

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ペンギン模倣遊泳ロボットに用いる水没型ギヤードサーボモータの研究
Title(English)	Study of a submersible geared servomotor for a penguin-mimetic underwater swimming robot
著者(和文)	下岡大樹, 加古川篤, 田中博人
Authors(English)	Taiki Shimooka, Atsushi Kakogawa, Hiroto Tanaka
出典(和文)	, , ,
Citation(English)	Proceedings of the 2023 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , ,
発行日 / Pub. date	2023, 6

ペンギン模倣遊泳ロボットに用いる 水没型ギヤードサーボモータの研究

Study of a submersible geared servomotor for a penguin-mimetic underwater swimming robot

○学 下岡 大樹 (東工大) 正 加古川 篤 (立命館大)
正 田中 博人 (東工大)

Taiki SHIMOOKA, Tokyo Institute of Technology, shimoka.t.aa@m.titech.ac.jp
Atsushi KAKOGAWA, Ritsumeikan University, kakogawa@fc.ritsumei.ac.jp
Hiroto TANAKA, Tokyo Institute of Technology, tanaka.h.cb@m.titech.ac.jp

In this study, a submersible geared servomotor was developed to realize a penguin-mimetic underwater flapping-robot. The mechanism was composed of a commercial brushless servomotor and a lab-made plastic planetary reducer. The required rotational speed and torque were determined based on the previous data of actual wing kinematics of swimming penguins and hydrodynamic calculation of the lift and drag for the wings and body. The fabricated mechanism was 66 mm in diameter and 53 mm in length, weighing 0.35 kg. Underwater experiments demonstrated that the output power of the mechanism was 107.4 W with 160-rpm rotational speed and 6.41-Nm torque. The positional accuracy was as large as 2.7 degrees, with simple proportional control only.

Key Words: Brushless motor, Planetary gear reducer, Flapping wing, Lift-based propulsion

1. 緒言

環境モニタリング, 海洋調査, 捜索救助など, さまざまな分野で水中ロボットに大きな関心が持たれており, スクリュー推進の自律型水中ロボット (AUV: Autonomous underwater vehicle) が数多く開発されてきた[1]. 一方, 遊泳生物の中には既存の AUV よりも, 俊敏性, 旋回性能, 静音性に関して優れているものもいると考えられている[2]. 遊泳生物の中で, 羽ばたき翼で推進する潜水鳥類であるペンギンは, 体重比速度が他の潜水鳥類, 哺乳類, 亀類に比べて速い[3]. また, 魚やイルカが主に 1 枚の尾びれで推進するのに対して, ペンギンは左右の羽ばたき翼で推進するため, 左右の翼を独立して制御できれば, 力の向きと重心周りのトルクを大きく変えることができ, 俊敏な遊泳が可能になると考えられる. 従って, ペンギンを模倣した羽ばたき遊泳ロボットには高速性と俊敏性の両立が期待できる. さらに, ペンギンの遊泳メカニズムの理解にも貢献できると考えられる.

これまで当研究室では, ペンギン型遊泳ロボットを目指した片翼 3 自由度の電動羽ばたき翼運動機構を実現した[4]. しかし, まだ防水対策はされておらず, 水中では使用できない. 従来の O リングやマグネットカップリングでモータ回転軸を防水する方法では, 高回転数で大きな摩擦が予想され, 水圧対策には構造の複雑化が考えられる.

そこで本研究は, ペンギン模倣遊泳ロボットを実現する水没型ギヤードサーボモータの開発を目的とした. ブラシレスモータを用いることで防水せずに水没を可能とし, 減速機を樹脂製とすることで軽量化と防錆を実現できる[5]. そのためにまず, ロボット全体の基本構成を考案して, 胴体と翼の流体力の準定常計算で算出し, モータの仕様を定めた. 次に, 市販ブラシレスモータを選定して樹脂製の遊星歯車減速機を設計・製作した. そして実際に製作した減速機付き水没型モータを静止水中で試験し, 回転数とトルク, および位置制御精度を評価した.

2. ペンギン模倣遊泳ロボットの概要

本研究で開発するギヤードモータを用いるペンギンロボットの概観を図 1(a) に, ペンギンロボットの推進機構として搭

載予定の 2 自由度羽ばたき機構を図 1(b) に示す. この羽ばたき機構が左右に 1 つずつ取り付けられている. 本研究では小型化のために片翼あたりフラッピングとフェザリングの 2 自由度の翼運動を行う羽ばたき機構を想定した. 本機構では, 差動歯車に直結した 2 つのモータの回転速度差によってフラッピングとフェザリングが生じ, フラッピング角速度は $\omega_{\text{flap}} = (\omega_1 - \omega_2)/2$, フェザリング角速度は $\omega_{\text{feather}} = \omega_1 + \omega_2 / 2$ となる.

3. ギヤードモータの必要性能の計算

3.1 翼に働く流体力の準定常計算

翼に働く流体力を, ペンギン羽ばたき翼の流体力計算[6]と同様に, 揚力, 抗力, 付加質量力を準定常計算によって求めた. 翼モデルは, ジェンツーペンギンの翼の 3-D スキャンデータから作成されたものである[6]. 翼型は, キャンバーを無くして対称的に修正し, 翼幅方向のねじれも修正されている. 胴体形状は, ペンギンの体側輪郭に基づく紡錘体形状とした[7]. 翼を翼幅方向に 10 等分して翼素に分解し, 各翼素の揚力と抗力を計算した. 翼素, 運動の代表点, 翼素中心を図 2 に示す. それぞれの翼素の翼弦長を c_j [m], 翼幅を r_j [m] とする. 揚力 $F_{\text{wing, lift}}$ [N], 抗力 $F_{\text{wing, drag}}$ [N] はそれぞれ式 (1, 2) で求め, 付加質量力 $F_{\text{wing, am}}$ [N] は式 (3) で求めた[8, 9, 10]. ここで $v_{\text{in}, j}$ [m/s] は流体の翼に対する相対的な流入速度であり, 翼の運動と遊泳速度から求めることができる. α_j [°] は翼素の迎え角である. 添え字 j は翼素番号を示す.

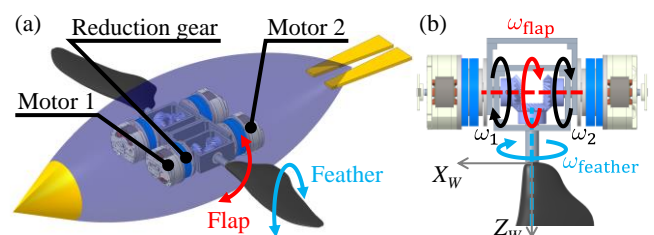


Fig. 1 (a) 3D model of the robotic penguin. (b) 2-DOF flapping and feathering mechanism.

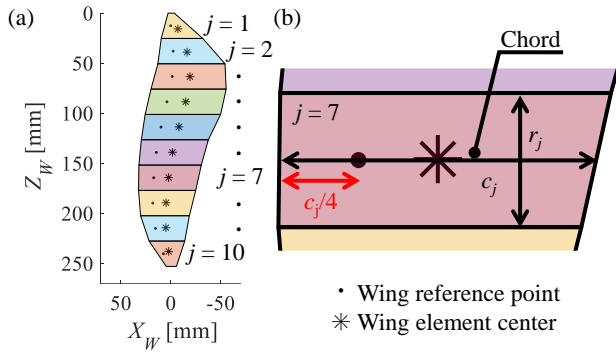


Fig. 2 (a) Planar outline of the wing and wing elements for hydrodynamics calculation. (b) Dimension parameters in each wing element.

また、 S_j [m²] は翼素面積、 awc [m/s²] は翼素中心の加速度である。翼長 $\sum r_j = 252$ mm, 翼面積 $\sum S_j = 0.0136$ m² である。図 3 にそれぞれ図示した。

$$F_{\text{wing, lift}} = \frac{1}{2} \rho \sum_{j=1}^{10} C_L(\alpha_j) S_j v_{\text{in},j}^2 \quad (1),$$

$$F_{\text{wing, drag}} = \frac{1}{2} \rho \sum_{j=1}^{10} C_D(\alpha_j) S_j v_{\text{in},j}^2 \quad (2),$$

$$F_{\text{wing, am}} = \frac{1}{4} \rho \pi \sum_{j=1}^{10} c_j^2 r_j a_{\text{WC}} \quad (3).$$

C_L , C_D は、それぞれ揚力係数と抗力係数であり、

$$C_L = 2.80 \sin \alpha \cos \alpha \quad (4),$$

$$C_D = 2.80 \sin^2 \alpha + 0.04281 \quad (5).$$

とした[6]。これは、定常翼で計測された揚力係数と抗力係数から、羽ばたき翼では大きな迎え角でも流れが翼から剥離しないと仮定したモデルに基づく関数である。

3.2 胴体に働く流体力の準定常計算

ロボットの推進方向の運動方程式を式 (6) に示す。 M [kg] はロボットの質量、 a [m/s²] は加速度である。胴体の付加質量力は無視した。 $F_{\text{body, drag}}$ [N] は胴体の抗力である (式 (7))。胴体の抗力係数 $C_{D, \text{body}}$ は齋藤・田中が行った抗力計測実験[7]から求めた。齋藤らの研究ではペンギンをフィッティングした紡錘体を、断面が正 24 角形の紡錘体として作成し、濡れ面積を代表面積とした抗力係数は 0.038 であった。本研究では、前面投影面積 $S_{\text{body, front}} = 0.0369$ m² を代表面積として、 $C_{D, \text{body}} = 0.4$ とした。 U [m/s] はロボットの遊泳速度である。

$$Ma = 2F_{\text{fluid, wing}} - F_{\text{body, drag}} \quad (6),$$

$$F_{\text{body, drag}} = \frac{1}{2} \rho C_{D, \text{body}} S_{\text{body, front}} U^2 \quad (7).$$

式 (1-7) を用いて数値解析ソフトウェア (MATLAB R2022a, MathWorks) でロボットの遊泳速度、ギヤードモータに必要なトルク、回転数を計算した。ロボットの質量は 4 kg とした。ここでロボットの翼運動として、静止からの加速モードと、最大速度モードを考えた。フラッピング角度 A_{flap} を、

$$A_{\text{flap}} = \begin{cases} 60^\circ \sin 3\pi t + 3\pi/2 & 0 \leq t \leq 0.333 \\ 60^\circ \sin 4\pi t + 7\pi/6 & 0.333 \leq t \leq 0.583 \\ 60^\circ \sin 5\pi t + 7\pi/12 & 0.583 \leq t \end{cases} \quad (8).$$

で与えた。 $t \leq 0.583$ が加速モードで、 $0.583 \leq t$ が最大速度モードである (図 4(a))。翼素 $j=7$ における迎え角は、加速モードでは、振幅 45°、周波数 1.5 Hz のシグモイド関数で半周期動作させた後、振幅 40° に下げ周波数は 2.0 Hz に上げて半周期動作させた。最大速度モードは、迎え角を振幅 30°、周波数 2.5 Hz のシグモイド関数で与えた (図 4(b))。フェザリング角度は、フラッピング角度と迎え角から計算した (図 4(c))。

計算から得られたロボットの遊泳速度、ギヤードモータに必要なトルク、回転数のグラフを図 5(a, b, c) に示す。モータ 1 と 2 でトルクと回転数の正負が逆となるが、大きさは同じであるため 1 のみを示す。最も出力を必要とするのは最大速度モードであり、必要なギヤードモータ性能は表 1 のようになった。フラッピングに必要なトルクは最大 10.1 Nm であり、そのときのフェザリングトルクは 1.28 Nm であった。2つのモータでフラッピングとフェザリングを駆動するため、ギヤードモータの最大トルクは 5.69 Nm とした。回転数はトルクが最大となるときに最大となり、158.3 rpm であった。

準定常計算より、フラッピングにはギヤードモータの回転軸から 229 mm の位置に最大で 44.0 N が負荷される。よって、に耐える強度が必要である。

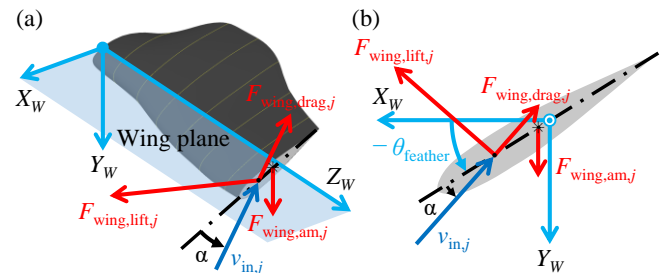


Fig. 3 Hydrodynamic forces and the angle of attack. (a) Orthogonal schematic. (b) Cross-sectional schematic.

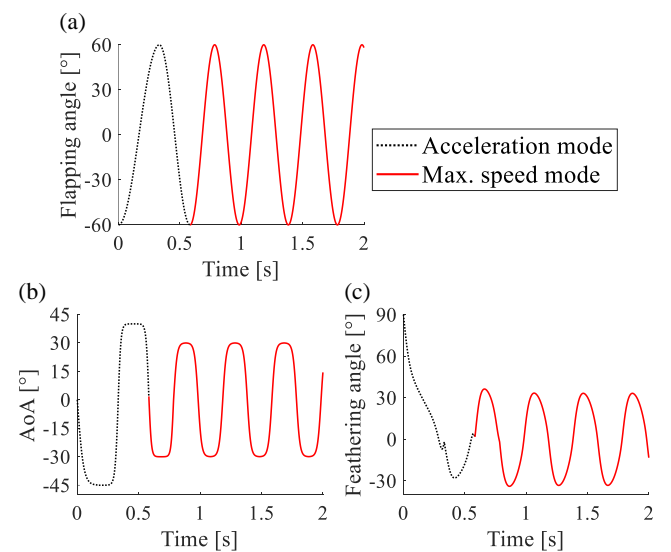


Fig. 4 Input wing kinematics for hydrodynamics calculation. (a) Flapping angle. (b) Angle of attack at the wing element of $j=7$. (c) Feathering angle.

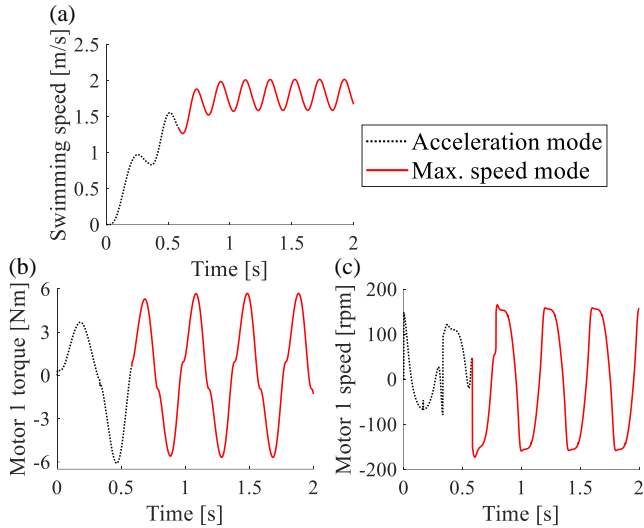


Fig. 5 Results of the numerical simulation. (a) Swimming speed. (b) Output torque of the geared motor 1. (c) Output rotational speed of the geared motor 1.

Table 1 Requirement for the geared motor

Max. power [W]	94.3
Max. torque [Nm]	5.69
Max. speed at max torque [rpm]	158.3

4. 水没型ギヤードモータの設計・製作

ブラシレスモータとして、文献[5]と同様に T-MOTOR 社製 RI50 KV100 を選定した (表 2)。このモータはフレームレスブラシレスモータでロータとステータのみで販売されており、防錆処理がしやすい。

設計したギヤードモータの構造を図 6 に示す。減速比は 13.44 とし、2 段の遊星歯車減速機で構成した。減速機の歯車などは、出力軸に 6 Nm が負荷されても壊れないように設計した。減速機の歯車の材質は、潤滑油なしでも使用できるという点と、水中でも錆びないという点からスーパーエンブラの MC ナイロン摺動グレードと PEEK を用いた。モータホルダなどの強度が必要でない部品は ABS とした。モータの軸の固定には無潤滑でも使用できるセラミックベアリングを用いた。これにより、水没可能な全樹脂製減速機を実現した。

完成したギヤードモータを図 7 に示す。減速機およびモータの部品は NC 加工機 (Micro MC-1, 株式会社ピーエムティー) を用いて加工した。ホールセンサ、磁気エンコーダのモジュールの設計製作は栢菅技術工房に依頼し、組み付け後にエポキシ樹脂で封止した (図 7(b, c))。質量は、配線を除いてモータが 243.0 g、減速機が 105.0 g だった。

Table 2 Specification data of RI50 KV100

Weight [g]	180.8
Voltage [V]	48
Rated power [W]	183.4
Rated torque [Nm]	0.58
Peak torque [Nm]	1.67
Max. speed at rated torque [rpm]	3020
Torque constant K_t [Nm/A]	0.1095
Speed constant K_v [rpm/V]	96

5. 水没型ギヤードモータの評価

5.1 水中でのトルク・回転数・パワー

開発したギヤードモータがロボットの要求性能 (表 1) を満たしていることを検証した。そのために、3.2 で求めた一定のトルクと力を与えながらギヤードモータを定速で回転させた。

図 8 に実験セットアップを示す。開発したモータの評価実験の前に maxon 製ギヤードモータ (ブラシレスフラットモータ EC 60 flat, プラネタリギヤヘッド GP 52 C) を用いて、半径 229 mm の半円板を 160.0 rpm で水中で回転させた電流値から、半円板が水中で回転することによる負荷トルクを推定した。結果は 0.8 Nm だった。開発したモータの評価のために同じ半円板に 9.8 N と 14.7 N の定荷重ばねを取り付けた。定荷重ばねと半円板の負荷トルクによって、24.5 N を負荷しながら 6.41 Nm を負荷することができた。モータコントローラ (ESCON 70/10, maxon) を用いてギヤードモータを 160.0 rpm で速度制御した。実験は 3 回行い、測定データには 10 Hz のローパスフィルタをかけた。結果は図 9 に示すように定速で回転することができた。よって、トルク 6.41 Nm を負荷した状態で、160.0 rpm で回転できたため、開発したギヤードモータは表 1 の必要性能を満たしていることが確認できた。

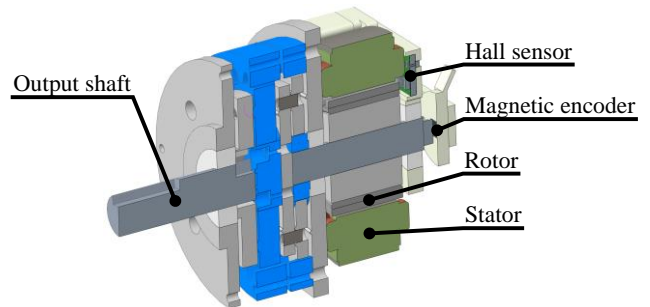


Fig. 6 Structure of the geared motor.

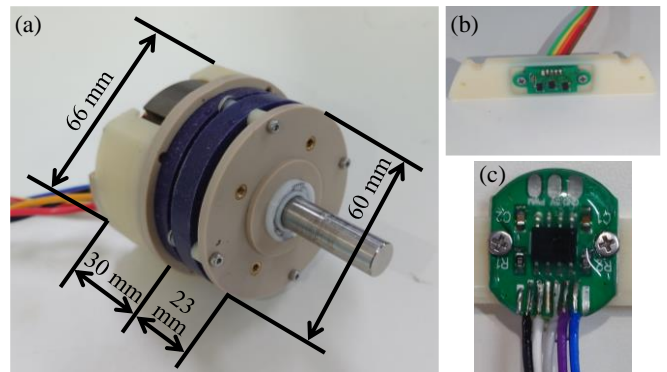


Fig. 7 (a) Completed geared motor. The hall sensor (b) and magnetic encoder (c) were embedded in epoxy resin for waterproof.

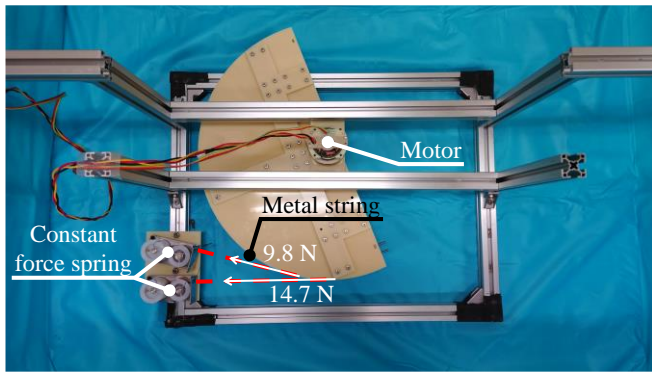


Fig. 8 Experimental setup to apply constant torque and shear force.

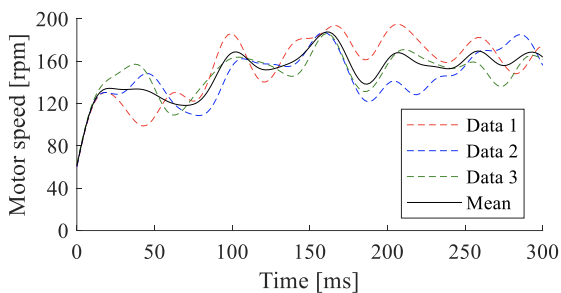


Fig. 9 Time history of motor speed recorded by ESCON. The experiment was conducted three times.

5.2 翼の位置制御

実験装置を図 10(a) に示す。5.1 と同じ実験装置に、3.1 で述べた翼モデルを 3D プリンタ (Ultimaker S5, Ultimaker) で製作 (図 10(b)) して取り付けた。水深は 270 mm であり、水面から翼までの距離は 100 mm、底面から翼までの距離は 80 mm である。モータはマイコン (NUCLEO-F767ZI, STMicroelectronics) と ESCON を用いて正弦波で駆動した。駆動プログラムは栢管技術工房に依頼した。PID 制御をしていたが、外乱が小さく、水中という振動が発生しづらい環境のため、ゲインチューニングの結果、P 制御のみとした。P 制御のローパスフィルタのカットオフ周波数は 10 Hz とした。フラッピング角度が振幅 60°, 周波数 1.0 Hz の正弦波となるように羽ばたかせ、モータに搭載された磁気エンコーダで 5 周期分のフラッピング角度を実測した (図 11(a))。フラッピング角度の実測値と目標値の差は平均 2.7° だった (図 11(b))。振幅の平均誤差は 0.29° であり、位相は目標値に対し約 0.008 秒遅れていた。5 回の羽ばたきの角度の誤差はほとんどなく、最大でも 1.3° だった。遅れについては、マイコンからの角度指令値の位相を進めるなどの方法で、より目標角と実測角の差を小さくすることができると考えられる。

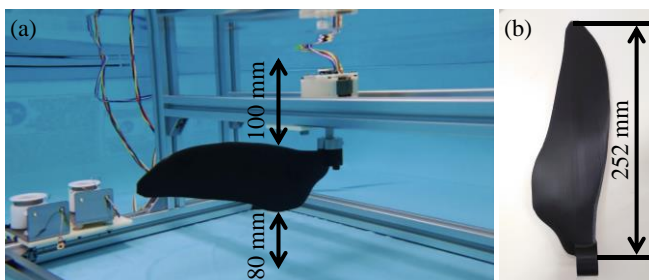


Fig. 10 (a) Experimental setup to test positional accuracy of the geared motor with a wing in water.

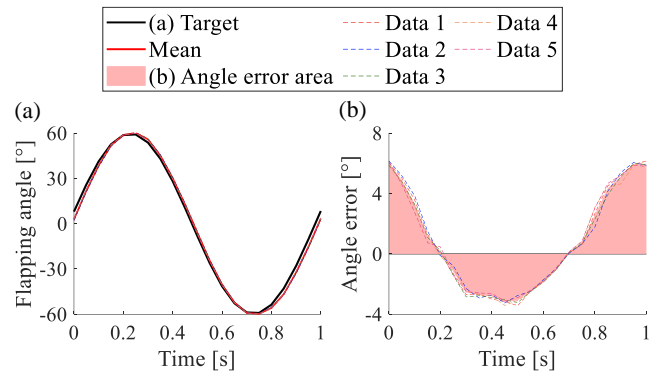


Fig. 11 Time history data obtained from the magnetic encoder. Data were obtained for 5 flapping. (a) Time history of the target and actual flapping angle. (b) Time history of the angle error (difference between target angle and actual angle).

6. 結言

本研究ではペンギン模倣遊泳ロボットに搭載するための水没型ギヤードモータの開発をした。開発したギヤードモータは 24.5 N の力と 6.41 Nm のトルクを負荷しながら 160 rpm で回転した。これは表 1 の必要性能を満たしている。位置制御に関しては、振幅 60° の羽ばたきの目標角と実測角の差の平均は 2.7° だった。振幅の平均誤差は 0.29° であり、位相は 0.008 秒遅れていた。5 回の羽ばたきの誤差は最大でも 1.3° と再現性のある羽ばたきができていた。マイコンからの角度指令値の位相を進めることで、目標角と実際の角度の差を小さくできると考えている。本研究で開発された水没型ギヤードサーボモータを用いて、ペンギンロボットが実現することが期待される。

参考文献

- [1] Gafurov, S. A., Klochkov, E. V., "Autonomous unmanned underwater vehicles development tendencies," *Procedia Engineering*, vol.106, pp.141-148, 2015.
- [2] Fish, F. E., "Advantages of aquatic animals as models for bio-inspired drones over present AUV technology," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.15, no.2, 025001, 2020.
- [3] Watanabe, Y. Y., Sato, K., Watanuki, Y., Takahashi, A., Mitani, Y., Amano, M., Aoki, K., Narazaki, T., Iwata, T., Minamikawa, S. and Miyazaki, N., "Scaling of swim speed in breath-hold divers," *Journal of Animal Ecology*, vol.205, no.80, pp.57-68, 2011.
- [4] Shen, Y., Harada, N., Katagiri, S. and Tanaka, H., "Biomimetic Realization of a Robotic Penguin Wing: Design and Thrust Characteristics," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.26, pp.2350-2361, 2021.
- [5] 加古川篤, 児島隆弘, 森佳樹, 川村貞夫, 坂上憲光, "防水シールを用いない水没型ギヤード電動サーボモータによる水中力制御," ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022, 2P1-L01, 2022.
- [6] Harada, N., Oura, T., Maeda, M., Shen, Y., Kikuchi, D. M. and Tanaka, H., "Kinematics and hydrodynamics analyses of swimming penguins: wing bending improves propulsion performance," *Journal of Experimental Biology*, vol.224, jeb.242140, 2021.
- [7] 齋藤遼輔, 田中博人, "ペンギンの体表を模倣したリプレットの 3 次元胴体モデルにおける抗力低減効果," 日本機械学会第 100 期流体力学部門講演会 講演論文集, OS05-04, 2022.
- [8] DeLaurier, J. D., "An aerodynamic model for flapping-wing flight," *The Aeronautical Journal*, vol.97, no.964, pp.125-130, 1993.
- [9] Fung, F. C., "An introduction to the theory of aeroelasticity," *Dover Publications*, New York, 1993.
- [10] Walker, J. A., "Rotational lift: something different or more of the same?" *Journal of Experimental Biology*, vol.205, no.24, pp.3783-3792, 2002.