

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	ペンギンの旋回遊泳の運動解析
Title(English)	Motion analysis of a penguin in turning swimming
著者(和文)	高倉 一之進, 原田 夏輝, 田中 博人
Authors(English)	Kazunoshin Takakura, Natsuki Harada, Hiroto Tanaka
出典(和文)	日本機械学会関東支部第28期総会・講演会予稿集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2022, 3

ペンギンの旋回遊泳の運動解析

Motion analysis of a penguin in turning swimming

○学 高倉 一之進^{*1}, 学 原田 夏輝^{*1}, 正 田中 博人^{*1}
Kazunoshin TAKAKURA^{*1}, Natsuki HARADA^{*1} and Hiroto TANAKA^{*1}
^{*1} 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

Penguins use a pair of wings to perform agile swimming maneuvers such as sharp turns and rapid acceleration. In previous studies on penguin swimming, 3D motion analysis for forward swimming and visual observation of turning swimming have been conducted. 3D motion analysis of turning swimming, however, has not been conducted. Since turning swimming is an important ability involved in foraging preys and escape from predators, it is essential for understanding the swimming mechanism of penguins. In this study, in order to reveal the mechanism of penguins in turning swimming, we filmed penguins at a zoo from multiple directions with underwater video cameras. We attached tracking markers to representative parts of the penguins and conducted 3D motion analysis, and a single sequence including left turn was analyzed. As a result, the penguin seemed to turn left during upstroke and move straight forward during downstroke, although the contributions of the left and right wings to those turning behavior is still unclear. During the left turn, the penguin bent the neck leftward so that the angle of attack of the head was small, suggesting that the drag of the head was minimized by the neck bending.

Keywords: Penguin, Turning swimming, 3D motion analysis, Hydrodynamics, Biomechanics

1. 緒 言

ペンギンは一対の翼を羽ばたかせて水中を推進する。さらに頭や足および尾も使って急旋回などの俊敏な遊泳を実現していると考えられている⁽¹⁾。旋回は、採餌や捕食者からの逃避など、ペンギンの生死に関わる重要な遊泳であり、そのメカニズムの解明はペンギン遊泳メカニズムの理解に必要である。これまでペンギンの遊泳メカニズムの研究は少なく、当研究室の Harada らはジェンツーペンギンの直進羽ばたき遊泳について初めて 3 次元運動解析を行い、羽ばたきによる推進メカニズムや翼の曲げ変形が遊泳に与える影響を明らかにした⁽²⁾。また Hui は 1 台のカメラを用いて水族館で飼育されているフンボルトペンギンの観察を行い、旋回遊泳の際に首や足、尾羽を駆使していることを報告した⁽¹⁾。しかし Harada らの研究では、カメラがペンギンから離れた位置にあったため、嘴や足および尾に関しては写りが悪く解析できていない。そして Hui の旋回遊泳の研究では、撮影方向が 1 方向に限られていたため 3 次元運動は解析しておらず、体の各部位の詳細な動きは不明である。体の各部位が発生する流体力は、各部位と相対流速のなす角である迎え角に強く依存するため、詳細な 3 次元運動解析が必要である。そこで本研究では、ペンギンの旋回メカニズムの解明を目的として、動物園で旋回遊泳するペンギンを近距離で多方向から撮影し、3 次元運動解析を行った。

2. 実験方法

2.1 遊泳するペンギンの水中撮影

ペンギンの遊泳の撮影は、2021 年 12 月 15 日に東武動物公園（埼玉県宮代町）のペンギン舎にて実施した。撮影対象はフンボルトペンギン (*Spheniscus humboldti*) の 2 個体である。体重は、個体 A が 3.73 kg、個体 B が 4.67 kg だった。運動解析時の追尾用マーカとして、各個体に対し防水テープ (tesa 4651, tesa SE, Germany) を貼付した (図 1)。取り付けた部位は胴体 4 点、翼 6 点、足首 2 点の計 12 点である。胴体については、腹面および背面の正中線上の 2 点に、防水テープをペンギンの羽毛を包むように貼付した。翼については、左右それぞれ

れ翼根と手首関節付近に防水テープを巻き付けて、その上から翼根・前縁・後縁の 3 点に蛍光テープを接着した。足首については、左右にそれぞれ防水テープを巻き付けた。

図 2 は撮影のセットアップである。撮影には 13 台の水中ビデオカメラ (GoPro HERO10 Black, GoPro, Inc., USA) を使用した。カメラの解像度, フレームレート, 露光時間はそれぞれ 3840×2160 pixels, 60 fps, $1/960$ s である。ガラス側に 4 つ, 陸側に 2 つのアルミ製フレームを設置し, 各フレームにカメラを固定した。ガラス側には, 各フレームのプール底付近と水面付近に 1 台ずつ計 8 台のカメラを取り付け, 陸側には, プール底付近に 1 台, 水面付近に 4 台の計 5 台のカメラを取り付けた。カメラの 3 次元キャリブレーションのために, 直方体状のキャリブレーション空間を撮影した。キャリブレーション空間として, マーカを貼付したチェーンの両端にそれぞれ重石と浮きを繋いだものをプール内に 8 つ配置し, チェーン上のマーカと浮きを特徴点として利用した。この特徴点で囲まれるキャリブレーション空間は, 長さ 3.3 m, 幅 0.9 m, 高さ 0.8 m の直方体である。また撮影された映像の時刻同期を行うため, 明滅する照明を全てのカメラで同時に撮影した。

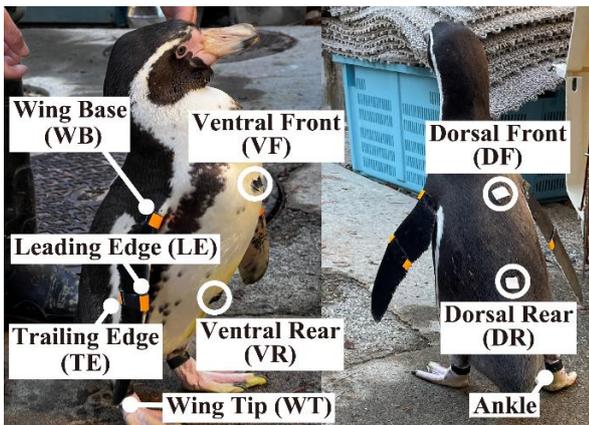


Fig. 1 Markers on the penguin A.

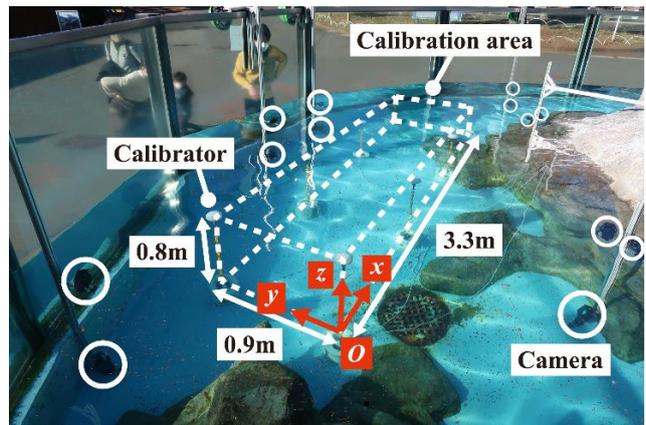


Fig. 2 Camera locations and calibration area.

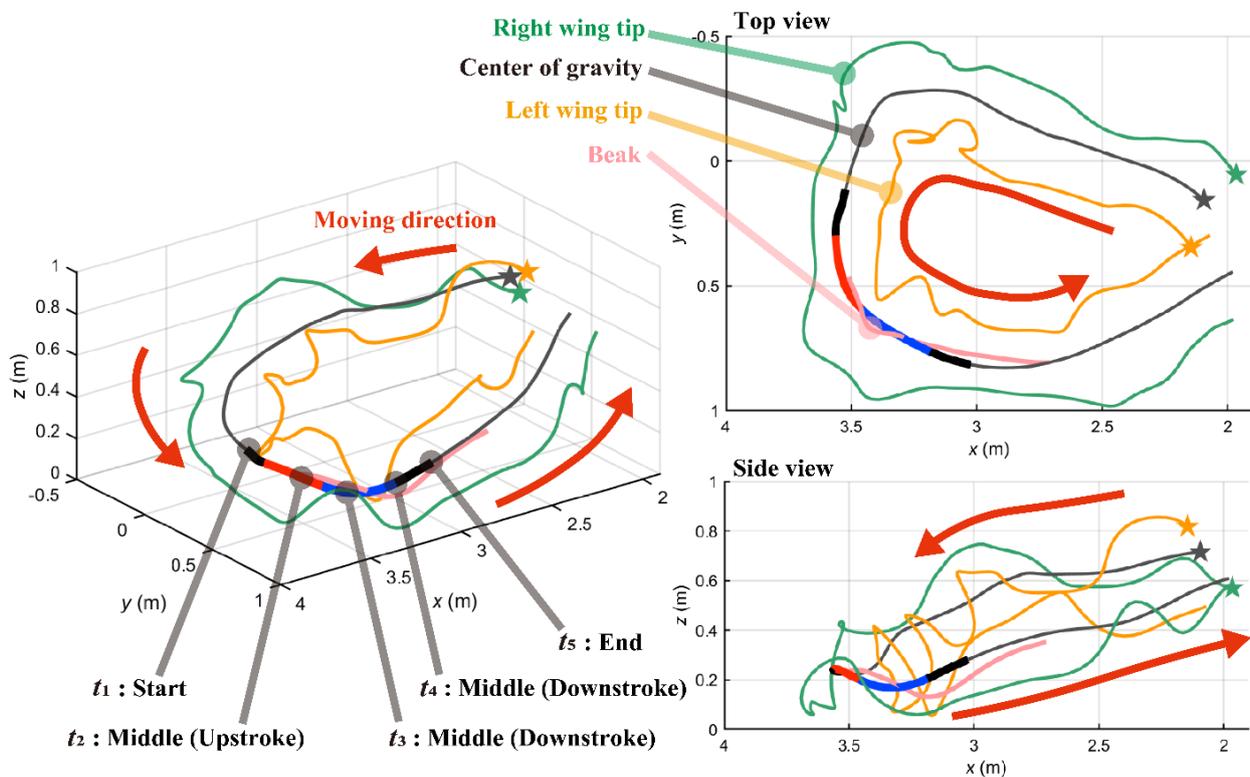


Fig. 3 Reconstructed trajectories of successive left turns.

2・2 運動解析

ペンギンに取り付けた 12 点のマーカに左右の翼端および嘴端を加えた、計 15 点の部位を追跡した。各部位の 3 次元座標の時系列データは、各カメラの画像から DLT (Direct Linear Transformation) 法で算出した。その際に運動解析ソフトウェア (DIPP-Motion V3D, ディテクト, 日本) を使用した。なお DLT 法は、マーカが 2 台以上のカメラから写っていればその 3 次元座標が得られるが、本研究ではデータをより正確にするために 3 台以上のカメラから写っているマーカについて 3 次元座標を取得した。その後データは、カットオフ周波数 8Hz の 17 点の重み付き移動平均により平滑化した。また直方体のキャリブレーション空間から、空間座標系 ($O-xyz$) を定めた (図 2)。

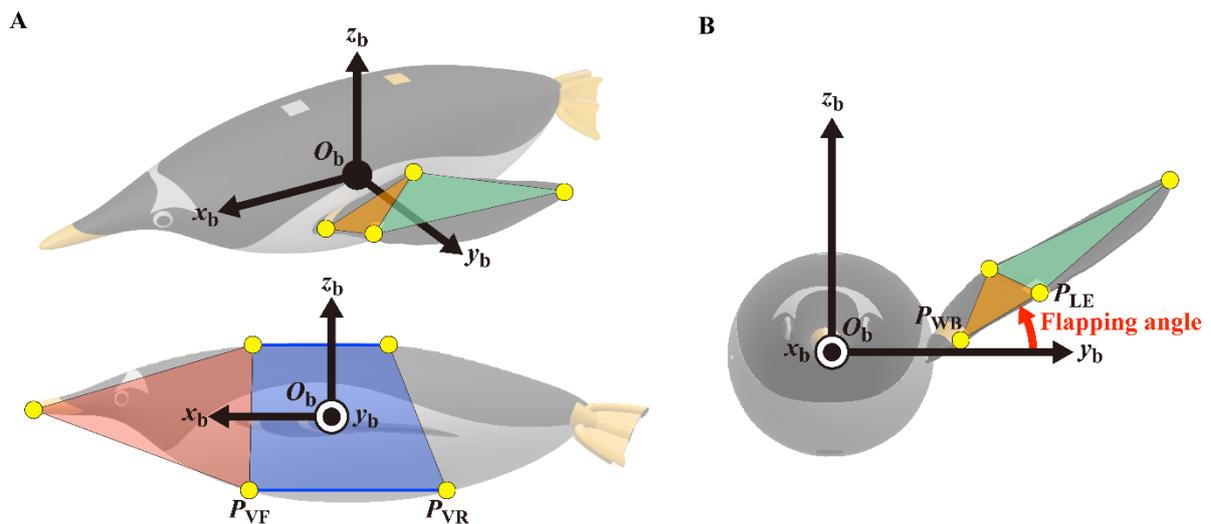


Fig. 4 (A) Body coordinate system and simplification of wings and body. (B) Definition of flapping angle.

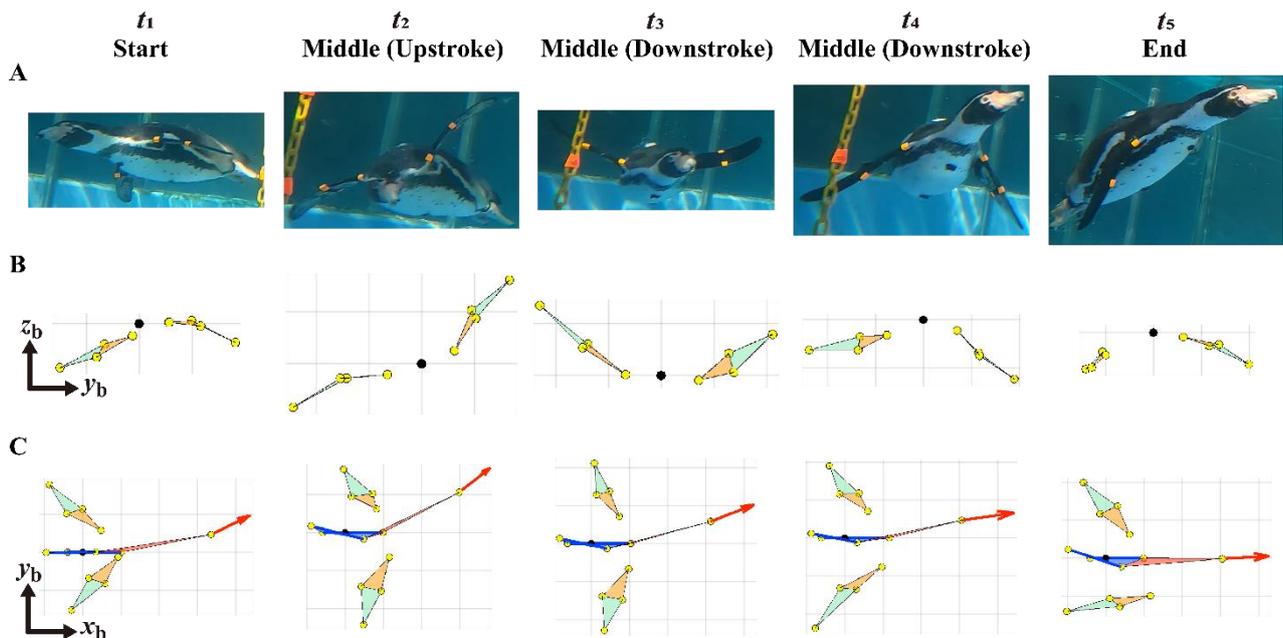


Fig. 5 Time variation of the body and wing postures in the left turn of the penguin A. (A) Images captured by a camera at the start (t_1), upstroke (t_2), downstrokes (t_3, t_4), and end (t_5) of the left turn. (B) Front views of the wing postures. (C) The body and wing postures and the beak tip velocity vector viewed from the dorsal side.

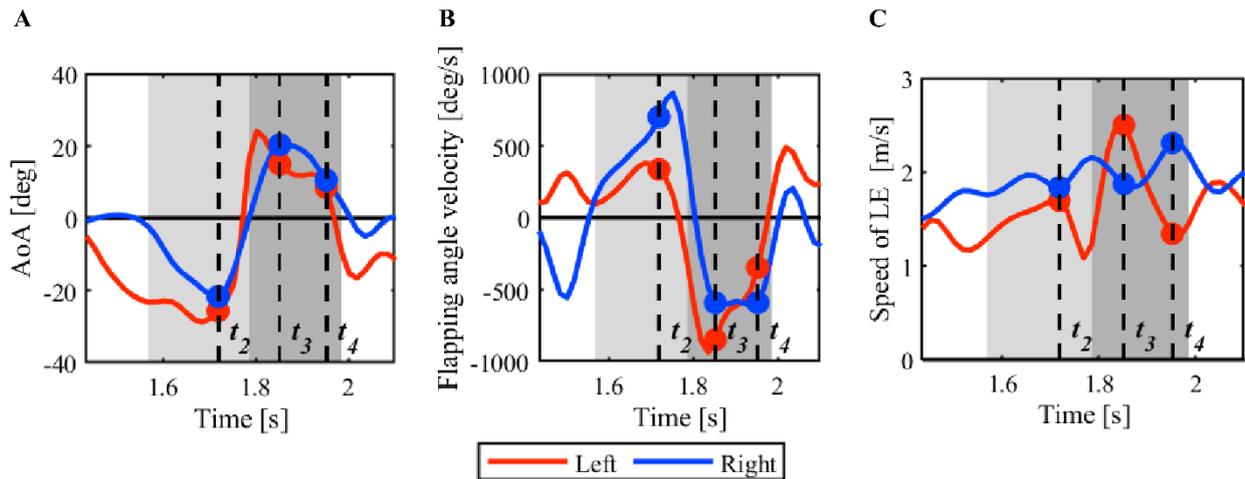


Fig. 6 (A) Angle of attack (AoA). (B) Angular velocities of flapping. (C) Speed of the leading edge points (P_{LE}).

3. 結果と考察

個体 A の左旋回の軌跡を図 3 に示す。胴体 4 点（腹面 2 点，背面 2 点）の幾何中心を重心と定義して，それに左右の翼端と嘴を加えた 4 点の軌跡がそれぞれ示されている。なお軌跡の最初の位置が星印で表されており，嘴端については以下の考察で扱う 2 回目の左旋回に対応する軌跡のみ表示されている。重心の軌跡から，ペンギンはまず下降し，2 回左旋回した後，上昇しながら緩い左旋回をしていることが分かる。特に 2 回目の左旋回の軌跡は太線で表示されており，黒色が滑空，赤色が打ち上げ，青色が打ち下ろしを表している。また翼端の軌跡は連続した打ち上げと打ち下ろしを捉えている。

図 4 に示されるように，胴体座標系 ($O_b-x_b y_b z_b$) を定義した。これは重心を原点 O_b とし，腹面マーカ 2 点から定まる $\overrightarrow{P_{VR}P_{VF}}$ を x_b 軸方向， $\overrightarrow{O_bP_{VF}}$ と $\overrightarrow{O_bP_{VR}}$ の外積を y_b 軸方向， x_b 軸と y_b 軸の外積を z_b 軸方向とする座標系である。そしてペンギンの姿勢について考察するにあたり，翼と胴体の単純化を図った。図 4(A) のように，翼については翼端と 3 点の翼マーカから作られる 2 枚の三角形により，胴体については嘴と背腹マーカ 4 点から成る三角形と四角形により，それぞれ単純化した。

2 回目の左旋回について，旋回の始め，羽ばたき中（打ち上げ，打ち下ろし前半，打ち下ろし後半），終わりの 5 つの時刻におけるペンギンの様子を図 5 に示す。なお羽ばたき中の時刻 t_2, t_3, t_4 は，羽ばたき角速度の大きい時刻を選択した（図 6(B)）。図 5(A) は，それぞれの時刻で撮影されたペンギンの画像である。図 5(B),(C) は，運動解析により復元された翼および胴体の姿勢であり，黒い点は重心を表している。図 5(B) では x_b 軸方向からみた翼の姿勢が，図 5(C) では z_b 軸方向からみた翼および胴体の姿勢と，嘴の速度ベクトル（赤い矢印）が示されている。

まず，迎え角の左右差について考察する。図 6(A) に，時刻 t_1 から t_5 までの区間において迎え角を示す。ただし前縁マーカの速度ベクトルの逆ベクトルを相対流速として，翼面と相対流速のなす角を迎え角と定義し，翼面の下側から相対流速が当たるときを正とした。なお図 6 の背景色について，白色，薄い灰色，濃い灰色はそれぞれ滑空，打ち上げ，打ち下ろしを表す。打ち上げ開始から時刻 t_2 までは左翼の迎え角の方が大きい傾向にあるが，時刻 t_2 から打ち下ろし終了までにおいて迎え角は左右で大きな差はない。図 6(B) に，時刻 t_1 から t_5 における翼の羽ばたき角速度を示す。ただし図 4(B) のように， $\overrightarrow{P_{WB}P_{LE}}$ を $y_b z_b$ 平面に投影したときに y_b 軸となす角を羽ばたき角と定義した。翼の打ち上げ方向が正となる。羽ばたき角速度の大きさは，時刻 t_2, t_4 では右翼の方が大きく，時刻 t_3 では左翼の方が大きい。そして図 5(B) を見ると，時刻 t_1, t_5 では翼の姿勢に左右で違いはほぼないが，打ち上げ中の時刻 t_2 では右翼の回外（翼の捻り上げ）が左翼よりもやや大きく，打ち下ろし前半の時刻 t_3 では左翼の回内（翼の捻り下げ）が顕著で，打ち下ろし後半の時刻 t_4 では右翼の回内がやや大きい。つまり打ち上げ中の時刻 t_2 では，右翼は羽ばたき角速度が大きいですが回外も大きいため，左右の翼の迎え角に大きな差は生まれなかったと考えられる。同様に，打ち下ろし中の時刻 t_3, t_4 についても左右の迎え角の差は小さく

なったと考えられる。

次に、迎え角と相対流速から翼に作用する揚力および旋回メカニズムを考察する。図 6(C) は時刻 t_1 から t_5 における前縁マーカの速度である。前縁の速さは、打ち上げ中の時刻 t_2 では左右の翼で差は見られないが、打ち上げ中の時間平均値では右翼の方が大きい（右翼：1.9 m/s, 左翼：1.5 m/s）。また打ち下ろし中は、時刻 t_3 と t_4 で大小が入れ替わっているが、同様に時間平均を考えると左右で大きな差は見られない（右翼：2.1 m/s, 左翼：1.9 m/s）。つまり時刻 t_2 から打ち上げ終了までは、左右の翼で迎え角は変わらないが相対流速が右翼の方が大きい。そのため、右翼がより大きな揚力を発生すると考えられる。しかし打ち上げ開始から時刻 t_2 までにおいては、迎え角は左翼の方が大きく相対流速は右翼の方が大きい。そのため、左右の揚力の大きさについて断定することはできない。よって打ち上げ中では必ずしも右翼に作用する揚力の方が大きいとは言えない。一方で打ち下ろし中は、迎え角および相対流速の左右差が小さいため、作用する揚力の大きさは左右で変わらないと考えられる。また揚力の方向は相対流速に依存するため、相対流速の方向によっては揚力が推力として機能しない場合も考えられる。そのため揚力の大きさの左右差が、旋回メカニズムに寄与しているとは一概には言えない。しかし図 3 の上面図から、打ち上げ中の方が打ち下ろし中よりも軌跡の曲率が大きいことが確認できるため、主に打ち上げ中には左旋回するための力が生成されており、打ち下ろし中には前進するための力が生成されている可能性がある。

最後に首の動きについて考察する。図 5(C) より特に時刻 t_2 では首が大きく曲がっていることが分かる。すなわち打ち上げ中に大きく旋回しているのと同時に、首も大きく曲がっている。これは、図 3 の上面図において重心の軌跡が嘴の軌跡を概ね辿っていることから確認される。また図 5(C) より、嘴の速度ベクトルと首の向いている方向が一致していることが確認できる。以上のことから左旋回の間、ペンギンはなるべく抵抗を減らすように首を動かしながら遊泳していると思われる。

4. 結 言

東武動物公園のプール内に 13 台の水中ビデオカメラを設置し、ペンギンの旋回遊泳を撮影した。そして運動解析を行い、遊泳の 3 次元軌跡を復元した。また左旋回における 5 つの時刻について、ペンギンの姿勢や翼の迎え角および相対流速から左右翼の揚力の大きさを考察した。結果として揚力の大きさの左右差が旋回メカニズムに寄与しているか不明ではあるが、打ち上げ中は左旋回のための力が、打ち下ろし中は前進のための力が生成されていることが示唆された。また左旋回中、ペンギンが首を曲げていることが確認され、これは流速に対して抵抗を減らすように動かしていると考えられる。今後は撮影方法を改善したうえで解析する旋回のサンプル数を増やし、ペンギンの旋回遊泳の詳細なメカニズムについて調べていく予定である。

謝 辞

ペンギンの撮影実験の実施にあたり、ご協力を頂いた東武動物公園に深く感謝申し上げます。本研究は JSPS 科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05468 の助成を受けたものです。

文 献

- (1) Hui, C. A., “Maneuverability of the Humboldt penguin (*Spheniscus humboldti*) during swimming,” *Canadian Journal of Zoology*, Vol. 63, No. 9 (1985), pp. 2165-2167.
- (2) 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, No. 21 (2021), jeb242140.