

沿岸用ゴミ収集ロボット開発への挑戦：エビの遊泳動作を用いた推進手法の創出

宮崎大学・工学部

李 根浩

1. 緒言

地球の表面積のうち、70%という広大な領域を海洋が占めている。海洋のうち詳細に調査が行われているのは 20%のみであり、残りの 80%はその地層や生態系、海洋資源など多くの謎に包まれている。それらを調べるために開発されてきたのが、様々な水中ロボットである。これらのロボットの多くは推進機構としてスクリュープローペラを採用しているが、スクリュープローペラにはいくつか問題点がある。例えば、プロペラの表面圧力と水圧との差により生じるキャビテーション、海中のごみが絡まることで生じるプロペラの破損、加えてウミガメやエイなどの海洋生物が巻き込まれて怪我をしたり命を落としてしまったりする問題点もある。

そこで、これらの問題を解決するために海洋生物を模倣した水中ロボットの開発が進められている。生物の特性を模倣することで安全かつ効率的な移動を実現できる。本研究では海洋生物の中でも体に対して推進機構にあたる部分が小さく、多様な動きが可能であるエビに着目し、エビの遊泳動作を模倣した 3D パドル式推進手法を創出し、水中ロボットへと応用することを目指とする。

本研究ではまず初めにエビの身体的特徴と運動的特徴を理解するために、エビの解剖とエビの動作解析を行った。次にこれによってわかった特徴をとらえた抗力モデルを創出し、シミュレーションによって抗力が生成されることを確認した。さらに試作機を開発し、それを用いた水中実験を通して、モデルの有効性を検証した。

2. エビの特徴及び抗力モデル

2.1 エビの身体的特徴

まず初めにエビの身体的特徴を理解するためにエビの解剖を行った。解剖には全長およそ 15cm のクルマエビを用いて、運動器官を中心に行った。エビは図 1 のように頭部（頭頸部）・腹部（遊泳脚部）・尾部から成っており、頭部には海底や沿岸を歩くために使う歩脚、腹部には水中を泳ぐために使う遊泳脚をもつ。解剖では頭部、遊泳脚部、尾部の長さに加えて、図 2 のように定めたエビを横から見た時の長さである体高、エビを上から見た時の幅である身幅、さらにはパドル間隔、パドルの長さについてノギスを用いて計測した。パドルの長さについては関節で区切り、腹部側を「軸部」、先端側を「ブレード部」と定義し、軸部とブレード部それぞれの長さ及び 2 つを足し合わせた遊泳脚全体の長さについても計測した。

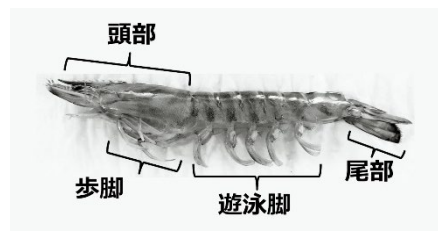


図 1.エビの身体構造



図 2.エビの体高・身幅

この結果から、エビの体は頭部から尾部にかけて体高、身幅ともに細くなっていることや、遊泳脚は頭部側と尾部側に比べて中心側に近づくほど長くなっているといった身体的特徴がわかった。

2.2 エビの運動的特徴

次に、エビの運動的特徴を理解するために、エビの遊泳時におけるパドルリングの観察及び解析を行った。その結果、エビは推進時に遊泳脚の往復運動によって進んでいた。図3のように水をかく往路であるパワーストロークの際には遊泳脚を広げた状態で進展し、より多くの水をとらえることができるようにしているが、復路であるリカバリーストロークの際には遊泳脚を閉じた状態で屈曲し、推進抵抗を減らすようにしている。この動作によってエビは抗力のストローク差を生み、推進力にしていると考えられる。

また、エビの遊泳動作を解析すると各遊泳脚は概ね $\sin$ 関数の正弦波を描き、各遊泳脚の正弦波には尾部側の遊泳脚から頭部側の遊泳脚にかけて位相差があることがわかった。この位相差は、直前のパドルリングで発生した流れが消失する前に次のパドルリングによって連続的に流れが発生させ、より大きな推進力を生み出す効果があると考えられる。

よってこれらの結果から、パワーストロークとリカバリーストロークのストローク差と各パドルの位相差という運動的特徴があることがわかった。

2.3 抗力モデル

これまでにわかったエビの運動的特徴であるストローク差と位相差を再現するために抗力モデルを創出した。まず初めに図4のように1パドルでのパラメータを定義した。次に各パドルでの位相差が生じることを考慮し、4パドルでのパラメータを定義した。ここで求めたパラメータを用いて、1パドルでの抗力モデルを創出した。最後に1パドルでの抗力の方程式を用いて、4パドルでの抗力の方程式を導出した。これを抗力モデルと呼称する。

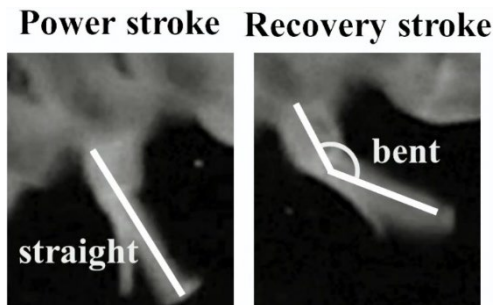


図3.ストローク差

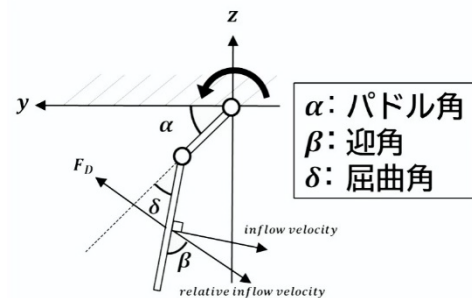


図4.パラメータ定義

3. シミュレーション結果

3.1 1パドルでのシミュレーション

本章では数値解析ソフトウェアを用いて、提案した抗力モデルの有効性を検証していく。このシミュレーションでは抗力及び抗力の水平方向成分、抗力の垂直方向成分の3つを示す。

まず初めに1パドルでの抗力をシミュレーションする。このシミュレーションでは抗力の解析を頭部側のパターン1、中間部分のパターン2、尾部側のパターン3の3つのパターンに分けて行う。各パドルのパドルリング範囲は 90° なので、モーターの可動範囲 180° の中で3分割すると、パターン1が $0^\circ \sim 90^\circ$ 、パターン2が $45^\circ \sim 135^\circ$ 、パターン3が $90^\circ \sim 180^\circ$ となる。それぞれのパターンの結果を以下の図5～図7に示す。

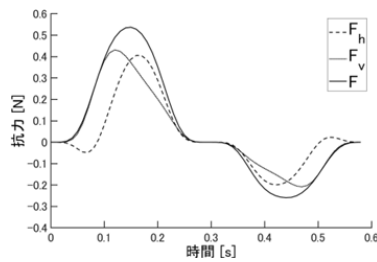


図 5.パターン 1 (1 パドル)

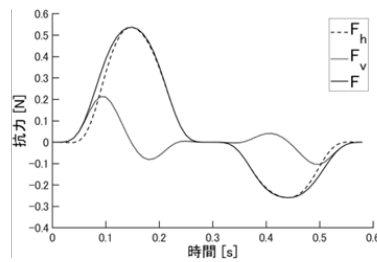


図 6.パターン 2 (1 パドル)

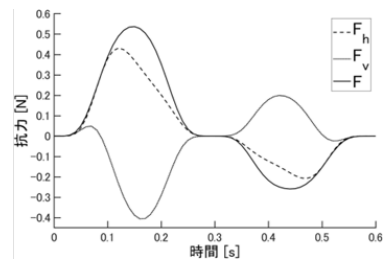


図 7.パターン 3 (1 パドル)

この結果、全体的な抗力の大きさはほとんど変わらない。しかし、抗力の垂直方向成分に着目すると、頭部側のパターン 1 では正の垂直方向成分が大きくなっているが、パターン 2 になると垂直方向成分が小さくなり、尾部側のパターン 3 になると垂直方向成分が負になっていることがわかる。このことから、パドルの動作範囲を変えることによって、抗力の大きさを変えることができると考えられる。

3.2 4パドルでのシミュレーション

次に 4 パドルでの抗力をシミュレーションする。このシミュレーションでは 1 パドルでの 3 パターンと同様の 3 パターンで行うが、各パドルで 17° の位相差が生まれることに留意する。4 つのパドルを頭部側から順番に $P_1 \sim P_4$ とすると、1 つのパドルのパドルリング範囲が 90° であることには変わりがないので、パターン 1 のパドルリング範囲は $0^\circ \sim 141^\circ$ となる。つまり、1 つのパターンの 4 つのパドルのパドルリング動作範囲は 141° となる。よって、パターン 2 のパドルリング範囲は $19.5^\circ \sim 160.5^\circ$ で、パターン 3 のパドルリング範囲は $39^\circ \sim 180^\circ$ となる。それぞれのパターンの結果を以下の図 8～図 10 に示す。

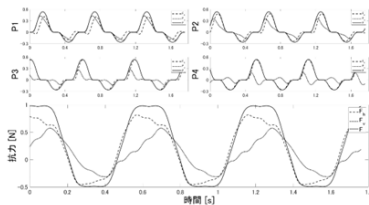


図 8.パターン 1 (4 パドル)

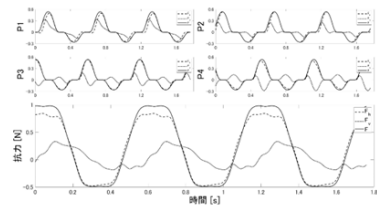


図 9.パターン 2 (4 パドル)

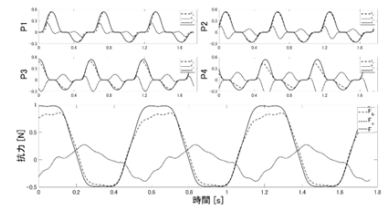


図 10.パターン 3 (4 パドル)

この結果、1 パドルでのシミュレーションと同様にして、位相差がある 4 パドルの場合でも、パドルの動作範囲を変えることによって、抗力の大きさを変えることができるということがわかった。また、位相差を利用した 4 パドルでの抗力のため、水平方向成分と垂直方向成分を合わせた全体の抗力は、1 パドルでの抗力に比べて大きくなっている。

3.3 抗力から推定軌跡の導出

ここまでの結果から求めることができた抗力から軌跡を導出する。ここでは、パターンごとではなく、抗力の水平方向成分 (y 方向) と垂直方向成分 (z 方向) ごとに行っていく。一般に、力はニュートンの運動の第 2 法則 ($F = ma$) により表される。 m は質量を表しており、本モデルでは一定であるため、加速度 a が抗力 F を示すことになる。加速度を積分すると速度を求める

ことができ、速度を積分すると変位（軌跡）を求めることができる。したがって、図 11～図 16 のようにして抗力から軌跡を導出した。

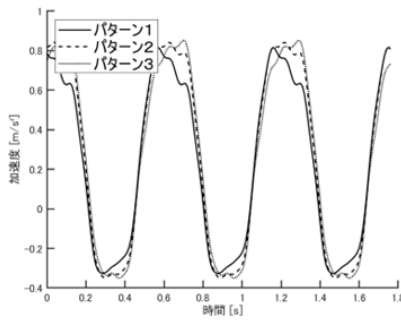


図 11.y 方向の加速度

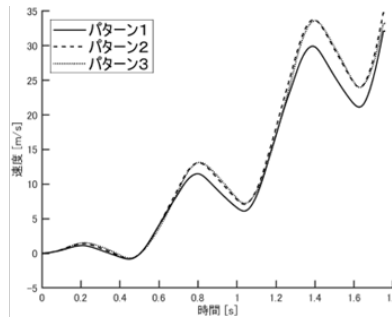


図 12.y 方向の速度

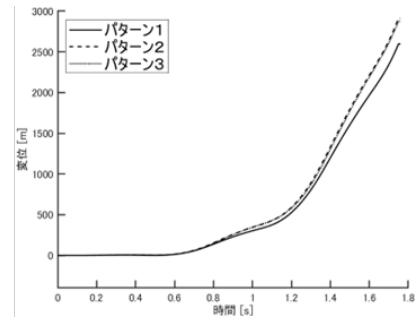


図 13.y 方向の変位

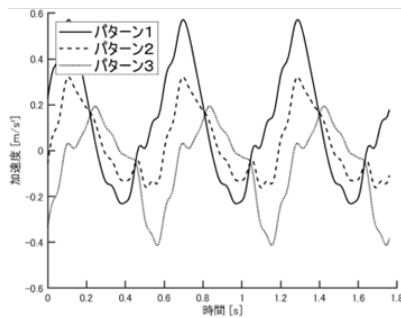


図 14.z 方向の加速度

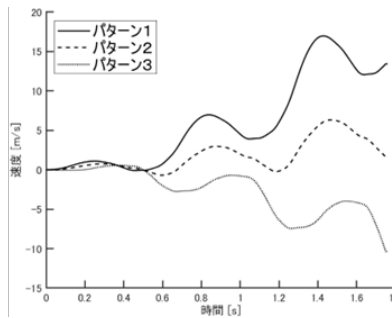


図 15.z 方向の速度

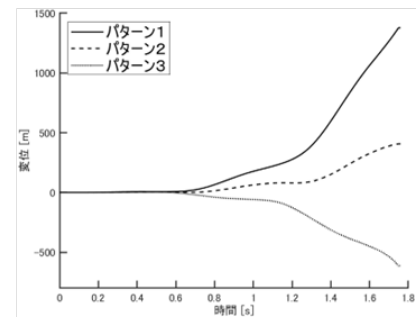


図 16.z 方向の速度

この結果、y方向ではどのパターンも同様の軌跡を示しているが、時間ごとに変位が大きくなっている。一方、z方向では各パターンによって変位が異なっている。したがって、パドルの動作範囲を変えることによって、抗力の大きさを変えることができ、軌跡を変えることができると考えられる。

4. 試作機の開発及び水中実験結果

4.1 試作機の開発

提案したモデルを実際に検証するために図 17 のような試作機を開発した。まず初めに 2.1 で行った解剖の結果をもとに設計比を導出した。これを用いて CAD ソフトウェアで設計し、3D プリンターを用いて印刷した。材料には PLA(Polylactic acid)樹脂を用い、防水加工のために FRP と Epoxy Resin を用いた。



図 17.設計した試作機

また、エビの運動的特徴であるストローク差と位相差を再現するためにパドルの開発には工夫を要した。まず初めにパドルの軸部とブレード部の間にスプリングを取り付けることによって、リカバリーストロークの際にパドルに曲がり角が生じるようにした。なお、ブレード部の基部が軸部と被るように設計しているため、軸部がブレード部のストッパー的役割を担い、パワーストロークの際には曲がり角が生じないようになっている。加えて、ブレード部の形状を V 字型にした。これにより、パワーストロークの際にはたくさんの水をとらえることができるが、リカバリーストロークの際にはとらえる水を少なくすることができ、抗力係数の決定に関わる表面積の違いを生み出すことができる。

4.2 水中実験

4.1 で開発した試作機を用いて、水中実験を行った。この実験では 3.2 で定めた 3 つのパターンについて検証し、撮影した動画を解析した。例として、パターン 2 の実験の様子を図 18 に示す。



図 18.実験の様子（パターン 2）

実験の結果は、図 19 のようになった。これを図 13 と図 16 の結果をまとめた図 20 と比較すると、ほぼ同じ軌道を示しており、パターン 1 で上昇、パターン 2 で前進、パターン 3 で下降していることがわかる。よって、提案した抗力モデルの有効性が示された。

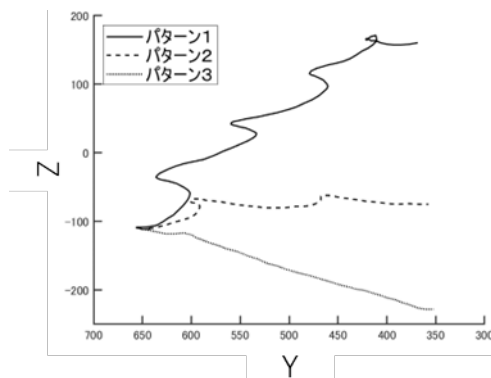


図 19.実験結果

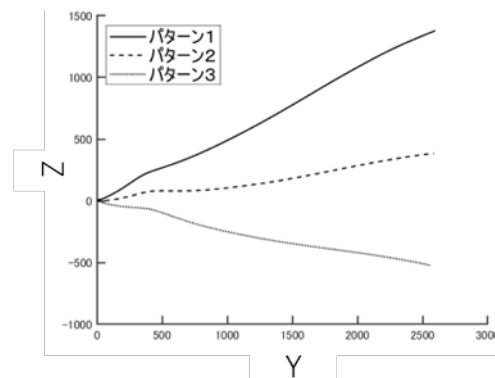


図 20.シミュレーション結果

5. 結言

本研究では、エビの遊泳動作を模倣した 3D パドル式推進手法を創出し、水中ロボットへと応用することを目指とし、エビの身体的特徴と運動的特徴をとらえた抗力モデルを導出した。その後、シミュレーションと開発した試作機を用いた水中実験を行い、提案した抗力モデルの有効性を確認した。これによって、水中ロボットの移動機能の向上に貢献できると考えられる。

今後は抗力以外の力にも着目し、より正確なモデルを創出することを目指したい。また、3次元の運動方程式を導出し、旋回やらせん状の動きといったより複雑な動きもできるようにしたい。さらに、エビの歩脚にも注目し、沿岸部や海底の岩場などでの作業もできるような機能の開発をすることで、将来的にゴミ収集が可能なロボットを目指す。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) Teppei Inoue, Geunho Lee, and Kazuki Takeshita, “Shrimp’s swimming motion imitated propulsion mechanism and its application to underwater robots”, *Proc. 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, pp.152-157, 2024
- 2) Kazuki Takeshita and Geunho Lee, “Underwater propulsion mechanism mimicking shrimp's swimming motions”, *Proc. the 7th Jc-IFTtoMM International Symposium*, pp.221-224, 2024.
- 3) Kazuki Takeshita, Geunho Lee, and Kosei Shiinoki, “Development and implementation of robotic swimming shrimp”, *Proc. the 11th International Conference on Intelligent Systems and Image Processing*, pp.85-88, 2024
- 4) 竹下千喜, 李根浩, 椎木孝成, “エビ型ロボットの開発と実装”, 産業応用工学会全国大会 2024 講演会, pp.31-32, 2024
- 5) 椎木孝成, 李根浩, 竹下千喜, “エビ型遊泳ロボットの推進力生成と流体解析”, 2024 年度(第 31 回)電子情報通信学会九州支部学生会講演会, D-45, 2024