefore, using the simplified model of the automatically controlled underwater vehicle is proposed in the paper.

1. WPROWADZENIE

Zbudowanie wieloagentowego systemu podwodnej inspekcji wymaga zaprojektowania i dostrojenia systemu decyzyjnego oraz jego elementów wykonawczych, czyli bloków sterujących ruchem poszczególnych pojazdów podwodnych [7]. Dostrojenie systemu decyzyjnego opartego na sztucznej sieci neuronowej wytwarzanej przy użyciu algorytmów ewolucyjnych związane jest z przeprowadzeniem wielu czasochłonnych obliczeń numerycznych, w czasie których będą testowane różne sieci neuronowe [4]. Duża liczba obliczeń wynika z tego, iż wektory zadanych stanów poszczególnych pojazdów podwodnych, wypracowane przez system decyzyjny są przetwarzane przez bloki sterujące na wektory wymuszeń ich systemów napędowych, które z kolei poprzez generowane napory pędników wpływają na trajektorie poruszania się poszczególnych pojazdów. Dodatkowo należy nadmienić, iż trajektoria ruchu jest ściśle związana z dynamiką danego typu pojazdu, reprezentowaną najczęściej przez jego nieliniowy model matematyczny.

Dlatego też istotne jest znalezienie modelu matematycznego pojazdu podwodnego i jego systemu sterującego, który będzie: z jednej strony dla potrzeb minimalizacji obliczeń jak najbardziej uproszczony, natomiast z drugiej strony dla wiarygodności uzyskanych wyników będzie poprawnie odwzorowywał trajektorie poruszania się sterowanego automatycznie pojazdu podwodnego. W artykule przedstawiona zostanie propozycja takiego modelu.

Na początku przedstawiony zostanie nieliniowy model matematyczny pojazdu podwodnego, na bazie którego zbudowano symulator umożliwiający zaprojektowanie i dostrojenie bloku sterującego pojazdem [7]. Następnie przedstawiony zostanie uproszczony model matematyczny sterowanego automatycznie pojazdu, który zostanie zweryfikowany na podstawie porównania jego działania w postaci wygenerowanych trajektorii ruchu z wynikami uzyskanymi z nieliniowego modelu matematycznego.

2. NIELINIOWY MODEL MATEMATYCZNY

W celu zasymulowania ruchu pojazdu podwodnego przyjęto jego model matematyczny o 6 stopniach swobody w dwóch układach odniesienia:

- 1) ruchomy układ współrzędnych $x_0y_0z_0$ związany z obiektem podwodnym
- 2) nieruchomy układ współrzędnych xyz związany z Ziemią [2].

Początek ruchomego układu współrzędnych O odpowiada zazwyczaj środkowi ciężkości pojazdu, natomiast jego osie zdefiniowane są jako:

- x_0 – oś wzdłużna skierowana od rufy do dziobu
- y_0 – oś poprzeczna skierowana na prawą burzę
- z_0 – oś prostopadła skierowana od góry do dna.

Zmiany położenia ruchomego układu współrzędnych $x_0y_0z_0$ opisywane są względem przyjętego układu współrzędnych xyz , związanego z Ziemią. Ze względu na to, że obiekt porusza się ze stosunkowo niewielką prędkością, stąd też pomija się przyspieszenie punktów na powierzchni Ziemi i układ xyz rozważa się jako nieruchomy. Daje to możliwość opisu położenia pojazdu podwodnego w przestrzeni względem nieruchomego układu xyz oraz opisu jego prędkości liniowych i kątowych względem ruchomego układu współrzędnych $x_0y_0z_0$.

Do opisu ruchu pojazdu podwodnego wykorzystano tzw. równania ruchu, które w postaci macierzowej przyjmują następującą postać [2]:

$$M\dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

gdzie:

v – wektor prędkości liniowych i kątowych w układzie ruchomym, czyli $v=[u, v, w, p, q, r]$

η – wektor współrzędnych pozycji pojazdu podwodnego oraz kątów Eulera w układzie związanym z Ziemią, czyli $\eta=[x, y, z, \phi, \theta, \psi]$

M – macierz inercji (równa sumie macierzy ciała sztywnego i mas towarzyszących)

$D(v)$ – macierz tłumienia hydrodynamicznego

$g(\eta)$ – macierz sił przywracających (siły ciężkości i siły wyporu)

τ – wektor sił i momentów oddziaływujących na pojazd, czyli $\tau=[X, Y, Z, K, M, N]^T$.

W niniejszej pracy przyjęto wartości elementów macierzy równania (1) dla pojazdu podwodnego typu Ukwiągł. Ze względu na niewielkie znaczenie liczbowe pominięto w równaniach ruchu pojazdu podwodnego macierz sił odśrodkowych i dośrodkowych Coriolisa. Dodatkowo przyjęto, że obiekt sterowania to pojazd autonomiczny, dlatego też pominięto macierz tłumienia generowanego przez kablolinę. Dla opisu wielkości ruchu pojazdu podwodnego przyjęto oznaczenia wielkości liniowych i kątowych zgodnie z notacją SNAME (ang. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*) [3].

Szerzej problem nieliniowego modelu matematycznego pojazdu podwodnego rozpatrzony został w [2] i [5], a sposób obliczania elementów macierzy z równania (1) wraz z zależnościami matematycznymi w sprawozdaniu z pracy badawczej [6]. Natomiast struktura bloku sterującego pojazdu podwodnego Ukwiągł została przedstawiona w [7]. Dla celów regulacji poszczególnych parametrów ruchu wykorzystano regulatory PD z rozmytym przetwarzaniem danych [1].

2. UPROSZCZONY MODEL MATEMATYCZNY

Ewolucyjna metoda wytwarzania sztucznych sieci neuronowych, tworzących system decyzyjny, wymaga wielokrotnego odwoływania się do modelu matematycznego pojazdu podwodnego. Wynika to z tego, że tworzone sieci neuronowe podlegają ocenie jakościowej na podstawie ich działania, czyli sterowania pojazdem lub pojazdami podwodnymi. Dla zwiększenia szybkości obliczeń, ruch automatycznie sterowanego pojazdu podwodnego został zapisany w postaci tabel, zawierających zdyskretyzowane wektory stanu pojazdu w odpowiedzi na zadane wektory stanu. Dodatkowo wektory stanu zostały zredukowane do parametrów niezbędnych dla systemu decyzyjnego.

Sygnały wypracowywane przez system decyzyjny dla poszczególnych pojazdów mają następującą postać:

1) w ruchu na płaszczyźnie poziomej xy :

- zmien kurs do wartości $kurs_zadany$
- zmien prędkość ruchu postępowego do wartości $prędkość_zadana$

2) w ruchu na płaszczyźnie pionowej xz :

- zmien głębokość zanurzenia do wartości $głębokość_zadana$.

Ze względu na przedstawione wyżej czynniki przyjęto, że parametry ruchu pojazdu podwodnego należy stabularyzować w następującej postaci:

1) w ruchu na płaszczyźnie poziomej xy (zmiany kursu ψ i współrzędnych x i y w odpowiedzi na zadaną wartość kursu ψ_{set} dla różnych zadanych prędkości ruchu postępowego V_{set}):

$$\psi_{\psi_{set}, t_{sym}}^{V_{set}} \quad (2)$$

$$x_{\psi_{set}, t_{sym}}^{V_{set}} \quad (3)$$

$$y_{\psi_{set}, t_{sym}}^{V_{set}} \quad (4)$$

gdzie:

V_{set} – zadana prędkość ruchu postępowego (dla pojazdu Ukwiągł przyjęto prędkości od 0,25 m/s do 1,5 m/s co 0,25 m/s – razem otrzymuje się po 18 tabel dla 3 parametrów ruchu)

ψ_{set} – zadany kurs (przyjęto wartości od 5° do 180° co 5° – razem otrzymuje się 36 wierszy)

t_{sym} – krok symulacji (przyjęto czas od 0 s do 30 s co 0,5 s – razem otrzymuje się 61 kolumn)

2) w ruchu na płaszczyźnie pionowej xz (zmiana współrzędnej z , czyli głębokość zanurzenia w odpowiedzi na zadaną wartość głębokości zanurzenia z_{set} dla różnych zadanych prędkości ruchu postępowego V_{set}):

$$z_{z_{set}, t_{sym}}^{V_{set}} \quad (5)$$

gdzie:

z_{set} – zadana głębokość zanurzenia pojazdu (przyjęto wartości od +4 m do -4 m co 0,25 m – razem otrzymuje się 33 wiersze),

Elementy tabel zdefiniowanych w (2)-(5) uzyskano w wyniku symulacji nieliniowego modelu matematycznego pojazdu podwodnego i jego bloku sterującego. Stabelaryzowane wartości parametrów ruchu w płaszczyźnie poziomej zostały zarejestrowane w stosunku do niezerowej wartości początkowej położenia i kursu ($x = 0, y = 0, \psi = 0$). W przypadku niezerowych wartości początkowych położenia i kursu należy do danych z tabel dodać te wartości początkowe. Dodatkowo w przypadku, gdy kurs początkowy jest różny od zera ($\psi_0 \neq 0$), to należy pamiętać o dokonaniu obrotu punktów o dany kąt kursowy. W tym celu można wykorzystać następujące zależności na odwzorowanie geometryczne:

$$x' = x \cos \psi_0 - y \sin \psi_0 \quad (6)$$

$$y' = x \sin \psi_0 + y \cos \psi_0 \quad (7)$$

gdzie:

x, y – współrzędne punktu,

x', y' – współrzędne punktu po obrocie,

ψ_0 – kąt obrotu, czyli początkowa wartość kursu.

Standardowo w modelowaniu ruchu pojazdu podwodnego stosuje się krok symulacji rzędu dziesiątek milisekund, np. w symulatorze pojazdu podwodnego typu Ukwiągł zastosowano krok symulacji równy 1/18 s. W przypadku wieloagentowego systemu przyjęto, że minimalny czas, po jakim system decyzyjny wypracowuje kolejną decyzję jest równy 10 s. Wynika to z dynamiki pojazdu oraz właściwości jego sterowania w ruchu po płaszczyźnie poziomej xy , tzn. po ok. 10 s pojazd jest w stanie osiągnąć zadaną wartość kursu. Dlatego też przyjęto krok symulacji równy 0,5 s (w ciągu 0,5 s pojazd podwodny Ukwiągł jest w stanie przebyć drogę 0,5 m).

W wyniku zastosowanych uproszczeń zamiast skomplikowanych i żmudnych obliczeń związanych z nieliniowym modelem pojazdu i jego blokiem sterującym otrzymano 24 tablice, składające się z kilkudziesięciu elementów, które pozwalają określić zmiany w czasie podstawowych parametrów ruchu sterowanego automatycznie pojazdu podwodnego dla zadanych parametrów ruchu.

3. PORÓWNANIE MODELU UPROSZCZONEGO I NIELINIOWEGO

Prezentowane modele ruchu pojazdu podwodnego – nieliniowy i uproszczony – zostały zaimplementowane w środowisku Matlab/Simulink wydanie 14, w systemie operacyjnym Windows XP Professional SP3. Do symulacji wykorzystano platformę sprzętową: procesor Intel Core2 DUO, wersja L7100 o częstotliwości pracy 1,2 GHz, współpracujący z pamięcią RAM 1,96 GB.

Uzyskano następujące czasy wykonywania się skryptów Matlaba dla symulacji ruchu pojazdu podwodnego po płaszczyźnie poziomej xy w czasie 60 s:

- 1) dla modelu nieliniowego pojazdu podwodnego, sterowanego za pomocą regulatorów rozmytych z wykorzystaniem zawartej w Matlabie struktury FIS (ang. Fuzzy Inference System): 35,2 s,
- 2) dla modelu nieliniowego pojazdu podwodnego, sterowanego za pomocą regulatorów rozmytych, działających na podstawie samodzielnie napisanego skryptu: 7,43 s,

- 3) dla modelu nieliniowego pojazdu podwodnego sterowanego za pomocą klasycznych regulatorów PD: 3,68 s,
- 4) dla modelu uproszczonego pojazdu podwodnego: 0,141 s.

Jak można zauważyć, czas wykonywania się skryptu z modelem uproszczonym jest kilkadziesiąt razy mniejszy od czasu wykonywania się skryptu z modelem nieliniowym. Czas wykonywania się skryptu z modelem uproszczonym został jeszcze skrócony poprzez zmniejszenie liczby operacji odczytu danych z plików, zawierających stabelaryzowane parametry ruchu. Przy założeniu, że tablice parametrów zostały odczytane z plików na początku prowadzonych obliczeń neuroewolucyjnych, czyli są dostępne w pamięci danych, to otrzymuje się 16.500 razy mniejszy czas wykonywania się skryptu z modelem uproszczonym w stosunku do czasu wykonywania się modelu nieliniowego pojazdu, sterowanego za pomocą klasycznych regulatorów PD. Sam proces odczytu stabelaryzowanych parametrów ruchu z plików trwał 0,125 s.

W dalszej części artykułu przedstawiono wybrane wyniki porównania trajektorii ruchu pojazdu podwodnego na płaszczyźnie poziomej xy , otrzymanych z modelu nieliniowego i uproszczonego.

Całkowity ruch pojazdu podwodnego może być opisany za pomocą złożenia ruchu na płaszczyźnie poziomej i pionowej. Sterowanie ruchem na płaszczyźnie poziomej jest bardziej skomplikowane, gdyż system napędowy pojazdu podwodnego, działający w tej płaszczyźnie musi rozdzielić generowane napory na wektor wymuszeń składający się z 3 elementów: siła X , działająca w wzdłużnej osi symetrii, siła Y , działająca w poprzecznej osi symetrii i moment siły N , działający względem pionowej osi symetrii. Natomiast w płaszczyźnie pionowej system napędowy składa się zazwyczaj z 1 pędnika, który ma za zadanie wygenerować odpowiedni napór dla siły sterującej Z , działającej w pionowej osi symetrii. Ogólnie rzecz ujmując, ruch pojazdu w płaszczyźnie poziomej będzie bardziej lub tak samo skomplikowany jak ruch w płaszczyźnie pionowej. Dlatego też do dalszej analizy wybrano ruch w płaszczyźnie poziomej.

W trakcie badań numerycznych porównano 2 różne trajektorie ruchu pojazdu podwodnego, otrzymane z modelu nieliniowego i uproszczonego (rys. 1 i rys. 2).

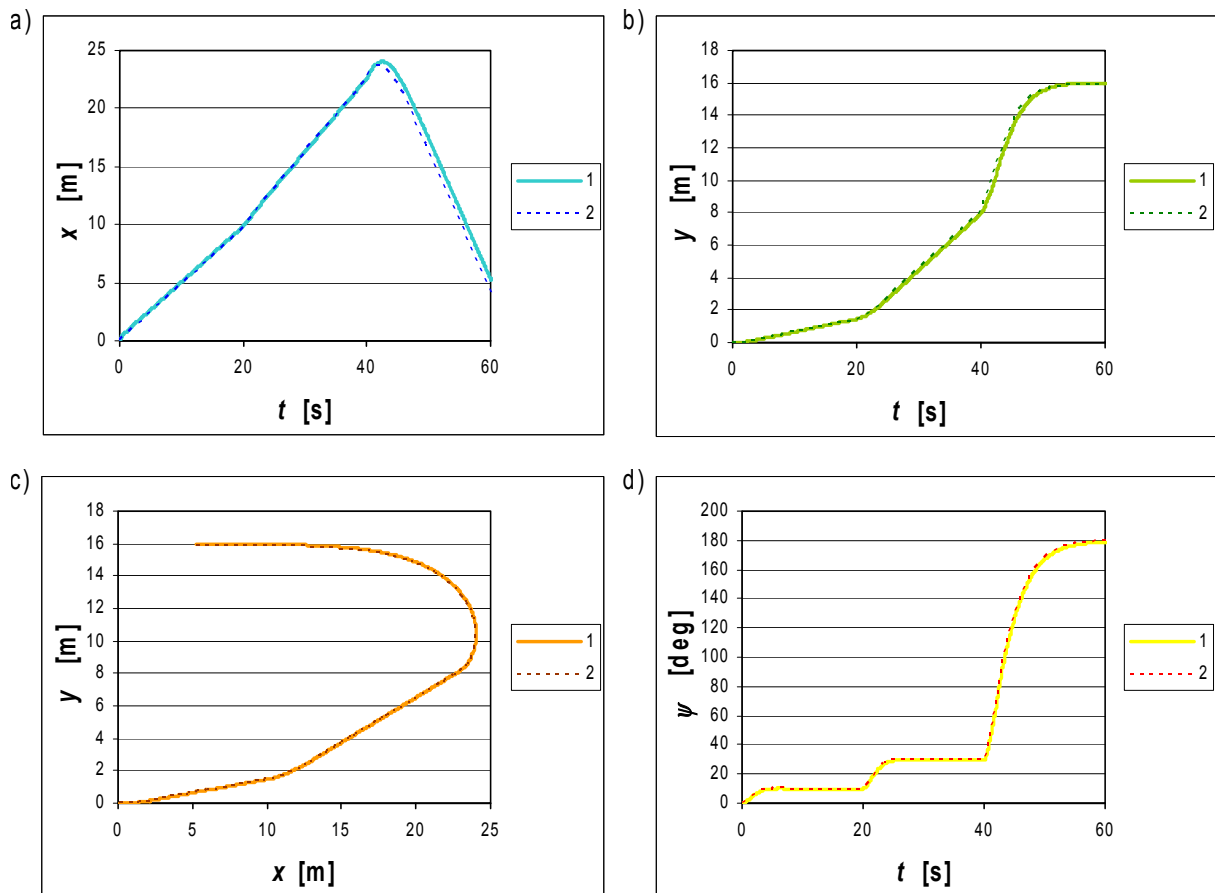
Trajektoria nr 1 (rys. 1) została określona przez następujące punkty zwrotu:

- 1) na początku symulacji kurs zadany 10° i zadana prędkość ruchu w osi x_o 0,5 m/s,
- 2) w 20 s symulacji kurs zadany 30° i zadana prędkość ruchu w osi x_o 0,75 m/s,
- 3) w 40 s symulacji kurs zadany 180° i zadana prędkość ruchu w osi x_o 1,5 m/s.

Natomiast trajektoria nr 2 (rys. 2) została określona przez następujące punkty zwrotu:

- 1) na początku symulacji kurs zadany 30° i zadana prędkość ruchu w osi x_o 0,5 m/s,
- 2) w 20 s symulacji kurs zadany 90° i zadana prędkość ruchu w osi x_o 1,5 m/s,
- 3) w 40 s symulacji kurs zadany 180° i zadana prędkość ruchu w osi x_o 1 m/s.

Obie trajektorie kończą się w 60 s symulacji.

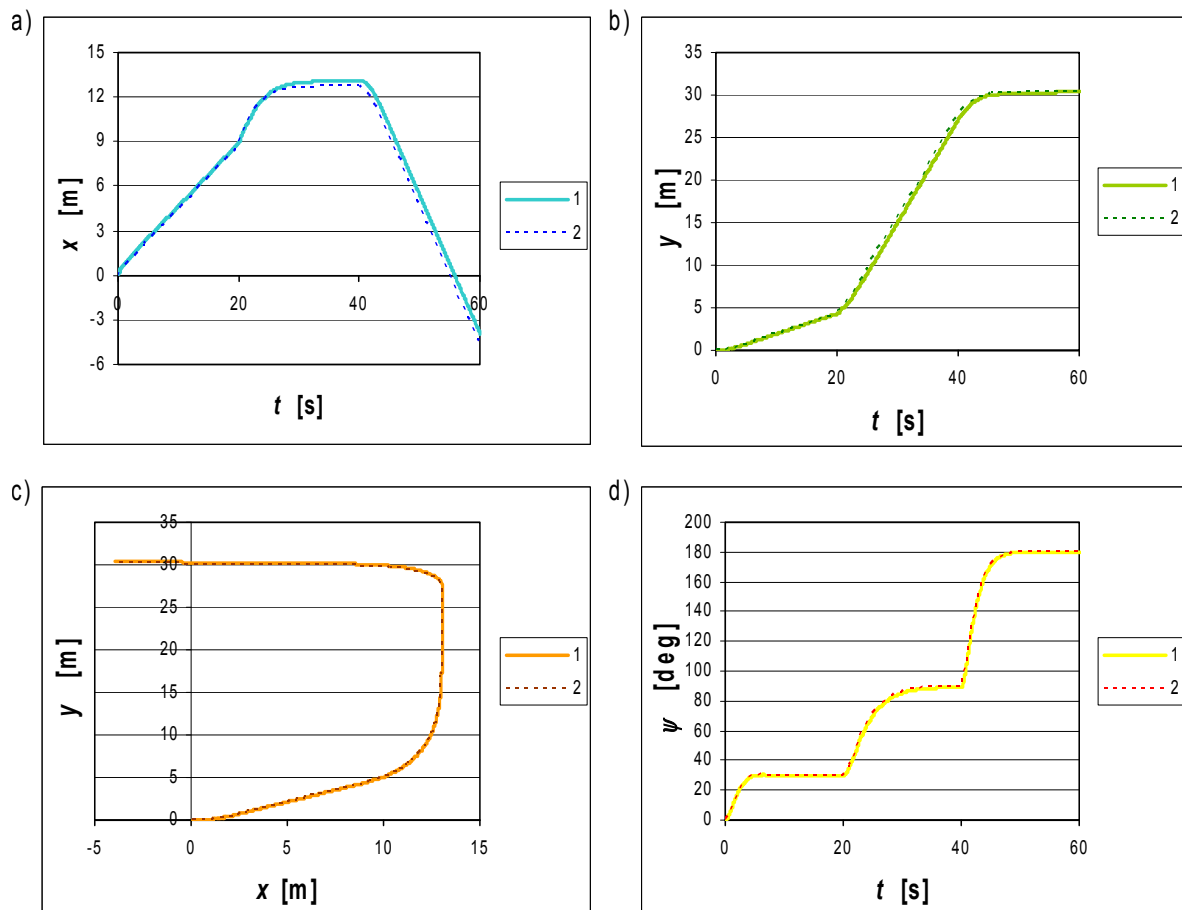


Rys. 1. Porównanie trajektorii nr 1 ruchu pojazdu podwodnego na płaszczyźnie xy, (otrzymanych z modelu nieliniowego (1) i uproszczonego (2)):
a) współrzędna x, b) współrzędna y, c) tor ruchu, d) kurs pojazdu ψ

Na podstawie wyników badań numerycznych przedstawionych na rys. 1 można stwierdzić, że:

- 1) przy obu punktach zwrotu w 20 s i 40 s brak jest widocznych różnic w przebiegu 2 trajektorii ruchu, otrzymanych z modelu nieliniowego i uproszczonego,
- 2) w 60 s symulacji otrzymuje się położenie ostatnich punktów porównywanych trajektorii ruchu w odległości 1,22 m.

Podobnie dla „trudniejszej” trajektorii nr 2 z punktami zwrotu o większych zmianach kursu i prędkości postępowej, otrzymuje się brak widocznych różnic w przebiegu obu trajektorii ruchu, otrzymanych z modelu nieliniowego i uproszczonego. Dodatkowo należy stwierdzić, że w 60 s symulacji otrzymuje się położenie ostatnich punktów trajektorii ruchu mniejsze niż w przypadku trajektorii nr 1, czyli uzyskuje się położenie ostatnich punktów trajektorii w odległości 0,92 m. Może to świadczyć o tym, iż powstające błędy wynikające z dyskretyzacji i tabelaryzacji parametrów ruchu (model uproszczony) mają charakter błędów przypadkowych.



Rys. 2. Porównanie trajektorii nr 2 ruchu pojazdu podwodnego na płaszczyźnie xy , (otrzymanych z modelu nieliniowego (1) i uproszczonego (2)):
a) współrzędna x , b) współrzędna y , c) tor ruchu, d) kurs pojazdu ψ

4. WNIOSKI

W wyniku analizy nieliniowego modelu matematycznego pojazdu podwodnego opracowano uproszczony model matematyczny w formie stabelaryzowanych parametrów ruchu pojazdu podwodnego, zarejestrowanych na podstawie działania modelu nieliniowego. Pozwoliło to na implementację modeli matematycznych (nieliniowego i uproszczonego) sterowanego automatycznie robota podwodnego w środowisku Matlab.

Implementacja modeli dała możliwość przeprowadzenia testów wiarygodności modelu uproszczonego na podstawie jego porównania z modelem nieliniowym, bazując na wygenerowanych przebiegach poruszania się sterowanych automatycznie pojazdów podwodnych po zadanych trajektoriach. Otrzymane błędy położenia ostatnich punktów trajektorii (po 60 s symulacji) osiągają wartości rzędu 1 m (maksymalny błąd równy 1,22 m), co nie jest dużą wartością w stosunku do wymiarów pojazdu, osiągających również wartości rzędu 1 m. Dodatkowo należy pamiętać o tym, że system decyzyjny będzie w stanie korygować ten błąd co ustalony czas podejmowania kolejnych decyzji. W przypadku minimalnego czasu podejmowania kolejnych decyzji wynoszącego 10 s, ewentualny błąd

będzie rzędu kilkudziesięciu centymetrów i co 10 s będzie mógł być skorygowany przez kolejną decyzję.

Synteza nowatorskiego modelu uproszczonego pozwoliła na zmniejszenie czasu obliczeń kilkanaście tysięcy razy (na przedstawionej wcześniej platformie Intel Core2 Duo/Windows XP uzyskano zmniejszenie czasu obliczeń o 16.500 razy). Jest to istotna zaleta tego modelu, w szczególności w przypadku potrzeby realizacji czasochłonnych obliczeń neuroewolucyjnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., „Wprowadzenie do sterowania rozmytego”, Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa 1996.
2. Fossen T.I., “Guidance and Control of Ocean Vehicles”, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
3. “Nomenclature for Treating the Motion of Submerged Body Through a Fluid”, Technical and Research Bulletin, The Society of Naval Architects and Marine Engineers – SNAME, no. 3 – 47, 1989.
4. Praczyk T., Szymak P., “Solving Predator-Prey Problem in Assembler Encoding”, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on AUTOMATIC CONTROL, MODELING AND SIMULATION, Istambul 2009, pp. 189-194.
5. Szymak P., “Using of fuzzy logic method to control of underwater vehicle in inspection of oceanotechnical objects”, Artificial Intelligence and Soft Computing, Polish Neural Network Society, Warsaw 2006, pp. 163-168.
6. Szymak P., Sprawozdanie z pracy badawczej własnej pt. „Zastosowanie metod logiki rozmytej do sterowanie zespołem okrętowym pojazd podwodny - ładunek”, Gdynia 2006.
7. Szymak P., “Struktura bloków sterujących ruchem pojazdów podwodnych w wieloagentowym systemie podwodnej inspekcji”, Pomiary, Automatyka i Robotyka Nr 2/2009, str. 338-344.