

魚ロボットに関する研究

機関動力部 * 平田宏一、春海一佳
氷海技術部 田村兼吉
推進性能部 児玉良明、富田 宏、牧野雅彦

1. はじめに

魚は、高速かつ高効率で泳ぐマグロや加速性に優れ機敏に泳ぐマス、狭い隙間を自由に泳ぎ回るウツボなど多種多様である。魚のように海中を自由に泳ぎ回り、しかも高効率で機敏な旋回性能を有する魚ロボットが開発されれば、海中調査や生態観測に多いに貢献するであろう。本研究は、船舶や潜水船の高効率推進装置の開発、そして周囲の状況に応じて自らが最適な泳法を学んでいく知能ロボットの開発を目的としている。

本報では、魚ロボットの基本的な推進特性を調べるために設計・試作した、全長 190 mm 程度の模型魚ロボットの基本的な特性を中心に解説する。

2. 魚の推進原理

魚の泳法は図 - 1 に示す 3 種¹⁾に要約できると考える。同図(a)の変形波による推進は、細長い体あるいはリボン状のひれに変形波を送って前進する。推進力を得るためには、(i)変形波の速度が前進速度よりも大きく、(ii)振幅を尾に向かって増加する（あるいは体高が尾に向かって増す）必要がある。変形波による推進は、波を送る向きを急激に変化させることができ、前後の動き、すなわち位置制御が容易である。

同図(b)は、尾柄及び尾ひれの運動によって変化する付加質量が揚力として働く。サケやマスがこの例であり、速い流れに対向でき、加速性に優れている。

同図(c)の振動翼推進は、尾ひれを単独の翼として考える。マグロやカツオなどのように、三日月形で翼幅が大きい尾ひれを持つ場合、高効率の推進が可能となる。振動翼の運動は、尾ひれの平行運動（ヒーヴィング運動）と回転運動（フェザリング運動）とを重ね合わせたものであると見なせ、実際の魚ではこれらに 90° 程度の位相差を与えている²⁾。

本研究では、これら 3 つの優れた特徴をすべて模擬できる魚ロボットの開発を目指している。

3. 試作した模型魚ロボットについて

魚ロボットの推進性能を詳細に評価するためには、高度な測定技術が必要となる。一方、魚ロボットの設計手法や性能に関するデータベースは十分に構築されていないのが現状である。そこで、簡易的な実験を行い、今後の魚ロボットの開発におけるデータベースを得るため、

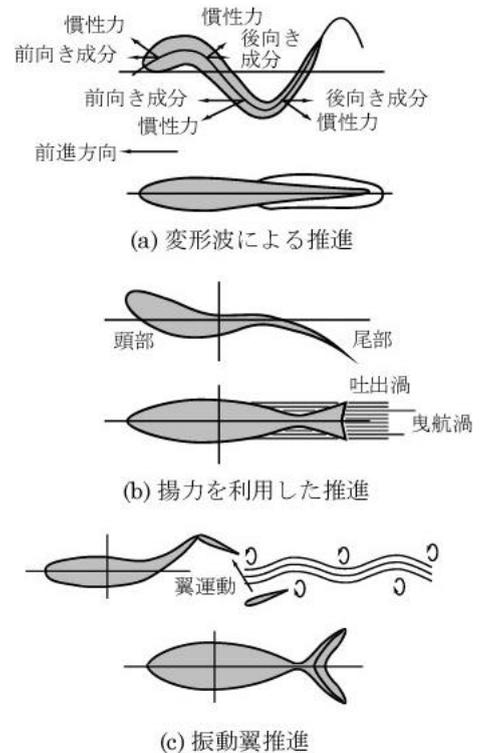


図 - 1 魚の推進原理

5種類の模型魚ロボットを設計・試作した。図-2はその一つであり、本試作機の開発目的は、(i)運動パターンと推進性能の確認、(ii)運動パターンと旋回性能の確認、(iii)運動制御プログラムの開発、(iv)魚ロボットの無線操縦(R/C)の動作確認、(v)魚ロボットの推進特性における測定方法の検討、である。

駆動源には、回転式モータやパルスモータなどが考えられたが、複雑な運動パターンを模擬できるR/C用サーボモータ(ユニオン社、UM-9G)を使用した。また、浴槽程度の小さな水槽で動作確認ができるように、できる限り小型化を試みた。

試作機の全長は約190mm、全重量は約400gである。図-1に示した魚の泳法を模擬する場合、関節数が多いほど滑らかな運動を実現できる。しかし、試作機においては構造を簡略化するため、関節を2つとし、尾柄及び尾ひれをそれぞれサーボモータ1及び2で駆動させる。尾柄及び尾ひれの最大振幅は $\pm 40 \text{ deg}$ 、最高周波数は4Hz程度である。

3.1 設計計算

魚ロボットの一次設計において、魚ロボットの全長、主要寸法及び駆動源の仕様等を決定する必要がある。一方、魚ロボットは尾ひれ及び尾柄が運動することによって、重心周りにモーメントを受け、揺動運動をする。この重心周りの運動は、駆動源のトルクに影響を及ぼすとともに、推進性能にも大きく影響を及ぼすため、その影響を調べておくことは重要である。

図-3に試作機の設計に用いた解析モデルを示す。同図(a)に示すように、尾柄及び尾ひれの前端に設けられた関節は、それぞれ適切な位相差を保ちながら角度 a 及び b で正弦状に運動する。

$$a_a = a_{a,max} \cos q \tag{1}$$

$$a_b = a_{b,max} \cos(q - b) \tag{2}$$

ここで、 $a_{a,max}$ 及び $a_{b,max}$ はそれぞれ尾柄及び尾ひれの最大振幅、($=0 \sim 360 \text{ deg}$)は周期的な制御角である。図-3(b)のように、荷重の作用点を G_F 、 G_R 、A及びBとし、それぞれの重心Gからの距離 r_i 及び荷重 F_i を与えることで、各関節に作用するトルク T_q 及び重心周りのモーメント M_o が求められる。同図(c)のように、荷重が働く要素を平板に置き換え、各要素に慣性力及び抗力が働く場合、荷重 F_i は次式で求められる。

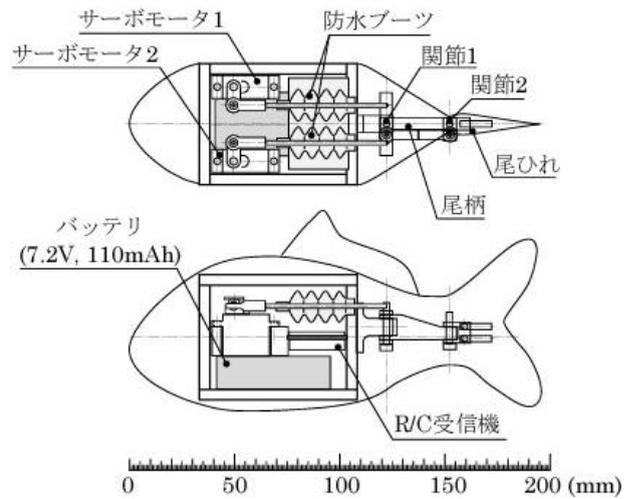


図-2 模型魚ロボットの構造

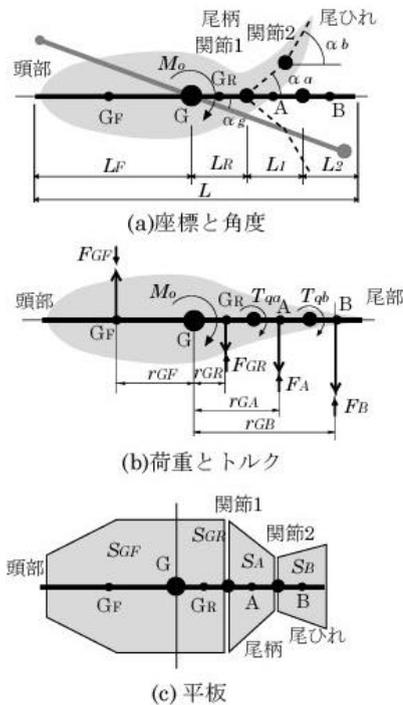


図-3 解析モデル

$$F_i = m_i A_i - C_D \frac{\rho V_i^2}{2} S_i$$

ここで、 m_i は各要素の質量、 A_i は加速度、 V_i は速度、 C_D は抵抗係数(=1.2)、 ρ は密度、 S_i は平板の面積、である。

一方、重心周りの回転角 g は、次式を数値解析的に解くことで得られる重心周りの角速度 \dot{g} から導かれる。

$$\frac{d\dot{w}_g}{dq} = \frac{M_o}{Iw_g} \quad (4)$$

ここで、 I は魚ロボットの慣性モーメントである。

計算結果の一例として、図 - 4 に魚ロボットの全長 L と各関節の最大トルクとの関係を示す。計算において、尾柄及び尾ひれは、周波数 3 Hz、位相差 90 deg、中心軸から左右に最大 40 deg ずつ運動させており、その他の計算条件は図 - 2 の試作機の寸法に基づいて設定している。この図より、全長が長くなるに従って、急激に各関節の最大トルクが増大していることがわかる。また、試作機に使用するサーボモータの最大トルクが 0.09 Nm (カタログ値) であることから、試作機の全長は約 280 mm 以下であればよいことがわかる。

詳細設計においては、それぞれの抗力をより適切な手法で求め、さらに尾柄及び尾ひれの運動による揚力(推進力)を求める必要がある。それらは、詳細な実験を進めると同時に検討すべき重要な課題である。

3.2 魚ロボットの運動制御

図 - 5 に試作機の運動制御システムを示す。パーソナルコンピュータと R/C 送信機とを D/A コンバータを介して接続しており、運動制御プログラムによって尾柄及び尾ひれを任意の角度に運動させることができる。また、試作機にはバッテリー(7.2 V、110 mAh)及び R/C 受信機が内蔵されており、受信アンテナの中間に設けられたフロートによって、アンテナの先端は水面上に突出している。

3.3 基本性能

(1) 運動パターンと速度の関係

図 - 6 は、試作機における周波数に対する速度の実験結果である。尾ひれと尾柄との位相差は 90 deg、中心軸から左右に最大 30 deg ずつ運動させている。この結果から、周波数が増加するに従って、ほぼ比例して速度が上昇していることがわかる。

図 - 7 は、尾柄と尾ひれとの位相差に対する速度の実験結果である。周波数は 3 Hz、中心軸から左右に最大 30 deg ずつ運動させている。一般には 90 deg の位相差で運転させた場合に最も高い効率が得られると言われているが、本実験では、位相差が 20~30 deg 程度で最高速度が得られている。これは位相差が小さいほど尾ひれ後端部の最大振幅が大きくなるので、水を推す力が增大するためであると考えられ、このような特性は、魚ロボットの体形や尾ひれの形

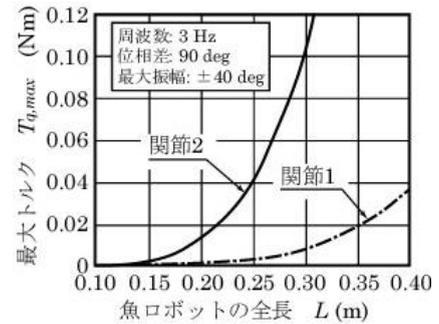


図 - 4 計算結果の一例

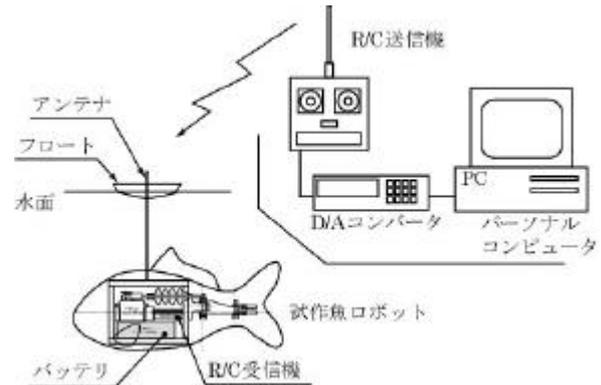


図 - 5 運動制御システム

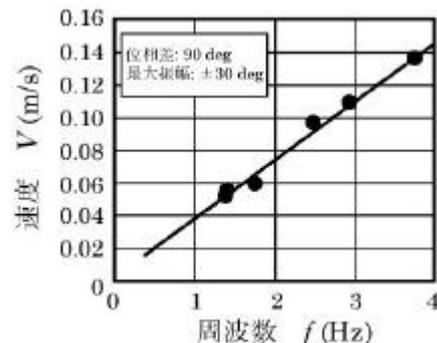


図 - 6 周波数と速度の関係

状に大きく影響を受けると考えられる。

本実験で得られた最高速度は、周波数 3 Hz、位相差 20 deg において、約 0.18 m/s であり、1 秒間に概ね試作機の全長 (190 mm) と同じ距離を進んでいることになる。試作機は高速性を重視した設計ではないが、1 秒間に体長の 10 倍程度もの距離を進む実際の魚が存在することから、試作機の推進性能はまだ十分ではないと考えている。

(2) 旋回性能

魚ロボットを旋回させるには、(i)胸ひれや腹ひれなどを利用する方法、(ii)尾の運動を左右どちらかに偏らせる方法、(iii)左右への尾の運動速度を変化させる方法、などが考えられる。以下の実験においては、運動制御が最も容易な(ii)の方法を採用した。

図 - 8 は、試作機を旋回させたときの合成写真である。尾ひれと尾柄との位相差は 90 deg、周波数は 3 Hz、尾ひれと尾柄は中心軸から左側に 40 ~ 10 deg までの範囲で往復運動させている。これより、試作機は半径約 150 mm 程度で旋回していることがわかる。さらに急速な旋回をさせるためには、式 (3) に示した尾柄及び尾ひれの慣性力 $m_r A_r$ を有効に利用することなどが考えられる。

(3) 消費電力の測定

図 - 9 は、試作機を水上に出した状態と水中に入れた状態の運転周波数と消費電力との関係である。尾ひれと尾柄との位相差は 90 deg、中心軸から左右に最大 30 deg ずつ運動させている。この結果から、水上 (空気中) と水中とでは、ほとんど消費電力に変化がないことがわかる。水中での消費電力と水上での消費電力との差は、水を推すために要した仕事量であると考えられるが、その仕事量は非常に小さく、測定不能であった。詳細な実験では、より精度の高い測定をしなければならないのは明らかである。

4 . おわりに

模型魚ロボットを設計・試作し、動作確認等の当初の開発目的は概ね達成されたと考えている。今後、より詳細な実験を行うための実験用魚ロボットの設計・試作を進めるとともに、流体的特性の解析や最適設計手法の検討を進める予定である。

参考文献

- (1) 加藤一郎: 動物のメカニズム, 朝倉書店(1980)32-44.
- (2) 東昭: 生物の動きの事典, 朝倉書店(1997)141-183.

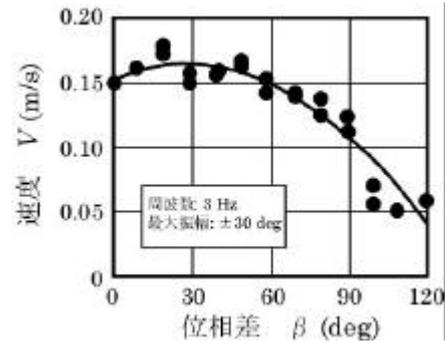


図 - 7 位相差と速度の関係

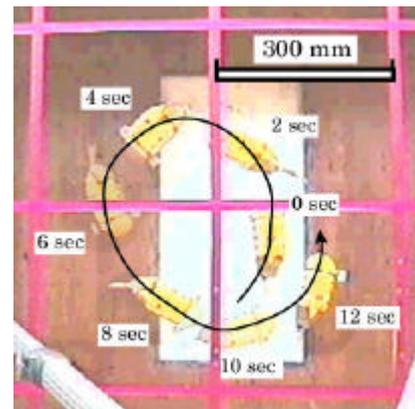


図 - 8 小型魚ロボットの旋回性能

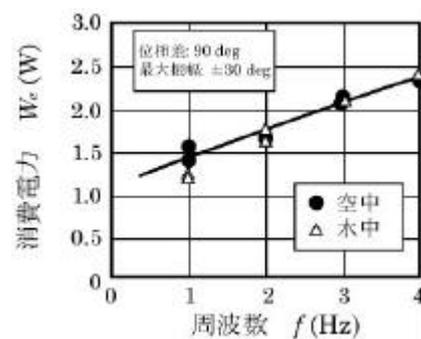


図 - 9 周波数と消費電力の関係