多様な遊泳機能を持つ魚型ロボットの開発

正員 市来崎 哲雄*

正員 山本 郁夫**

Development of Robotic Fish with Various Swimming Functions

by Tetsuo Ichikizaki, Member Ikuo Yamamoto, Member

Summary

The authors developed a robotic fish that swim with fins that apply flexible oscillating fin technology. The Carp Robot, whose artificial appearance was created through three-dimensional CAD processing of numerical data for the outer shape of living carp sampled through three-dimensional laser digitizing. Although this robotic fish was developed for the amusement field, it is thought to contain key technologies for the development of work robots in the future. For example, "mechatronics" technology involving center-of-gravity shifts, FM radio wave technology for navigation, CCD image data transfer technology for observation, and other technologies were applied to the robotic fish. In this report this robotic fish will be used as examples to explain these development achievements.

1. 緒 言

日本は周囲を海でかこまれた海洋国家であり、貿易、漁業など経済、市民生活は海と深いかかわりを持っている。このような環境を背景に海洋生態系調査なども活発に行われており、調査には水中ロボットが使われる機会も多くなってきている。水中ロボットの大半は推進方式にスクリューを採用しており性能、信頼性の面でも豊富な実績を誇っている。筆者らはこれまでに弾性振動翼技術^{1), 2), 3)}を適用したひれで遊泳する数種類の魚型ロボットの開発を手がけてきている。これまでの経験から、弾性振動翼技術を適用したひれを持つ潜在的な能力の高さや環境や海洋生物に対してやさしいという優れた特性などから、推進方式に弾性振動翼技術を適用したひれを持つ魚型作業ロボットの将来性に注目をしている。しかし一方で魚型ロボットを開発する上での課題として、魚型ロボットに活きた魚の外観をリアルに反映させるための肝要な開発ツールとしての実体形状再現手法、すなわち形状データの採取および魚型ロボットの外形を形づくる外皮シェルの製作手法についての系統だった取組みがほとんどなされていない点が指摘できる。そこで本報ではデジタ

ル加工をキーとする魚型ロボット開発の基本手法を提案し、鯉ロボットの開発に適用したのでその結果を報告する。

2. 開 発 の 基 本 手 法

アミューズメント分野を中心にこれまで魚型ロボットの開発を手がけてきているが、開発に要した時間と費用を最小にすることが開発の成否を決める重要な評価基準であるこ

* MHI ソリューションテクノロジーズ株式会社
**北九州市立大学

原稿受理 平成 18 年 11 月 22 日

Fig. 1 Basic Steps of Development

とは魚型ロボットの開発においても変えることは無い。これまで実施した開発でも基本コンセプト策定の段階まで工程を戻すことはほとんど無かったが、後半の製作工程では迅速さを欠き期間遅延、費用超過を招いたケースがあった。これらの経験から図1に示す魚型ロボット開発の基本手法を提案する。図中、左側に開発工程を、右側には開発ツールを示している。基本仕様策定から要素模型試験までの前半の工程では「手戻りが無い」ことが肝要である。魚型ロボットは水中に浮かすために比重を水（あるいは海水）に合わせ、水中で水平姿勢をとるために重心・浮力心の位置を調整するなど複数のパラメータをバランスさせる必要があり、机上検討のみで計画を進めようとする結果的に長い時間を要する。そこでまず運動モデル、シミュレーションなどの開発ツール⁴⁾でアクチュエータの設置位置・動力容量、操縦・通信機能についての大きな数値見通しを立て、次に実績のない機能要素については要素模型試験で動作確認を実施し、その結果をもとに3D-CAD画面上でアクチュエータの設置位置の調整、小型・軽量化を行なう工程で開発を進めることが有効である。基本計画から製作、検証試験実施までの後半の工程では「迅速・フレキシブル」に開発を進めるのが肝要である。この工程で有用な開発ツールは3つある。1つ目は外形形状計測ツールであり、ポータブル・非接触式の3次元レーザデジタイザ、3次元オブティカルデジタイザ、定置・接触式の3次元プローブ式デジタイザなどがある。^{5),6)} 2つ目はCAM (Computer Aided Manufacturing) である。ラピッドプロトタイプニングやNC機械加工などにCAMデータをインプットすることで部品を迅速・フレキシブルに加工することができる。CAMは単品でも低コストで製作することができることが特徴であり、魚型ロボットの開発では外皮シェルの製作に威力を発揮する。3つ目は3D-CAD (Computer Aided Design) である。外形形状計測ツールで採取したSTLデータ (Stereo Lithography) を3D-CAD画面上でデジタル処理し、活きた魚の外観をリアルに反映させた外皮シェルを加工するためのCAMデータを作成する。また外皮シェル以外の本体構成部品についても3D-CADで図面作成することで重心、浮力心の位置を良好な精度で求めることが可能であり、魚型ロボットの水中姿勢調整などの工程を大幅に短縮することができる。この開発の基本手法に沿って鯉をモデルにした魚型ロボットの開発を実施したので、デジタル加工を適用した外皮シェル製作工程を中心にその結果を報告する。

3. 開発仕様

鯉ロボットの開発仕様を表1に示す。外観は鯉をモデルにして製作した。サイズは、体長900mm、直径180mmで、体重

Table 1 Specifications of the Carp Robot

Subject	Specifications
Dimensions	L:900mm D:180 mm
Weight	Max. 12kg
Power source	Ni-H battery
Operating time	Min. 60 min
Swimming speed	Max. 1.5km/h
Swimming function	Turn (min. radius : 1.0m) ① Bending joint*
	Hovering, Backward ② Pectoral fin*
	Treading water ③ Balance weight*
Visual sensing & Transmitting	CCD-Camera & FM radio waves ④ Transmitting images to the ground surface*
Navigation	Wireless radio control

* Items of Elemental model testing

は12kg以下に抑える計画にした。動力源にニッケル水素電池を使用し1回の充電で60分間の遊泳が可能で、直線の遊泳速度を最高1.5km/hとした。最小旋回半径を1mとし腰の関節を曲げる機構を組込んだ。尾ひれと胸ひれはサーボモータ駆動の弾性振動翼とし、このひれを組合せて操縦することでホバリング、後退泳ぎ、立ち泳ぎなどの多様な遊泳機能を実現することにした。魚体の先端部に組込んだCCDカメラで水中の様子を撮影し、映像データを地上に伝送する機能を持たせ、操縦はラジコン無線で行うことにした。

4. 開発結果

4.1 鯉ロボットの外観

鯉ロボットの外観を図2に示す。活きた鯉から採取したSTLデータをもとにロボットらしい人工的な外観に仕上げた。鯉ロボットの外皮シェルには白色の塗装を施し、カラーシートを貼り付けてスポット状の模様をつけた。目と口にLEDライトを組込んでいる。

4.2 要素模型試験

鯉ロボットの遊泳機能(表1:①～③)と水中映像モニタリング(表1:④)はこれまでに実績のない技術であるため図3に示す要素模型試験機を事前に製作して、遊泳試験により個々の機能を確認した。旋回については、腰部に設けた関節の曲角度を25度以上にすることで旋回半径を1m以下にできることを確認した。またホバリング、後退泳ぎなどについては胸ひれを360度旋回する構造とし、全方位に推力発生ができる機能を持たせることで可能なことを確認した。前・後傾斜機能については体長方向に錘を移動させること

Fig. 2 Appearance of the Carp Robot

Fig. 4 3D-CAD drawings of the Carp Robot

Fig. 3 Elemental model of the Carp Robot

で、前・後傾斜角度を約70度にすることができることを確認した。また水中映像モニタリングについてはFM電波(72.81MHz)で伝送可能なことを確認した。

4.3 製作工程

鯉ロボットの3D-CAD図を図4に示す。胸ひれの駆動用として30Wクラスのサーボモータを左、右に1台ずつ設置した。尾ひれには60wクラスのサーボモータを1台設置した。腰に設けた関節の曲げ角度の調整用アクチュエータとして30Wクラスのサーボモータを使用した。移動錘の駆動軸にはボールスクリーを用い小型のサーボモータを使用した。CCDカメラおよび映像送信機器、ラジコン無線受信機器、バラストポンプ制御装置などの計装機器はアクリル樹脂製の耐圧シェルの中に組込んだ。浮力材には密度 35kg/m^3 のスタイロフォームを使用した。3D-CADは機器をレイアウトする際に機器の干渉をチェックしながら計画を進めることができるという点で優れた手法であるが、本来のこれらの効果に加え魚型ロボットの開発においては、重心や浮力心の位置を良好な精度で事前に知ることができるという点で非常に有用な手法となっている。すなわち、浮力材の配置位置と必要量(浮力材の体積)を事前に求めることで完成機の重心、浮力心の誤差を最小に抑えることができ、水中での姿勢調整

にかかる時間を短縮することができる。つぎに魚型ロボット開発でもっとも重要な工程となる鯉ロボットの外観を形作る外皮シェルの製作工程を図5, 6, 7, 8で説明する。開発仕様にあるようにロボットには鯉の外観を与えるために本物の鯉の形状データを収集する必要がある。このため、活きた鯉を一時的に睡眠薬で眠らせて3次元レーザデジタイザで点群データを採取した。3次元レーザデジタイザでデータ採取する様子を図5に、採取した点群データ表示を図6-①に示す。STLデータ化した後、体長方向に20mmの等間隔に切断してその断面積を計算し、長径と短径の比が0.72となる楕円で断面形状を置き換えた(図6-②)。

Fig. 5 3D-Laser digitizing of the live Carp

Fig. 6 CAM data preparation for Rapid-prototyping

Fig. 7 Rapid-prototyping Process

Fig. 8 Appearance of Painted Outer Skin Shell

Fig. 9 Sectional view of the Carp Robot

次に 3D-CAD 画面上で各楕円断面を体長線上に再配列し (図 6 - ③)、各断面の間を面データで円滑につないで外皮シェルの 3D-CAD 図 (図 6 - ④) を作成した。次に外皮シェルの 3D-CAD 図から作成した CAM データを使い、紫外線硬化樹脂方式のラピッドプロトタイピングで肉厚約 3mm 外皮シェルを製作した。図 7 に製作中の様子と製作した外皮シェル、図 8 に表面に塗装を施し内面に浮力材を貼付け外皮シェルを示す。図 9 に手前側の外皮シェルを取付ける前の組立て途中の鯉ロボット本体を示す。耐圧シェルを透明なアクリル樹脂で製作しているため、本体内に組み込まれた機器を見ることができる。また本体上部に配置したバラストタンクと外皮シェルの隙間に見える薄青色の部分が浮力材のスタイロフォームで、外皮シェルの設計の段階で配置位置と必要な量 (体積) を決めているため隙間の少ない仕上がりとなっている。

5. 遊 泳 試 験

5.1 試験水槽での遊泳試験

直径 6.5m の円形試験水槽で実施した遊泳機能検証試験の様子を図 10 に示す。旋回と浮潜を組合せた 3 次元軌跡の遊泳は腰に設けた関節の曲げ角度を調整して旋回半径を変えることで、また立ち泳ぎ、ホバリング、後退泳ぎは胸ひれの動きと錘の移動を組合せることで可能であることを確認した。また水中映像モニタリングについては CCD カメラによる水中撮影の機能を検証し、受信装置との距離が半径 1.5m の範囲であれば水中での映像データ伝送が可能であることを確認した。鯉ロボットの胸ひれの推力特性を表 2 に示す。左・右の両方の胸ひれを後方に向けて揺動させると 0.9km/h で直進し、反対の方向に向けて揺動させると 3rpm の速さで旋回した。直進、旋回ともに胸ひれの揺動周波数は 2Hz、振り角度は 60 度の両振りとした。胸ひれの運動機構については加藤らの研究^{7), 8)} があり、魚の胸ひれの動きを再現するアクチュエータの開発で成果を挙げている。一方、鯉ロボットの胸ひれはサーボモータの軸に弾力性のある樹脂製のひれを固定した単純な構造になっており、その動き自体は魚のひれの動きを再現するものにはなっていない。しかし駆動軸数を最小限 (左・右側各 1 軸) に抑へることで故障のリスクを最小限に抑へ、

Treading water

Inclining forward

Hovering

Swimming Backward

Turning

At an Aquarium

Fig. 10 Swimming Test of the Carp Robot

Table 2 Thrust Characteristic of the Pectoral fin

	Thrust generating direction	Mode
Straight	<u>Oscillate toward the rear</u>	Moved straight 0.9km/h (Oscillation frequency:2Hz)
	<u>Oscillate in opposite direction</u>	Turned in a circle 3 rpm (Oscillation frequency:2Hz)

左・右の胸ひれの揺動方向を個別に設定して旋回・後退の動きをさせることができるという特長があり、将来の海洋調査などのフィールドワークへの適用に向け故障リスクを最小限にする推進アクチュエータ方式の一つとして検討に値するものと考ええる。

5.2 水族館での実証試験

水族館の淡水魚ピラルク (Pirarucu) の水槽で鯉ロボットの遊泳機能の実証試験を実施した。実証試験の様子を図 10 の右下段の写真に示す。ピラルクは鯉ロボットが近くに寄っても特に驚く様子はなく、魚型ロボットの海洋生物調査などへの適用性をうかがわせる成果を得ることができた。

6. 結 言

魚型ロボットに魚の外観をリアルに反映させるための実体形状再現手法として、迅速、フレキシブルなデジタル加工を適用することを特徴とする開発の基本手法を提案し、実際に鯉ロボットの開発に適用し次の成果が得られた。

(1) 活きた魚の外観をリアルに再現した魚型ロボットを実現するために、その主要な要素である外皮シェル製作に有用な実体形状再現手法として、3次元レーザデジタイザを適用した。活きた鯉から採取した計測データをもとに STL データを作成し、これを CAM データとして使いラピッドプロトタイプングで鯉ロボットの外皮シェルを製作する方法を検証し、手法の有効性を確認した。

(2) 3D-CAD を使うことで、重心や浮力心の位置を事前に良好な精度で知ることができ、浮力材の適正な配置位置、必要体積を事前に知ること最適な外皮シェルの設計が可能になることから、魚型ロボットの開発に有用な手法であることを確認した。

また魚型ロボットの遊泳機能に関しては、

(3) 鯉ロボットは弾性振動翼を適用した尾ひれと左、右の

胸ひれ、および移動錘、腰部関節用の 5 個のサーボモータと、浮潜を制御するバラストポンプ用の 1 個の合計 6 個のモータを組合せて操縦することで立ち泳ぎ、ホバリング、後退泳ぎなどの多様な遊泳が可能であることを確認した。

(4) 胸ひれはサーボモータの軸に弾力性のある樹脂製のひれを固定した単純な構造ではあるが、様々な遊泳モードに対応できることから魚型ロボット用推進アクチュエータとしての有用性を確認することができた。

(5) 水族館の淡水魚ピラルクは鯉ロボットが近くに寄っても特に驚く様子はなく、魚型ロボットの海洋生物調査などへの適用性をうかがわせる成果を得ることができた。

謝 辞

本研究は平成 17 年度ひろしま産業創生補助金「エンターテインメント性と地球環境の大切さを教える新鯉型ロボットの開発」の支出を受けて行われた。ここに謝意を記します。

あわせて共同研究グループの株式会社メンテック、広島ガスサービス株式会社の関係者に感謝します。

参 考 文 献

- 1) I.Yamamoto, Y.Terada: Research on an oscillating fin propulsion control system, IEEE OCEANS 93 Vol.3 (1993)
- 2) I.Yamamoto, Y.Terada: Design of maneuvering control system for a ship, Journal of the West-Japan Society of Naval Architects Vol.87 (1994)
- 3) I.Yamamoto, Y.Terada: Propulsion system with flexible/rigid oscillating fin, IEEE Journal of Oceanic Engineering Vol.20 No.1 (1995)
- 4)たとえば, I.Yamamoto: Robust and non-linear control of marine system, International Journal of Robust and Nonlinear Control Vol.11 (2001)
- 5) 市来崎哲雄, 陰山優造, 末田穰, 山本郁夫, 寺田郁二: 高機能魚型ロボットの開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 1 号 (2005)
- 6) 市来崎哲雄, 陰山優造, 山本郁夫: 「金のシャチホコ」をモデルにした魚ロボットの開発, 作業船 No286 (2007-1)
- 7) N.Kato, H.Liu, H.Morikawa: Biology-Inspired Precision Maneuvering of Underwater Vehicles in “Bio-mechanisms of Swimming and Flying” Chapt.9, Springer-Verlag Tokyo 2004
- 8) N.Kato: Median and Paired fin Controllers for Biomimetic Marine Vehicles, Applied Mechanics Reviews(ASME) Vol.58 Issue 4 (2005-7)