平田宏一(正,船舶技術研究所)

# 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 程度の小型魚ロボ ットの基本的な特性について記す.

### 2.魚の推進原理

魚の泳法は図1に示す3種<sup>1</sup>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



日本設計工学会 1999 年度春季研究発表講演会(1999 年 5 月 22 日)

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,波の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 deg 程度の位相差を与えている<sup>20</sup>.

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.魚ロボットの設計

3.1 設計指針

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十分なデータベースが構築 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,小型魚ロボット(以下,試作機 と称す)を設計・試作した.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 考えられるが,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.

### 3.2 設計計算手法

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2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 <sub>a</sub>及び <sub>b</sub>で正弦状に運動する.

$$\boldsymbol{a}_a = \boldsymbol{a}_{a,\max} \cos \boldsymbol{q} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{a}_{b} = \boldsymbol{a}_{b,\max} \cos(\boldsymbol{q} - \boldsymbol{b}) \tag{2}$$

ここで,  $a_{max}$  及び  $b_{max}$  はそれぞれ尾柄及び尾ひれの最大振幅, (=0~360 deg)は周期的な制御角である.図 2(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と仮定した場合,荷重 $F_i$ は次式で求められる.

$$F_i = m_i A_i - C_D \frac{\mathbf{r} \mathbf{V}_i^2}{2} S_i$$
(3)

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), は密度, $S_i$ は平板の面積, である.

一方,重心周りの回転角 <sub>g</sub>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 <sub>g</sub>から導 かれる.

$$\frac{d\boldsymbol{w}_g}{d\boldsymbol{q}} = \frac{M_o}{I\boldsymbol{w}_g} \tag{4}$$

ここで, I は魚ロボットの慣性モーメントである. 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.

# 3.3 計算結果

計算結果の一例として,図3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3Hz,位相差90deg, 中心軸から左右に最大40degずつ運動させており, その他の計算条件は後述する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0.09Nm(カタログ値)であること から,試作機の全長は約280mm以下であればよい ことがわかる.



4.魚ロボットの試作

## 4.1 魚ロボットの構造

上述の設計指針及び設計計算に基づき,図4に示 す試作機を製作した.試作機の全長は約190 mm, 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±40 deg,最高周波数は4 Hz 程度である.

### 4.2 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(7.2 V,110 mAh) 及びR/C受信機が内蔵されており,受信用アンテナ



図5 運動制御システム

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.

5.魚ロボットの基本性能

5.1 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°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3Hz,中心軸から左右に 最大30°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とがわかる.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,水を推す力が増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 尾ひれの形状に大きく影響を受けると考えられる.

試作機を上記の実験条件で運動させた場合,位相差 を 30 deg としたときの尾ひれ後端部の最大振幅は 72 mm であるのに対し,位相差を 90 deg としたと きは 54 mm である.

本実験で得られた最高速度は,周波数3Hz,位相



図7 位相差と速度の関係

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.

5.2 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<sub>i</sub>A<sub>i</sub>を有効に利用することなどが考えられる.

5.3 消費電力の測定

試作機における消費電力の測定系を図9に示す. 電圧 *V<sub>o</sub>と V<sub>i</sub>を*測定することで,次式により消費電力 *W<sub>o</sub>*を求めることができる.

$$W_e = V_f i = \frac{(V_0 - V_1)V_1}{R}$$
(5)

以下の実験では,電源供給を安定させるために, 魚ロボット内のバッテリを用いず,外部に設置した



図8 小型魚ロボットの旋回性能



図9 消費電力の測定

直流電源(5V)を使用した.また,サーボモータの 運動によって電圧 V<sub>f</sub>および電流 i が変動するため, A/D コンバータにより1 kHzのサンプリング周波数 で1秒間のデータを取得し,それらの平均から消費 電力 W<sub>e</sub>を求めている.詳細な測定では,運転周波 数によってサンプリング時間を適切に同期させなけ ればならない.

図10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.振幅を20 deg および40 deg と した場合も同様の結果が得られている.また,サー ボモータを静止させた状態での消費電力は, 1.32 W (5回の測定の平均値)であった.この値は電波を 受信するための消費電力であると考えられるので、1 Hz 以下程度の低い周波数で運動させた場合、サーボ モータを動かすための電力は非常に小さいことがわ かる.

図 11 は、試作機を水上に出した状態および水中に入れた状態で、尾ひれと尾柄との位相差を変化させた場合の消費電力を示している.周波数は3 Hz,振幅は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、ばらつきは大きいものの、水



上に出した状態では位相差の変化に対して消費電力 はあまり変化していないことがわかる.一方,水中 で運動させた場合は位相差が小さいほど消費電力が 増加する傾向が見受けられる.これは位相差が小さ いほど水を推す動力が大きくなっているためである と考えられる.水中での消費電力は,水上での消費 電力より若干小さく測定されているが,その原因は, 負荷が加わることによって電圧 V<sub>f</sub>が低下することな どが考えられる.

以上の方法で消費電力を概ね測定できることが確認された.しかし,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.

## 6.おわりに

小型魚ロボットを設計・試作し,動作確認等の当 初の目的は概ね達成された.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.