三軸胸鰭運動装置の流力特性と 自律型水中ロボットへの応用

正員 加藤 直三* ブギ ウィック W.**
鈴木 佳広***

Hydrodynamic Characteristics of Three-Motor-driven Mechanical Pectoral Fin and
Its Application to an Autonomous Underwater Vehicle

by Naomi Kato, *Member* Bugi Wiku W.
Yoshihiro Suzuki

Summary

This paper presents (1) development of a three-motor-driven mechanical pectoral fin (3MDMPF) based on the observation and analysis of three-dimensional motion of pectoral fin of a black bass, (2) its hydrodynamic characteristics, (3) development of an autonomous underwater vehicle equipped with a pair of 3MDMPFs named "BASS III" and its swimming performance. 3MDMPF can produce lead-lag motion, feathering motion and flapping motion independently. The flapping motion 3MDMPF can produce is effective in slightly increasing the thrust force compared with the case without the flapping motion. "BASS III" has a high maneuverability not only in the horizontal plane, but also in the vertical plane.

1. 緒 言

水中探査ロボットが複雑な海底を探査する場合、海底に生息する魚のようにホバリングや素早い旋回など細かい運動が要求される。また腕付き水中ロボットが浮いた状態で作業を行う場合、ロボット本体の細かな制御が必要となる¹⁾。

本研究は、水棲動物が持つ多様な推進・運動機能を利用して、従来から水中ロボットの運動制御に用いられているスクリュウ型スラスタや翼に代わる新しい操縦装置を考案することを目的としている。具体的には、魚の胸鰭に着目してその観察と解析に基づいて胸鰭運動装置の開発を行う。

水棲動物の持つ多様な推進・運動機能を水中ロボットに適用する場合、何が現在の水中ロボットの技術を補完あるいは

凌駕できるかを見極める必要がある。水中ロボットの要素技術として、動力源、知能化技術、推進・運動性能、素材、計測・センサー技術がある。その中で水中ロボットが求める推進・運動機能は、効率的で制御応答性の優れた推進装置、少ないエネルギー消費で優れた運動性能を発揮できる機体形状や推進装置等の配置、放射雑音の少ない推進装置や機体形状が挙げられる。

これまでの水棲動物の推進・運動機能の水中ロボットや水上船への適用の研究を見ると、琉球大²⁾、MIT³⁾、信州大⁴⁾、東工大⁵⁾、船研⁶⁾に見られるように、魚体尾ひれ型についての推進性能、高速での操縦性能、停止状態からの加速性能を重視したものや、Bandyopadhyayら⁷⁾や著者ら⁸⁾の魚体尾ひれ型や中央ひれ型についての低速での操縦性能を重視した研究に大別できる。前者については、従来のプロペラ型スラスタとの競合になるが、MITのように機体本体の後半部が柔軟性を持つ魚体尾ひれ型波状運動式になると、内部部品の配置からみて不利であることが欠点となる。一方長所としては、推進機構を魚類の筋肉システムに近づけることで、放射雑音レベルが低く、しかもその特性が自然界のも

* 東海大学海洋学部

** BPPT、インドネシア（研究当時 東海大学大学院）

*** 東海大学大学院

のに近くなことや海藻などの巻き込みがなくなることが挙げられる。一方、後者についてはこれまでほとんど研究がなされてこなかった。

スクリー式スラスターは、水中ロボットが停止状態でその位置や姿勢を保持する場合、正負の推力を迅速に発生するのが難しいという欠点を持っている。したがって、スクリー式スラスターを浮遊状態での水中ロボットやそれに装着している腕の操縦や安定化に利用すると精度が得られないことになる。魚の胸鰭の運動を浮遊状態での水中ロボットの操縦や安定化へ利用する観点からの研究はほとんどない⁹⁾。

一般に鰭運動は鳥の羽ばたき運動と同じく、主に (1) 上下方向のフラッピング運動、(2) 前後方向のリード・ラグ運動、(3) ひねりを行うフェザリング運動、(4) ひれの伸縮運動から構成されている (Fig.1 参照)¹⁰⁾。これまでの著者らの研究は、胸鰭を剛平板とし、水平面内の魚の運動を扱うことによって、(3) と (4) の効果を見逃して、(1) 魚は平面内の前後運動や旋回運動をリード・ラグ運動とフェザリング運動の組み合わせで行っている、(2) リード・ラグ運動とフェザリング運動を行うことができる二軸胸鰭運動装置はその運動間のある位相差の領域で前進力を発生する、(3) 二軸胸鰭運動装置を左右一対取り付け付けた魚型水中ロボットは平面内にて前進、後進、旋回を行うことができることを明らかにした^{11), 12)}。

本研究は、これまでの二軸胸鰭運動装置に関する研究に引き続き、魚の胸鰭の三次元運動解析、フラッピング運動を取り入れた三軸胸鰭運動装置の開発とその流力特性の解析、それを左右一対装着した自律型水中ロボットの遊泳性能を扱う。

Fig.1 Illustrations of lead-lag motion, feathering motion and flapping motion of a pectoral fin

2. ブラックバスの胸鰭の三次元運動解析

体長 0.335 m で胸鰭の大きさ (幅 45 mm, 高さ 30 mm)

を持つブラックバスを用いて、胸鰭の運動を解析した。胸鰭には Fig.2 に示す 4 つのマーカー (アルミ小片) を取り付け付けた。魚を 1206 mm (L) × 153 mm (W) × 203 mm (H) の水槽に入れ、水槽の上部に 45° の角度で鏡を取り付けた。その水槽に平行にレールを置き、その上に 2 台の CCD カメラを配置し、胸鰭の運動をカメラの中心に来るように移動させ、真横と真上から同時に撮影した。その後、それらのマーカーの位置を 1/30 秒間隔で計測した。

Fig.2 Location of markers

無次元振動数を次のように定義する。

$$K = c \cdot \omega_{fin} / U \quad (1)$$

ここで、 ω_{fin} は胸鰭の角振動数、 U は前進または後進速度、 c は胸鰭の高さを表す。下表に後進における実験状態を示す。

Table 1 Parameters of pectoral fin of a bass

U (mm/s)	ω_{fin} (rad/s)	K
33.5	7.54	6.757

Fig.3 に Table 1 の実験状態における胸鰭位置の時間変化を示す。1/30 秒毎に、胸鰭の形状を胸鰭上の 4 点のマーカーをスプラインカーブで結んで示してある。ここで、 X 軸の正の方向が魚の前方をさし、 X - Y 面が平面図を、 X - Z 面が側面図を表す。この図から、胸鰭が後ろから前にかく状態では X - Y 面にはほぼ垂直に動かしている。このとき、胸鰭は後進方向の推力をだしている。それに対して、胸鰭が前から後ろにかく状態では、ひねり (フェザリング) と上方への移動 (フラッピング) が見られる。これは、前方への推力発生を極力抑えるためと思われる。

胸鰭が剛体平板と仮定して、胸鰭のスパン方向やコード方向の曲げを無視して、Fig.4 に定義するリード・ラグ角 ϕ_L 、フラッピング角 ϕ_{FE} 、フェザリング角 ϕ_{FL} に対応するオイラー角を求める。点 O 、 $P1$ 、 $P4$ の位置情報からオイラー角 ϕ_L 、 ϕ_{FE} 、 ϕ_{FL} を Fig.2 に示す基準座標に対して

Fig.3 Experimentally measured time histories of motion of a pectoral fin in a backward swimming

繰り返し計算法によって求めた。この計算の過程では、0-P1と0-P4の距離を正規化し、三角形0-P1-P4の0-P1と0-P4のなす角度がFig.2に示す基準座標での値になるようにP1の位置を基準としてP4の位置をずらしている。Fig.5に、Fig.3に示した運動におけるオイラー角の時間変化を示す。またFig.6に、点0、P1、P4の位置情報から0-P1と0-P4のなす角の時間変化を示す。これらの結果から、後進状態の胸鰭が最も前方に来るあたりで、最も大きな角度変化を示すことや、胸鰭が最も前方に達する少し前あたりで開き、前方から後方に移る間に縮むことがわかる。

3. 三軸胸鰭運動装置の開発

ジンバル方式によってリード・ラグ運動、フェザリング運動、フラッピング運動を独立に作動させることができるDCサーボモータ3個を用いた三軸胸鰭運動装置を開発した(Fig.7参照)。長さ×幅×高さ=0.375m×0.212m×0.40mで、質量は11kgである。それぞれの運動において、 $\pm 45^\circ$ を最小0.5sで稼働できる設計となっている。またそれぞれの軸には角度検出器を設けた。

Fig.4 Notation

4. 三軸胸鰭運動装置の流力特性

4.1 三軸胸鰭運動装置の流力特性実験

厚み0.6mm、幅188mm、高さ155mmのステンレス製の胸鰭平板(Fig.8)を三軸胸鰭運動装置に取り付け、さらに胸鰭付近の流れをスムーズにするフェアリング部(Fig.9)に装置を取り付け、回流水槽(観測部:長さ×幅×高さ=2.2m×1.4m×0.9m)にて計測を行った。計測には3分力計を用いた。

Fig.5 Time histories of Euler angles of a pectoral fin

Fig.6 Time histories of angle between O-P1 and O-P4

Fig.7 Mechanical pectoral fin

リード・ラグ運動、フェザリング運動、フラッピング運動は次のように設定した。

$$\begin{aligned}\phi_L &= \phi_{LA} \cdot (1 - \cos(\omega_{fin} \cdot t)) \\ \phi_{FE} &= -\phi_{LA} \cdot (1 + \cos(\omega_{fin} \cdot t + \Delta\phi_{FE})) \\ \phi_{FL} &= \phi_{FLA} \cdot \sin(\omega_{fin} \cdot t + \Delta\phi_{FL})\end{aligned}\quad (2)$$

ここで ϕ_{LA} , ϕ_{FEA} , ϕ_{FLA} をそれぞれ 35° , 35° , 20° とおいた。無次元振動数 K は 3.76 とした。

4.2 数値解析

一様流れに対して高迎角をとる抗力型胸鰭まわりの流れは剥離流が支配的である。著者の一人が開発した粘性による渦拡散を考慮した非定常渦格子法¹¹⁾を用いて胸鰭運動装置に加わる流体力の数値解析を行った。

Fig.10 に示すように胸鰭表面を 162 分割して計算を行った。U=1.0 (m/s), 時間ステップ $\Delta t = 0.026$ (s) とした。計算は 2 周期分行い、最後の 1 周期の流体力の平均値を求めた。K は実験値と同じ 3.76 とした。

流体力係数は次の定義に従って求めた。

$$\begin{aligned}C_x &= F_x / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S), \\ C_y &= F_y / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S), \\ C_z &= F_z / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S), \\ C_{mx} &= M_x / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot c), \\ C_{my} &= M_y / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot c), \\ C_{mz} &= M_z / (1/2 \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot c)\end{aligned}\quad (3)$$

ここで F_x, F_y, F_z はそれぞれ X 軸、Y 軸、Z 軸方向の流体力を、 M_x, M_y, M_z はそれぞれ X 軸、Y 軸、Z 軸まわりのモーメントを、S は胸鰭表面積を、 ρ は流体密度を表す。

4.3 考察

Fig.11 にフラッピング運動なしの場合の平均推力係数について、横軸に $\Delta\phi_{FE}$ をとり、実験値と計算値の比較を示す。Fig.12 には、フラッピング運動ありの場合の平均推力係数について、横軸に $\Delta\phi_{FL}$ をとって示す。このとき、 $\Delta\phi_{FE} = 110^\circ$ とした。実験値から、平均推力係数は $\Delta\phi_{FE}$ の変化の影響を大きく受け、 $\Delta\phi_{FL}$ の変化の影響は少ないことがわかる。また、その最大値はフラッピング運動を伴ったほうがやや大きいことがわかる。計算値は実験値にほぼ対応している。

Fig.13 と Fig.14 に、フラッピング運動なしとありの場合の平均鉛直力係数の実験値と計算値の比較を示す。平均鉛

直力係数についても $\Delta\phi_{FE}$ の変化の影響を大きく受け、
 $\Delta\phi_{FL}$ の変化の影響は少ないことがわかる。

Fig.8 Model of pectoral fin

Fig.9 Configuration of a faired body equipped with 3MDMPF

Fig.10 Division of surface of pectoral fin

Fig.11 Comparison of C_x^* without flapping motion between computation and experiment

Fig.12 Comparison of C_x^* with flapping motion between computation and experiment

Fig.13 Comparison of Cz^* without flapping motion between computation and experiment

Fig.14 Comparison of Cz^* with flapping motion between computation and experiment

Fig.15 Photograph of "BASS III"

Fig.16 Configuration of BASS III and its arrangement

5. 三軸胸鰭運動装置つき自律型水中ロボット" BASS III"

5.1 "BASS III" の構造

三軸胸鰭運動装置つき自律型水中ロボット" BASS III" を、水平面ばかりでなく鉛直面においてその操縦性能を把握するために製作した。Fig.15 にその写真を、Fig.16 にその構造図を示す。質量は104kgで、最大潜航深度は10mである。全体の重心が三軸胸鰭運動装置の軸付近にくるように、バッテリーのための圧力容器はカバー（FRP 製）の外側に配置した。これによって、少ないヨー運動での横移動や少ないピッチ運動での上下移動が可能となる。" BASS III" の後端には、潮流中で用いるためのスクリー型

スラスタ—機を取り付けている。目下のところ、CPU には Pentium II333Mhz を、OS には WindowsNT を用いている。センサーとして、3 軸ジャイロ、2 軸傾斜計、方位計、深度計、超音波高度計、三つの CCD カメラを装備している。下方 CCD カメラは、水中ロボットの水平位置を計測するために、二つの前方 CCD カメラは水中ロボットと前方の構造物との相対位置を計測するために用いられる。

実験の初期段階では、地上と水中ロボットとの間で AC 電線で結ばれ、地上から電源が供給される。また地上コンピュータと水中ロボットとのコンピュータの間は LAN ケーブルで結ばれ、プログラムのダウンロードやデータ収録が行われる。

5.2 水槽での遊泳性能試験

JAMSTEC の長さ 40m、幅 4m、深さ 2m の試験水槽において、“BASS III”の遊泳性能試験を行った。水中ロボットとの平面位置を計測するため、一辺が 5cm の白い正方形板を長手方向と横方向に 50cm 毎に鉛入りロープを用いて配置した。今回の実験では、ロボットの動きとともに計測台車を動かして、計測台車から真下にロボットをビデオカメラで撮影し、それを解析して、ロボットの平面位置を求めた。

胸鰭模型に Fig.8 に示すものの 1.5 倍の大きさのプラスチック製の平板を用いた。胸鰭の運動の周波数を 0.5 Hz にした。

実験は、一対の三軸胸鰭運動装置を駆動する 6 種類の運動をおこなった。1) 上昇前進、2) 下降前進、3) 上昇後退、4) 下降後退、5) 定点左旋回、6) 右方向への平行移動、である。Table 2 と Table 3 に各実験における胸鰭運動を示す。

Fig.17 に、前進上昇における深度、スタート地点からの移動距離、ヨー角、ピッチ角、ロール角の時間変化を示す。水中ロボットは、少ない姿勢変化で前進上昇することがわかる。この場合、経路角は約 38° に達する。ピッチ角の 10sec 程度の振動は、ピッチ運動の固有周期となっている。

Fig.18 に、後進下降における深度、スタート地点からの移動距離、ヨー角の時間変化を示す。後進状態においても、水中ロボットは安定であることがわかる。このときに、最大経路角は約 53° に達する。このことから、 ϕ_{FEA} は鉛直方向の移動に関係し、 $\Delta\phi_{FE}$ は前進・後進の移動に関係することがわかる。深度データの振動は、Fig.17 のピッチ運動と同じくピッチ運動の固有周期となっている。

Fig.19 に、左旋回におけるヨー角、位置の時間変化を示す。ここで X 軸は水槽の長手方向としている。水中ロボットはほぼ同じ位置で旋回することがわかる。

Fig.20 に、右方向横移動におけるヨー角と位置の時間変化を示す。わずかにヨー角が増加するがほぼ右方向に平行移動することがわかる。

6. 結 論

本研究の結果、次の結論を得た。

1. 魚の胸鰭の運動は、リード・ラグ、フェザリング、フラッピング、伸縮、たわみを伴う複雑な運動を行っている。
2. リード・ラグ、フェザリング、フラッピング運動を独立に作り出す三軸胸鰭運動装置を製作した。この装置の推力係数はフラッピング運動がない場合よりフラッピング運動がある場合のほうがやや大きい。
3. 三軸胸鰭運動装置を左右一対装着した自律型水中ロボットは、水平面内や鉛直面内において従来の航行型の自律型水中ロボットに比べ高い操縦性能を持つ。

今後、三軸胸鰭運動装置に関して、

- 1) コンパクトでパワーのあるものへの改良、
 - 2) 三軸胸鰭運動装置と胴体との干渉効果の検討、
 - 3) 三軸胸鰭運動装置の運動と鰭形状の最適化、自律型水中ロボット“BASS III”に関して、
 - 1) フラッピング運動の遊泳性能への影響、
 - 2) CCD カメラを用いた誘導制御、
 - 3) 波浪中や潮流中でのホバリング性能、
- などについて、研究を進める必要がある。

Table 2 Setups of angles

	ϕ_{LA}	ϕ_{FEA}	ϕ_{FLA}	$\Delta\phi_{FE}$
(A)	25°	20°	0°	90°
(B)	25°	-20°	0°	90°
(C)	25°	-20°	0°	-105°
(D)	25°	20°	0°	-105°
(E)	25°	20°	0°	90°
(F)	25°	20°	0°	-105°

- (A) Ascent in Forward Swimming
 (B) Descent in Forward Swimming
 (C) Ascent in Backward Swimming
 (D) Descent in Backward Swimming
 (E) Left Turning (Right)
 (F) Left Turning (Left)

Table 3 Setups of angles for lateral swimming to the right-hand side

	ϕ_L	ϕ_{FE}	ϕ_{FL}
Right	$20 \cdot \sin(\omega_{fin} \cdot t)$	$-20 \cdot \sin(\omega_{fin} \cdot t)$	0°
Left	$30 \cdot \sin(\omega_{fin} \cdot t)$	$20 \cdot \sin(\omega_{fin} \cdot t)$	0°

参考文献

- 1) Kato, N. and D.M. Lane, 1996, "Co-ordinated Control of Multiple Manipulators in Underwater Robots," Proc. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2505-2510, Minneapolis, MN, April 22-28
- 2) 田中一郎、永井實, 1996, "抵抗と推進の流体力学—水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ—", シップ・アンド・オーシャン財団
- 3) Barrett, D.S., Triantafyllou, M.S., Yue, D.K.P., Grosenbaugh, M.A. and Wolfgang, M.J., 1999, "Drag Reduction in Fish-Like Locomotion", J. Fluid Mech., vol.392, pp.183-212
- 4) 一色尚次、森川裕久, 1982, "いるか型フィンシップの研究", 日本造船学会誌, 第642号, pp.2-9
- 5) Nakashima, M. and Ono, Kyosuke, 1999, "Experimental Study of Two-Joint Dolphin Robot", Proc. Of 11th International Symposium on Unmanned, Untethered Submersible Technology, pp.211-218.
- 6) 平田宏一、春海一佳、田村謙吉、児玉良明、富田宏、牧野雅彦, 1999, "魚ロボットに関する研究", 平成11年度船舶技術研究所研究発表会講演集, pp.190-193
- 7) Bandyopadhyay, P.R., Castano, J.M., Rice, J.Q., Philips, R.B., Nedderman, W.H. and Macy, W.K., 1997, "Low Speed Maneuvering Hydrodynamics of Fish and Small Underwater Vehicles", J. Fluids Eng. (ASME), Vol.119, pp.136-144
- 8) 加藤直三、稲葉忠彦, 1997, "胸鰭運動装置の流体力学的特性", 日本造船学会論文集, 第182号, pp.129-139
- 9) Kato, N., 1999, "Application of Swimming Functions of Aquatic Animals to Autonomous Underwater Vehicles", Proc. Of OCEANS '99(IEEE)
- 10) 東 昭, 生物の動きの事典, 朝倉書店
- 11) Kato, N., 1999, "Hydrodynamic Characteristics of Mechanical Pectoral Fin," Trans. of ASME, J. of Fluids Engineering, Vol.121, No.3, pp.605-613
- 12) Kato, N., 2000, "Control Performance in Horizontal Plane of a Fish Robot of Fish Robot with Mechanical Pectoral Fins," IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol.25, No.1, pp.121-129

Fig.17 Ascending in forward swimming

Fig.18 Descending in backward swimming

Fig.20 Lateral swimming to the right-hand side

Fig.19 Left turning