

mgr inż. Marcin Malec  
mgr inż. Marcin Morawski  
dr hab. inż. Jerzy Zając, Prof. PK  
Politechnika Krakowska

## **BIOMIMETYCZNE NAPĘDY PODWODNYCH ROBOTÓW MOBILNYCH W KONTEKŚCIE ROZWOJU CYBERRYBY**

*W artykule autorzy postanowili przedstawić pokrótce rozwiązania napędowe stosowane w klasycznych pojazdach typu ROV/AUV jak również biomimetyczne rozwiązania konstrukcyjne w dziedzinie napędów podwodnych robotów mobilnych. Szczegółowo omówiono problematykę naśladowania sposobu poruszania się ryb okoniokształtnych. Na koniec przedstawiono kierunki możliwego rozwoju CyberRyby jako autonomicznego podwodnego robota mobilnego.*

### **BIOMIMETIC DRIVES OF UNDERWATER MOBILE ROBOTS IN CONTEXT OF DEVELOPMENT OF THE CYBERFISH**

*In this paper authors decided to present shortly drives used in classic ROV/AUV as well as biomimetic drives in the field of underwater mobile robots. The way carangiform fish moves was described in details. In the end, directions of development of CyberFish as an autonomous mobile robot has been presented.*

## **1. WPROWADZENIE**

W dziedzinie podwodnych robotów mobilnych niekwestionowany prym wiodą pojazdy typu ROV (ang. *Remotely Operated Vehicle*) oraz AUV (ang. *Autonomous Underwater Vehicle*) zwane tak że UUV (ang. *Unmanned Underwater Vehicle*), niemniej jednak coraz częściej pojawiają się konstrukcje biomimetyczne wzorowane na różnego rodzaju zwierzętach wodnych. Technologia ROV, której początki sięgają lat '50 XX wieku, została doskonale dopracowana i jest z powodzeniem stosowana we wszelkiego rodzaju operacjach podwodnych [9]. Ograniczenia ilości tych robotów, wynikające z uwagi w postaci kabloliny, skłaniają inżynierów i naukowców do rozwoju pojazdów typu AUV(UUV), których zaawansowane systemy sterowania i pozycjonowania umożliwiają realizację różnorodnych zadań, zarówno militarnych jak i cywilnych [11]. Rozwój bioniki zawdzięcza wyodrębnieniem nurtu w konstrukcji podwodnych robotów mobilnych, którego główną ideą jest naśladowanie zwierząt wodnych. Najczęściej pierwowzorem pojazdu jest kształt i sposób poruszania się różnego rodzaju ryb, choć istnieją także konstrukcje wzorowane na płaszczkach, mantach, pingwinach, meduzach i innych. W każdym przypadku konieczna jest jednak dokładna analiza ruchu zwierzęcia oraz opracowanie właściwego uproszczonego modelu matematycznego, który zostanie następnie wykorzystany do sterowania biomimetycznym robotem mobilnym.

## **2. KLASYCZNE NAPĘDY POJAZDÓW PODWODNYCH**

Zasadniczą rolę w systemie napędowym pojazdów typu ROV i AUV spełniają pędniki umieszczone w odpowiednich miejscach pojazdu podwodnego. Dużą rolę odgrywa w tym przypadku kształt korpusu takiego robota. Należy wyodrębnić dwa główne typy pojazdów: o kształcie zbliżonym do prostopadłościanu oraz o kształcie cylindrycznym. Znacząca

większość pojazdów typu ROV posiada prostopadłościenną ramę, do której mocowane są elementy wyposażenia robota, podczas gdy pojazdy AUV budowane są najczęściej w postaci przypominającej torpedy [1]. Rys. 1 ilustruje przykład obu wymienionych powyżej typów.

Pojazdy ROV posiadają najczęściej od trzech do ośmiu pędników umieszczonych w płaszczyźnie poziomej oraz jeden lub dwa pędniki usytuowane w płaszczyźnie pionowej. Napędy poziome realizują ruch wzdłużny (wzdłuż osi X) i poprzeczny (wzdłuż osi Y) pojazdu jak również umożliwiają obrót robota wokół jego osi pionowej (osi Z), przez odpowiednią zmianę prędkości obrotowej poszczególnych pędników. Napędy umieszczone pionowo odpowiadają za zanurzenie i wynurzenie pojazdu jak również w pewnym stopniu pozwalają na realizację przegłębienia (obróty wokół osi Y) [8]. Inne rozwiązanie stosowane jest w pojazdach typu AUV, w których napęd w postaci od jednego do czterech pędników usytuowany jest na rufie pojazdu oraz jeden pędnik umieszczony w środku ciężkości robota, działający w osi pionowej i realizujący zmianę głębokości zanurzenia. Pędniki rufowe wraz z dodatkowymi sterami, umożliwiają ruch wzdłużny pojazdu, zmianę kursu i przegłębienia.

Do niewątpliwych zalet napędu pojazdów typu ROV należy zaliczyć możliwość poruszania się w kierunkach osi kartezjańskiego układu współrzędnych związanego z robotem, z jednakową bądź zbliżoną prędkością. Dodatkowo istnieje łatwa i szybka możliwość zmiany orientacji takiego robota przez zmianę prędkości obrotowej odpowiednich pędników. Wadą jest konieczność zastosowania kabloliny w celu zasilania pojazdu i przesyłania sygnałów, co w pewnym stopniu ogranicza mobilność oraz zasięg robota. Gabaryty ROV oraz zastosowanie kabloliny, powodują duży opór hydrokinetyczny robota, w związku z czym jego maksymalna prędkość postępową jest stosunkowo mała i wynosi ok. 3 węzły (1,5 m/s) [10].



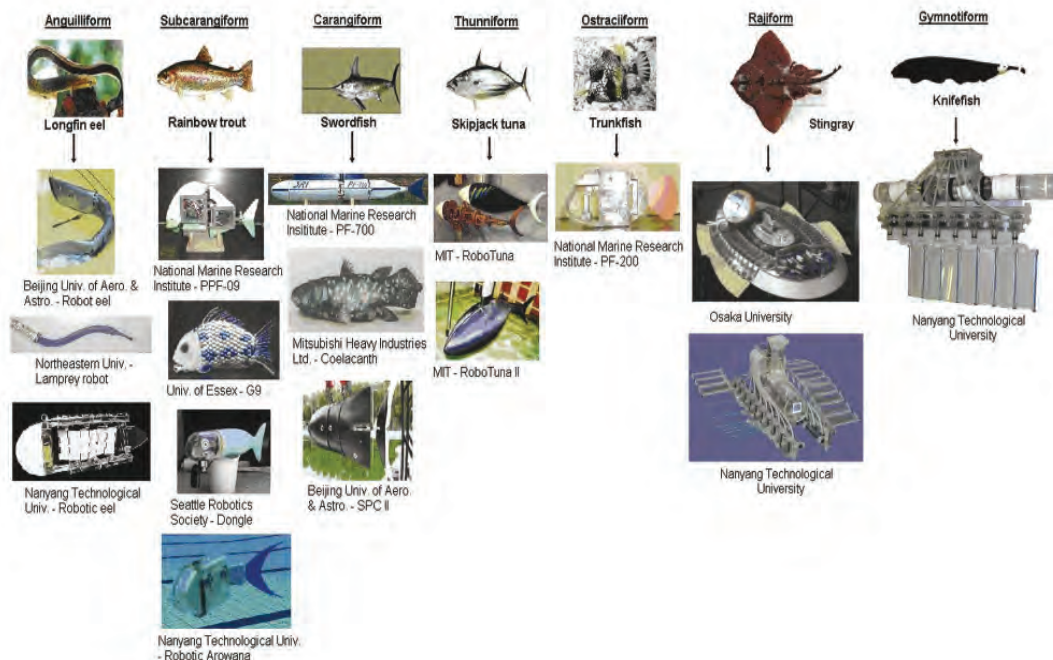
Rys. 1. Podwodne roboty mobilne:  
 a) ROV SEA EYE COUGAR-XT firmy SAAB [10],  
 b) AUV HUGIN 1000 MR firmy Kongsberg Maritime [1]

Pojazdy typu AUV charakteryzują się natomiast znacznie większą maksymalną prędkością postępową (ok. 6 węzłów – 3 m/s) [11], jednak efektywny ruch możliwy jest jedynie w kierunku wzdłużnym do głównej osi symetrii robota. Zmianę kursu i przegłębienia realizuje zmiana naporu pędników i/lub zmiana ustawień sterów rufowych. Wzrost kształt AUV oraz wyeliminowanie kabloliny, znacznie zmniejszają opór hydrokinetyczny oraz zasięg robota. Wymagają natomiast zastosowania akumulatorów oraz autonomicznego systemu sterowania.

Należy pamiętać, że moc potrzebna do zasilania pojazdu podwodnego jest w przybliżeniu proporcjonalna do sześciangu prędkości, zatem potrzeba osiągnięcia dużych prędkości wymaga zastosowania wydajnego źródła zasilania – np. układ pakietu akumulatorów o dużej pojemności i gęstości energii dla pojazdów AUV, oraz ograniczenie oporu hydrokinetycznego korpusu robota.

### 3. NAPĘDY BIOMIMETYCZNE W PODWODNYCH ROBOTACH MOBILNYCH

Dobrze znany fakt większej efektywności napędu falowego ryb niż napędu za pomocą śruby czy pędnika przy zużyciu tej samej ilości energii, skłania naukowców i inżynierów do badania sposobów poruszania się zwierząt wodnych oraz implementacji otrzymanych wyników badań w prototypach pojazdów podwodnych. Różnorodność fauny morskiej sprawia, iż powstaje coraz więcej oryginalnych konstrukcji podwodnych robotów mobilnych opartych na sposobie poruszania się wybranych gatunków zwierząt morskich. Niekwestionowany prym wiodą oczywiście pojazdy przypominające ryby. W pracy [2] H. K. Low dokonał klasyfikacji istniejących podwodnych robotów mobilnych ze względu na sposób poruszania się różnych gatunków ryb, przypisując je do siedmiu kategorii: węgorzowate (*anguiliform*), łososiokształtne (*subcarangiform*), okoniokształtne (*carangiform*), tuńczykowate (*tunifform*), rozdymkookształtne (*ostraciform*), rajokształtne (*rajiform*), strętowokształtne (*gymnotiform*). Kategorie ryb oraz odpowiadające im konstrukcje robotów ilustruje Rys. 2. Największą grupę reprezentują roboty typu: *subcarangiform* i *carangiform*, które pod względem konstrukcyjnym są do siebie zbliżone i naśladują ryby z rodziny okoniokształtnych lub łososiokształtnych. Niemniej jednak ciekawe rozwinięcia reprezentują także sztuczne węgorze, płaszczki i robot naśladujący rybę-nóż (Ducha Brazylijskiego).



Rys. 2. Różnorodne konstrukcje biomimetycznych podwodnych robotów mobilnych [2]

Przedstawione na Rys. 2 roboty charakteryzuje ponadto przynależność do dwóch grup różniących się sposobem realizacji napędu: BCF (ang. *Body and/or Caudal Fin*) oraz MPF (ang. *Median and/or Paired Fin*), ściśle związany ze sposobem poruszania się gatunków ryb, które naśladują. Roboty z napędem typu BCF zbudowane są z kilku członów

połączonych szeregowo obrotowymi parami i kinematycznymi. Każdy z członów oscylujący z odpowiednią amplitudą i częstotliwością, wprawia w ruch drgający cały korpus lub końcową część korpusu robota z płetwą ogonową, stanowiąc tym samym główny napęd. Pojazdy z napędem typu MPF natomiast generują siłę napędową za pomocą falujących powierzchni pionowych lub poziomych imitujących płetwy. Zmiana geometrii tych powierzchni realizowana jest przez odpowiednie wychylenia sztywnych prętów stanowiących promienie płetwy. Położenie promieni sterowane jest za pośrednictwem mechanizmu korbowego, dźwigniowego lub krzywkowego przez zespół serwomechanizmów ustawionych szeregowo, z których każdy napędza jeden promień płetwy. Odpowiednia synchronizacja wychyleń poszczególnych serwomechanizmów skutkuje falowaniem płetwy w sposób sinusoidalny.

Ze względu na ograniczony zakres niniejszej pracy oraz rozważania konstrukcyjne ukierunkowane na rozwój CyberRyby, autorzy omawiają w dalszej części jedynie okoniokształtny typ napędu (*carangiform* lub *subcarangiform*) podwodnych robotów mobilnych.

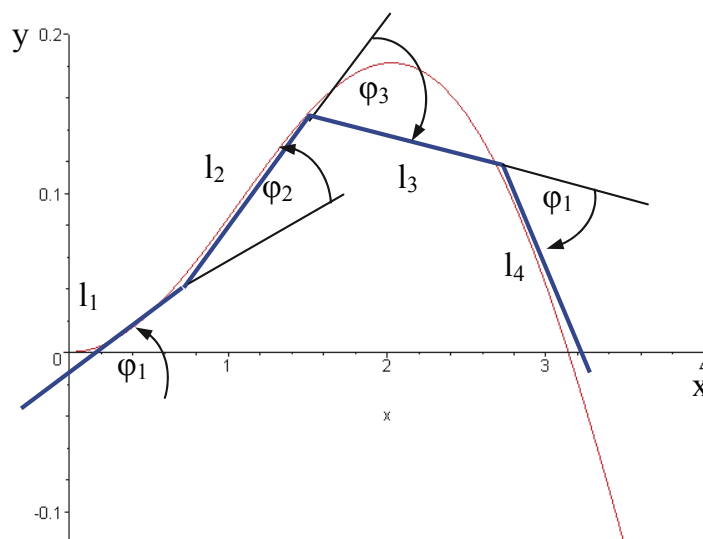
#### 4. NAPĘD ROBOTA MOBILNEGO TYPU BCF

Ryby okoniokształtne poruszają się, wprawiając w ruch drgający tylną część ciała i płetwę ogonową, w wyniku czego generują siłę napędową. W pracy [5] Junzhi Yu i inni przedstawiają uproszczony model matematyczny ruchu ryb z rodzaju okoniokształtnych. Kształt ciała ryby w czasie wykonywania takiego ruchu można opisać w sposób przybliżony za pomocą funkcji (1)

$$y(x, t) = (c_1 x + c_2 x^2) \sin(kx + \omega t) \quad (1)$$

gdzie:  $y$  to przemieszczenie poprzeczne ciała ryby,  $x$  – przemieszczenie wzdłużne ciała ryby,  $c_1$  i  $c_2$  – odpowiednio liniowy i kwadratowy współczynnik obwiedni fali,  $k$  – liczba fali ciała ryby ( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – długość fali ciała ryby),  $\omega$  – pulsacja ( $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ ),  $f$  – częstotliwość oscylacji,  $T = 1/f$  – okres oscylacji.

Współczynniki  $\{c_1, c_2, k, \omega\}$  są różne dla różnych gatunków ryb okoniokształtnych. Ich wyznaczenie oraz optymalizacja stanowi duży problem. Z pomocą przychodzi często algorytmy genetyczne, których zadaniem jest wyznaczenie optymalnych parametrów kinematycznych biorąc pod uwagę efektywność pływania robota.



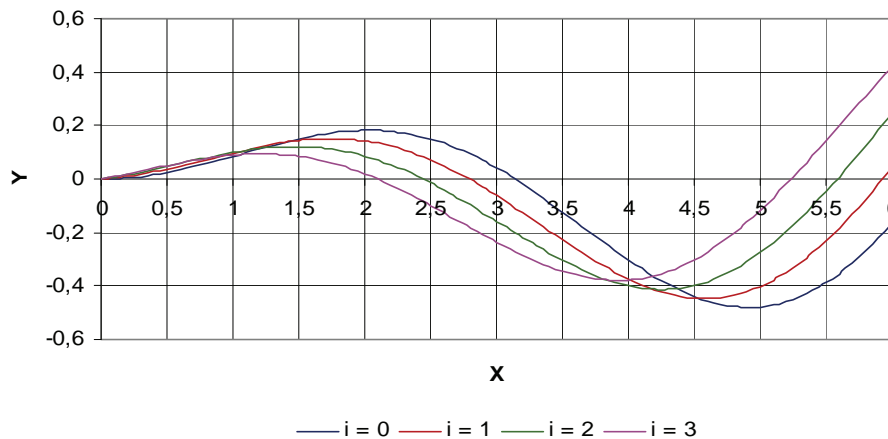
Rys. 3 Wykres fali ruchu ryb okoniokształtnych z dopasowanym łańcuchem członów mechanizmu napędowego robota

Wykres krzywej opisanej równaniem (1) wraz z dopasowanym i sztywnymi członami mechanizmu napędowego robota-ryby, przedstawiono na Rys. 3.

W celu uproszczenia zależności (1) należy usunąć czas  $t$ , co prowadzi do równania (2)

$$y(x, i) = (c_1x + c_2x^2) \sin(kx + \frac{2\pi}{M}i) \quad (2)$$

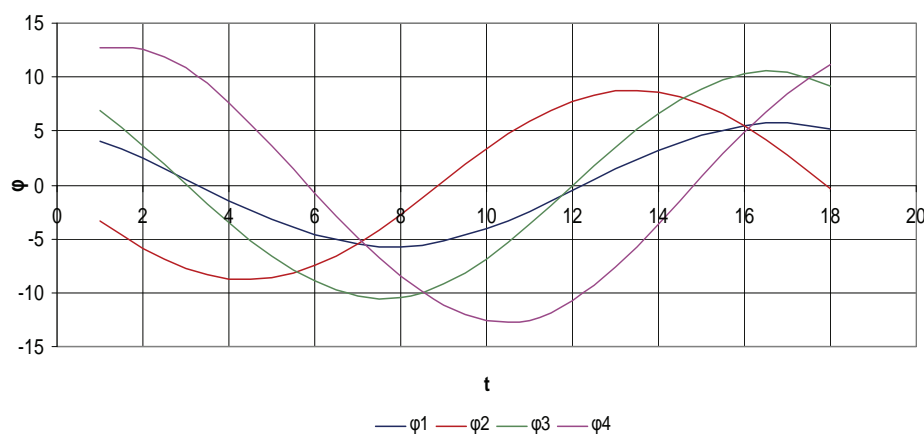
gdzie:  $i = 0, 1, 2, \dots, M-1$  – jest zmienną określającą kolejne dyskretne położenia fali w czasie całej sekwencji ruchów, zaś  $M$  oznacza rozdzielczość sekwencji ruchów i reprezentuje liczbę wszystkich dyskretnych położeń fali w czasie całej sekwencji ruchów. Na rys. 4 przedstawiono wykres funkcji (2) dla czterech kolejnych położeń fali ( $i = 0, 1, 2, 3$ ).



Rys. 4. Wykres kolejnych położeń fali w zależności od wartości zmiennej  $i$

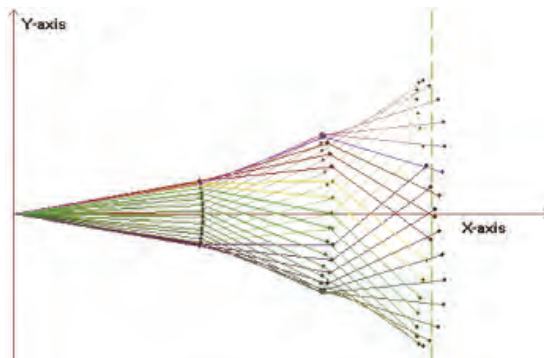
Model ogona ryby jako połączenie szeregu we  $N$  sztywnych członów, należy następnie dopasować do krzywej (2) w kolejnych etapach ruchu. Istotne jest obliczenie wartości kątów wychyleń poszczególnych członów  $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$  dla całej sekwencji ruchu. W konsekwencji otrzymuje się macierz o wymiarach  $M \times N$ . Obliczone kąty wychyleń członów oraz częstotliwość oscylacji, stanowią parametry ruchu robota-ryby.

W pracy [5] przedstawiono macierz kątów wychyleń poszczególnych członów ogona, obliczonych dla czterech segmentów o równej długości. Analiza otrzymanych danych ujawnia fakt, że zmiana wartości kąta dla każdego członu następuje w sposób sinusoidalny o tej samej częstotliwości lecz z różną amplitudą i przesunięciem fazowym (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** 5).



Rys. 5. Wykres zmiany kątów wychyleń czterech członów ogona

W literaturze [4] można znaleźć symulację ruchu mechanizmu złożonego z trzech szeregowo połączonych sztywnych członów, w oparciu o równanie (2). Rys. 6 przedstawia graficznie wynik tej symulacji ilustrując sekwencję ruchów ogona robota-ryby.



Rys. 6. Sekwencja kolejnych położeń mechanizmu ogona 4

W oparciu o przedstawiony powyżej, uproszczony model matematyczny powstał biomimetyczny podwodny robot mobilny (Rys. 7a) o czterech, szeregowo połączonych członach ogona wraz z elastyczną płetwą ogonową oraz płetwami bocznymi o regulowanym kącie nachylenia w celu realizacji zmiany głębokości. Pełny opis konstrukcji można znaleźć w literaturze [4, 5, 6]. Rys. 7b ilustruje natomiast Robo-karpia, którego główny mechanizm napędowy składa się z trzech członów i również wykazuje matematyczny przedstawiony powyżej.



Rys. 7. Przykłady Biomimetycznych robotów mobilnych typu BCF:

- a) Robot fish skonstruowany przez chińskich naukowców [6]
- b) Robo-Carp zbudowany na Uniwersytecie w Essex [3]

Wykonywanie skrętoń przez roboty-ryby powinno również odzwierciedlać zachowanie ich żywych odpowiedników. Należy tutaj rozróżnić dwa sposoby [3]: wykonywanie skrętoń w czasie płynięcia na wprost (*cruise-in-turning*) oraz gwałtowny skrętoń z pozycji stacjonarnej (*sharp-turn*). Pierwszy z wymienionych sposobów polega na wygięciu głównej osi ciała ryby z zachowaniem oscylacyjnego ruchu poszczególnych sekcji ogona. Wówczas trajektoria ruchu ryby jest łukiem gładkim. Praktyczna realizacja takiego rodzaju skrętoń w robocie polega na zmianie punktu środkowego oscylacji poszczególnych członów. Drugi typ skrętoń jest o wiele bardziej złożony pod względem opisu matematycznego jednak umożliwia uzyskanie większego kąta i prędkości kątowej w czasie skrętoń. Brak jednoznacznie określonego modelu matematycznego dla gwałtownego skrętoń, uniemożliwia takżę opracowanie systemu

dokładnej kontroli takiego manewru. W praktyce, realizacja tego typu ruchu sprowadza się do gwałtownego wychylenia wszystkich członów ogona robota w jednym kierunku, a następnie z małą prędkością wyprostowaniu kolejnych członów począwszy od pierwszego.

W celu realizacji zmiany głębokości przedstawione powyżej konstrukcje robotów wykorzystują zmianę kąta nachylenia płetw bocznych i/lub zamontowany wewnętrzny zbiornik balastowy pełniący funkcje sztucznego pęcherza pławnego. Najlepszym rozwiązaniem wydaje się być połączenie tych dwóch sposobów regulacji głębokości pływania. Praca L. Zhang i innych [6] dowodzi jednak, że opracowanie efektywnego układu regulacji głębokości zanurzenia biodynamicznego robota podwodnego nie jest zadaniem prostym. Zhang i inni zaproponowali system zmiany kąta nachylenia płetw bocznych wykorzystujący regulator typu fuzzy. Jako element sprzężenia zwrotnego realizujący pomiar głębokości zastosowano czujnik ciśnienia. Głównym problemem w tym przypadku było występowanie niepewności pomiaru głębokości spowodowanej zawirowaniami wody w wyniku ruchu falowego robota oraz zastosowanie taniego czujnika ciśnienia o zbyt małej dokładności pomiaru. Niemniej jednak zastosowanie regulatora typu fuzzy umożliwiło robotowi osiągnięcie zadanej głębokości z dopuszczalnym błędem.

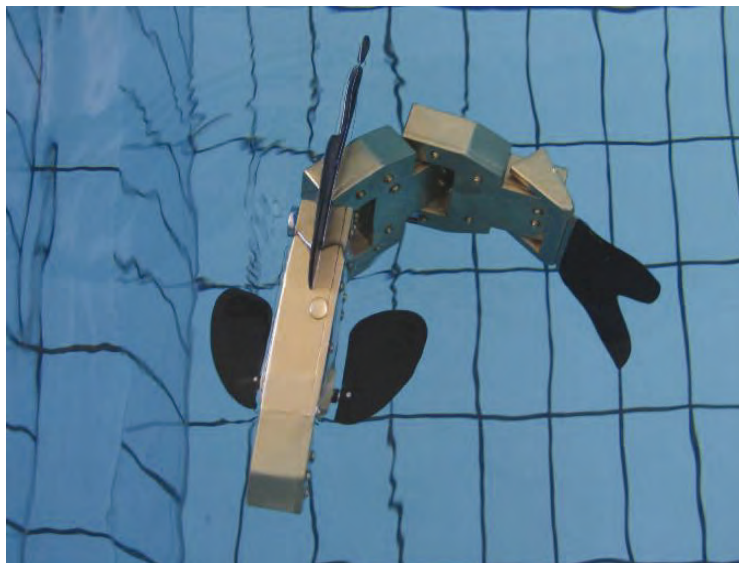
## 5. ROZWÓJ CYBERRYBY

Projekt CyberRyba jako praca magisterska realizowany był przy ograniczonym budżecie i nie uwzględniał modyfikacji matematycznego ruchu ryb a jedynie spostrzeżenia i eksperymentalną wiedzę wynikającą z obserwacji zachowania karpia. Zaprojektowany przez autorów robot [7], należy zaklasyfikować jako jednostkę z napędem typu BCF, czyli naśladującą ryby z rzędu okoniokształtnych. W dalszych pracach rozwojowych CyberRyby został uwzględniony model matematyczny ruchu głównego opisany w rozdziale 4 oraz został opracowany bardziej efektywny sposób zmiany głębokości pływania uwzględniający: zmianę kąta nachylenia płetw bocznych, wykorzystanie zbiornika balastowego oraz mechanizm zmiany położenia środka ciężkości robota w celu realizacji obrotu wokół osi poprzecznej do głównej osi CyberRyby. Przewiduje się, że sposób pływania takiej konstrukcji będzie musiał uwzględniać także realizację zmiany kursu za pomocą dwóch trybów: płynięcia po łuku oraz gwałtownego skrętu. Docelowy robot będzie zbudowany z czterech szeregowo połączonych członów, zaś kształt zewnętrzny całej konstrukcji korpusu będzie maksymalnie zbliżony do kształtu karpia. Planuje się zaprojektować opływowy, hydrodynamiczny kształt poszczególnych członów, a następnie wykonać je jedną z metod Rapid Prototyping.

System sterowania nowej wersji CyberRyby będzie (tak jak poprzednio) składać się z dwóch podsystemów: podrzędnego, umieszczonego wewnątrz robota układu sterującego oraz nadrzędnego, w postaci zewnętrznego komputera z odpowiednim oprogramowaniem, generującego zasadnicze polecenia dla układu podrzędnego. Jako element pomiarowy parametrów ruchu, wykorzystany w pętli sprzężenia zwrotnego układu sterującego ruchem robota, planuje się wykorzystać inercjalny system pozycjonowania wyposażony w trzy żyroskopy, trzy akcelerometry oraz magnetometr. Odpowiednie umieszczenie inercjalnego układu pomiarowego wewnątrz robota, umożliwi pomiar przyspieszeń w trzech osiach lokalnego kartezjańskiego układu współrzędnych oraz obrotów i prędkości obrotowych wokół tych osi. Dodatkowo do określenia głębokości zanurzenia wykorzystany zostanie czujnik ciśnienia, jednak dane uzyskane w ten sposób będą korygowane za pomocą informacji odebranych z systemu inercjalnego. Istotne jest także umieszczenie wewnątrz robota czujników odległości wykorzystanych do detekcji ewentualnych przeszkód i procesu planowania trajektorii ruchu.

Tak zbudowany podwodny robot mobilny pozwoli następnie do przeprowadzenia badań efektywności napędu biomimetycznego w porażdździe podwodnym, przy wykorzystaniu różnych algorytmów sterujących. Planuje się tak że opracowanie autonomicznego trybu poruszania się robota z planowaniem trajektorii ruchu i unikaniem kolizji z przeszkodami.

Wykorzystując model matematyczny przedstawiony w rozdziale 4, autorzy zbudowali kolejny prototyp CyberRyby o lżejszej i bardziej zwartej konstrukcji. Powstał on w celu przetestowania wpływu wymuszeń sinusoidalnych wychyleń poszczególnych członów na sposób i prędkość pływania robota. Podobnie jak oryginalna wersja CyberRyby, nowa konstrukcja tak że zbudowana jest z czterech członów (głowa i trzy człony ogona). Kąt wychyleń poszczególnych członów zmieniają się w sposób sinusoidalny z jednakową częstotliwością, jednak z różną amplitudą i przesunięciem fazowym. W celu zmiany głębokości pływania, zamontowano wewnątrz robota zbiornik balastowy napełniany wodą za pomocą pompki zębatej, oraz zmianę kąta nachylenia płetw bocznych. W nowej wersji CyberRyby zastosowano tak że dwa sposoby zmiany kierunku pływania przedstawione w rozdziale 4, mianowicie pływanie po łuku oraz gwałtowny skręt. Prototyp sterowany jest za pomocą profesjonalnej aparatury radiowej działającej na częstotliwości 35 MHz. Wygląd robota przedstawiono na zdjęciu (Fot. 1).



Fot. 1. Prototyp drugiej wersji CyberRyby

Nowy prototyp CyberRyby przetestowano na basenie sportowym o długości 25 m i maksymalnej głębokości 2 m. Przy maksymalnej zaprogramowanej częstotliwości oscylacji ogona wynoszącej 1,3 Hz, zmierzono średnią prędkość na odcinku 20 m, wynoszącą ok. 0,2 m/s. CyberRyba zdolna byłaby tak że do efektywnego nurkowania do głębokości 1,5 m i ponownego wynurzenia. Zespół autorów będzie dalej kontynuował prace nad rozwojem CyberRyby z uwzględnieniem kierunków opisanych powyżej.

## 6. PODSUMOWANIE

Klasyczny napęd pojazdów podwodnych w postaci pędnika, mimo iż bardzo rozpowszechniony w konstrukcjach ROV i AUV, posiada szereg wad, z których kluczową rolę odgrywa niska sprawność. Chęć skonstruowania pojazdu AUV moźliwie najefektywniej poruszającego się w środowisku wodnym oraz minimalnie oddziałującego na faunę i florę wodną, zaowocowała pracami nad rozwojem biomimetycznych napędów podwodnych



robotów mobilnych. Wiele ośrodków naukowych na całym świecie prowadzi badania w tej dziedzinie w wyniku czego powstało dużo innowacyjnych konstrukcji. W rozwiązaniach technicznych dominują roboty wykorzystujące oscylacyjny ruch korpusu, naśladujące ryby z rodziny okoniokształtnych, łososiokształtnych lub tuńczykowatych. Istnieje także grupa pojazdów napędzana falowym ruchem pływających zachowanie płaszczyki, mąty, Ducha Brazylijskiego lub kalmara. Niemniej jednak wszystkie te rozwiązania dalekie są od niedoścignionych pierwowzorów przemierzających z gracją głębiny mórz, rzek, jezior. Wynika to z faktu, że ruch organizmów wodnych wciąż nie jest dokładnie poznany i opisany za pomocą narzędzi matematycznych. Jednym z uproszczonych modeli (przedstawionym w niniejszej pracy) jest wykorzystanie równania fali biegnącej o rosnącej amplitudzie. W dalszym ciągu brak w literaturze dokładnego opisu bardziej złożonych zjawisk hydrodynamicznych zachodzących wokół poruszających się ryby. Wyniosek jest oczywisty. W dziedzinie biomimetycznych napędów pojazdów podwodnych jest jeszcze dużo do zrobienia. Poczawszy od opracowania odpowiednich modeli matematycznych ruchu ryb, skończywszy na algorytmach sterujących umozliwiających robotom pracę w pełni autonomiczną. Nie można jednak wykluczyć, że w niedległej przyszłości powstanie robot, który drastycznie zmieni sposób poruszania się pojazdów podwodnych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Autonomous Undersea Vehicle Applications Center, <http://auvac.org/>, Listopad 2010.
2. H. K. Low, *Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots*, Mechanism and Machine Theory, Elsevier Ltd. 2008, p. 615–632.
3. H. Hu, J. Liu, I. Dukes, G. Francis, *Design of 3D Swim Patterns for Autonomous Robotic Fish*, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing 2006.
4. J. Shao, L. Wang, J. Yu, *Development of an artificial fish-like robot and its application in cooperative transportation*, Control Engineering Practice No. 16, 2008, p. 569–584.
5. J. Yu, S. Wang, M. Tan, *Design of a Free-swimming Biomimetic Robot Fish*, Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003, p. 95–100.
6. L. Zhang, W. Zhao, Y. Hu, D. Zhang, L. Wang, *Development and Depth Control of Biomimetic Robotic Fish*, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego 2007.
7. M. Malec, M. Morawski, D. Wojtas, J. Zajac, *CyberRyba – podwodny robot mobilny*, Pomiar Automatyka Robotyka, nr 2/2010, s. 331–340.
8. P. Szymak, *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, p. 163–168,
9. Remotely Operated Vehicles Committee of the Marine Technology Society, <http://www.rov.org/>, Listopad 2010.
10. Roper Resources Ltd., <http://www.ropresources.com/>, Listopad 2010.
11. R. W. Button, J. Kamph, T. B. Curtin, J. Dryden, *A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles*, RAND National Defense Research Institute, 2009.