

Andrzej Żak

MODEL SYMULACYJNY BEZZAŁOGOWEGO ROBOTA PODWODNEGO

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono koncepcję środowiska symulacyjnego dla ruchu robota podwodnego. Krótko zaprezentowano model matematyczny pojazdu, na podstawie którego utworzono model symulacyjny. Omówiono także metody uwzględnienia wpływu prądów podwodnych oraz zmian rozkładu masy w modelu matematycznym robota. Ponadto została przedstawiona struktura programu symulacyjnego oraz opis przyjętego sposobu tworzenia wirtualnego akwenu podwodnego. Na koniec przedstawiono przykładowe wyniki z pracy programu symulacyjnego dla ruchu robota podwodnego.

WSTĘP

Oceany zajmują dwie trzecie powierzchni Ziemi, jednakże możliwości poznawania tego środowiska są bardzo ograniczone ze względu na ciśnienia hydrostatyczne panujące w tym środowisku. Ludzkość od zarania dziejów dąży do dotarcia w głąb oceanów i eksploatacji ich bogactw. Dlatego też w ostatnich latach nastąpił rozwój bezzałogowych pojazdów podwodnych dysponujących obecnie wszystkimi charakterystycznymi cechami robota, a więc możliwością przemieszczania się i manipulacji, zdolnością technicznej obserwacji otoczenia, a także niekiedy samodzielnego wypracowywania decyzji w sytuacjach typowych i powtarzalnych.



Rys. 1. Współczesne roboty podwodne

Przez robot podwodny ROV (Remotely Operated Vehicle – zdalnie sterowany pojazd podwodny) będzie rozumiany bezzałogowy obiekt całkowicie zanurzony w wodzie, mający sześć stopni swobody i połączony z bazą nawodną przewodem lub za pomocą hydroakustycznego kanału łączności. Przykładowy wygląd współczesnych robotów podwodnych przedstawiono na rysunku 1. Za kontrolę pracy wszystkich urządzeń robota odpowiada system sterowania, który sprawuje nadzór, poczynając od napędu, a kończąc na przełączaniu kamer wideo i oświetlenia. W układzie sterowania takim robotem funkcje regulatora w torze sprzężenia zwrotnego spełnia najczęściej operator obserwujący współrzędne ruchu robota na monitorze znajdującym się na pokładowym pulpicie sterowania, obserwujący przez system wizyjny przestrzeń roboczą, w której operuje pojazd. Obecnie pilotowanie ROV realizowane jest z wykorzystaniem joysticka, którego zadaniem jest formowanie zadanych sygnałów sterujących podawanych na pędniki robota. Ruch robota odbywa się w przestrzeni trójwymiarowej, przy czym konstrukcyjne rozmieszczenie pędników w robocie zapewnia jego ruch w górę i w dół, do przodu i do tyłu oraz na boki. Ponadto poprzez przełączniki operator określa parametry ruchu manipulatora będącego na wyposażeniu robota. Zadane przez operatora sygnały po przetworzeniu przez komputer trafiają jako sygnały sterujące do poszczególnych elementów pojazdu. Robot na podstawie posiadanych na wyposażeniu czujników dokonuje pomiaru między innymi takich współrzędnych wektora stanu, jak głębokość zanurzenia, prędkość, położenie itp., i przekazuje je poprzez komputer do użytkownika, co stanowi informację zwrotną o jakości sterowania. Przykładowy wygląd pulpitu sterowniczego przedstawiono na rysunku 2.

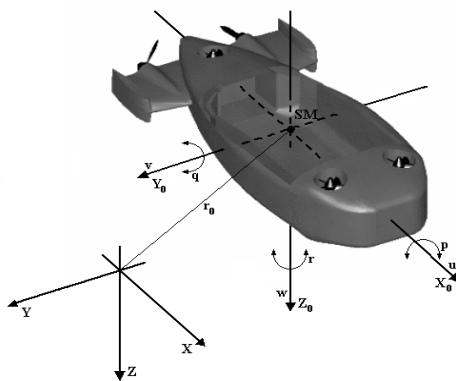


Rys. 2. Pulpit sterowniczy robota podwodnego

Roboty podwodne dosyć dobrze reagują na sygnały sterujące i przemieszczają się pod wodą z dosyć dużą prędkością. Niestety, taka manewrowość jest czasami dużą przeszkodą, szczególnie dla początkujących operatorów oraz dla pilota pracującego robotem w ciężkich warunkach hydrometeorologicznych, czyli przy istnieniu dużych zakłóceń, tj. falowaniu lub prądach. Wydaje się wtedy, że pojazd porusza się w tę i z powrotem bez jakichkolwiek oddziaływań ze strony pilota. Pilotowanie ROV nie jest sprawą łatwą i wymaga dużej wprawy oraz wielu godzin praktyki. Przygotowanie wykwalifikowanego pilota pojazdów głębinowych jest procesem długotrwałym i kosztownym. Właśnie dlatego wiele instytucji interesuje się tworzeniem symulatorów robotów podwodnych, co pozwoli na zdobycie przez przyszłych pilotów praktycznych umiejętności operowania robotem. Obecnie ROV-y stały się podstawowym wyposażeniem wielu jednostek pływających, zarówno okrętów wojennych, jak i jednostek cywilnych, ze szczególnym uwzględnieniem platform wiertniczych. Są one także na wyposażeniu ośrodków naukowych i służb ratownictwa morskiego oraz firm zajmujących się pracami podwodnymi. Na całym świecie jest kilkadziesiąt miejsc, gdzie prace prowadzone za pomocą robotów podwodnych mają szczególne znaczenie. Miejsca te są zazwyczaj związane z miejscami wydobywania gazu i ropy. Ze względu na tak znaczny wzrost zastosowań robotów podwodnych, wzrasta zapotrzebowanie na wyszkolonych pilotów pojazdów podwodnych, a tym samym zainteresowanie tworzeniem symulatorów treningowych.

MODEL MATEMATYCZNY BEZZAŁOGOWEGO ROBOTA PODWODNEGO

Podczas prowadzenia analizy ruchu obiektu pływającego o sześciu stopniach swobody definiowane są dwa układy współrzędnych kartezjańskich, które przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Układ odniesienia związany z pojazdem i związany z ziemią

Ruchomy układ współrzędnych $X_0Y_0Z_0$ jest związany z obiektem pływającym i potocznie nazywa się go układem odniesienia pojazdu. Ruch układu odniesienia pojazdu jest opisywany w stosunku do stałego układu współrzędnych związanego z ziemią, który przyjęto nazywać stałym układem odniesienia. Sugeruje się, aby orientację pojazdu opisywać w stałym układzie odniesienia, natomiast prędkości kątowe i liniowe opisywać w układzie odniesienia związanym z pojazdem. Wielkości opisujące ruch pojazdu są zdefiniowane zgodnie z notacją SNAME, jak to przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Notacja używana przy opisie ruchu pojazdów podwodnych

Stopnie swobody	Nazwa ruchu	Sily i momenty	Prędkości kątowe i liniowe	Pozycja i kąty Eulera
1	ruch postępowy	X	u	x
2	dryf	Y	v	y
3	ruch pionowy	Z	w	z
4	kołysanie boczne	K	p	ϕ
5	przygłębienie	M	q	θ
6	myszkowanie	N	r	ψ

Nieliniowe równania ruchu robota podwodnego traktowanego jako ciało sztywne mogą być zapisane w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] &= X \\
 m[\dot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] &= Z \\
 I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] &= K \\
 I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] &= N
 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: m – masa pojazdu;
 I_x, I_y, I_z – momenty bezwładności względem osi symetrii pojazdu;
 x_G, y_G, z_G – współrzędne środka masy.

Ogólną reprezentację równania ruchu w układzie związanym z ciałem można przedstawić jako:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau, \quad (2)$$

gdzie: η – wektor stanu;
 τ – wektor wymuszeń;
 v – wektor prędkości
 M – macierz mas pojazdu i mas wody dołączonej;
 $C(v)$ – macierz sił dośrodkowych i Coriolisa;
 $D(v)$ – macierz oporów hydrodynamicznych;
 $g(\eta)$ – macierz momentów i sił przywracających.

Tworzenie modelu matematycznego pojazdu podwodnego jest zagadnieniem złożonym. Związane jest to z trudnością wyznaczenia doświadczalnie lub obliczenia bardzo dużej liczby parametrów, która musi być znana, aby rozwiązać równania ruchu. Liczbę tę można zredukować, przyjmując pewne założenia dotyczące budowy pojazdu, takie jak: rozpatrywany pojazd jest symetryczny w różnych płaszczyznach, położenie środka masy pojazdu pokrywa się z położeniem środka wyporu, istnieje odpowiedni dobór układów odniesienia.

Ponadto na złożoność zagadnień modelowania dynamiki ruchu robota podwodnego wpływają zakłócenia oddziałujące na proces sterowany, które należy uwzględnić, aby tworzony model matematyczny odpowiadał rzeczywistości. Zakłócenia, jakie mogą oddziaływać na ruch robota podwodnego, można podzielić na dwa rodzaje: zakłócenia środowiskowe oraz zakłócenia wewnętrzne.

Przy analizie dynamiki ruchu obiektów pływających do podstawowych zakłóceń środowiskowych należy zaliczyć falowanie, wiatr oraz prądy podwodne. Jednakże rozpatrując prace robota podwodnego na dużych głębokościach, należy również uwzględnić zmianę gęstości wody i jej temperatury jako zakłócenia środowiskowe. Przy rozpatrywaniu obiektów całkowicie zanurzonych w wodzie, takich jak roboty podwodne, można pominąć wpływ wiatru na model obiektu, a falowanie ma znaczenie jedynie do głębokości 10 [m]. Dlatego też zakładając, iż symulacja robota podwodnego będzie prowadzona na większych głębokościach, można to zakłócenie zaniedbać w dalszych rozważaniach. Tak więc, dla potrzeb symulacji rozpatrywane są jedynie zakłócenia środowiskowe wywołane przez prądy podwodne.

Jako zakłócenia wewnętrzne w dużym stopniu wpływające na dynamikę robota należy uwzględnić zmianę rozkładu masy. Ze zmianą rozkładu masy mamy do czynienia szczególnie przy wykonywaniu prac podwodnych z wykorzystaniem manipulatora, na którego końcu mogą być zamontowane różnego rodzaju narzędzia lub kamera TV. W takim wypadku każde przemieszczenie manipulatora powoduje zmianę rozkładu masy, a co za tym idzie – zmianę dynamiki robota podwodnego, dlatego czynnik ten należy uwzględnić przy opracowywaniu modelu jego dynamiki.

Prąd podwodny

Metoda uwzględnienia sił i momentów indukowanych przez prądy podwodne w równaniach dynamiki ruchu opiera się na założeniu, że równania ruchu mogą być reprezentowane w postaci prędkości relatywnych:

$$v_r = v - v_c, \quad (3)$$

gdzie $v_c = [u_c, v_c, \omega_c, 0, 0, 0]^T$ – jest wektorem nierotacyjnych prędkości prądów w układzie odniesienia związanym z ciałem.

Należy założyć, że wektor prędkości prądu podwodnego w układzie odniesienia związanym z ziemią będzie zapisany jako $[u_c^E, v_c^E, \omega_c^E]$. Stąd możemy obliczyć składowe występujące w układzie współrzędnych związanym z ciałem poprzez macierz transformacji wynikającą z równań Eulera.

Zakładamy, że prędkość prądu w układzie związanym z ciałem jest stała lub wolnozmienna, tak że spełnia:

$$v_c = 0 \Rightarrow v_r = v. \quad (4)$$

Stąd równanie ruchu (2) przybiera formę:

$$M\dot{v}_r + C(v_r)v_r + D(v_r)v_r + g(\eta) = \tau. \quad (5)$$

Rozkład mas

Podstawowe swoje zadania roboty podwodne wykonują za pomocą manipulatorów. Przeznaczone są one głównie do wykonywania rozmaitych prac podwodnych prowadzonych z zastosowaniem chwytaka i wymiennych narzędzi. Jednak

najczęściej wykonywanym zadaniem jest podnoszenie obiektów z toni wodnej. Przeciętna długość całkowita łańcucha kinematycznego współczesnych manipulatorów podwodnych waha się w granicach od jednego do trzech metrów. Wychylenie tak długiego ramienia powoduje zmianę rozkładu masy, co zmienia dynamikę robota podwodnego. Problem ten nabiera znaczenia szczególnie przy podnoszeniu przez robota wybranych elementów konstrukcji podwodnych, które zazwyczaj mają znaczną masę. Uwzględnienie zmian rozkładu masy w modelu matematycznym pojazdu odbywa się poprzez odpowiednie przesunięcie środka masy robota, które zależy przede wszystkim od masy podnoszonego obiektu, a także od wysięgu ramienia robota. Położenie chwytaka w przestrzeni jest znane w trzech wymiarach w każdym momencie. Umożliwia to obliczenie zmiany środka masy robota obciążonego względem środka masy robota nieobciążonego, zgodnie z zależnością:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{odl} \\ y_{odl} \\ z_{odl} \end{bmatrix} \frac{m}{M+m}, \quad (6)$$

gdzie: M – masa pojazdu;
 m – masa obiektu podnoszonego;
 x_s, y_s, z_s – przesunięcie środka masy pojazdu nieobciążonego po obciążeniu;
 $x_{odl}, y_{odl}, z_{odl}$ – odległość środka masy podnoszonego obiektu od środka masy pojazdu nieobciążonego.

Gęstość wody

Na dynamikę ruchu bezzałogowego robota podwodnego mogą wpływać właściwości wody morskiej, a szczególnie jej gęstość, dlatego też należy dokonać analizy tego zjawiska. Gęstość wody morskiej zmienia się w szerokich granicach – od nieco poniżej jedności w silnie nagrzanych, całkowicie wysłodzonych wodach, np. w ujściach rzek tropikalnych, do 1.076 g/cm³ w najgłębszych częściach oceanu (w pobliżu dna Rowu Mariańskiego). Średnia gęstość wody morskiej dla powierzchni oceanu jest szacowana na około 1.025 g/cm³. Gęstość wody morskiej stanowi funkcję trzech zmiennych:

1. Zasolenia: im większe zasolenie, tym większa gęstość; rozpuszczone substancje mineralne są cięższe od wody, im jest ich więcej w jednostce objętości,

tym jej masa jest większa. Wzrost zasolenia o 1 [‰] powoduje wzrost gęstości o $0,0008 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

2. Temperatury: im wyższa temperatura, tym gęstość mniejsza; temperatura określa rozszerzalność objętościową wody, im wyższa temperatura, tym ta sama masa ma większą objętość.
3. Ciśnienia: im wyższe ciśnienie, tym większa gęstość – ciśnienie określa stopień ściśliwości wody, im woda poddana większemu ciśnieniu, tym „upakowanie” cząstek w jednostce objętości większe. Wzrost ciśnienia odpowiadający przejściu wody od powierzchni do głębokości 1000 [m] spowoduje wzrost gęstości o $0,0045 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

Wobec niewielkiej ściśliwości wody, do głębokości kilkunastu – kilkudziesięciu metrów, można zaniedbać wpływ wzrostu ciśnienia nadległego słupa wody i traktować gęstość jako niezmienną w stosunku do gęstości na powierzchni. W takim wypadku gęstość można traktować jako funkcję dwóch zmiennych: zasolenia i temperatury.

Znając temperaturę wody i jej zasolenie, gęstość można łatwo określić, stosując wzór Mamaeva:

$$\rho = 1 + \frac{28.152 - 0.0735t - 0.00469t^2 + (0.802 - 0.002t)(S - 35)}{1000}, \quad (7)$$

gdzie: t – temperatura wody [$^{\circ}\text{C}$];
 S – zasolenie wody [‰].

Zmiany gęstości wody morskiej wywierają wpływ na zanurzone obiekty, zgodnie z prawem Archimedesesa:

$$m_1 = \frac{\rho_0}{\rho_1} m_0, \quad (8)$$

gdzie: m_1 – masa po zmianie gęstości wody morskiej z ρ_0 do ρ_1 ;
 m_0 i ρ_0 – masa i gęstość wody w stanie początkowym.

W okresie jesieni i zimy, gdy powierzchniowa warstwa wody oddaje ciepło, jej temperatura spada, a gęstość rośnie. Woda taka staje się „cięższa” od cieplejszych wód znajdujących się poniżej i zaczyna opadać. Na jej miejsce wypływa

cieplejsza, o mniejszej gęstości woda z głębszych, podpowierzchniowych warstw, która znowu oddaje ciepło, staje się „cięższa” itd. Jest to klasyczny proces konwekcji, w którym, wraz z pionowymi ruchami wód, ocean przekazuje ciepło do atmosfery. Jeśli jednak w wodach występuje stratyfikacja zasolenia (uwarstwienie), polegająca na tym, że warstwa wody o mniejszym zasoleniu leży na warstwie o nieco większym zasoleniu, to na granicy tych warstw tworzy się strefa skoku gęstościowego, nosząca nazwę piknokliny. Piknoklina stanowi granicę, do której może sięgnąć konwekcja, gdyż woda w piknoklinie będzie miała większą gęstość od wychłodzonych, opadających wód i tym samym ruch wody w głąb nie może być kontynuowany, co wynika z prawa Archimedesesa.

W okresie wiosennym, gdy pochłaniane przez powierzchnię oceanu promieniowanie słoneczne prowadzi do wzrostu temperatury wody na powierzchni, woda na powierzchni ma mniejszą gęstość niż chłodniejsza woda leżąca niżej. W takich warunkach procesy konwekcji nie są możliwe, występuje silna stabilność hydrodynamiczna prowadząca do wytworzenia się warstwy nagranych wód na powierzchni, oddzielonych termokliną od wód niżej leżących.

Z powyższego wynika, że zmiany temperatury i zasolenia mają wpływ i powinny być uwzględniane podczas rozpatrywania obiektów nawodnych lub podwodnych zanurzonych na niewielkich głębokościach. Dla obiektów pracujących na dużych głębokościach, jakimi są roboty podwodne, parametry wody nie będą w znaczny sposób wpływały na ich dynamikę. Wynika to z pomijalnie małych zmian temperatury i zasolenia wraz z głębokością. Zjawisko wynikające z różnicy gęstości wody, czyli konwekcja, nie będzie także w istotny sposób wpływała na dynamikę pojazdu, ponieważ prędkości pionowych ruchów wody wywołanych tym zjawiskiem są niewielkie i występują okresowo. Należy mieć także na uwadze, że pilotowanie ROV odbywa się na niewielkim akwenu, co jeszcze bardziej zawęża możliwości zmian podstawowych parametrów wody, które są przede wszystkim uzależnione od położenia geograficznego rozpatrywanego miejsca pływania.

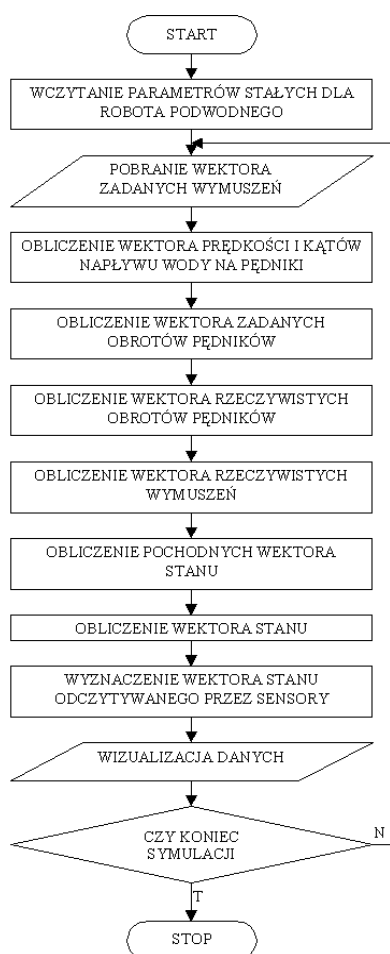
MODEL SYMULACYJNY ROBOTA PODWODNEGO

Model symulacyjny został utworzony na podstawie parametrów rzeczywistych robota podwodnego UKWIAŁ. Podstawowe parametry techniczne tego pojazdu to:

- głębokość robocza 200 [m];
- masa pojazdu 175 [kg];

- wyposażenie:
 - dwie kamery TV,
 - sonar omiatający,
 - echosonda,
 - kompas magnetyczny i elektroniczny,
 - przechyłomierz elektrolityczny;
- liczba pędników: 6, w tym 4 w płaszczyźnie poziomej i 2 w pionowej;
- napór pojedynczego pędnika 220 [N];
- prędkość maksymalna do przodu 1,5 [m/s].

Obliczenia do prowadzenia symulacji są prowadzone zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat obliczeń prowadzonych w modelu symulacyjnym

W pierwszym etapie symulacji zostają wczytane parametry pojazdu podwodnego, które są stałe i charakterystyczne dla danego typu robota. Parametry te zostały wyznaczone podczas pracy pojazdu w warunkach eksploatacyjnych, a należą do nich między innymi takie wielkości, jak: masa pojazdu, momenty bezwładności, masa wody towarzyszącej, położenie pędników, kąty skreślenia pędników, maksymalne napory pędników, maksymalne obroty pędników, współrzędne środków oporu hydrodynamicznego, wyporu i naporu oraz wartości błędów wskazań wszystkich sensorów zamontowanych na pokładzie robota. Następnie określany jest wektor zadanych wymuszeń, który jest ustalany na podstawie wychylenia drążka manipulatora. Wektor stanu oraz parametry równań opisujących dynamikę robota są modyfikowane do postaci uwzględniającej wpływ zakłóceń pochodzących od zadanych prądów podwodnych oraz ewentualnej zmiany rozkładu mas pojazdu. Na podstawie aktualnego wektora stanu oraz informacji o położeniu i kątów skreślenia pędników obliczany jest wektor prędkości i kątów napływu wody na pędniki. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie naporów niezbędnych do uzyskania wektora zadanych wymuszeń; na podstawie tak określonego wektora oraz wektora prędkości i kątów napływu wody na pędniki obliczany jest wektor zadanych obrotów pędników. Wektor ten służy do wyznaczenia, na podstawie charakterystyki rozruchu i hamowania pędników, wektora rzeczywistych obrotów pędników. Znając te wartości, można obliczyć wektor rzeczywistych naporów pędników oraz na jego podstawie wektor rzeczywistych wymuszeń. Następnie obliczona zostaje pochodna względem czasu wektora stanu. Należy zauważyć, że w tym momencie otrzymujemy wektor stanu w układzie lokalnym. Na jego podstawie wyznaczony zostaje, poprzez całkowanie, wektor prędkości w układzie lokalnym, który jest transformowany do układu globalnego.

Drugie całkowanie pozwala wyznaczyć położenie w układzie globalnym. W ten sposób otrzymujemy wektor stanu pojazdu, w którym prędkości są określone w układzie lokalnym, a położenie w układzie globalnym. Kolejnym etapem jest przygotowanie danych do wizualizacji. W tym celu na podstawie wektora stanu – znając dokładności i błędy wskazań sensorów zamontowanych na pojeździe, dokonując prostych obliczeń i wprowadzając losowe zakłócenia odczytu w zakresie określonym przez parametry charakterystyczne dla poszczególnych czujników – można wyznaczyć wartości rzeczywiste odczytywane z czujników. Wartości te są następnie przedstawiane użytkownikowi w postaci odchylenia wskaźników i stanowią one informację zwrotną o jakości sterowania. Następnym krokiem, jeżeli symulacja nie została zakończona, jest powrót do etapu odczytania wektora zadanych wymuszeń i proces obliczeniowy zostaje powtórzony.

Akwen podwodny został zaimplementowany z wykorzystaniem Direct3D, który jest komponentem opracowanego przez Microsoft pakietu DirectX SDK, wspomagającego tworzenie szybkiej, trójwymiarowej grafiki, dostępnej w dzisiejszych komputerach. Bibliotekę Direct3D można przedstawić jako graficzny system operacyjny lub jako warstwę izolacyjną dla akceleratorów graficznych. Jej podstawowym zadaniem jest zapewnienie interfejsu dla sprzętu graficznego i jednocześnie odizolowanie programisty od szczegółów związanych z różnicami w dostępie do sprzętu. Oprócz tego, biblioteka ta ma udostępniać usługi pozwalające na tworzenie trójwymiarowej grafiki na komputerach klasy PC.

Wirtualny akwen, w którym prowadzona jest symulacja ruchu robota podwodnego, składa się z dna oraz przeszkód zanurzonych w toni wodnej. Przed rozpoczęciem prowadzenia symulacji zostają zdeterminowane podstawowe parametry określające charakter scenarii, w której ma odbywać się pływanie. Pierwszym krokiem tworzenia wirtualnego akwenu jest ustalenie miejsca prowadzenia symulacji. W tym celu na mapie świata, przedstawiającej graficznie głębokości wód, wskazywany jest akwen, gdzie ma być prowadzona symulacja. Wybrane miejsce jest podstawą do utworzenia właściwego ukształtowania dna morskiego, odpowiadającego warunkom rzeczywistym. Oprócz tego, wskazane miejsce jest podstawą do ustalenia parametrów zakłóceń środowiska wynikających z prądów podwodnych występujących na danym akwenu. Po wyznaczeniu miejsca pływania zostaje wygenerowane dno w postaci trójwymiarowej siatki. Siatka ta w celu wiernego odzwierciedlenia ukształtowania terenu zostaje złożona z trójkątnych płaszczyzn. Następnie tak przygotowany szkielec jest renderowany, czyli nanoszone są tekstury w postaci bitmap, nadając tym samym dnu rzeczywisty wygląd.

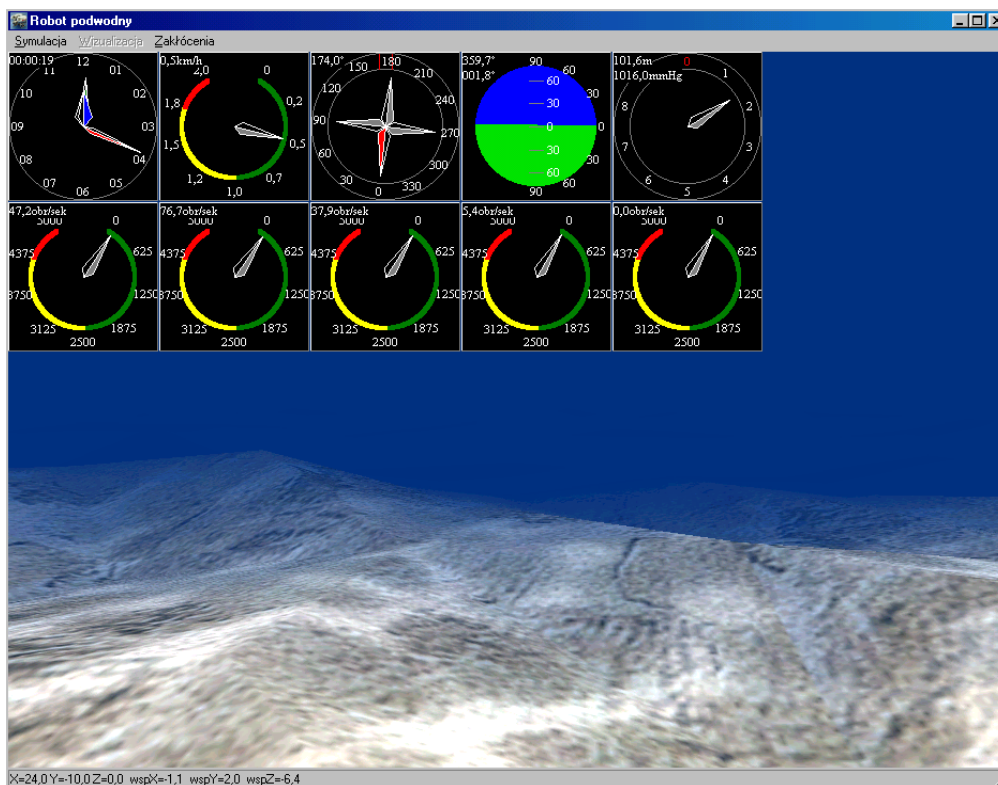
Kolejnym krokiem w tworzeniu scenarii wirtualnego akwenu jest określenie, jakie oraz gdzie mają być rozmieszczone obiekty pełniące funkcje przeszkód podwodnych. W tym celu określa się dla każdego z nich kształt oraz położenie w trzech wymiarach. Istnieje możliwość wyboru postaci tych elementów z listy podstawowych trójwymiarowych prymitywów, takich jak ostrosłup, stożek, sześcian lub walec. Istnieje także możliwość wgrania własnych kształtów obiektów z plików zapisanych w formacie X.

Po przygotowaniu akwenu operator może przyjąć w zaproponowanej formie ustawienia zakłóceń środowiska występujących na danym akwenu lub dokonać ich zmian. Zakłócenie jest opisywane przez trzy parametry określające prędkości wody w trzech wymiarach w układzie odniesienia związanym z ziemią. Jednocześnie

można uwzględnić przypadek przenoszenia przez pojazd podwodny pewnych elementów, określając zmiany rozkładu masy robota podwodnego poprzez deklarację ciężaru oraz usytuowania podnoszonego obiektu. Sytuacja taka powoduje zmianę rozkładu masy pojazdu, a tym samym w dużym stopniu wpływa na dynamikę jego ruchu, co w konsekwencji zmusza operatora do zmiany sposobu sterowania takim robotem w celu wykonania stawianego zadania, którym może być na przykład wykonanie pływania po zadanej trajektorii.

Po zatwierdzeniu tych parametrów program przechodzi w tryb symulacji. W tym trybie na ekranie prezentowany jest widok na akwen podwodny odpowiadający temu, co w rzeczywistości widzi operator robota poprzez zainstalowane na nim kamery. W celu podniesienia realności prezentowanych obrazów zastosowano połączenie kilku efektów wizualnych udostępnianych przez środowisko DirectX. W tym przypadku wykorzystano między innymi: odpowiednie oświetlenie, efekt rozmycia obrazu, nałożono mgłę oraz dobrano odpowiednią przezroczystość widoku. Poza tym na ekranie prezentowane są w postaci graficznej wskaźniki przyrządów zainstalowanych na pokładzie robota podwodnego. Poprzez te wskaźniki użytkownik uzyskuje informację zwrotną o jakości sterowania. Na informację tę składają się następujące elementy: prędkości obrotowe poszczególnych pędników, prędkość wypadkowa poruszania się pojazdu, głębokość zanurzenia pojazdu, jego kurs oraz kąt przyglębienia i przechyłu. Oprócz tych informacji użytkownikowi prezentowane są wartości nastaw zadanych naporów w poszczególnych osiach pojazdu podwodnego, co znacznie ułatwia pilotowanie robota oraz optymalizuje czas prowadzonej symulacji. Poza tym na minimapie akwenu na bieżąco nanoszona jest aktualna pozycja pojazdu oraz prezentowana jest jego cała trajektoria. Rysowana trajektoria zmienia swój kolor zgodnie ze zmianami głębokości zanurzenia pojazdu.

Opisany program symulacyjny został zaimplementowany z wykorzystaniem środowiska programistycznego Delphi firmy Borland Inprise. Obraz widziany na ekranie podczas prowadzenia symulacji ruchu robota podwodnego w toni wodnej przedstawia rysunek 5. Na obraz ten składa się widok otoczenia w wirtualnym akwenu podwodnym oraz widok wskaźników przyrządów zamontowanych na pokładzie robota.



Rys. 5. Wygląd ekranu symulatora podczas pracy

Sterowanie pojazdem odbywa się poprzez wychylenie drążka dwóch manipulatorów – joysticków. Jeden z nich odpowiada za zadawanie naporów wzdłuż osi wzdłużnej X i poprzecznej Y robota podwodnego, drugi zaś odpowiada za zadawanie naporu wzdłuż osi pionowej Z .

Wszystkie parametry ruchu robota mogą być na bieżąco rejestrowane, co umożliwia ich późniejszą analizę, prezentację w postaci wykresów, a także daje możliwość odtworzenia prowadzonej symulacji.

Prezentowana aplikacja symulacyjna umożliwia wprowadzanie dowolnego scenariusza, z możliwością jego zapisu i modyfikacji, na który składają się ukształtowanie terenu podwodnego oraz rozmieszczenie przeszkód w toni wodnej.

Przyjęte w programie rozwiązania oraz uwzględnienie podstawowych czynników wpływających w znaczny sposób na metodę sterowania dają możliwość prowadzenia podstawowych szkoleń w zakresie pilotowania robota podwodnego.

PODSUMOWANIE

Tworzenie symulatorów ma niezaprzeczalne zalety związane przede wszystkim z kosztami, ale także wygodą i skróceniem czasu potrzebnego na szkolenie pilotów robotów podwodnych. Dzięki zastosowaniu symulatorów można także, w łatwy i szybki sposób, przetestować nowo powstające systemy, których działanie ma wpływ na wektor stanu pojazdu. Utworzony model symulacyjny robota podwodnego może być podstawą do dalszych prac związanych z identyfikacją dynamiki pojazdów podwodnych oraz opracowywania różnych systemów sterowania ruchem robota podwodnego czy elementami jego wyposażenia, takimi jak kamery, sonary itp.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ayres J., *Delphi Graphics and Game Programming Exposed with DirectX 7.0*, Wordware Publishing, Inc., 1999.
- [2] Fossen T. I., *Guidance and control of ocean vehicles*, John Wiley & Sons, Chichester 1994.
- [3] Gerler M., Hagen G., *Standard equations of motion for submarine simulation*, Technical Report, Defense Technical Information Center, document #A653861, David Taylor Naval Ship Research and Development, June 1967.
- [4] Goheen K., Jefferys E., *The application of alternative modeling techniques to ROV dynamics*, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990.
- [5] Grzybowski M., *Symulatory w szkoleniu marynarzy*, „Przegląd Morski”, 1992, nr 10.
- [6] Morrison F., *Sztuka modelowania układów dynamicznych*, WNT, Warszawa 1996.
- [7] Sanchez J., Canton M., *Biblia Direct3D*, Helion, Gliwice 2000.
- [8] *The Society of Naval Architects and Marine Engineers: Nomenclature for treating the motion of submerged body through a fluid*, „Technical and Research Bulletin”, No 1 – 5.
- [9] Zalewski A., Cegiela R., *Matlab – obliczenia numeryczne i zastosowania*, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1997.

- [10] Żak B., Żak A., *Simulation model of underwater vehicle's motion in disturbed environment*, Electrical and Computer Engineering Series. Computational Methods in Circuits and Systems Applications, WSEAS Press, USA 2003.

ABSTRACT

The paper presents a concept of simulation environment for movement of an underwater robot. It briefly shows the mathematical model of the vehicle which was used to develop a simulation model. It also discusses methods which take into account the effect of underwater currents as well as changes in mass distribution in the mathematical model of robot. In addition, it presents the structure of the simulation program and description of the way adopted to create a virtual underwater area. Finally, it gives examples of the results from the simulation program for underwater robot movement.

Recenzent kmdr prof. dr hab. inż. Andrzej Felski