

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ペンギンを規範とした水中羽ばたき推進機構におけるフラッピングとフェザリングの運動パターン制御による高推力化と高効率化
Title(English)	Improvement of thrust and efficiency by controlling flapping and feathering motion pattern in a penguin-mimetic wing mechanism
著者(和文)	経塚凌, 下岡大樹, 長谷川千晃, 田中博人
Authors(English)	Ryo Kyozyuka, Taiki Shimooka, Chiaki Hasegawa, Hiroto Tanaka
出典(和文)	第49回エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会資料, , pp. 8–9
Citation(English)	, , pp. 8–9
発行日 / Pub. date	2025, 3

ペンギンを規範とした水中羽ばたき推進機構における フラッピングとフェザリングの運動パターン制御による高推力化と高効率化

Improvement of thrust and efficiency by controlling flapping and feathering motion pattern in a penguin-mimetic wing mechanism

○経塚凌, 下岡大輝, 長谷川千晃, (正) 田中博人 (東京科学大)

Ryo KYOZUKA, School of Engineering, Institute of Science Tokyo, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo
Taiki SHIMOOKA, School of Engineering, Institute of Science Tokyo, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo
Chiaki HASEGAWA, School of Engineering, Institute of Science Tokyo, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo
Hiroyuki TANAKA, School of Engineering, Institute of Science Tokyo, 2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

Penguins are birds that can swim underwater by using flapping wings. They can perform versatile swimming such as rapid acceleration and long-distance travel. Previous studies on underwater flapping motion have demonstrated that thrust and swimming efficiency can be enhanced by controlling the frequency and amplitude of flapping and feathering motions. However, these studies considered only sinusoidal flapping and feathering with phase difference of $-\pi/2$. In this study, to explore the wing motion for high thrust and high propulsion efficiency, various waveforms of flapping with different phase difference of feathering were investigated. A penguin-inspired wing mechanism capable of servo control of flapping and feathering was used for thrust and efficiency measurements in a water tunnel. As a result, it is found that both thrust and propulsive efficiency at high speed can be improved by angular deceleration in flapping and smaller phase delay than $\pi/2$ in feathering during each stroke.

Key Words: Penguin, Underwater propulsion, Flapping wings, Water tunnel experiment

1. 緒言

水中ロボットへの関心が、海洋調査をはじめとする多様な分野で高まっている。従来のプロペラ推進型水中ロボットに対し、生物を模倣した水中ロボットは、エネルギー効率、機動性、静音性に優れる可能性がある⁽¹⁻²⁾。本研究室では、ペンギンを規範とした羽ばたき推進ロボットの研究を行っている⁽³⁾。水は空気に比べて密度と粘度が高く、十分な推力がなければロボットの機動性や速度を確保できない。また、バッテリー駆動の場合は、エネルギーの効率的な使用は長距離移動に直結する。したがって、高速かつ俊敏なペンギン型ロボットには高推力化と高効率化が必要である。本研究は、ペンギンを規範とした羽ばたき推進機構において、高推力または高効率を実現する羽ばたき翼運動のパターンを解明することを目的とする。

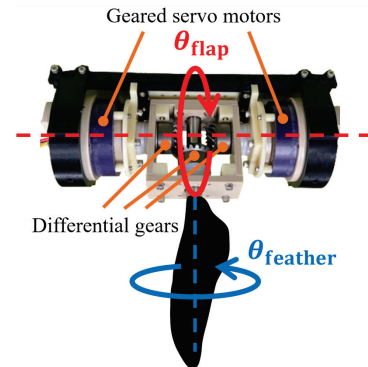


Fig 1 Wing mechanism.

2. 実験方法

本研究で使用する羽ばたき機構を図 1 に示す。本機構は、翼のフラッピング運動（羽ばたき）とフェザリング運動（ねじり）を実現する。これら 2 種類の運動は、2 つのサーボモータにより差動歯車を介して任意に制御可能である。従来研究では、フラッピング角 θ_{flap} とフェザリング角 θ_{feather} の時間変化波形は正弦波状に単純化されていた⁽⁴⁻⁵⁾。

そこで本研究では、フラッピングをストローク中に加減速させ、従来の正弦波とは異なる 5 種類の波形パターンを比較した（図 2）。等角速度パターンは三角波で表現し（図 2(b)）、フラッピング振幅を A_{flap} [deg] として以下の式のようなフーリエ級数で与えた。

$$\theta_{\text{flap}} = A_{\text{flap}} \sum_{n=1}^{100} \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}}{m^2} \sin(m \cdot 2\pi ft) \quad (1)$$

ここで、 m は $m = 2n - 1$ と定義される数である。

1 段減速または加速パターンでは、ストローク中に角速度を 1 回減速または増速させた（図 2(c, d)）。等角速度パターンでは、角速度を一定に増加または減速させた（図 2(e, f)）。角度を時間の関数として 2 次関数で表し、 $(n_r + 1)$ 周期目 ($n_r = 0, 1, \dots$) における式は以下のように与えた。

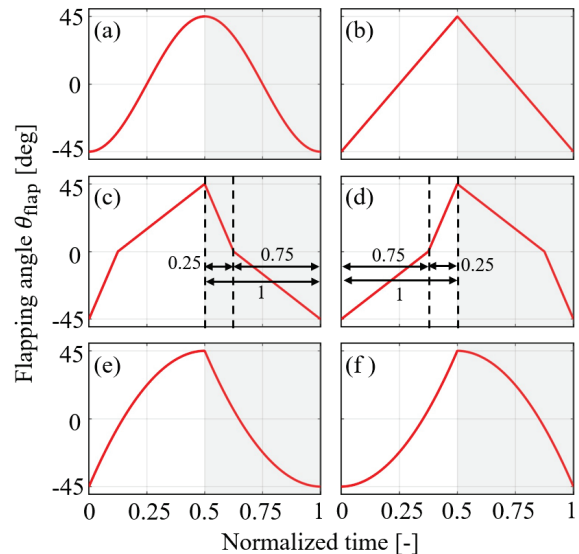


Fig 2 Flapping patterns. (a) Sinusoidal pattern. (b) Constant angular speed pattern. (c, d) Steps angular deceleration and acceleration patterns. (e, f) Constant angular deceleration and acceleration patterns.

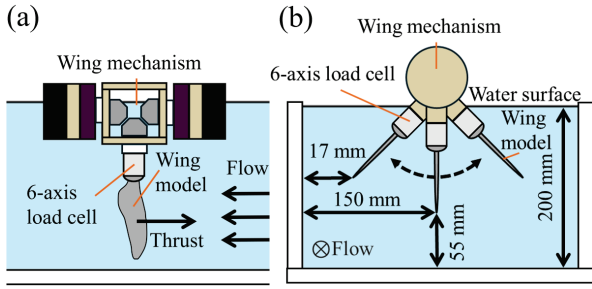


Fig 3 Schematics of experimental setup. (a) Side view. (b) Front view.

$$\theta_{\text{flap}} = \begin{cases} a(t - n_r T + T/4)^2 + b(t - n_r T + T/4) - A_{\text{flap}}, & \text{if } n_r T \leq t < n_r T + T/4 \\ -a(t - n_r T - T/4)^2 - b(t - n_r T - T/4) + A_{\text{flap}}, & \text{if } n_r T + T/4 \leq t < n_r T + 3T/4 \\ a(t - n_r T - 3T/4)^2 + b(t - n_r T - 3T/4) - A_{\text{flap}}, & \text{if } n_r T + 3T/4 \leq t < (n_r + 1)T \end{cases} \quad (2)$$

なお、本研究では2次の係数 $a = \pm 800$ とし、1次の係数 b は次式で求めた。

$$b = \frac{4A_{\text{flap}}}{T} - \frac{aT}{2} \quad (3)$$

なお、 A_{flap} は全てのパターンで 45° とした。

フェザリング角は正弦波とした。フェザリング振幅を A_{feather} [deg]、フラッピング角との位相差を ϕ [deg] とし、以下の式で表した。

$$\theta_{\text{feather}} = A_{\text{feather}} \cdot \sin(2\pi t' + \phi) \quad (4)$$

なお、 t' は時刻 t [s] を羽ばたき周期 T [s] で除算した無次元化時間を表す。本研究では、 ϕ を $-90^\circ, -70^\circ, -50^\circ$ とし、 A_{feather} は後述するように流速によって変えた。

防水6分力センサ (BFS030XS501G6S, 株式会社レプトリノ, 日本) を翼の付け根に付け、回流水槽 (KP-100(改), 西日本流体技研. 断面幅 0.3 m, 高さ 0.2 m) に翼を沈めて羽ばたかせた (図3)。ストローハル数 St を実際のペンギンに基づいて設定した。ジェントウペンギン (*Pygoscelis papua*) の St は 0.19 から 0.64 の範囲にあり、遊泳速度が大きいほど St は小さい⁽⁶⁾。そこで本研究では高速遊泳の St を 0.25, 低速遊泳の St を 0.6 とし、それぞれ回流水槽の流速を 1.78, 0.74 m/s とした。また、対応するフェザリング振幅を $14^\circ, 38^\circ$ とした。

センサのサンプリングレートは 1200 Hz とし、カットオフ周波数 7.5 Hz のローパスフィルタで平滑化した。解析には 18 羽ばたきのうち中央 12 羽ばたきを用いて推力の時間平均を算出し、その値と流速の積を時間平均電力で除した値を推進効率とした。

3. 結果

得られた推力と推進効率を図4に示す。1段減速パターンと等減速パターンでは、位相差が -50° に近づくほど推力と推進効率が大きくなり、それ以外のパターンでは -90° に近づくほど推力と推進効率が大きくなる傾向があった。

従来の正弦波パターンと比較して、位相差 -50° の1段減速パターンは、 St が 0.25 のとき推力は 115% 大きく、推進効率も 29% 大きかった。 St が 0.6 のときは推力が 35% 大きく、推進効率は 44% 小さかった。また、位相差 -50° の等減速パターンでは、 St が 0.25 のとき推力が 37% 大きく、推進効率は 3% 小さかった。 St が 0.6 のときは推力が 28% 大きく、推進効率は 27% 小さかった。その他のパターンでは、

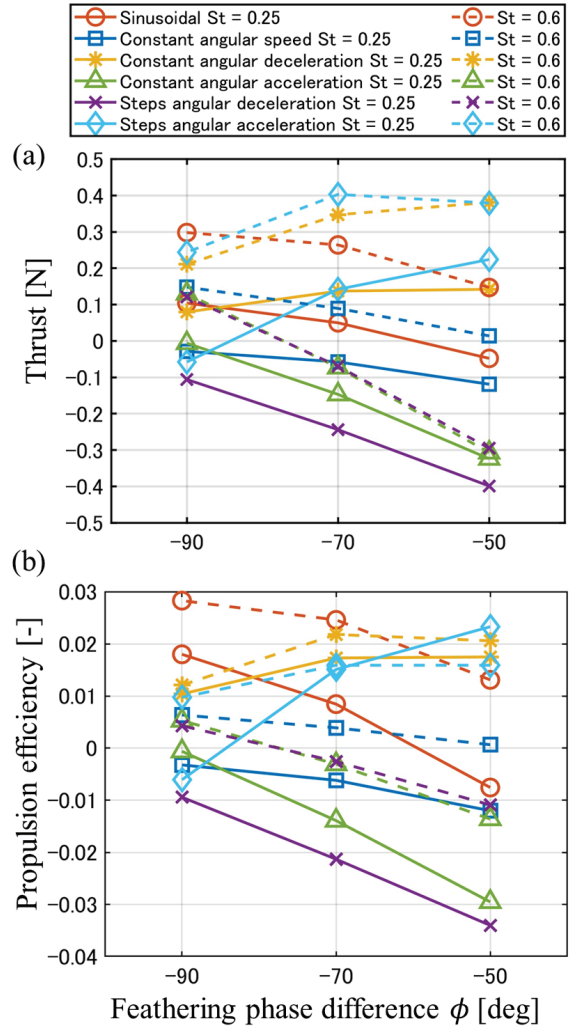


Fig 4 (a) Thrust. (b) Propulsion efficiency.

従来の正弦波パターンより推力と推進効率が低下した。

4. 結言

本研究では、ペンギンを規範とした電動翼機構を用いて、回流水槽中で翼を羽ばたかせ、推力と推進効率を計測した。その結果、流速が速いとき、フラッピング角速度をストローク中に減速させ、フラッピングに対するフェザリングの位相遅れを 90 度より小さくすることで、推力と推進効率を向上できることが示唆された。

参考文献

- (1) F. E. Fish, Marine Technology Society Journal, vol. 47, no. 5, pp. 37–44, 2013.
- (2) P. R. Bandyopadhyay, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 30, no. 1, pp. 109–139, 2005.
- (3) T. Shimooka et al., in Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2024.
- (4) P. R. Bandyopadhyay et al., D. N. Beal, and A. Menozzi, Journal of Experimental Biology, vol. 211, no. 2, pp. 206–214, 2008.
- (5) Y. Shen et al., IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 26, no. 5, pp. 2350–2360, 2021.
- (6) N. Harada et al., Journal of Experimental Biology, vol. 224, jeb242140, 2021.