

一つのモータと位相差を持つクランク機構を用いた ヒラムシ型水中ロボット

Flatworm-type underwater robot using a single motor and a crank mechanism with phase difference

古澤 典大¹, 早田 圭之介¹, 石上 玄也¹, 高橋 英俊¹, 浅井 誠¹

Norihiro FURUSAWA¹, Keinosuke SODA¹, Genya ISHIGAMI¹, Hidetoshi TAKAHASHI¹, Makoto ASAI¹

¹慶應義塾大学

¹Keio University

【要約】

本研究では海洋生物の胸ビレの運動を規範としたヒラムシ型の遊泳ロボットを研究開発した。ヒラムシ型ロボットは、小さな羽ばたき速度で十分な動力を発生でき、騒音も小さく、コンパクトなボディで狭い場所での低速走行に優れている。しかしながら、従来のヒラムシ型ロボットはヒラムシの各鰭条にモータが配置され小型化・軽量化には向いていなかった。そこで本研究では、一つのモータと位相差を持つクランク機構を用いてヒラムシを模した平板型の翼の位相差を形成する羽ばたき機構を製作し、その羽ばたき性能を評価するとともに鰭条間の位相差に対する推進力を測ることを目的とした。これにより、ソフトロボットとしてのヒラムシ型ロボットにも本研究で求めた最適パラメータを適応させることが可能である。

キーワード: 水中ロボット, バイオミメティック, ヒラムシ

【Abstract】

This research proposes a swimming robot in the shape of a flatworm which has a motor and a crank mechanism with a phase difference. Flatworm-type robots can generate sufficient power with small flapping speed. However, previous flatworm-type robots are not suitable for miniaturization and weight reduction because the motors are located on each fin ray of the flatworm. In this study, we developed a flapping robot which had a single motor and a crank mechanism with a phase difference. We evaluated its flapping performance and measured the propulsive force against the phase difference between the fin rays. The optimal parameters obtained can be applied to a flatworm-type robot as a soft robot.

Keywords: underwater robot, biomimetic, flatworm

1. 序論

これまでに様々なバイオミメティック水中ロボットが提案されてきた[1]。これらのロボットは一般的に尾ビレを模したヒレを駆動することによって動力を得ており、騒音が大きいことや細かい動きに長けていないという課題があった。

一方で、胸ビレを模したヒレを駆動することによって動力を得ている水中ロボットが注目を集めている[2]。このような胸ビレを使ったエイやマンタを模したロボットは、騒音も小さくできるほか、コンパクトな機体であるため、狭い場所で低速で動作させる機動性に優れていると考えられている。本研究ではこの胸ビレ(外套膜の側縁)のことをひだと呼ぶこととする。ひだを模倣した水中ロボットの中でもヒラムシを模倣したロボットに着目した。扁平動物に属するヒラムシはシート状の形態というシンプルな形態をしており、骨格や体節を持たない無脊椎動物であるにも関わらず、エイやマンタなどに見られるような高度な遊泳性能、例えば急旋回やホバリング、前進や這行などの多彩で細かい動きが可能である。このようなシート状構造を有するロボットの概念図を図 1(a)に示す。また、ヒラムシを模倣したロボットは小さな羽ばたき速度で十分な動力を発生させることができることが予想される。しかしながら、これらのロボットは各鰭条にモータが配置され小型化・軽量化には向いて

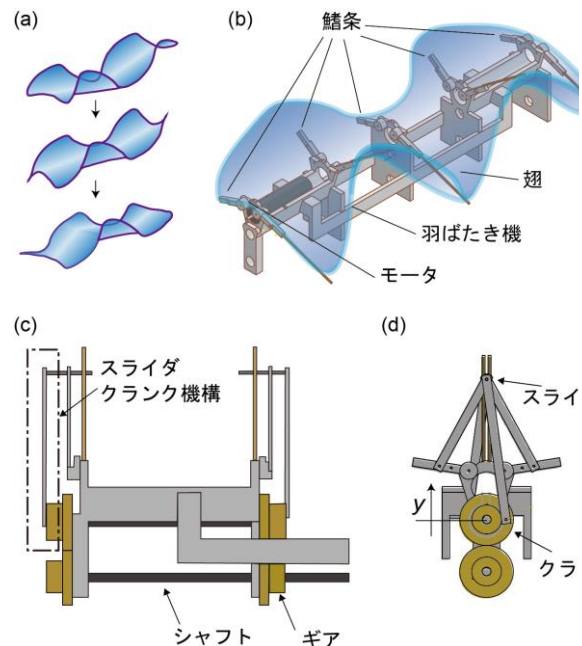


Fig. 1 (a)シート状構造を持つロボットの概念図. (b)本研究のヒラムシ型ロボットの概念図. 羽ばたき機構の(c)側面図, (d)正面図.

いないほか、現状においてはヒラムシ型ロボットのひだの形状と遊泳性能の関係を示す実験データは得られていない。そこで、本研究では、一つのモータと位相差を持つクランク機構を用いた軽量なヒラムシ型ロボットを製作し、製作したロボットの評価と、ひだの形状と遊泳性能の関係を評価する実験を行い、ヒラムシ型ロボットの有用性やそれらのロボットが推進力を効率よく得るための最適パラメータを確立することを目指す。

2. 原理・設計

本研究で提案するロボットの概要図を図 1(b)で示す。本研究では、トンボの羽ばたき機構[3]に着想を得て、ロボットの鰭条部分に関節を設け、それらを、位相差を設けて動かすことによりひだの波を再現する。羽ばたき機構についてはスライダクランク機構を採用した(図 1(d))。関節を五本製作し、それぞれにスライダクランク機構をつけ、シャフトを介して一つのモータで動かす構造をとった(図 1(c))。このクランク同士の位相をずらすことにより鰭条間の位相差を生じさせ、ひだの位相速度を変更させて、ひだの波形を変更させることが可能になる。例として、鰭条間の位相差が 45° の場合の各クランクの位相 θ に対する鉛直方向の変位の関係を図 2(a)に、その時の各クランクの位相と各鰭条の挙動の関係の正面図を図 2(b)に、側面図を図 2(c)示す。また、定常翼理論を用い、羽ばたき機に加わる推進力とモーメントを概算した。鰭条間の位相差が $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の場合における羽ばたき機に加わる推進力の時間変化を図 3 に示す。これらより理論上では鰭条間の位相差 90° が最適パラメータであることがわかった。

本研究では、ヒラムシの二倍程度の全長 20 cm に拡大し、モデルを製作した。骨組みは 50 mm 間隔で取り付け、羽ばたき機の設計図を図 4 に示す。羽ばたき角はヒラムシと同じ 75° 程度、羽ばたき周波数はレイノルズ数を加味し、ヒラムシの羽ばたき周波数より低い約 1.5 Hz になるように設計した。スライダが鉛直方向だけに動けるよう図 4 のように真鍮線を設置しスライダの動きを拘束した。

3. 製作

製作した羽ばたき機を図 5 に示す。ギアにはベアリングをはめ込み、固定した。ギアとベアリング、ピアノ線と真鍮線以外はすべて 3D プリンタで製作した。3D プリンタで作った部品同士はピアノ線でつなぎビーズと接着剤で固定した。モータは公称電圧 12V の遊星ギアを取り付けたモータを用い、クランクシャフトに伝える。

4. 実験・結果

実験は二つ行った。一つ目の実験は完成したロボットの羽ばたき性能を評価する実験である。実験のセットアップを図 6(a)に示す。製作した羽ばたき機に矩形の翅と、体軸付近から離れたところほど長くなる台形の翅の二種類を取り付け、外部電源で 7V の電圧をかけ羽ばたき機の挙動を撮影し、動作を確認した。さらに、その映像の翅先の挙動をトラッキングし、翅先の鉛直方向の変位をグラフに出力した。例として、台形の翅を取り付けた時の各ポイントのトラッ

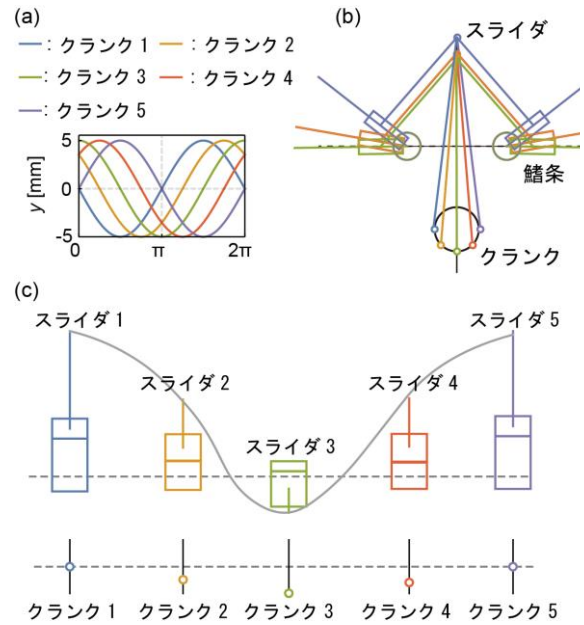


Fig. 2 (a)各クランクの1サイクルの変位量、各クランクの位相と各鰭条の挙動の関係の(b)正面図、(c)側面図。

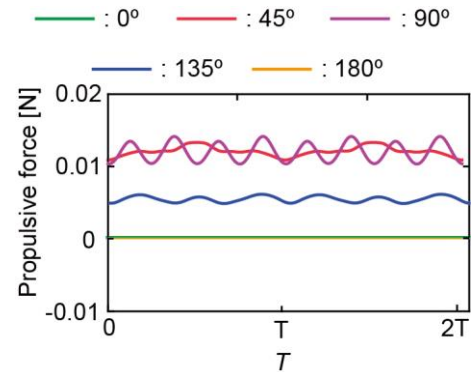


Fig. 3 各鰭条間の位相差が $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ の時の羽ばたき機の推進力の時間変化。

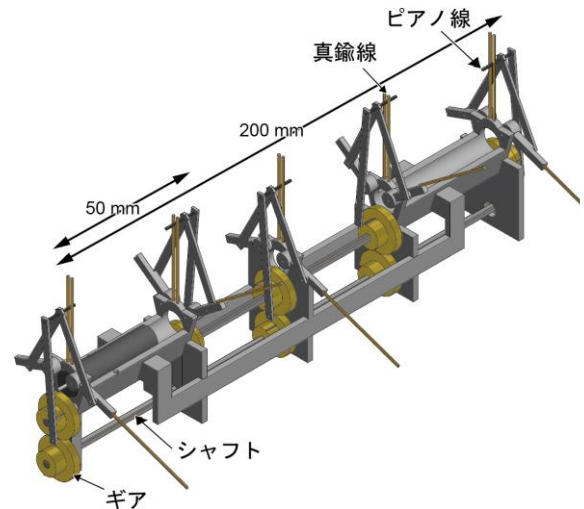


Fig. 4 羽ばたき機の設計図。

キング結果を図 6(b)で、矩形の翅を取り付けた時の各ポイントのトラッキング結果を図 6(c)で示す。実験

の結果、翅を取り付ける前の羽ばたき機は、部品同士のずれなどの誤差以外の目立った誤差はなく、設計通りの挙動を示した。また、矩形のシリコンゴム膜を取り付けた場合、シリコンゴムの伸縮が足りず、羽ばたき振幅が設計値より小さくなったが、台形のシリコンゴム膜を翅として取り付けた場合、上記の伸縮性の問題を改善することができた。

二つ目の実験は、ひだの形状に対する羽ばたき機の水中での推進力を計測する実験である。実験のセットアップを図 7(a)で示す。羽ばたき機のひだの片方を水中に入れ、羽ばたき機に6軸力センサを取り付け、羽ばたき機の水中での推進力を測定した。ひだの形状に対する推進力を測定するため、鰭条間の位相差を、 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° にして実験を行った。その結果を図 7(b)で示す。鰭条間の位相差が 45° 、 90° 、 135° の時、推進力を得ることができ、位相差が 90° の時推進力が最大となった。

5. 結論

本研究では、ヒラムシを模倣した水中ロボットを提案した。一つのモータと位相差を持つスライダクランク機構を用いることで、クランクの位相を変えることでひだの波の位相速度を自在に変更することを実現するとともに従来のヒラムシ型ロボットに比べ軽量化することができた。また、製作したロボットを解析したところ、設計通りの挙動を確認でき、取り付ける翅を台形にすることにより、シリコンゴム膜の伸縮性の問題を緩和できることが確認された。羽ばたき機の水中での推進力は定常翼理論で求めた値と同様に、鰭条間の位相差が 90° の時、推進力が最大となった。これにより、各翅を駆動させるタイプのヒラムシ型ロボットにおいてひだの形状が正弦波の羽ばたき機には、鰭条間の位相差が 90° の時が最も推進力を得ることができるという結果を適用することが可能である。

謝辞

本研究は、慶應義塾 2040 独立自尊プロジェクト・研究推進プログラム塾内助成により実施されました。

参考文献

1. P. Duraisamy, *et al.* "Design, Modeling, and Control of Biomimetic Fish Robot: A Review," *J. Bionic Eng.*, vol. 16, pp. 967–993, 2019.
2. H. Huang, *et al.* "Hydrodynamic analysis and motion simulation of fin and propeller driven manta ray robot," *Appl. Ocean Res.*, vol. 108, no. January, p. 102528, 2021.
3. H. Takahashi, *et al.* "The effect of the phase angle between the forewing and hindwing on the aerodynamic performance of a dragonfly-type ornithopter," *Aerospace*, vol. 3, no. 1, Mar. 2016.

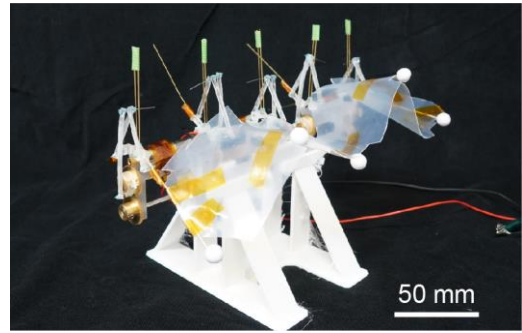


Fig. 5 羽ばたき機の外観図.

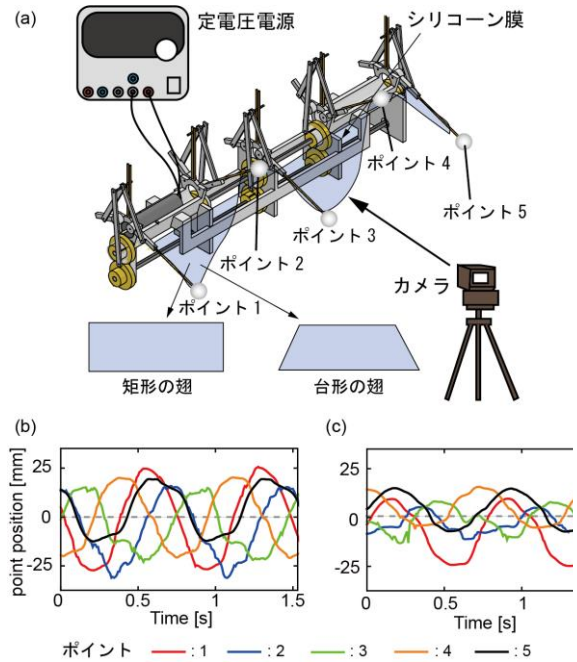


Fig. 6 (a) 羽ばたき性能評価実験のセットアップ. (b) 台形の翅を取り付けた際の各ポイントの挙動. (c) 矩形の翅を取り付けた際の各ポイントの挙動.

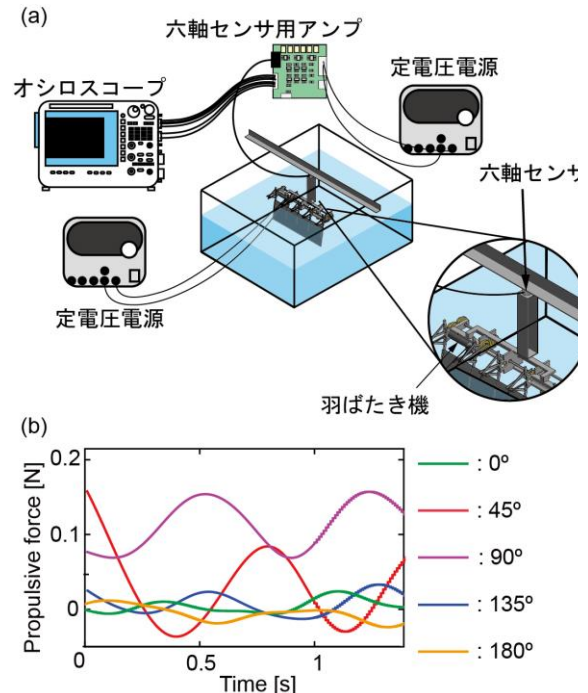


Fig. 7 (a) 羽ばたき機の推進力測定実験のセットアップ. (b) 鰭条間の各位相差に対する推進力の時間変

