

実験用ウミガメ型海中ロボットの設計・試作

- 古屋拓郎 (工学院大学)
- 金野祥久 (工学院大学)
- 水野明哲 (工学院大学)
- 菱沼和久 (工学院大学)
- 平田宏一 (正, 海上技術安全研究所)
- 川田正國 (海上技術安全研究所)

1. はじめに

近年, 水棲生物の優れた遊泳能力に着目した海中ロボットやひれ型推進の研究開発が国内外で活発に行われている。水棲生物のように優れた遊泳能力を有する海中ロボットが開発されれば, 海洋開発や海洋環境保全に多に貢献すると考えられる。そのような観点から, 著者らは, 主として魚の尾ひれの動きを模擬する海中ロボット (魚ロボット) に関する研究を行ってきた¹⁾。一方, 海中には様々な種類の水棲生物が生活している。それぞれの水棲生物は体形や運動様式が異なり, 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, 海中ロボットを設計することで, 様々な用途に使用可能な海中ロボットを開発することができると考えられる。

様々な様式がある水棲生物の中で, マンタやウミガメなどに見られる羽ばたき型推進は, 推進に揚力を最大限に利用することで, 推進効率の向上, さらに左右2つのひれを使用することによる多様な運動の実現が可能であると考えられる。本研究では, 海中ロボット開発における羽ばたき型推進の有効性を検討するため, ウミガメをモデルとした実験用ウミガメ型海中ロボットを設計・試作し, 性能評価を行う。

2. 実験用ウミガメ型海中ロボットの設計 試作

2.1 設計指針

図1にウミガメの外観を示す。ウミガメは, 前方に左右2つの前肢を, 後方に左右2つの後肢を持つ。ウミガメは, 陸上に生息しているカメとは異なり, 生誕直後とメスが産卵するときを除き, 一生を海で過ごす。そのため, 前肢 (以下, 前ひれ) と後肢 (以下, 後ひれ) は, 水中生活に適応するために, 形状がひれ

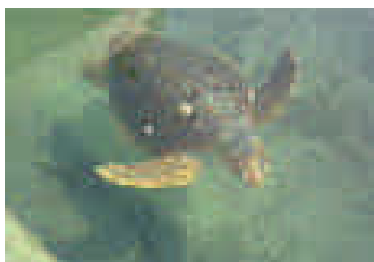


図1 ウミガメの外観

状になっている²⁾。

ウミガメの前ひれは翼形状で弾性があり, 後ひれは板状になっている。前ひれを羽ばたかせることで推進力を発生させて遊泳し, 後ひれは舵取りやバランスを取るために使用されている。また, 胴体は固い甲羅に覆われ, 運動による形状変化がない。実際のウミガメの前ひれには, 肩部と肘部に2つの関節があり, 人間の腕の構造に類似し, 複雑な運動を行う。前ひれの羽ばたきで遊泳するウミガメの泳ぎ方をビデオ映像から簡易的に解析した結果, 主として前ひれは上下方向の振幅運動とひねり運動を組み合わせた運動を行っていることがわかった。ウミガメは, 前ひれの迎角を適切に変化させることで, 前ひれに働く揚力の推進方向成分を最大限に利用し, 遊泳していると考えられる。

本研究で設計・試作する実験用ロボットは, 実際のウミガメの泳ぎ方を参考にし, 前方に左右2つの前ひれを配置し, その羽ばたき運動によって推進させる。関節の数は, 構造を簡略化するために1つとする。さらに, 左右2つの後ひれを配置し, 前ひれの運動と後ひれの運動を複合的に組み合わせることで, 旋回や上下運動を実現させる。

2.2 実験用ウミガメ型海中ロボットの基本構造

図2に実験用ウミガメ型海中ロボットの外観, 図3に構造を示す。本ロボットの全長は570 mm, 全幅は前ひれ関節間が約440 mm, 全高は約200 mmである。胴体形状は, 流体抵抗を抑えるために紡錘型とした。ひれを動かす動力源には, ステッピングモータおよびR/Cサーボモータを使用している。本実験用ロボットは, 前ひれに上下方向の振幅運動とひねり運動を同時に与えることで推進力を発生させる。また, 左右の2つの前ひれの運動を独立に制御することで, 多様な運動を行うことができる。

本実験用ロボットの骨格は, 3つのアクリル製水密ケース (ケース1, ケース2, ケース3) から構成さ

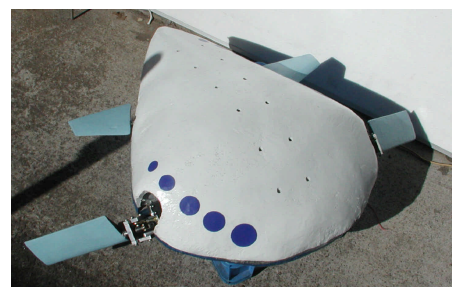


図2 実験用ウミガメ型海中ロボット Turtle-2005

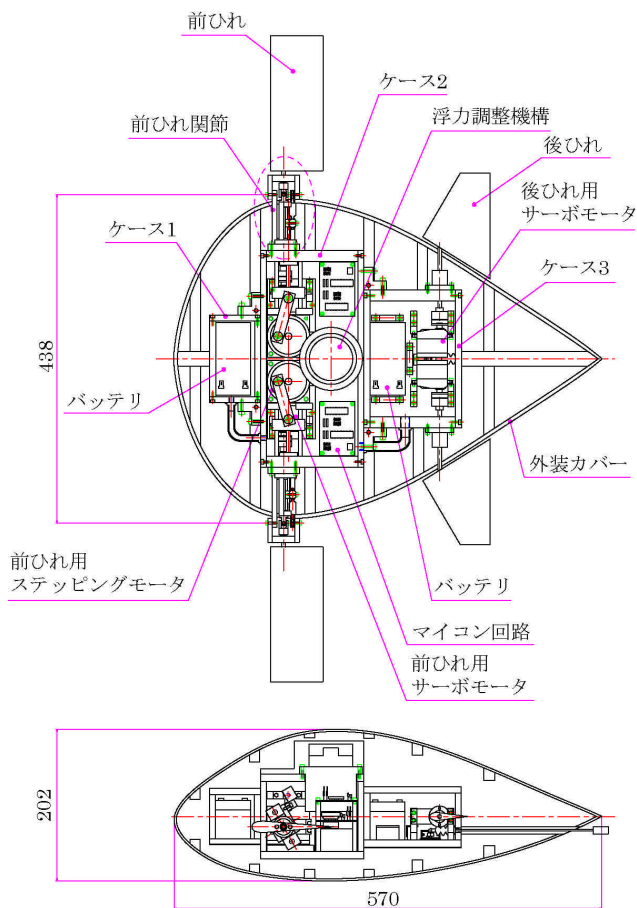


図3 実験用ウミガメ型海中口ボットの構造

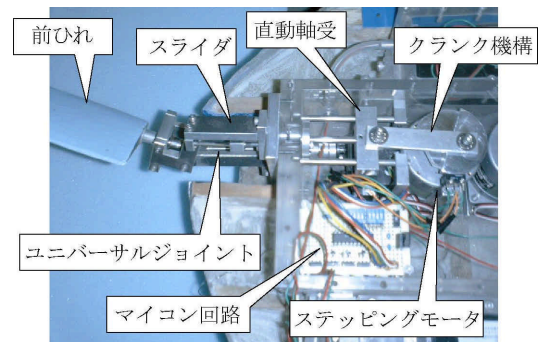
れる．ケース1には，バッテリーが内蔵され，ケース2には，前ひれを駆動するためのステッピングモータ，R/C サーボモータ，ステッピングモータ駆動回路，R/C サーボモータ制御回路および上下運動用の浮力調節機構が内蔵されている．ケース3には，後ひれを駆動するための R/C サーボモータ，バッテリーおよび R/C 受信機が内蔵されている．なお，これらの内部機器の配置は，重心位置と胴体形状を考慮して決定した．各ケース間の配線は，ニップルとシリコンゴム製のチューブを使用し防水している．また，水密ケースの防水には，シリコンゴム製のシートを使用している．水密ケースの外側には流体抵抗を抑えるための FRP 製の外装カバーが付けられている．

2.3 前ひれ運動部の構造

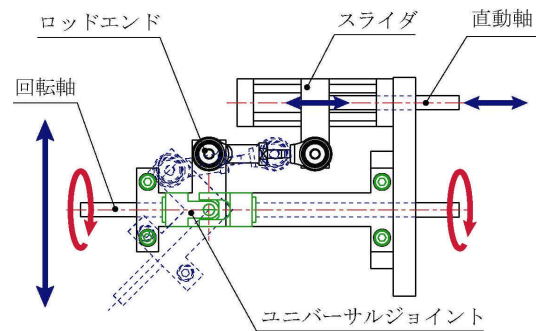
本実験用口ボットは，前ひれに上下方向の振幅運動とひねり運動である軸の回転運動を組み合わせた運動を与えて推進力を発生させる．そのため，前ひれの関節には2自由度の運動が必要になる．図4に示す前ひれ運動機構では，前ひれ関節にユニバーサルジョイントを組み込むことで，2自由度の運動を可能としている．

上下方向の振幅運動は，ステッピングモータとクランク機構を使用し，直動軸を往復運動させることで行う．軸の回転運動は，R/C サーボモータを回転軸に直結することで行う．

本実験用口ボットでは，クランク機構に連結された直動軸を往復運動させることで，前ひれの振幅運動を



(a) 外観



(b) 構造

図4 前ひれ運動部の構造

行っている．そのため，振幅運動において，直動軸に横方向のサイドスラストが発生する．これまで，筆者らによって設計・試作された魚口ボットでは，往復運動部の水密にラジコンボート用のゴムブーツを使用することが多かった．本実験用口ボットでは，前ひれをできる限り大きく振幅運動させることとし，振幅の最大角度をユニバーサルジョイントの運動制限である $\pm 45^\circ$ と設定した．そのため，直動軸のストロークが大きくなり，ゴムブーツによる水密は適していないと判断した．そこで，本実験用口ボットの直動軸の水密には，魚口ボット UPF-2001³⁾で実績のある摺り合わせシール構造とした．

直動軸と回転軸のシール面には，リーマ加工を施している．シール面の損傷を防ぐために，サイドスラストをできる限り低減する必要がある．そこで，水密ケース内部にガイドを設けてクランク機構によるサイドスラストを低減させる構造とした．さらに，水密ケース外部の関節機構によるサイドスラストを低減するため，水密ケースの外部にもガイドを取り付けた．なお，各部品を組み立てた後の動作確認では，前ひれはスムーズな動作を実現できなかった．その原因として，前ひれの駆動部を水密ケース内部と外部とで分割構造としたことや水密ケース内部のスライダのガイドに高精度な直動軸受を設けたことによって部品の拘束が厳しくなったことなどがあげられる．これらの問題については内部の部品を再加工することで解決した．

2.4 前ひれの運動制御

羽ばたきの動作において，上下方向の振幅運動とひねり運動である軸の回転運動に適切な位相差を持た

せて運動させると、打ち上げ・打ち下ろしの両方で前向きの推進力が発生する⁴⁾。

本実験用ロボットは、前ひれの上下方向の振幅運動とひねり運動である軸の回転運動を同期させて、適切な迎角を与える。同期は、カムによるスイッチの切り換えを利用する。ステッピングモータのクランクディスクに2つのカムを取り付け、ステッピングモータの回転角に応じて、カムがスイッチを切り換えることで、回転角度に対応する信号を発生させる。この信号をマイコンに取り込み、信号に応じて R/C サーボモータの回転角を制御することで、適切な迎角を与える。

2.5 後ひれ運動部の構造

後ひれは、回転軸に R/C サーボモータに直結することで運動させ、旋回運動や上下運動のときに、前ひれの運動と組み合わせて使用する。旋回運動は、片方の前ひれを停止させ、推進力を一方に偏らせることで行う。このとき、停止している前ひれと逆の後ひれを推進方向に垂直にすることで、後ひれに抵抗を発生させて旋回運動を補助する。上下運動は、後ひれにフィンの役目を持たせ、流体力により行う。

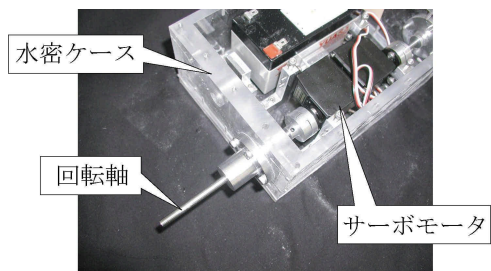


図5 後ひれ運動部の外観

2.6 浮力調整機構

上下運動を確実に行うために、空気の体積変化を利用した浮力調整機構を重心近くに搭載可能な構造とした。図6は検討を進めている浮力調整機構の構造を示している。浮力調整機構は、ピストンとシリンダを持ち、ピストン部に取り付けられた雄ねじとシリンダ部に取り付けた雌ねじの相対回転運動により、ピストンが伸縮する。そのピストンの伸縮により、内部空気の体積、すなわち浮力を変化させる。雌ねじの回転には若干の改造を施した R/C サーボモータを使用する。なお、以下の遊泳実験においては浮力調整機構を取り付けていない。

2.7 システム構成

図7に本実験用ロボットのシステム構成図を示す。本実験用ロボットは、図7に示すシステム構成の元に、設計・試作を行った。現段階では、浮力調整機構および後ひれの制御は行っており、前ひれのみの制御になっている。

3.動作特性および遊泳性能

3.1 前ひれの動作特性

本実験用ロボットを試作した後、本実験用ロボットの前ひれの動きと実際のウミガメの前ひれの動きを比較した。本実験用ロボットの前ひれの動きは、ビデオカメラで撮影した映像を解析することで確認

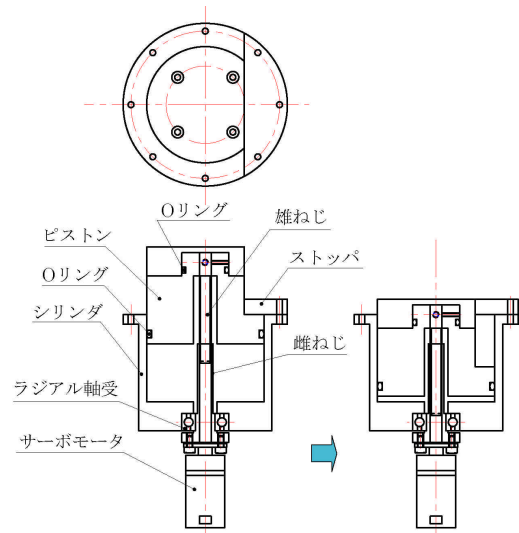


図6 浮力調整機構の構造

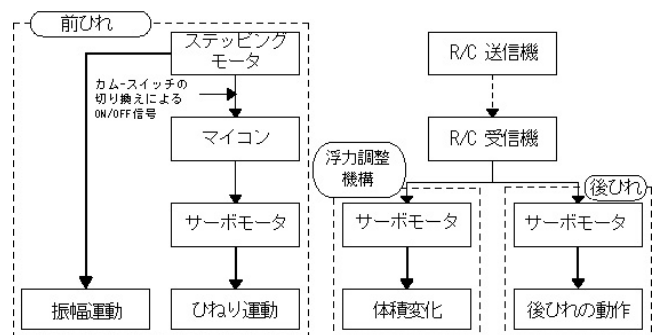


図7 システム構成図

した。同様に、実際のウミガメの前ひれの動きも前進時のビデオ映像を解析した。ただし、実際のウミガメの動きは一樣ではなく、解析に適した映像を撮ることが困難であったため、ここでの解析は、運動様式の一例として認識している。

図8は、前ひれの1周期の変化角度に対する前ひれ前縁高さを翼弦長さで除した無次元高さとして迎角の変化を示している。これより、本実験用ロボットの前ひれの動きは、実際のウミガメの前ひれの動きをよく模擬できていることを確認できた。

3.2 遊泳試験結果および考察

海上技術安全研究所内の魚口ロボット試験水槽において、遊泳試験を行った。以下の遊泳試験において、実験用ロボットは水上付近で遊泳させ、前ひれ周波数を変化させた場合の遊泳速度を測定した。

遊泳速度の測定において、実験用ロボットを0.5 m間隔に区切った区間を直進運動させ、概ね一定速度で遊泳しているときの通過所要時間を測定し、平均速度を求めた。

図9は、前ひれの周波数をおよそ0.2 Hz～0.6 Hzと変化させたときの遊泳速度を計測した結果である。これより、遊泳速度は、周波数を高くするに従って、上昇していることがわかる。そして、周波数0.55 Hzにおいて約0.06 m/sの最高速度が得られている。本実験用ロボットは直進性が低く、また前ひれ運動の

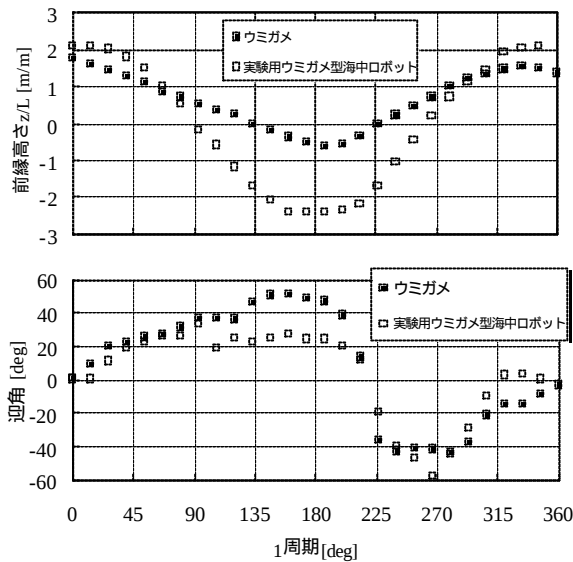


図8 前ひれの動作特性

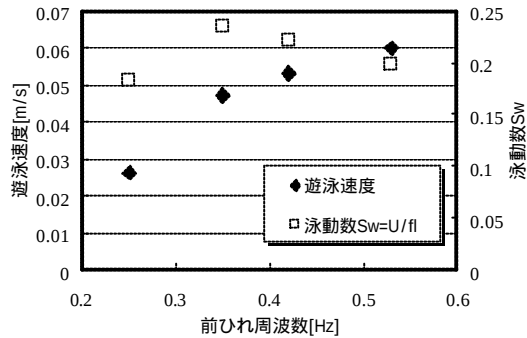


図9 実験用ロボットの遊泳性能

最適化等が施されていない．それらの改善・調整を行うことでさらなる遊泳速度の向上が図られると考えている．

また図9には，水棲生物の遊泳能力を評価する尺度として用いられる泳動数を併記している⁵⁾．泳動数 Sw は，永井らが提案している無次元数であり，次式で表される．

$$Sw = \frac{U}{L \cdot f} \quad (1)$$

ここで， U は遊泳速度[m/s]， L は全長[m]， f はひれの周波数[Hz]である．通常，泳動数は尾ひれを振動させて推進する水棲生物の遊泳能力を評価する際に使用され，尾ひれの運動1周期における全長あたりの遊泳距離を表している．したがって，数値が大きいほど遊泳能力が高いことを示している．本実験用ロボットの泳動数は，前ひれ周波数が0.35 Hzのとき，最大値約0.24が得られ，周波数をさらに高めると泳動数の減少が確認された．これまで筆者らによって設計・試作された尾ひれを振動させる魚ロボットの泳動数は，約0.10～0.25の範囲である．運

動形式が異なるため，これらと詳細に比較することは難しいが，概ね同程度の遊泳能力を有していると考えられる．

4. おわりに

本研究では，ウミガメをモデルとした実験用ロボットを設計・試作し，前ひれ機構の動作確認および遊泳試験を行った．その結果，以下の知見が得られた．

- (1) 実験用ウミガメ型海中ロボットのの前ひれ機構は，実際のウミガメの動きをほぼ模擬できることが確認できた．
- (2) 遊泳試験の結果，本実験用ロボットはウミガメの前ひれの動きを模擬した運動を行うことで，推進力を発生し，遊泳できることが確認できた．
- (3) 実験用ウミガメ型海中ロボットは，前ひれの周波数を上げることで遊泳速度を向上でき，周波数0.55 Hzにおいて約0.06 m/sの最高速度が得られた．

本実験用ロボットは，前ひれ機構の構造や迎角の設定等に課題が残されており，これらを改善することで，より推進性能を高められるものと考えられる．また，本実験用ロボットは，設計段階で目標としていた3次元運動の実現には至っていない．浮力調整機構や後ひれなどを適切に動作させることで，多様な運動を実現できると考えられ，海中ロボットへ適用するときの有用性や問題点を詳細に評価できるものと考えている．

参考文献

- 1) 平田宏一，海上技術安全研究所における魚ロボットの開発，設計工学，Vol.38，No.6，pp.293-301(2003)．
- 2) 香原和志，ウミガメの旅 太平洋2万キロ ポプ(1999)．
- 3) 平田宏一，河合秀祐，多用途化を目指したユニット式ロボットの開発，日本設計工学会2002年度春季研究発表講演会講演論文集，pp.115-118(2002)．
- 4) 横山徳幸，柏谷達男，三島茂徳，振動する剛体翼の推進力特性の計測結果について，防衛庁技術研究本部技報，第6750号(2000)．
- 5) 田中一郎，永井實，抵抗と推進の力学，シップアンドオーシャン財団(1996)，p.16-17．