

実験用魚ロボットの旋回性能に関する研究

平田宏一（正，船舶技術研究所）

○ 藁科真一（非，東京電機大学）

1. まえかき

海中技術は，海洋開発，海洋調査及び海洋環境保全において極めて重要であり，そのような観点から，海中ロボットの開発が盛んに行われている¹⁾．他方，水中生活によく適応し，最も繁栄を誇っているのは「魚」である．本研究は，魚の泳法を模擬し，魚と同等の運動性能を有する無策無人海中ロボット（魚ロボット）の開発を目指しており，推進特性，旋回特性及び運動制御といった魚ロボットの基本特性を評価することを目的としている．

本報では，魚ロボットの旋回方法について検討した後，主として旋回性能に着目した実験用魚ロボットの設計・試作を行い，基本的な運動形式における旋回性能を測定した．

2. 旋回方法の種類と特徴

実際の魚は，胸びれや腹びれを巧みに利用し，旋回している．本報で設計・試作する魚ロボットは，運動制御を簡略化するために，胸びれ及び腹びれの運動を利用しない構造とした．魚ロボットが尾柄及び尾びれの運動だけを利用して旋回する場合，図 1 に示す 3 種の旋回方法に分類できると考えられる．それぞれの旋回方法の特徴は以下の通りである．

(1) 尾柄・尾びれの運動を左右に偏らせる方法

図 1(a)は，尾柄及び尾びれの運動を左右どちらかに偏らせて運動させる旋回方法である．これは，尾柄及び尾びれが推力を発生させながら，魚ロボットの頭部及び胴部が船舶における方向舵と同様の働きをすると考えられる．このように，推進と方向舵の 2 つの作用を考慮することで，旋回性能の解析や旋回角度の制御が比較的容易に可能であると考えられる．

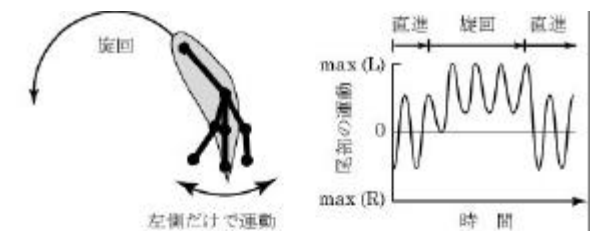
(2) 直進運動の慣性力を利用する方法

図 1(b)は，魚ロボットを直進運動させた状態から，尾柄及び尾びれを左右のどちらかに偏らせた状態で運動を停止させて旋回をさせる方法である．この方法は，上述した尾柄及び尾びれを左右に偏らせながら運動させる方法より，旋回直径を小さくできると

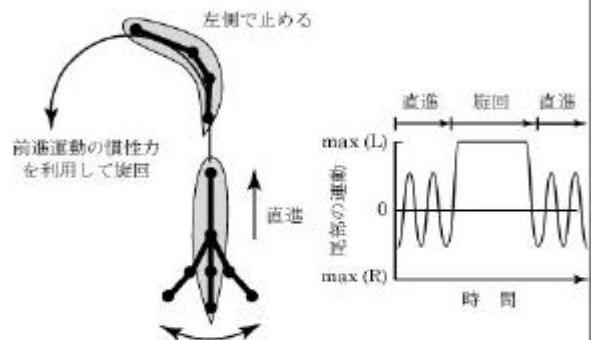
思われる．また，静止状態の魚ロボットの体形を 1 枚の翼とみなすことで，その揚力及び抗力を概算し，さらに直進運動時の慣性エネルギー（速度）の兼ね合いを考慮することで解析及び制御が可能であると考えられる．

(3) 往復部の慣性力及び抗力を利用する方法

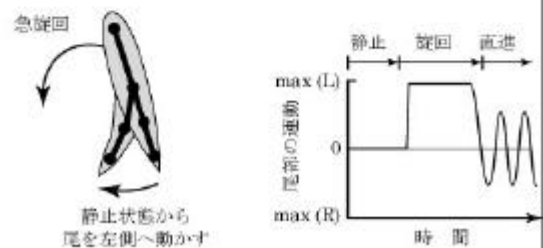
図 1(c)は，魚ロボットを静止させた状態から，尾柄及び尾びれを左右のどちらか一方に勢いよく運動させて旋回する方法である．これは，主として運動部の慣性力及び抗力を利用し，重心周りの回転モーメントを発生させる方法である．静止時からの旋回が可能であり，旋回直径を最も小さくできると考え



(a) 尾柄・尾びれの運動を左右に偏らせる方法



(b) 直進運動の慣性力を利用する方法



(c) 往復部の慣性力及び抗力を利用する方法

図 1 魚ロボットの旋回方法

られる．しかし，旋回角度の制御が困難であり，瞬時に旋回させるためには，尾柄及び尾びれを駆動させるための十分なトルクを有する動力源が必要となる．したがって，魚口ボットに使用する動力源のトルク及び運動速度等を十分に考慮する必要があると考えられる．

以上の3種の他にも，これらを組み合わせた方法などが考えられるが，旋回方法をこのように分類することで，魚口ボットの基本的な旋回性能を概ね把握できるものと考えている．

3．実験用魚口ボットの設計・試作

3.1 設計指針及び基本構造

上述の旋回方法について検討した結果，体高が高い体形（側扁形）の魚が急旋回や遊泳速度を変えるのに適していると考えられる．そのため，側扁形の体形を有するタイの体形を参考にして，実験用魚口ボットの設計・試作を行うこととした．さらに，実験の容易性並びに使用する動力源のトルク等を考慮して魚口ボットの小型化を目指すこととした．

魚の泳法を模擬する場合，尾柄及び尾びれの関節が多いほど滑らかな運動を実現できる．しかし，本報で設計・試作する魚口ボットでは，構造を略化するために関節を2つとし，尾柄及び尾びれを独立した2個のサーボモータ（フタバ製 S148）で駆動させることとした．また，尾柄及び尾びれを任意の運動パターンで運動させるため，R/C送信機とD/Aコンバータを取り付けたパーソナルコンピュータで運動制御を行うこととした²⁾．

また，魚口ボットの基本構造を検討するに当たって，魚口ボットの全長に対するサーボモータに必要なトルクについて検討した．計算を簡単にするため，魚口ボット周りの水の流れを考慮せず，尾柄及び尾びれの運動だけに着目した．タイの体形に基づき，諸寸法及び関節の位置等を設定し，尾柄及び尾びれをそれぞれ1枚の平板として考え，関節に作用する

トルクを計算した²⁾．周波数及び位相差などをパラメータとして計算した結果，使用するサーボモータは全長300 mm程度の魚口ボットを駆動させるのに十分なトルクを有していることが確認された．

3.2 形式の検討

設計指針及び基本構造を考慮して，図2に示すサーボモータ及びバッテリーの配置を提案し，それぞれの形式の特徴について検討した．

(1) Type A

図2(a)は，胴部に2個のサーボモータを上下方向に配置し，その上方にR/C受信機，下方にバッテリーを配置した形式である．この形式はリンク機構の高さが関節の近くに配置できるため，機構を構成しやすい．また，尾柄及び尾びれの長さのバランスもとりにやすい．しかし，バッテリー及びR/C受信機を配置する空間を十分にとりにくくなるという問題がある．

(2) Type B

図2(b)は，胴部に2個のサーボモータを横方向に配置し，その前方にバッテリー及びR/C受信機を配置した形式である．この形式は尾柄及び尾びれのバランスがとりやすく，バッテリーを配置する空間を大きくできる．しかし，リンク機構がやや複雑になり，また，体幅が厚くなり相対的に対高が低くなるため，旋回性能に劣る可能性がある．

(3) Type C

図2(c)は，胴部に2個のサーボモータを前後方向に配置し，その上方にR/C受信機，下方にバッテリーを配置した形式である．Type Aと同様，リンク機構を構成しやすい．しかも，バッテリーを配置する空間が十分に大きくでき，体幅を薄くできる．しかし，長さ方向に制限を設けた場合，尾柄及び尾びれの長さのバランスがとりにくい．

(4) Type D

図2(d)は，胴部にR/C受信機，バッテリー及び尾柄を駆動させるサーボモータ，尾柄の内部に尾びれを駆動させるサーボモータを内蔵した形式である．リンク機構が構成しやすく，バッテリーを配置する空間も十分に大きくできる．尾柄及び尾びれのバランスもとりにやすく，旋回性能に優れる可能性があると考えられる．しかし，尾柄の往復部質量が大きくなるため，尾柄を駆動させるサーボモータは大きなトルクを必要とする．

以上の検討結果を表1に示す．それぞれの特徴を詳細に検討した結果，タイの体形に類似させること

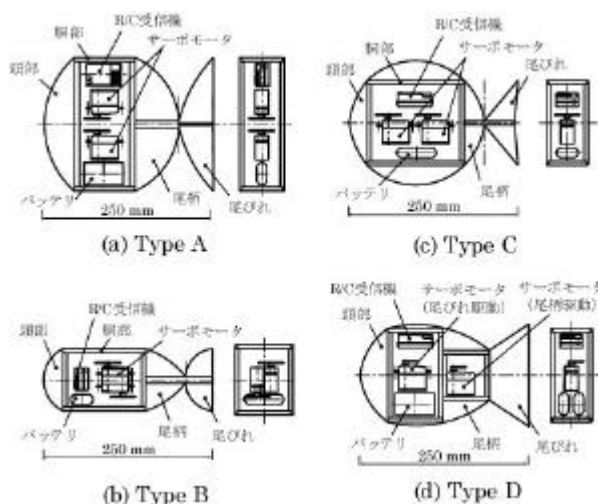


図2 魚口ボットの形式

表1 提案した魚口ボットの特徴

	Type A	Type B	Type C	Type D
体形	○		○	
旋回性能	○		×	○
尾柄・尾びれのバランス	○	○	×	
リンク機構の構成	○	×	○	○
バッテリー搭載空間		○		

が比較的容易であり、最も高い旋回性能を有すると考えられる Type D を採用することとし、詳細設計を進めた。

3.3 詳細構造及び試作

以上の検討結果並びにリンク機構の構成等を踏まえて、図 3 及び図 4 に示す実験用魚口ボットを試作した。全長は約 340 mm であり、頭部に R/C 受信機、胴部にバッテリー及び尾柄を駆動させるサーボモータを配置し、尾柄には尾びれを駆動させるサーボモータを内蔵している。リンク機構部の防水は、ゴム製の防水ブーツを使用している。関節の位置は、タイの体形を参考にして概ね決定しているが、関節数が少ないこと及び機械部品の形状等により制限を受けている。

頭部及び胴部の上部は、硬質発泡ウレタンを用いて外形を整えている。また、頭部及び胴部の下部には S45C 製のバランス（おもり）を取り付けている。運転時には魚口ボットの上部に取り付けたアンテナにバルサ製のフロートを取り付けることで浮力をバランスさせて、一定の水深で運動させる。往復運動を行う尾柄部の外形を整えるには極めて軟質な材料を用いる必要があるが、その材料の選定は難しい。以下の実験は、尾柄部の外形を整えない状態で行っている。なお、尾びれには硬質な木材を使用している。

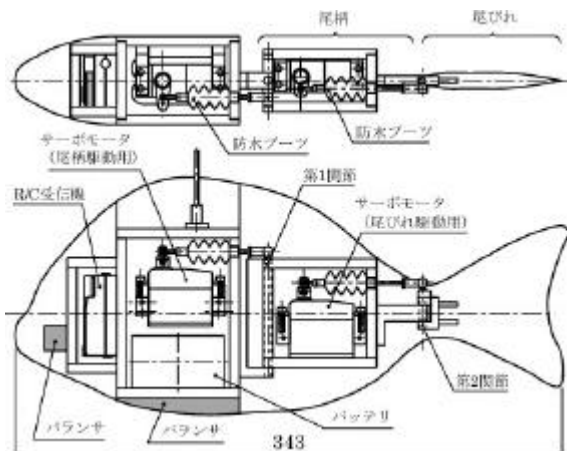


図 3 実験用魚口ボットの構造

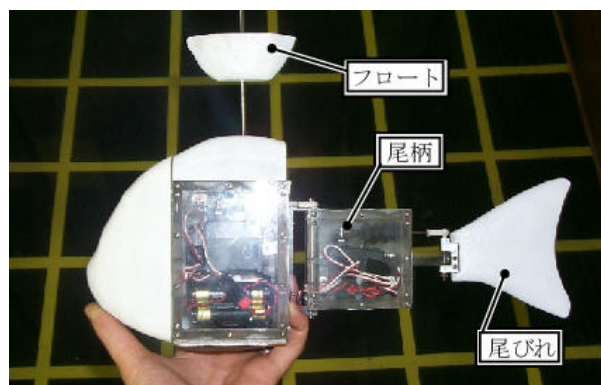


図 4 実験用魚口ボットの外観

4. 実験用魚口ボットの旋回性能

4.1 実験方法

魚口ボットの運動形式は極めて多様である。以下では、旋回性能実験の第一段階として、上述の尾柄・尾びれの運動を左右に偏らせる方法を用い、運動波形を正弦状として旋回性能を測定した。

図 5 は本実験における運動形式の概略を示している。胴部に対する尾柄の角度 A_1 (deg) 及び尾柄に対する尾びれの角度 A_2 (deg) は次式で表される。

$$A_1 = K_a A_{1\max} \sin q + A_{1\max} (1 - K_a) K_i \quad (1)$$

$$A_2 = K_a A_{2\max} \sin(q - b) + A_{2\max} (1 - K_a) K_i \quad (2)$$

ここで、 $A_{1\max}$ 及び $A_{2\max}$ は尾柄及び尾びれの最大振れ角であり、以下の実験において $A_{1\max} = 30$ deg, $A_{2\max} = 40$ deg に設定している。 K_a は振幅の度合いを表す係数 (0 ~ 1), K_i は偏りの度合いを表す係数 (-1 ~ 1, 直進時は 0) である。 K_a 及び K_i は尾柄と尾びれとで独立して設定できるが、以下の実験では全て同一な値としている。 b は尾柄と尾びれとの位相差, q は $2\pi ft$ (f : 周波数, t : 時間) で表される変化角 (0 ~ 360 deg) である。以下の実験においては、周波数 f を 2.2 Hz, 位相差 b を 90 deg に一定とし、振幅度 K_a は 0.2 から 0.5, 偏り度 K_i は 0.6 から 1.0 の範囲で測定を行った。

また、実験は 0.9 m × 0.9 m, 深さ 0.4 m 程度の小型水槽で行い、水槽の上方約 2 m の高さに設置したビデオカメラで得られる画像により、旋回直径 D 及び 360 deg の旋回を行う場合の旋回時間 T を求めた。

4.2 実験結果

実験結果の一例として、図 6 は旋回運動時の合成写真を示している。これより、魚口ボットは概ね適切な円運動を行っていることがわかる。

図 7 に振幅度 K_a に対する旋回直径 D 及び旋回時間 T の測定結果を示す。これより、振幅度 K_a が小

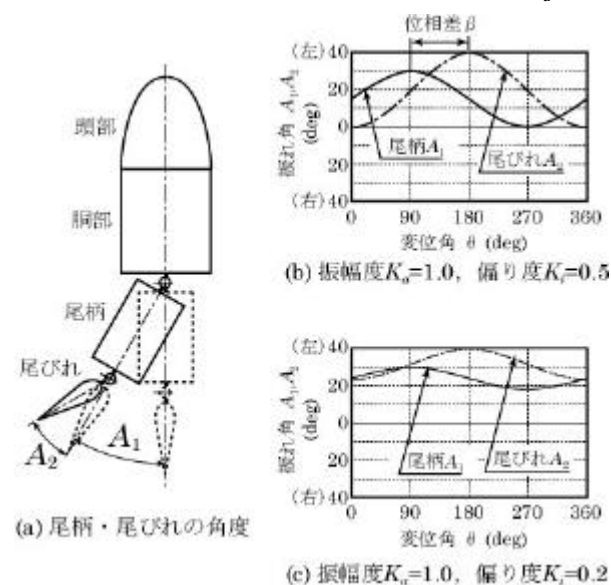
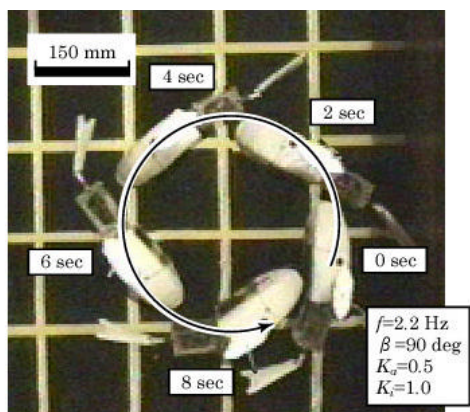
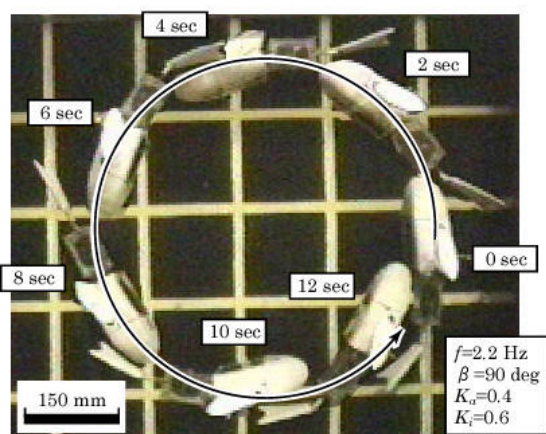


図 5 魚口ボットの運動形式



(a) 振幅度 $K_a=0.5$, 偏り度 $K_i=1.0$



(b) 振幅度 $K_a=0.4$, 偏り度 $K_i=0.6$

図6 実験用魚ロボットの旋回運動

さいほど旋回直径 D が減少し、旋回時間 T が長くなることわかる。これは振幅度 K_a が小さいほど、魚ロボットの推力が小さくなるものの、尾柄及び尾びれの偏りが相対的に大きくなるためであると考えられる。また、旋回直径 D は、偏り度 K_i の増大に伴い小さくなるが、偏り度 K_i が周期 T に与える影響はかなり小さいことがわかる。

図8に振幅度 K_a に対する平均速度 $V (=2\pi D/T)$ との関係を示す。平均速度 V は、振幅度 K_a の増大に伴い概ね直線的に上昇していることがわかる。また、平均速度 V は、偏り度 K_i が小さいほど高くなっている。これは、振幅度 K_a が大きく、偏り度 K_i が小さいほど魚ロボットを前進させるための推力が増大するためであると考えられる。

5. あとがき

以上、魚ロボットの旋回方法について検討し、旋回性能に着目した実験用魚ロボットの設計・試作を行った。そして、最も基本的な運動形式パターンにおける旋回性能を測定し、概ね予想通りの運動を行うことが確認できた。今後、さらに複雑かつ多様な運動パターンにおける旋回性能を測定し、旋回直径

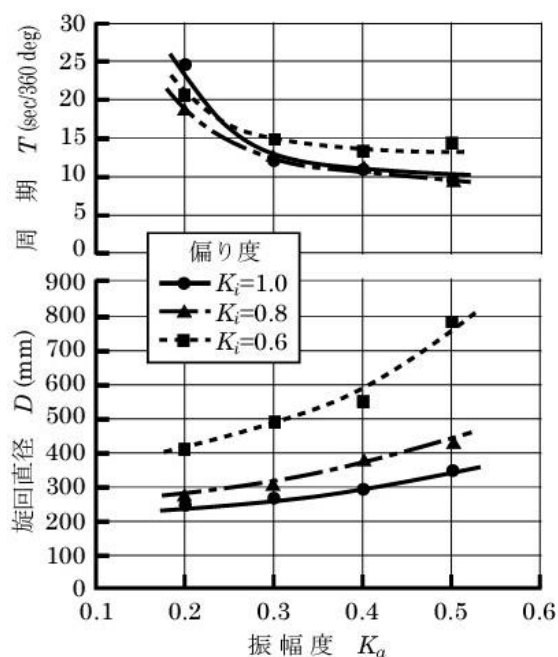


図7 振幅度と旋回直径及び旋回時間との関係

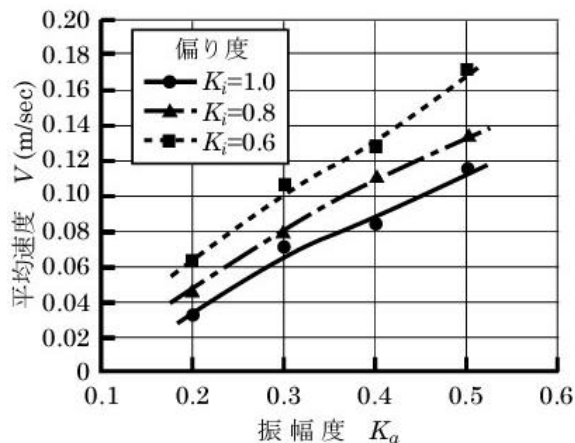


図8 振幅度と平均速度との関係

や旋回角度の運動制御性等を含めて、魚ロボットに適した旋回方法について考察する予定である。

参考文献

- 1) (社)日本造船学会海中技術専門委員会：海中技術一般，成山堂(1992)。
- 2) 平田宏一：小型魚ロボットの設計・試作，日本設計工学会平成 11 年度春期研究発表講演会講演論文集，No.99 - 春季(1999)，29/32。