

Piotr Szymak, Marcin Malec, Marcin Morawski

dr inż. Piotr Szymak
Akademia Marynarki Wojennej, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej,
81-103, Gdynia, ul. Śmidowicza 69,
58 626 28 81,
p.szymak@amw.gdynia.pl.

mgr inż. Marcin Malec, mgr inż. Marcin Morawski
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny,
31-864, Kraków, Jana Pawła II 37,
marcin.m.malec@gmail.com,
marcin.morawski@gmail.com.

KONCEPCJA ROZWOJU CYBERRYBY

Coraz częściej systemy napędowe pojazdów podwodnych są projektowane na podstawie analizy sposobu poruszania się naturalnych mieszkańców środowiska podwodnego. W tym przypadku najczęściej naśladuje się różne rodzaju ryby, których techniki poruszania się pod wodą zostały ukształtowane w toku długotrwałego procesu ewolucji. Istnieje kilka różnych przykładów tego typu pojazdów zarówno na świecie jak i w Polsce. Jednym z nich jest CyberRyba, robot podwodny zaprojektowany na Politechnice Krakowskiej.

W niniejszym artykule zaprezentowano budowę i zasadę działania CyberRyby, pojazdu podwodnego z napędem falowym. Następnie przedstawiono możliwe kierunki rozwoju tej konstrukcji, mające na celu przede wszystkim zwiększenie jej funkcjonalności oraz poprawę parametrów ruchu. Ogólnie rzecz ujmując, planowane zmiany i udogodnienia zostały podzielone na dwie grupy. Pierwszy kierunek rozwoju związany jest z doposażeniem istniejącej konstrukcji w dodatkowe urządzenia i sensory zwiększające jej funkcjonalność w zakresie różnego rodzaju zadań podwodnej inspekcji. Natomiast druga grupa działań związana jest z zapewnieniem jak największej autonomii działania CyberRyby, czyli z jej wyposażeniem w algorytmy sterowania oparte na metodach sztucznej inteligencji, pozwalające na samodzielne podejmowanie decyzji w toku realizowanej misji.

Słowa kluczowe: autonomiczny pojazd podwodny, napęd falowy

CONCEPTION OF DEVELOPMENT OF CYBERFISH

More often, new driving systems of underwater vehicles are designed based on a motion analysis of natural inhabitants in an underwater space. In this case, different types of fishes are usually imitated, whose techniques of moving underwater were formed during long-lasting process of an evolution. There are several examples of these vehicles both on the world and in Poland. One of them is CyberFish, the underwater robot designed in Krakow University of Technology.

In the paper, a structure and principles of operation of CyberFish, the

underwater vehicle with the undulating propulsion, was described. Next, possible directions in development of the vehicle were presented, which are aimed at increasing its functionality and improving its parameters of motion. In general, the planned changes and improvements were divided into two groups. The first direction in development is connected with installing additional equipment and sensors on board of the CyberFish, what can increase its abilities in different tasks of underwater inspection. The second group of changes and improvements is connected with increasing autonomy of the CyberFish and it depends on using artificial intelligence methods to control of the robot, to independently make decisions during carried out mission.

Key Words: *autonomous underwater vehicle, undulating propulsion*

WSTĘP

Zdolność ryb do poruszania się w wodzie jest oparta na precyzyjnym ruchu falowym ich ciała i ogona. Ryby na przestrzeni tysięcy lat ewolucji, dopracowały ten sposób poruszania się do perfekcji zatem nie dziwi fakt, że napęd falowy jest uważany za najbardziej efektywny sposób poruszania się w środowisku wodnym.

Po to, aby zrozumieć sposób poruszania się ryby, należy najpierw poznać kilka szczegółów anatomicznych jej ciała [5]. Wrzecionowaty kształt ciała ryby oraz wydzieliną, którą pokryta jest skóra ryby, ułatwia jej szybkie pływanie pod wodą. Prędkość pływania w dużej mierze zależy od kształtu ciała. Najlepszymi pływakami są ryby o kształcie tuńczyka lub makreli. Elastyczny tułów i ogon, wprawiony w ruch za pomocą cyklicznych skurczów mięśni, odpycha wodę do tyłu i na boki. Siły działające na boki równoważą się natomiast siła odpychająca wodę ku tyłowi wytwarza reakcję, która z kolei powoduje ruch ryby do przodu. Ryba zatem używa całej powierzchni ciała w czasie pływania. Zmiana głębokości pływania realizowana jest za pomocą pęcherza pławnego, wypełnionego powietrzem. Umiejscowienie środka ciężkości ryby również ma niebagatelne znaczenie dla sprawności pływania. Ryby o środku ciężkości umiejscowionym poniżej głównej osi ciała łatwiej podpływają do powierzchni wody.

Wszystkie wymienione powyżej cechy budowy anatomicznej ciała ryby zostały uwzględnione przy projektowaniu i wykonaniu CyberRyby, tak aby maksymalnie zbliżyć konstrukcję robota oraz sposób jego poruszania się do żywej ryby.

W dwóch kolejnych rozdziałach niniejszej pracy zostanie pokrótce omówiona budowa oraz sposób poruszania się robota. Następnie zostanie opisana koncepcja rozwoju CyberRyby zarówno pod względem wyposażenia robota w dodatkowe urządzenia jak również zastosowania wyrafinowanych algorytmów z dziedziny sztucznej inteligencji do sterowania jej ruchem.

1. KONSTRUKCJA CYBERRYBY

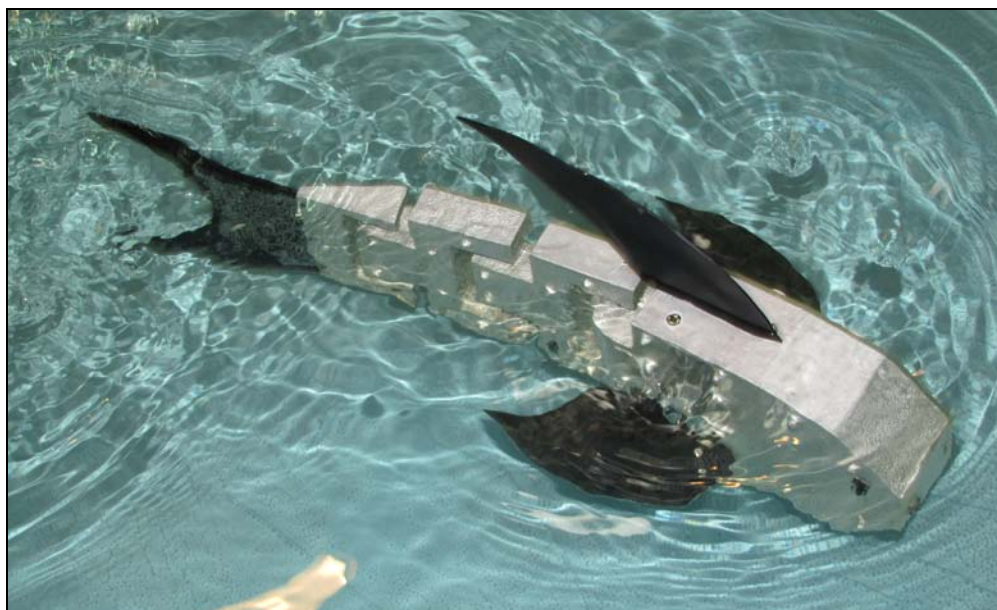
Trójwymiarowy projekt konstrukcji mechanicznej CyberRyby, zaprojektowany w systemie Catia v.5, zakładał zbudowanie robota składającego się z czterech członów, połączonych szeregowo za pomocą obrotowych par kinematycznych. Każdy człon tułowia i ogona jest napędzany przez oddzielny miniaturowy serwomechanizm modelarski oraz przekładnię zębatą o przełożeniu 1:1. W największym członie (tj. głowie) przewidziano miejsce na: elektroniczny układ sterujący, dwa pakiety akumulatorów, miniaturową bezprzewodową kamerę, sztuczny pęcherz pławny wraz z mechanizmem zmiany głębokości pływania, dwa serwomechanizmy modelarskie,

czujnik temperatury oraz zbliżeniowe czujniki obiektów, działające na zasadzie detekcji promieniowania podczerwonego, odbitego od przeszkody. W dwóch kolejnych członach tułowia umieszczono jedynie serwomechanizmy napędzające każdy kolejny element. Ostatnim członem jest elastyczna płetwa ogonowa, działająca dodatkowo jako ster kierunku. Sztuczny pęcherz pławny wykonany został z dwóch silikonowych rurek w kształcie harmonijki, zamkniętych na jednym końcu i przytwierdzonych drugim końcem do dolnej ścianki głowy robota, w miejscach gdzie wcześniej wywiercono dwa otwory. Tak wykonane zbiorniczki balastowe umożliwiają zasysanie wody do ich wnętrza lub wypompowywanie jej. Odbywa się to przez rozciąganie lub ściskanie zbiorniczków za pomocą serwomechanizmu umieszczonego w głowie CyberRyby oraz mechanizmu dźwigni i cięgien. Mechanizm dźwigniowy jest także połączony z osią obrotu płetw bocznych, dzięki czemu przy zmianie głębokości zmienia się także kąt nachylenia płetw bocznych, co dynamicznie usprawnia proces zmiany głębokości w czasie poruszania się robota. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność działania wyżej wymienionego mechanizmu zmiany głębokości jest gęstość robota. Podobnie jak w przypadku żywej ryby, gęstość „ciała” CyberRyby jest maksymalnie zbliżona do gęstości wody. Dzięki temu mała zmiana objętości pęcherza pławnego powoduje zmianę zanurzenia.

Na podstawie modelu 3D CyberRyby, wyznaczono objętość robota a następnie dobrano jego masę. Fizyczny prototyp wykonano z PCW, aluminium, gumy, akrylu i blach nierdzewnych. Do wykonania połączeń użyto różnego rodzaju klejów, śrub oraz połączeń spawanych. Poszczególne człony korpusu robota, zostały uszczelnione wazeliną techniczną, wtłoczoną w miejsce połączenia członów z ich pokrywami. Pokrywy przykręcono śrubami wyposażonymi w silikonowe podkładki. Osie obrotów uszczelniono gumowymi pierścieniami uszczelniającymi i łożyskami ślizgowymi wypełnionymi wazeliną techniczną.

Gotowy prototyp CyberRyby przedstawiony na Rys. 1, został następnie przetestowany w basenie o pojemności 2 tysięcy litrów.

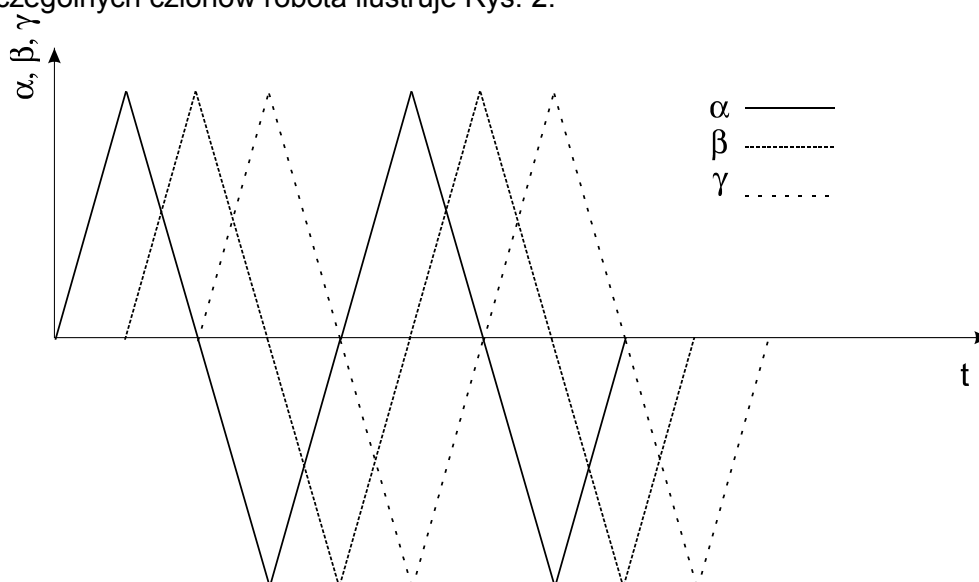
Elektroniczny układ sterujący zbudowano w oparciu o mikrokontroler jednoukładowy ATmega32 z rezonatorem kwarcowym 8MHz. Wykorzystano klasyczną aplikację dostępną w literaturze [1], jednak rozbudowano układ sterujący o dodatkowe elementy. Do komunikacji z komputerem wykorzystano dwa bezprzewodowe moduły radiowe MOBOT RCRv2 przesyłające dane sygnałem radiowym o częstotliwości 433MHz. Jeden z modułów podłączony jest bezpośrednio do portu USART mikrokontrolera. Drugi natomiast podłączony jest do komputera przez port USB. Komunikacja z modułami odbywa się za pomocą asynchronicznej transmisji szeregowej z domyślnymi parametrami: 56kbps, 8 bitów danych, 1 bit stop, bez kontroli parzystości. CyberRyba posiada cztery zbliżeniowe czujniki obiektów, zamontowane na głowie i działające w paśmie podczerwieni. Zbudowane są z diod IR LED oraz detektorów podczerwieni TSOP1736. Dodatkowo CyberRyba wyposażona jest w cyfrowy czujnik temperatury wody DS18B20, komunikujący się z mikrokontrolerem poprzez interfejs 1-wire. Elektroniczny układ sterujący oraz miniaturowa bezprzewodowa kamera, umieszczona w przedniej części robota, zasilane są stabilizowanym napięciem 5V. Serwomechanizmy natomiast zasilane są z oddzielnego źródła zasilania o napięciu 6V. Takie rozwiązanie ma na celu eliminację zakłóceń generowanych przez działające serwomechanizmy. Energia do zasilania wszystkich układów CyberRyby czerpana jest z dwóch pakietów baterii o pojemności 2,7Ah i napięciu 9,6V. Więcej informacji na temat konstrukcji i zasady działania robota można znaleźć w pracy [3].



Rys.1. Widok CyberRyby podczas testów w basenie

2. ZASADA DZIAŁANIA CYBERRYBY

Falowy ruch tułowia i ogona, który wprawia CyberRybę w ruch, jest zrealizowany przez odpowiednią synchronizację wychyleń poszczególnych członów, z których zbudowany jest robot. Synchronizacja polega na odpowiednim opóźnieniu momentu startu każdego kolejnego serwomechanizmu, w wyniku czego następuje pewne przesunięcie kątowe pomiędzy chwilowymi położeniami poszczególnych członów. W efekcie złożenia ruchów pojedynczych członów, cały mechanizm ogona wykonuje ruch falowy, zbliżony do ruchu żywej ryby. Przykładowy wykres wychyleń poszczególnych członów robota ilustruje Rys. 2.



Rys. 2. Wykres wychyleń serwomechanizmów napędu ogona

Sygnaly PWM sterujące serwomechanizmami, generowane są przez mikrokontroler ATmega32. Maksymalny kąt wychylenia każdego członu wynosi $\pm 90^\circ$, jednak w praktyce jest on ograniczony do około $\pm 30^\circ$. Prędkość poruszania się robota może być zmieniana przez zmianę częstotliwości oscylacji tułowia i ogona.

Obserwując sposób poruszania się żywej ryby, można stwierdzić, że najlepszym sposobem zmiany kierunku w wodzie jest gwałtowne wychylenie tułowia i ogona w jednym kierunku, a następnie powolne wyprostowanie ciała. Reakcja spowodowana takim ruchem, powoduje obrót ryby dookoła pionowej osi. Taka sama zasada przy wykonywaniu podwodnych skrętów, jest zastosowana w CyberRybie. Wysłanie do robota komendy „skręć w lewo” lub „skręć w prawo”, skutkuje gwałtownym wychyleniem wszystkich członów w lewo bądź w prawo a następnie powolnym wyprostowaniu ciała i kontynuowaniu ruchu na wprost. Zmiana zanurzenia realizowana jest w sposób skokowy poprzez sztuczny pęcherz pławny i odpowiednie nachylenie płetw bocznych. Wysłanie pojedynczej komendy „zanurzenie” lub „wynurzenie”, powoduje odpowiednie zmniejszenie objętości pęcherza pławnego i nachylenie płetw bocznych o około 9° . Maksymalne wychylenie płetw bocznych wynosi około $\pm 27^\circ$.

Program mikrokontrolera, sterujący wszystkimi podzespołami wewnątrz CyberRyby, został napisany w języku C przy wykorzystaniu środowiska programistycznego WinAVR oraz kompilatora AVRGCC. Idea działania programu opiera się na nieskończonej pętli, w której wywoływane są odpowiednie funkcje, odpowiedzialne za: odbiór i dekodowanie komend sterujących, generowanie sygnałów PWM, obsługa interfejsu 1-wire i odczyt temperatury, obsługa zbliżeniowych czujników odległości oraz prosty tryb autonomiczny. Obsługa licznika/czasomierza oraz interfejsu szeregowego USART odbywa się w przerwanach.

Aplikacja sterująca CyberRybą na poziomie komputera PC została napisana w języku C++ przy użyciu Microsoft Visual Studio 2008. Za pomocą aplikacji PC może sterować robotem w trzech trybach: manualnie – poprzez wciskanie klawiszy na klawiaturze komputera lub przycisków w oknie aplikacji, automatycznie – za pomocą algorytmu rozpoznawania położenia czerwonego okrągłego obiektu w obrazie video z kamery zamontowanej w robocie oraz przy wykorzystaniu telefonu komórkowego z oprogramowaniem Wireless Presenter i łączności Bluetooth. Sposób działania aplikacji i algorytmu rozpoznawania obrazu opisany jest bardziej szczegółowo w [2].

3. DOPOSAŻENIE SPRZĘTOWE CYBERRYBY

W celu zwiększenia możliwości wykonywania przez CyberRybę różnych zadań podwodnej inspekcji, należy doposażyć robota w kilka dodatkowych urządzeń i czujników. Jednym z koniecznych udoskonaleń jest zamontowanie na pokładzie CyberRyby systemu nawigacji podwodnej, którego zadaniem jest określenie pozycji robota pod wodą za pomocą współrzędnych kartezjańskich. Istnieje także możliwość określenia kątów Eulera pojazdu podwodnego (kurs, przechył, przegłębienie). Dla realizacji nawigacji podwodnej można zastosować system USBL (ang. Ultra Short Base Line), składający się z kierunkowej anteny zainstalowanej stacjonarnie, np. przy burcie zakotwiczonej jednostki pływającej oraz transpondera umieszczonego na pokładzie pojazdu podwodnego. Pozycja pojazdu podwodnego jest określona na podstawie pomiaru czasu i kierunku sygnału przesyłanego pomiędzy anteną a transponderem. Kolejnym urządzeniem zwiększającym możliwości systemu podwodnej nawigacji jest inercyjny system pomiaru przyspieszeń pojazdu podwodnego. Urządzenie takie posiada trzy akcelerometry umieszczone względem siebie w sposób umożliwiający pomiar przyspieszeń w trzech kierunkach kartezjańskiego układu współrzędnych. W celu określenia położenia podwodnego pojazdu, należy

zamontować system na pokładzie w taki sposób, alby osie akcelerometrów pokrywały się z osiami symetrii pojazdu. Wówczas scałkowanie wartości zmierzonych przyspieszeń, zwróci informację o składowych prędkości pojazdu wzdłuż osi symetrii. Z kolei scałkowanie sygnału prędkości, zwróci informację o przemieszczeniu pojazdu. Inercyjny system pomiarowy jest także często wyposażony w odbiornik GPS. Jeżeli sygnał GPS jest dostępny (na przykład w czasie wynurzenia pojazdu), wówczas jest on używany do korygowania błędów położenia pojazdu podwodnego.

Bardzo istotnym urządzeniem z punktu widzenia możliwości autonomicznej pracy robota z wykrywaniem i omijaniem przeszkód, jest zastosowanie czujników hydroakustycznych, odbierających sygnały akustyczne, emitowane przez większość obiektów podwodnych. Należy tutaj wymienić urządzenia aktywne, takie jak sonary oraz pasywne, takie jak hydrofony. W przeciwieństwie do hydrofonów, sonary emitują sygnał akustyczny, który po odbiciu od podwodnego obiektu lub przeszkody, wraca do odbiornika sonaru w postaci tak zwanego echa wykrytego obiektu. Dodatkowe czujniki, w jakie można wyposażać CyberRybę, mogą posłużyć do pomiaru zarówno parametrów środowiska wodnego (pH/O₂/temperatura/ciśnienie hydrostatyczne), jak również pomiaru zanieczyszczeń wody (pomiaru stężenia w wodzie substancji szkodliwych lub osadów).

W celu maksymalnego upodobnienia robota do żywej ryby należy także wykonać zewnętrzne pokrycie silikonowe imitujące naturalną skórę i kształt ryby, które dodatkowo zapewni szczelność konstrukcji na dużych głębokościach (Rys. 3).



Rys. 3. Pojazd podwodny z napędem falowym (Tai robot kun), zaprojektowany na Uniwersytecie w Kitakyushu (Japonia) - <http://xorsyst.com/japan/realistic-robotic-fish/>

4. IMPLEMENTACJA ALGORYTMÓW SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

CyberRyba wyposażona jest w zestaw baterii i miniaturową bezprzewodową kamerę, oraz proste algorytmy rozpoznawania obrazu, dzięki którym może pracować w sposób niezależny od operatora. W celu zwiększenia możliwości autonomicznej pracy robota, system sterowania należy wyposażać w dodatkowe, bardziej wyrafinowane algorytmy, zwiększające niezależność działania i inteligencję pojazdu w czasie wykonywania zadań podwodnych.

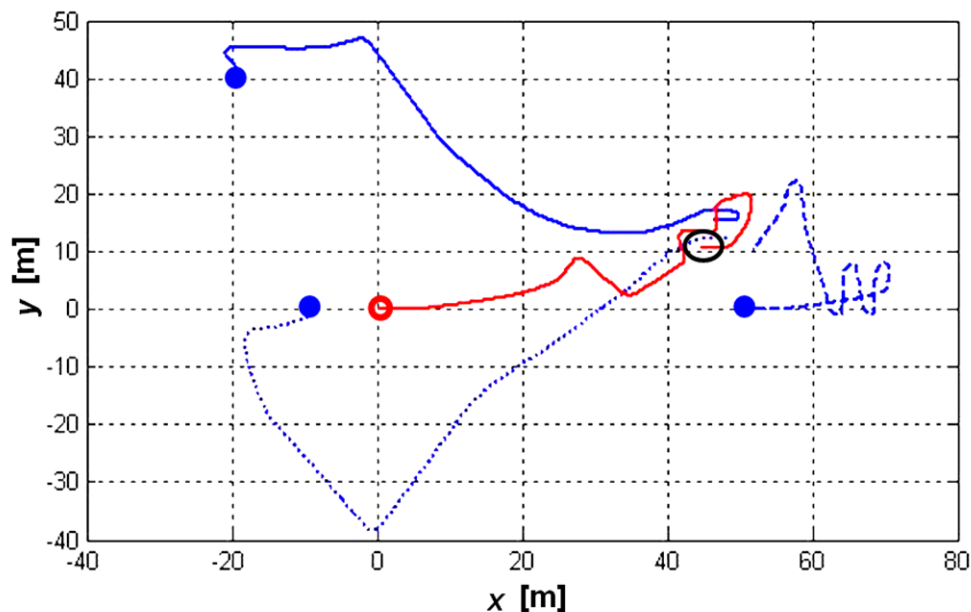
Bardzo istotnym etapem jest zaprojektowanie i implementacja w robocie

regulatorów wybranych parametrów ruchu CyberRyby, tj. prędkości postępowej, kursu, przegłębienia i głębokości zanurzenia. W tym celu można posłużyć się regulatorami działającymi w oparciu o metody logiki rozmytej (ang. fuzzy logic). Metody takie były z sukcesem testowane we wcześniejszych pracach badawczych, w których obiektem sterowania był pojazd podwodny z napędem klasycznym (w postaci systemu pędników ulokowanych w poziomej i pionowej płaszczyźnie) [7].

Zaprojektowane i zaimplementowane w robocie regulatory rozmyte powinny być następnie zintegrowane z układem sterowania nadrzędnego, co umożliwi poruszanie się po zadanej trajektorii z możliwością wykrywania i omijania przeszkód [4]. System taki powinien określić najlepszą trajektorię do zadanego celu misji lub do przeszukania określonego akwenu podwodnego. W celu określenia najlepszej trajektorii można wykorzystać algorytmy ewolucyjne [6].

Kolejnym istotnym algorytmem jest identyfikacja obiektów podwodnych na podstawie, np. sygnatur hydroakustycznych. Do realizacji algorytmu „swój-obcy” wykorzystać można odpowiednio skonstruowane i nauczone sztuczne sieci neuronowe [9].

W celu realizacji złożonych misji podwodnych, można zastosować kilka współpracujących ze sobą CyberRyb. Mogą one zostać użyte w celu schwytania innego obiektu podwodnego (problem Predator-Prey - Rys. 4) lub patrolowania zadanego obszaru. Współpracę robotów można zrealizować wykorzystując ideę systemów wieloagentowych wspomaganych metodami neuroewolucyjnymi. Prace w tej dziedzinie są aktualnie prowadzone w Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni [8].



Rys. 4. Trajektorie ruchu na płaszczyźnie xy dla trzech pojazdów podwodnych mających za zadanie schwycić pojazd uciekający (pojazdy łapiące: linia niebieska ciągła (nr 1), kropkowana (nr 2), kreskowana (nr 3); pojazd uciekający: linia czerwona ciągła)

WNIOSKI

Projekt i wdrożenie podwodnego robota mobilnego z napędem falowym (CyberRyby) ma kilka korzyści, głównie ze względu na upodobnienie robota do naturalnych mieszkańców środowiska wodnego. Dodatkowo, napęd zastosowany w takim robocie jest cichy, zaś sam pojazd odznacza się doskonałą zwrotnością.

Przewaga napędu falowego nad klasyczną śrubą napędową uwidacznia się w czasie pływania w szuwarach czy między podwodną roślinnością, która potencjalnie może spowodować unieruchomienie śruby napędowej.

W celu zwiększenia autonomiczności konstrukcji CyberRyby zarówno pod względem sprzętowym jak i programowym, konieczne są dalsze badania. Należy wyróżnić dwa kierunki dalszego rozwoju konstrukcji:

- 1) wyposażenie CyberRyby w urządzenia nawigacyjne, komunikacyjne i sterowania oraz sensory do monitoringu podwodnego,
- 2) implementacja algorytmów z dziedziny sztucznej inteligencji do sterowania robotem oraz rozpoznawania obiektów podwodnych.

Po wykonaniu niezbędnych poprawek i ulepszeń zaprezentowanych w niniejszej pracy oraz przeprowadzeniu wielorakich testów zarówno laboratoryjnych jak i testów w warunkach rzeczywistych, autonomiczny pojazd podwodny z napędem falowym, może wspomagać lub nawet w pewnych zadaniach zastąpić stosowane dotychczas rozwiązania z klasycznym napędem śrubowym, zarówno w zastosowaniach cywilnych jak i wojskowych.

LITERATURA

1. Baranowski R.; „Mikrokontrolery AVR ATmega w praktyce”, Wydawnictwo BTC, Warszawa 2005,
2. Malec M., inni; „Cyberryba – podwodny robot mobilny”, „Pomiary, Automatyka i Robotyka”, Nr 02/2010,
3. Malec M, Morawski M., Zajac J.; “Fish-like swimming prototype of mobile underwater robot”, “Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems”, Volume 4, No 3, 2010,
4. Małecki J., Szymak P.; “Control System of Underwater Vehicle Based on Artificial Intelligence Methods”, “Automation and Robotics”, I-Tech Education and Publishing, Vienna, pp. 285-296, 2008,
5. Poloch P; “Jak poruszają się ryby”, <http://www.pmp.p-net.pl/>, 2005,
6. Praczyk P, Szymak P.; „Solving Predator-Prey Problem in Assembler Encoding”, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling And Simulation, Istanbul, pp. 189-194, 2009,
7. 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, pp. 163-168, 2006,
8. Szymak P., Garus J.; “Conception of Multiagents System Using in Control of Cooperating Autonomous Underwater Vehicles”, Series 6 "Transport and Engineering. Transport. Aviation Transport", N27, Riga, pp. 263-268, 2008,
9. Żak A.; „Kohonen networks as hydroacoustic signatures classifier”, Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Neural Networks, Sofia, pp. 186-193, 2008.

Autorzy:

kmdr por. dr inż. Piotr Szymak

Adiunkt w Instytucie Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Zajmuje się badaniami naukowymi w obszarze automatyzacji ruchu obiektów morskich, w szczególności pojazdów podwodnych zarówno jako pojedynczych obiektów sterowania jak i zespołu obiektów współdziałających.

mgr inż. Marcin Malec

Doktorant Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki. Konstruktor CyberRyby – podwodnego robota mobilnego. Prowadzi prace nad wykorzystaniem napędów falowych w podwodnych robotach mobilnych.

mgr inż. Marcin Morawski

Doktorant Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki. Konstruktor CyberRyby, zainteresowania związane z adaptacją sposobu poruszania organizmów żywych na potrzeby robotów mobilnych.

