

dr inż. Jerzy GARUS
Akademia Marynarki Wojennej
mgr inż. Andrzej ŻAK
Zespół Informatyki Marynarki Wojennej

MODEL SYMULACYJNY RUCHU ROBOTA PODWODNEGO

W pracy przedstawiono koncepcję tworzenia modelu symulacyjnego robota podwodnego. Zaprezentowano model matematyczny pojazdu oraz schemat blokowy obliczeń wykonywanych w procesie symulacji. Zamieszczono przykładowe wyniki w postaci rysunków z pracy symulatora robota podwodnego.

SIMULATION MODEL OF UNDERWATER ROBOTIC VEHICLE'S MOTION

The paper presents a simulation model for underwater vehicle's motion. The mathematical model of robotic vehicle and a block diagram of data flow are described. A graphical example of an operator's screen is inserted.

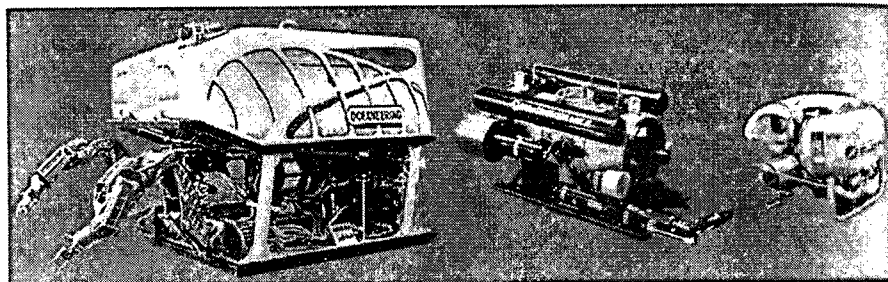
1. WPROWADZENIE

Oceany zajmują dwie trzecie powierzchni Ziemi i są zamieszkiwane przez większość organizmów żywych naszej planety. Bezpośrednie ludzkie możliwości poznawania tego środowiska są bardzo ograniczone. Z tego też względu do badania i eksploracji głębin wykorzystuje się pojazdy podwodne. Od lat siedemdziesiątych 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.

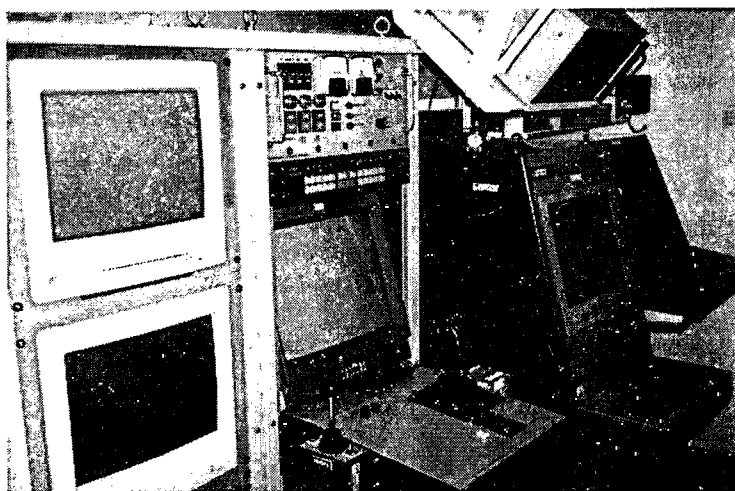
Przez robot podwodny typu ROV (Remotely Operated Vehicle – zdalnie sterowany pojazd podwodny) będzie rozumiany bezzałogowy obiekt całkowicie zanurzony w wodzie, posiadający sześć stopni swobody i połączony z bazą nawodną przewodem lub za pomocą hydroakustycznego kanału łączności. Przykładowy wygląd współczesnych 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 video i oświetlenia. W układzie sterowania takim robotem funkcje regulatora w torze sprzężenia zwrotnego spełnia najczęściej operator obserwujący obiekt pracy na monitorze na pokładowym pulpicie sterowania. Pilotowanie ROV odbywa się w przestrzeni trójwymiarowej za pomocą joysticka, który umożliwia przemieszczanie robota w górę i w dół, do przodu i do tyłu oraz na boki. Poprzez system przełączników i manipulatorów operator określa specyficzne parametry robota, które po przetworzeniu przez komputer trafiają jako sygnały sterujące do poszczególnych elementów pojazdu takich jak choćby silniki napędu determinujące położenie robota. Robot na podstawie

posiadanych na wyposażeniu czujników dokonuje pomiaru specyficznych parametrów (głębokość zanurzenia, prędkość, położenie, itp.) i przekazuje je poprzez komputer do użytkownika, co stanowi informację zwrotną o jakości sterowania. Przykład pulpitu sterowniczego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Współczesne roboty podwodne



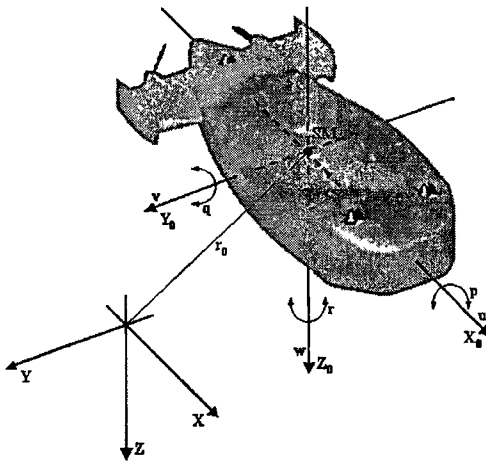
Rys. 2. Pulpit sterowniczy robota podwodnego

Roboty podwodne dobrze reagują na sygnały sterujące i przemieszczają się pod wodą ze znaczną prędkością. Ich manewrowość jest dużą przeszkodą szczególnie dla początkujących operatorów, w szczególności pracujących robotem w ciężkich warunkach hydrometeorologicznych, czyli przy dużym wietrze, falowaniu lub prądzie morskim. Pilotowanie ROV nie jest sprawą łatwą i wymaga dużej wprawy oraz wielu godzin praktyki. Przygotowanie wykwalifikowanego pilota pojazdów głębinowych jest procesem długotrwałym i kosztownym. Typowo przyjmuje się, że wykwalifikowany pilot musi przepracować około 500 godzin prowadząc robota, aby móc poradzić sobie z większością zaistniałych sytuacji. Są organizowane szkolenia pilotażu pojazdów podwodnych, na których przeważnie można zdobyć umiejętności praktyczne prowadząc robota własnoręcznie nie dłużej niż 8-10 godzin. Dlatego też dużo firm interesuje się

tworzeniem komercyjnych symulatorów robotów podwodnych, co pozwoli na znaczne zmniejszenie kosztów szkolenia a zarazem zdobycie przez przyszłych pilotów praktycznych umiejętności operowania robotem. Obecnie ROV stały się podstawowym wyposażeniem wielu jednostek pływających ze szczególnym uwzględnieniem platform, a także są na wyposażeniu ośrodków naukowych, wojskowych, ratowniczych 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. Przewiduje się, że w każdej chwili około 400 ROV pracuje jednocześnie na całym świecie i liczba ta ciągle rośnie, co pokazuje jak duże jest zapotrzebowanie na wyszkolonych pilotów pojazdów podwodnych.

2. MODEL MATEMATYCZNY ROBOTA PODWODNEGO

Podczas prowadzenia analizy ruchu obiektów pływającego o sześciu stopniach swobody definiowane są dwa układy współrzędnych kartezjańskich, które przedstawiono na rysunku 3. Ruchomy układ współrzędnych X_0, Y_0, Z_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 zaś prędkości kątowe i liniowe powinny być opisywane w układzie odniesienia związanym z pojazdem. Wielkości opisujące ruch pojazdu są zdefiniowane zgodnie z notacją SNAME jak to przedstawiono w tabeli 1 [5].



Rys. 3. Układy odniesienia: związany z pojazdem i związany z ziemią

Tabela 1. Notacja używana przy opisie ruchu pojazdów podwodnych.

Stopień swobody	Nazwa ruchu	Siły i momenty	Prędkości katowe i liniowe	Pozycja i kąty Eulera
1	ruch postępowy (w kierunku osi x)	X	u	x
2	dryf (w kierunku osi y)	Y	v	y
3	ruch pionowy (w kierunku osi z)	Z	w	z
4	kołysanie boczne (wokół osi x)	K	p	ϕ
5	przygiębnienie (wokół osi y)	M	q	θ
6	myszkowanie (wokół osi z)	N	r	ψ

Nieliniowe równania ruchu robota podwodnego traktowanego jako ciało sztywne mogą być zapisane w następujący sposób [2, 3]:

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

gdzie:

I_x, I_y, I_z – momenty bezwładności względem osi symetrii pojazdu;

m – masa pojazdu;

x_G, y_G, z_G – współrzędne środka ciężkości.

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

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

gdzie:

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;

η – wektor stanu;

τ – wektor wymuszeń;

v – wektor prędkości.

Tworzenie modelu matematycznego pojazdu podwodnego jest zagadnieniem złożonym. Związane jest to z trudnością wyznaczenia lub obliczenia bardzo dużej ilości parametrów, która musi być znana, aby rozwiązać równania ruchu. Ilość tą można zredukować przyjmując pewne założenia dotyczące budowy pojazdu takie jak: symetria pojazdu w różnych płaszczyznach, położenie środka ciężkości pojazdu i środka wyporu, oraz poprzez odpowiedni dobór układów odniesienia [4,5].

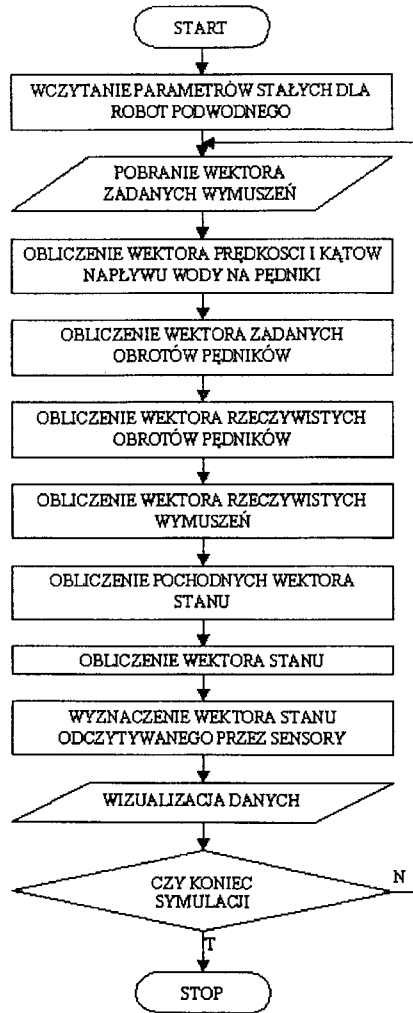
3. MODEL SYMULACYJNY

Model symulacyjny został utworzony na podstawie parametrów pojazdu podwodnego UKWIAŁ będącego na wyposażeniu okrętów trałowych Marynarki Wojennej. 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;
- ilość pędników: 6, 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.

W pierwszym etapie symulacji zostają wczytane parametry pojazdu podwodnego, które są stałych i charakterystycznych dla danego typu robota. Parametry te zostały wyznaczone podczas pracy pojazdu w warunkach eksploatacyjnych a należą do nich takie wartości jak: masa, momenty bezwładności pojazdu, ciężar mas towarzyszących, położenie pędników, kąty skrzywienia 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 ten posiada sześć składowych, do których należą: siły działające wzdłuż osi symetrii pojazdu oraz momenty skręcające wokół tychże osi. Dla potrzeb sterowania zadaje się jedynie wartości określające siły naporu wzdłuż osi robota. Na podstawie aktualnego wektora stanu oraz informacji o położeniu i kątów skrzywienia pędników obliczany jest wektor prędkości i kątów napływu wody na pędniki. Kolejnym krokiem jest wyznaczenie naporów niezbędnych do uzyskania wektora zadanych wymuszeń oraz 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 obliczany zostaje wektor rzeczywistych naporów



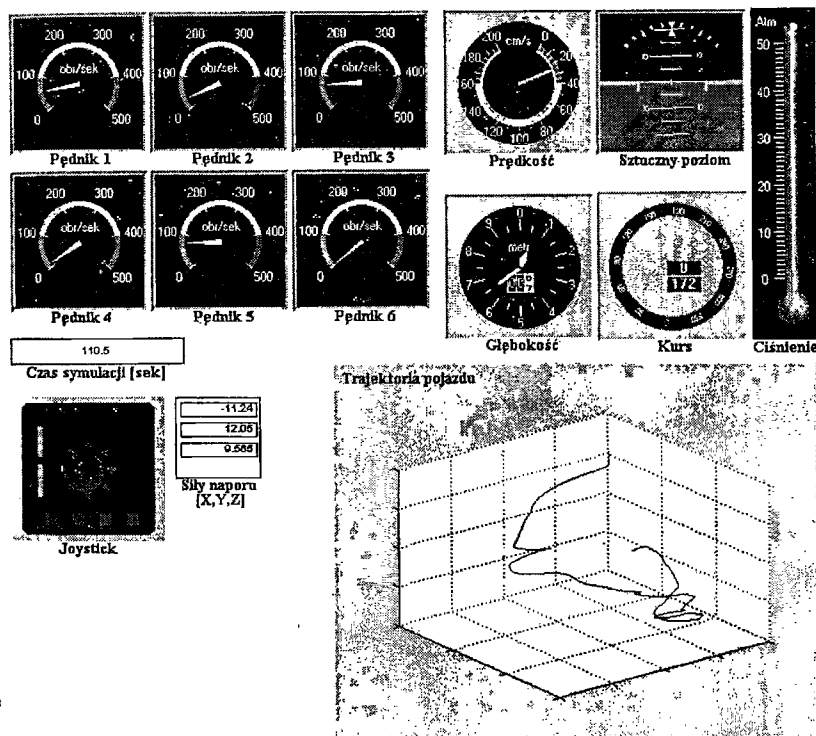
Rys. 4. Schemat obliczeń prowadzonych w modelu symulacyjnym

pędników oraz na jego podstawie wektor rzeczywistych wymuszeń. Następnie obliczona zostaje pochodna względem czasu wektora stanu. Należy zauważyć, że w tym momencie otrzymujemy wektorem 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 zaś położenie w układzie globalnym. Kolejnym etapem jest przygotowanie danych do wizualizacji. W tym celu na podstawie wektora stanu oraz znając dokładności i błędy wskazań sensorów zamontowanych na pojeździe można, dokonując drobnych obliczeń, wyznaczyć wartości rzeczywiste odczytywane z czujników. Wartości te są następnie przedstawiane

użytkownikowi w postaci odchylenia wskaźników podobnych do tych zamontowanych na konsoli operatora 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 powtarza się.

4. PRZYKŁAD PRACY MODELU SYMULACYJNEGO

postać pulpitu symulatora wyświetlanego użytkownikowi przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wygląd ekranu symulatora podczas pracy

Sterowanie pojazdem odbywa się poprzez wychylenie drążka manipulatora – joysticka, co odpowiada zadaniu naporów wzdłuż osi X, Y oraz suwaka manipulatora odpowiadającego zadaniu naporu wzdłuż osi Z. Za pomocą wskaźników użytkownik uzyskuje informację zwrotną o jakości sterowania. Na informację tą składają się następujące elementy: prędkości obrotowe wszystkich prędników, prędkość poruszania się pojazdu, głębokość zanurzenia pojazdu, kurs pojazdu, ciśnienie oraz przegłębienie i sztuczny poziom. Oprócz tych informacji użytkownikowi zostały pokazane wartości nastaw zadanych naporów, czas prowadzonej symulacji oraz trajektoria pojazdu w przestrzeni trójwymiarowej.

Oprócz wartości, które są prezentowane powyżej, w łatwy sposób można uzyskać wykresy wszystkich innych parametrów pracy symulatora w czasie dzięki możliwości zapisywania przebiegów podczas jego działania.

Obecnie trwają prace nad stworzeniem wirtualnego środowiska, w którym pojazd mógłby się poruszać a operator miał by możliwość wykonywania pewnych zadań. Umożliwiłoby to prowadzenie pełnowartościowych szkoleń w zakresie pilotowania robota podwodnego.

5. PODSUMOWANIE

Tworzenie symulatorów ma niezaprzeczalne zalety związane przede wszystkim z kosztami, ale także wygodą i skróceniem czasu podczas prowadzenia szkolenia 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.

LITERATURA

- [1] Fossen Thor I.: *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons, Chichester 1994.
- [2] 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.
- [3] Goheen K., Jefferys E.: *The application of alternative modeling techniques to ROV dynamics*. Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1302–1309, 1999.
- [4] Morrison F.: *Sztuka modelowania układów dynamicznych*. WNT, Warszawa 1996.
- [5] 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.