

多用途化を目指したユニット式魚ロボットの開発

○平田宏一（正，海上技術安全研究所）
河合秀祐（日立製作所）

1. まえがき

近年，海洋開発や海洋環境保全の観点から，海中ロボット開発が極めて重要な課題となっている。そのような背景に基づき，著者らは高い遊泳性能を有する海中作業ロボットの開発を目指して，魚の泳法を模擬したロボットの研究を進めている。現在までに，数種の魚ロボットを製作し，推進性能や旋回性能を測定してきた^{1)~3)}。その結果，尾部に数個の関節を持つ魚ロボットは，実際の魚のように滑らかな遊泳ができることが確認された。一方，実際の海中には，様々な種類の魚が生活している。それぞれの魚は，体形や運動形式が異なり，それぞれ特有の遊泳能力を持つ。それらの特徴を活かして魚ロボットを設計することで，様々な用途に使用可能な魚ロボットを開発できると考えられる。本報では，これらの観点から，高性能化・多用途化を目指して，各構成要素をユニット化した全長約1 mの魚ロボットを開発する。

2 魚ロボットの高性能化及び多用途化

2.1 魚ロボットの遊泳能力

魚ロボットの遊泳能力には遊泳速度や旋回性能等，様々な評価指標がある。その中でも，尾ひれの振動による推進の有効性を表す指標として，永井らが提案している泳動数⁵⁾を用いて検討する。泳動数 N_s は，尾ひれの周波数 f (Hz)，全長 L (m)，速度 v (m/s)を用いて次式で定義される。

$$N_s = \frac{v}{L \cdot f} \quad (1)$$

すなわち，泳動数は尾ひれを1周期動かしたときに進む全長当たりの遊泳距離を表しており，数値が大きいほど遊泳能力が高いことを示している。

表1は，現在までに開発した4種類の魚ロボット（図1）において，最高速度が得られた測定結果に基づく泳動数の値を示している。これより，Model Dの遊泳速度は，Model A～Cよりも高いものの泳動数はそれらよりもかなり低いことがわかる。これは，Model A～Cが複数の関節をサーボモータで駆動することにより，尾柄と尾ひれとの間に適切な位相差を設けているためであると考えられる。一方，Model Dは，直流モータによって尾部を高い周波数で振動させているため遊泳速度は高い。しかし，関節が1つだけであるので，水を押し出す力が弱く，泳動数が低くなったと考えられる。これらの魚ロボットは尾部の振幅や体形，設計目的等が大きく異なるため，遊泳能力について詳細に比較・検討することはできないが，魚ロボットの遊泳能力を向上させるためには，比較的高い周波数で尾部を振動させ，しかも尾柄と尾ひれの間に適切な位相差を設けることが重要であると推測される。本報で開発する魚ロボットは，高い周波数で尾部を運動できる直流モータを使用

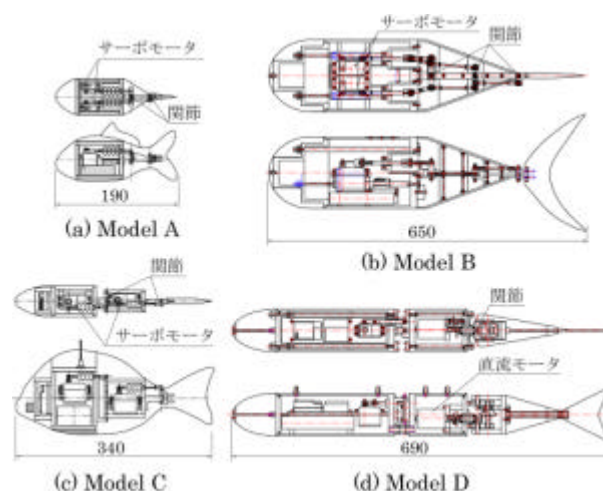


図1 現在までに開発した実験用魚ロボット

表1 魚ロボットの泳動数

	体長 L (m)	周波数 f (Hz)	速度 v (m/s)	泳動数 N_s	関節数	動力源	文献
Model A	0.19	3	0.18	0.32	2	サーボモータ	(1)
Model B	0.60	3	0.39	0.22	3	サーボモータ	(2)
Model C	0.34	2.3	0.20	0.26	2	サーボモータ	(3)
Model D	0.69	11	0.68	0.09	1	直流モータ	(4)
イルカ（参考）	2	5	10	1	-----	-----	(5)

し、適切な位相差を設けるために尾部に特殊な駆動機構を採用する。

2.2 魚ロボットの用途と要求される機能

海中ロボットは、海中観測や水中機器の点検・保守、水中生物の生態観測等の様々な用途に使われる。それらの用途によって、海中ロボットに要求される遊泳速度、旋回性能及び連続航行時間等の性能はもちろん、搭載する計測装置等も大きく異なる。これらを踏まえて、魚ロボットの多用途化を考えた場合、各構成要素をユニット化することが有効であると考えられる。図2に示すように、各ユニットの配置を変更し、魚ロボットの体形を変えることによって、異なる遊泳速度や旋回性能を得ることができる。また、搭載する動力源や計測機器の変更によって、それぞれの用途に見合った連続航行時間あるいは機能を得ることができるものと考えられる。

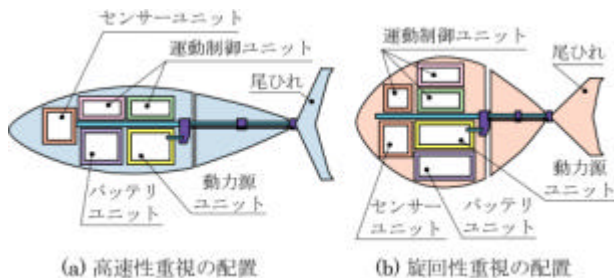


図2 ユニット式魚ロボットのイメージ

3. ユニット式魚ロボットの開発

3.1 全体構造

以上の検討に基づき、図3に示す実験用魚ロボットを設計・試作した。本魚ロボットは、全長が約1mであり、推進動力源として直流モータを使用している。そして、直流モータや減速機構等が内蔵されたパワーユニット、2つの関節を動かす特殊な駆動機構、旋回運動及び上下運動を行うた

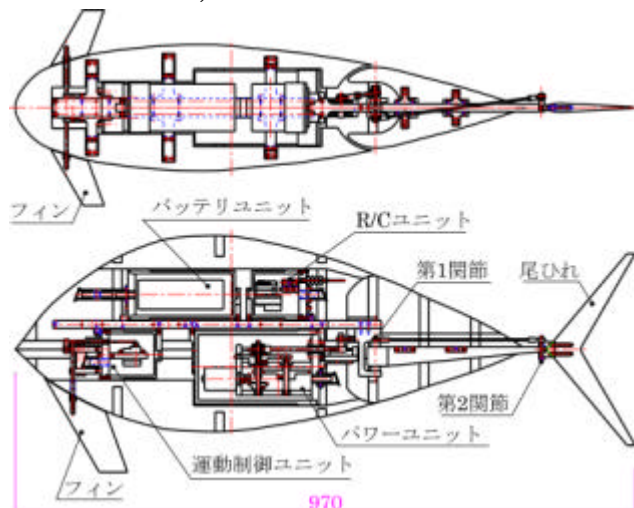


図3 ユニット式魚ロボットの構造

めの機構が内蔵された運動制御ユニット、無線操縦のための受信機等を内蔵したR/Cユニット及びバッテリーユニットで構成されている。これらは、流線形胴体の形状及び重心位置と浮心位置のバランス等を考慮して配置されている。

各ユニットの防水には、主としてOリングを使用している。また、各ユニット間の配線は、ケースにニップルを取り付け、シリコンゴム製のホースにより防水した。

3.2 パワーユニットの構造

図4にパワーユニットの構造を示す。パワーユニットには、市販のラジコン模型用直流モータ、歯車減速機構及び直流モータの回転運動を往復運動に変換するスコッチ・ヨーク機構が内蔵されている。減速比は、モータと尾部のトルク・出力特性を概算し、適当な運動範囲となるように決めた。本魚ロボットでは、6枚の歯車を用いて1/40.5の減速比としている。

スコッチ・ヨーク機構は、クランクディスクの偏心させた位置にクランクピンを取り付け、長穴をあけたヨークを往復運動させる。スコッチ・ヨーク機構につなげられたロッドは市販の直動軸受(ASK社)によってシールされている。そのPTFE製のシール面の損傷を防ぐため、ロッドのサイドスラストをできる限り低減する必要がある。スコッチ・ヨーク機構に取り付けた直動玉軸受やケースの後方に取り付けたガイドはサイドスラストを低減するために有効である。

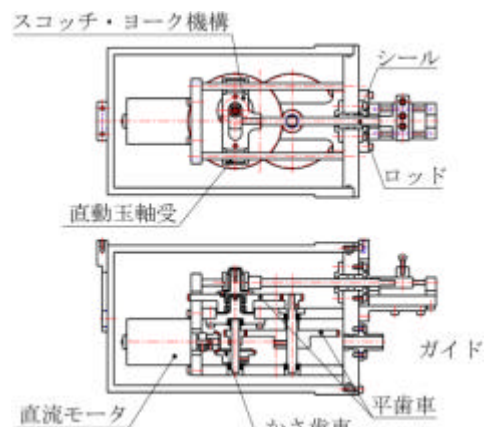
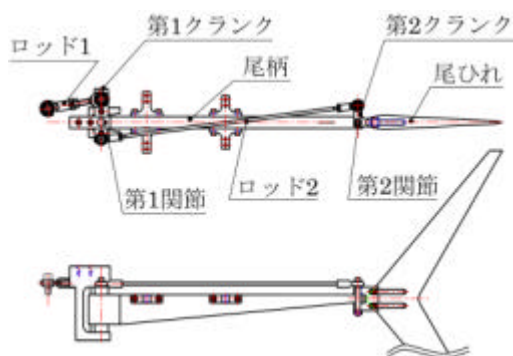


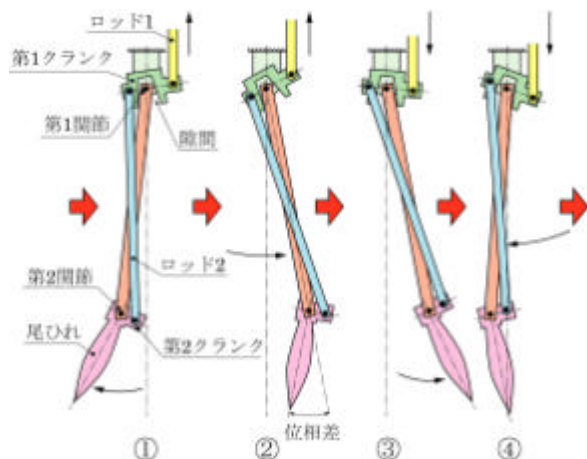
図4 パワーユニットの構造

3.3 尾部駆動機構の構造

図5に尾部の駆動機構を示す。本機構は、比較的簡単な構造でありながら、高い周波数で、しかも適切な位相差で運動する。本機構は、第1関節及び第2関節の2つの関節から構成され、尾柄は第1関節を中心に回転し、尾ひれは第2関節を中心に回転する。また、第1関節には、往復運動を行うロッド1につなげられた第1クランクが取り



(a) 構造



(b) 駆動機構の運動

図5 尾部の駆動機構

付けられている。本機構の特徴は、第1クランクと尾柄の間に隙間があること、第1クランクと第2クランクとをつなぐロッド2を左右に交差させていることである。

図5(b)に本機構の運動を示す。①→②の段階では、ロッド1が上方へ移動する。その際、尾柄及び尾ひれは、右側からの水の抵抗を受けるため、左側の隙間がない状態で、一定の位相角を保って運動する。②→③の段階では、ロッド1が下方へ移動する。この際、尾柄が受ける水の抵抗が尾ひれが受ける抵抗より大きくなるように尾部の投影面積を設定しておく、尾柄が右側で静止した状態で、尾ひれだけが第2関節を中心に回転する。すなわち、第1関節に設けた隙間の分だけロッド2が引かれ、それに連結した尾ひれが運動する。そして、この段階で左側の隙間が生じる。③→④及び④→①の段階では、以上と同様に尾柄及び尾ひれが運動する。

3.4 運動制御ユニットの構造

旋回運動については、尾部を偏らせて魚ロボット胴体の流体力を利用することで高い旋回性能を実現できることを確認している²⁾。しかし、本魚ロボットでは、駆動機構の構造上、尾部を偏らせて運動させることが難しい。そのため、頭部下方

に旋回用フィンを取り付けることで、方向修正程度の旋回性能を期待した。上下運動については、実際の魚と同様、浮き袋を持つ形式、頭部または尾部を上下方向に傾けて胴体の流体力を利用する形式、フィンを利用する形式等を検討した。本魚ロボットでは、取り付けが最も容易であるフィンを利用する形式を採用した。

図3に示す運動制御ユニットの内部には2つのサーボモータ（フタバ、S3101）が内蔵されており、それぞれ旋回運動用フィン及び胴体左右に取り付けた上下運動用フィンを動かす。フィンを用いて魚ロボットを運動させる場合、魚ロボットの運動性能は、重心位置からフィンまでの距離によって大きく異なる。フィンを重心位置に配置した場合、回転モーメントが働かず、魚ロボットは進行方向に対して胴体の向きを変えず平行移動する。フィンが重心位置から離れている場合、回転モーメントが働き、胴体の向きを変えて回転運動する。本魚ロボットでは、後者の運動を期待して、フィンを重心からなるべく離れた位置に配置した。

3.5 胴体形状と重心・浮心位置

魚ロボットの胴体形状は遊泳速度等の推進性能に大きく影響を及ぼす。遊泳時の水の抗力が小さい流線形とすることが望ましいが、実際には構成要素の形状、重心や浮心の位置等に制限を受け、流体力学的な検討だけで胴体形状を決定することはできない。本魚ロボットの胴体形状を選定するに当たっては流体力学的特性の他、(i)構成部品の配置の適合性、(ii)排水量と重量のバランス、(iii)重心と浮心のバランス、(iv)製作の容易性について検討した。

重心と浮心のバランスは、魚ロボットを試作した後、水槽に浮かべ、FRP製胴体並びに尾柄への浮力材（発泡ウレタン）の挿入量を調節し、胴体が水面上に20 mm程度露出するように調整した。

4. 魚ロボットの遊泳性能

4.1 実験方法

魚ロボットを試作した後、長さ25 m、幅10 m、深さ2～5 m程度の屋外水槽で遊泳性能を測定した。遊泳速度の測定においては、魚ロボットの胴体が水面上に20 mm程度露出する位置で水平遊泳させ、2 mの距離を通過する時間をストップウォッチによって測定し、速度を求めた。尾部の周波数は、ビデオカメラで撮影した映像から求めた。

4.2 遊泳速度及び泳動数

図6は、尾部の片側振幅を5、10及び15°と

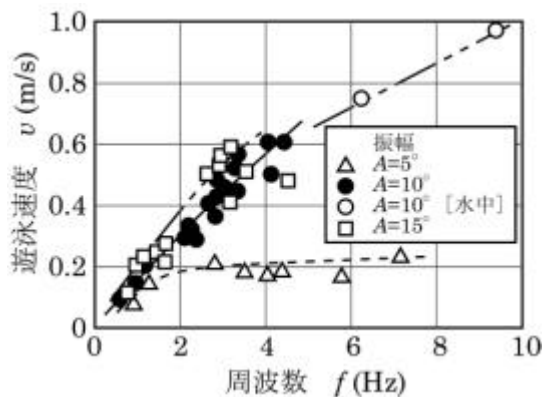


図6 周波数と遊泳速度の関係

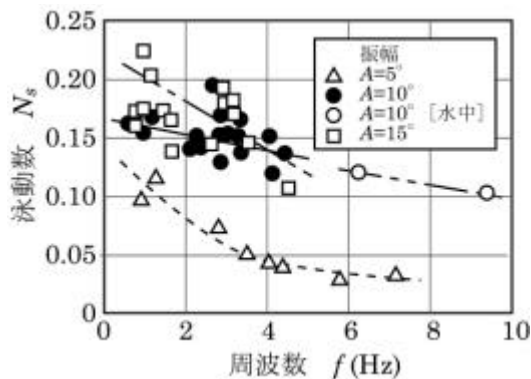


図7 周波数と泳動数の関係

した場合、周波数に対する遊泳速度の実験結果を示している。振幅を 5° とした場合、遊泳速度は、周波数が約 2 Hz 以上でほぼ一定となっている。これは、尾部駆動機構の隙間に起因する構造上の問題であると考えられる。振幅を 10° とした場合、速度はほぼ直線的に上昇している。振幅を 15° とした場合、測定した範囲において、振幅 10° と比べて速度の大幅な上昇は見られなかった。これは、魚ロボットの胴体が尾部の振動の反作用を受けたため直立状態を保てず、適切な推進力が得られなかったためであると考えられる。

一方、速度が約 0.6 m/s を超えると、魚ロボットは安定した水平遊泳ができなくなり、フィンの動作に関わらず水中に潜る現象が見られた。そのため、再現性のある実験結果を得ることはできなかった。水中を水平遊泳しているビデオ映像から速度を求めたところ、振幅 10° 、周波数 9 Hz において 0.97 m/s であった。これは図1(d)の魚ロボットの 1.4 倍程度の速度である。

図7は同実験条件における周波数 f と泳動数 N_s の関係を示している。これより、泳動数はどの振幅においても周波数の増加に伴い減少していることがわかる。振幅が 10° 及び 15° の場合、測定した範囲では $N_s=0.1\sim0.2$ 程度の結果であった。これは図1(a)～(c)の魚ロボットに比べてわずかに低い値であるが、それらの魚ロボットが複数の

サーボモータで尾部を駆動していることを考えれば、本魚ロボットに採用した尾部駆動機構が有効に機能していると考えられる。

4.3 旋回運動及び上下運動

上述の通り、本魚ロボットでは、フィンによる3次元運動を試みた。旋回運動については、フィンによって働く力が魚ロボットを旋回させる方向に働かず、魚ロボット自体をローリングさせる結果となり、期待した運動を実現できなかった。高い旋回性能を得るためには、胴体の流体力を有効に利用することが必要であると考えられる。

一方、上下運動はフィンにより上下に 1 m 程度の深度で任意に操縦することができた。しかし、上述のように、速度が 0.6 m/s を超えると、フィンの動作に関わらず、水中に潜る現象が見られた。この現象は、胴体形状による流体力その他、浮力と重力の関係等が影響しているものと考えられる。

以上のように、旋回運動及び上下運動については安定した操作特性が得られず、今後の課題として残されている。

5. あとがき

本報では、高性能化・多用途化を目指したユニット式魚ロボットを開発し、試験水槽で遊泳性能を測定した。その結果、特殊な尾部駆動機構が適切に動作し、最高 0.97 m/s の速度で遊泳することが確認できた。また、フィンによる旋回運動及び上下運動についての様々な知見が得られた。さらに、魚ロボットをユニット化することが、魚ロボットの大型化やシール構造の簡単化等に有効であることが確認できた。

これらの結果を踏まえて、新たな高性能魚ロボットの開発並びに魚ロボットを自律化させるための制御・計測技術についての研究に着手したいと考えている。

参考文献

- 1) 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(1999), p.29-32.
- 2) 平田宏一：実験用魚ロボットの推進性能, 日本設計工学会平成 12 年度春期研究発表講演会講演論文集(2000), p.163-166.
- 3) 平田宏一, 藁科真一：実験用魚ロボットの旋回性能に関する研究, 日本設計工学会東北支部, 平成 11 年度研究発表講演会(1999), p.68-71.
- 4) 平田宏一：高速化を目指した実験用魚ロボットの開発, 日本設計工学会平成 13 年度春期研究発表講演会講演論文集(2001), p.69-72.
- 5) 永井實：イルカに学ぶ流体力学, オーム社(1999), p.10-11

