

2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻
職位または役職	准教授
氏名	新竹 純

1. 研究題目

直接駆動方式の生物模倣型水中ロボットの研究開発

2. 研究目的

本研究の目的は、トビウオのように離水と滑空が可能な、直接駆動方式の生物模倣型水中ロボットを開発することである。水中ロボットは海洋や湖沼における資源探査や水難救助に有用である。生物の構造や機能を工学的に取り入れた、生物模倣型水中ロボットは、魚類のような高い運動性や効率を実現できる可能性があり、研究開発が盛んに行われている。電磁モータはエネルギー密度や効率、導入のしやすさの観点から、生物模倣型水中ロボットの動力源として最も有望であると考えられる。従来の生物模倣型水中ロボットでは、トルクの確保や動力伝達のために、モータにギアやクランクが付随している。そのため、ロボットの構造は複雑になり、結果として重量の増加や衝撃に対する耐久性の低下を招く懸念がある。この問題に対して、ギアなどの伝達機構を省いた直接駆動方式は構造を大幅に単純化できる利点があり、有効な解決手段となり得る。2021年度は、生物模倣型水中ロボットの構成法として直接駆動方式を提案し、実機を用いた実験を通して、それが持つ高い遊泳性能を明らかにした。その次のステップとして、2022年度は、ロボットに離水と滑空能力を付加することを試みる。本研究の成果によって、先進的な生物模倣ロボットが実現されるとともに、電磁モータの新しい用途と関連技術が創出され、モータの利用が大きく拡大することが期待される。

3. 研究内容及び成果

ロボットの高速化

本研究で目的としている、胸鰭によるロボットの離水と滑空には、それを成し得るだけの高速な遊泳が前提として必要になってくる。そこでまず、前年度に得られたロボットの高速化に取り組んだ。具体的には、ロボットに付随するモータの制御ゲインの調整と尾ひれ形状の改善を行った。また、ロボットのヘッド部とフロート部の改良を行い、抵抗を低減した状態で自立した遊泳を行えるようにした。これらの高速化を施したロボットを図 1 に示す。実験の結果、ロボットの最大速度が 2.6 m/s であることが分かった。これは、体長比速度 (Body Length: BL / s) で 6.3 BL/s であり、前年度のロボット (0.4 m/s) と比較して 6 倍以上高速である。推力についても、2.6 倍大きな値 (63.2 N) を出力できることが分かった。



図 1. 高速化したロボット(全長 415 mm, 上段)とその遊泳の様子(下段)。

ロボットの特性解析

高速化されたロボットの詳細な特性解析を行った。その内容は、駆動周波数に対する遊泳速度、駆動周波数に対する推力と推力/消費電力、駆動周波数に対する尾ひれの振幅、および直角入力に対する旋回速度である。また、これらの測定データに基づいて、魚類の遊泳を特徴付けるストローハル数と泳動数によってロボットの運動を解析し、さらに移動効率の指標である Cost of transport (COT) の推定も行った。その結果、遊泳速度や推力は実験で与えた周波数の範囲内で、上述の最大値を含む複数のピーク値を取ることが分かった。また、これらのピーク周波数は、ロボットのボディを片持ち梁として周囲流体を考慮した、単純な解析モデルで得られた値とほぼ一致することが分かった。このことは、本研究で提案する直接駆動方式に基づく生物模倣型水中ロボットの遊泳特性を、解析モデルによって設計できることを意味し、その点において設計指針を得ることができた。直角入力に対する旋回速度の測定では、ロボットが $1450 \text{ }^\circ/\text{s}$ で回頭できることが示された。この旋回速度と遊泳速度 6.3 BL/s を同時に達成できる水中ロボットは文献を参照しても例がなく、本研究の提案手法の有効性を十分に示しているといえる。ストローハル数と泳動数については、前述のピーク周波数付近で魚類の値と一致することが分かり、ロボットが定量的にも生物のように遊泳できていることを確認した。遊泳に関する移動効率である COT は 5.9 と算出され、この値は他の高効率であるとされる魚型ロボットと同じオーダーであることが分かった。以上の成果は学術論文として整理し海外学術雑誌に投稿済みであり、本報告書の作成時点で査読中となっている。

胸鰭の付加

基本的な方針として、防水サーボモータに取付けた胸鰭の迎え角を制御することによって、ロボットのピッチ方向（上下方向）の運動が行えるようにし、それによって高速遊泳からの離水を行うこととした。このような動作を行うための胸鰭機構は、図 2 に示すようにロボットの側面もしくは上部に付加する形態として実験を行った。その結果、遊泳中に上下運動ができることを確認した。しかしながら、上述したロボットの特長解析と論文準備に想定よりも時間がかかり、本項目の活動は期間後も継続する結果となった。

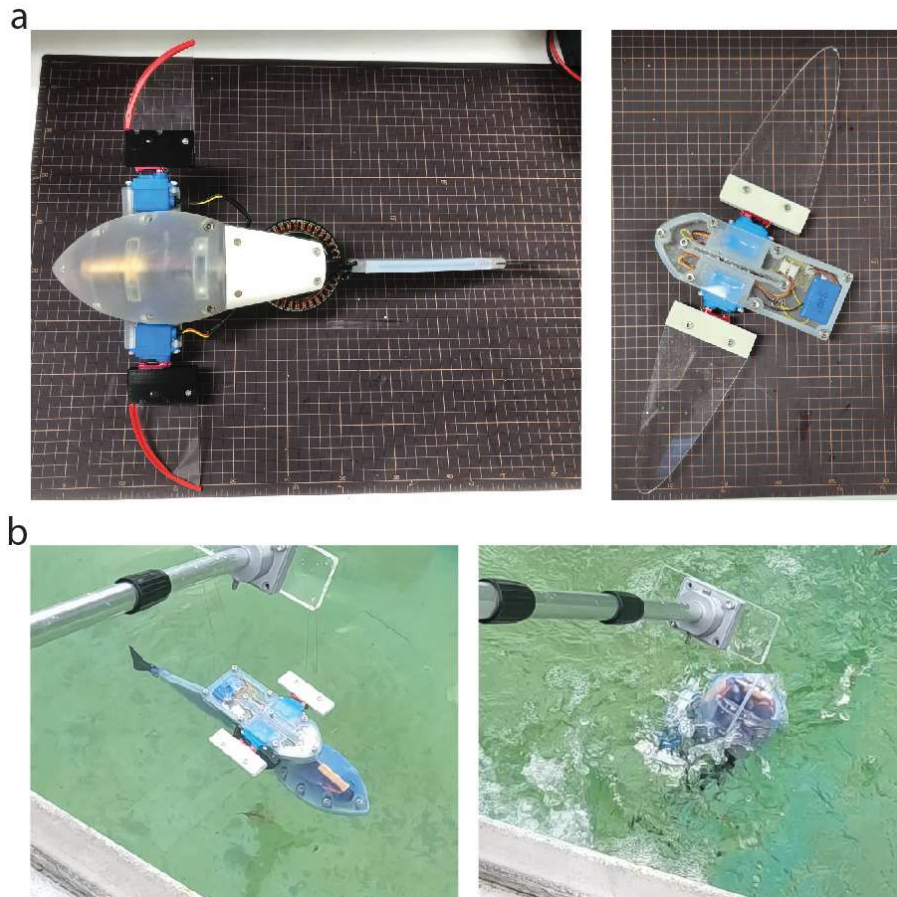


図 2.(a)ロボットの側面に配された胸鰭機構（左）と上部に取り付ける胸鰭機構。(b)胸鰭機構を取り付けたロボットの実験の様子。胸鰭の角度変化によって上向きのピッチ角度が発生している。

4. 今後の研究の見通し

胸鰭機構に関する研究開発を進め、実際のトビウオのような離水による滑空実験を行う予定である。ここで、胸鰭は水中遊泳時にはロボットの上（ピッチ）方向を可変させて離水させる役割を持つ。しかし、ロボットとしての実用性を担保するためには、上下（ピッチ）だけでなく左右（ヨー）と回転（ロール）方向の制御性が求められる。これらの各方向への高い制御性が実現できれば、水中における動作の自由度と安定性が飛躍的に向上し、遊泳から離水への動作も滑らかに行うことができると期待できる。そこで、今後は多自由度運動の実現と制御法の確立にも取り組む。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議（査読無）

新竹純, 井口慶祐, 舟久保賢希, 原田開生, 直接駆動方式の生物模倣型水中ロボット, 日本科学振興協会 年次大会, 2023 年 10 月 7 日.

井口慶祐, 新竹純, 直接駆動方式の生物模倣型水中ロボット, 電気学会 回転機/リニアドライブ/家電・民生合同研究会, RM-23-056, LD-23-070, HCA-23-040, 2023 年 8 月 9 日.