

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	生物規範柔軟羽ばたき翼の歪感覚による風環境検知の研究
Title(English)	
著者(和文)	久保田健太, 伊藤達哉, 近藤寛隆, 藤井智矢, 田中博人
Authors(English)	Kenta Kubota, Tatsuya Ito, Hirotaka Kondo, Tomoya Fujii, Hiroto Tanaka
出典(和文)	第41回日本ロボット学会学術講演会, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2023, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

# 生物規範柔軟羽ばたき翼の歪感覚による風環境検知の研究

○久保田 健太 伊藤 達哉 近藤 寛隆 藤井 智矢 田中 博人

(東京工業大学)

Previous research has demonstrated that machine learning can be effectively used to detect wind environments by analyzing strain data from strain gauges on flapping wings. However, the placement of the strain gauge has not been sufficiently considered. Also, flapping phase was not measured. This oversight was addressed by carefully considering the location of the strain sensor. The results show placing strain gauges near the edge of wing models can enhance accuracy of wind environments estimation, and implicate flapping phase is unnecessary for detecting wind environments.

## 1. 諸言

飛行生物は翼内の感覚器を利用して、翼変形を検出することで[1-4]周囲の風況を把握し、飛行制御に活用している可能性が指摘されている[1-3]. 生物を規範とした羽ばたき翼飛行体でも、翼変形を感知するセンサによって、周囲の風速や風向きといった風況を認識できることが明らかになっている[5-6]. 当研究室では、これまでハチドリをモデルにした羽ばたき翼に複数の歪ゲージを取り付け、ホバリングを想定した静止状態で羽ばたかせ、得られた歪の約1周期の時間長の時系列データを畳み込みニューラルネットワーク (CNN) [7]によって解析し、周囲の風速・風向の分類に95%を超える正答率で成功した. しかしこの際、歪ゲージの貼付場所は翼表面フィルムを支持する相対的に硬質な構造部位 (羽軸) を採用したが、十分に検討されていなかった. また、翼変形に大きく影響する羽ばたき機の羽ばたき位相は測定されていなかった.

そこで本研究では、飛行生物の翼内の感覚器配置を参考にし、歪ゲージの配置が機械学習による風況推定の正答率に影響を及ぼすかどうかを検証した. また、羽ばたきの位相を歪と同時に学習させることで、風況推定の正答率が向上する可能性についても検討した.

## 2. 研究手法

### 2.1 実験

#### 2.1.1 翼モデル製作

翼モデルは、羽軸、翼膜、翼基部及び取り付け部で構成される[8]. 翼基部から伸びる5本の羽軸が翼膜を支える. . . 翼外形は翼長80mm、翼幅28mmで、翼モデル製作の参考にしたチャムネエメラルドハチドリ[9]の翼の前縁の1.1倍の前縁長さとなるように設計した.

翼膜は厚さ12.5 $\mu$ mのポリイミドフィルム (カプトン50H, 東レ・デュポン) をレーザー加工で製作した. 翼膜以外の部位 (以下、翼フレーム) は熱溶解積層方式3Dプリンター (UltiMaker S3, UltiMaker B. V.) で Tough PLA (NFC Tough PLA - Black, UltiMaker B. V.) , PET CF (3F PET CF 9780 BK, Lehmann

& Voss & Co. KG.) の二色一括成形した. 最前縁羽軸及び翼基部の内部を PET CF で成形し、他の4本の羽軸、翼基部の外部及び取り付け部を Tough PLA で成形した. 翼膜と翼フレームは弾性接着剤 (SUPER X HYPER ワイド, セメダイン) で接着した.

#### 2.1.2 歪ゲージ貼付

歪ゲージ (KFGS-1N-120-C1-11 N30C2, 共和電業) を使用した. 歪ゲージのゲージ線の長さ不足を補うため、2種ポリウレタン銅線 (極細エナメル線, 共和ハーモネット) をはんだ付けし、延長した.

歪ゲージは伸びきった状態の際に、翼変形を邪魔し、適切な翼変形歪が計測できず、また翼モデルが壊れやすくなる. そこで、ベース部近くのリード線を複数回曲げて、歪ゲージの過度な伸びを防いだ.

延長した歪ゲージを翼モデル上の6か所に歪ゲージ専用瞬間接着剤 (CC-36, 共和電業) で貼付した. 貼付場所はトンボ、スズメガの鐘状感覚器を参考に決定した[3-4]. トンボやスズメガの鐘状感覚器は翼の中では剛性の高い脈上に分布している. また、

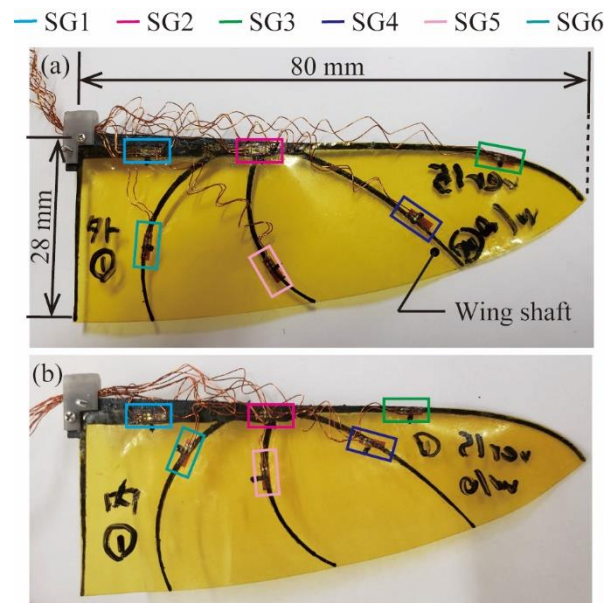


Figure 1 Strain gauges' (a) outside distribution and (b) inside distribution

鐘状感覚器は軸索が最短になるように設計されている[4]にも関わらず、軸索が長いこと神経細胞シグナル伝達の代謝コストの大きい[10]後縁付近に、鐘状感覚器が点在する。これは後縁付近に風況分類に重要な情報が保持される可能性を示唆している。そこで翼基部に2か所、4本の羽軸それぞれに歪ゲージを配置し、羽軸上の歪ゲージの貼付場所は図1(a)(b)の2パターン用意した。(a)では羽軸根元から羽軸の曲線長さの2/3の位置に、(b)では1/3の位置にそれぞれ歪ゲージを貼付している。

### 2.1.3 羽ばたきと風況の実験条件

製作した翼モデルを羽ばたき機の右側に取り付けた[8,11]。機体は羽ばたき軸が鉛直上向きとなるように自動回転ステージ(RMPG60WC-N, Misumi)上に設置した。羽ばたき角の範囲は $-79^\circ$ から $79^\circ$ で、羽ばたき周波数はDCモーターに入力する直流安定化電源の設定電圧値を手動で設定し、 $12\text{Hz}$ (羽ばたき周期 $T=8.3\times 10^{-2}$ )とした。このとき、羽ばたき機は無風状態で上向きに約 $3\text{gf}$ の力を発生させた。翼モデルが約 $2\times 10^{-1}\text{g}$ 、羽ばたき機構が約 $5\text{g}$ なので、両翼を設置した場合、機構を浮かせるのに十分な揚力を発生させる。

機体上部に磁気式エンコーダーを設置し、マイコンボード(NUCLEO-F767ZI, ST Microelectronics)と接続した。解像度は1周期の12分の1で、マイコンボードから $30^\circ$ 毎に約 $0\text{V}$ 、約 $2.6\times 10^{-1}\text{V}$ 、約 $5.2\times 10^{-1}\text{V}$ 、...約 $3.1\text{V}$ の電圧が出力される。ただし、角度は図2のように定義した。

自動回転ステージの回転軸を原点とし、原点からファンのモーター回転軸までをy軸、それに直交する軸をx軸と定義、正の方向は図2参照。図3のように、この機体にy軸正の方向に $0.5\text{m}$ で、同じ高さに設置した軸流電動ファンで水平に風を与えた。無段階速度調整スイッチを手動で操作することで風速

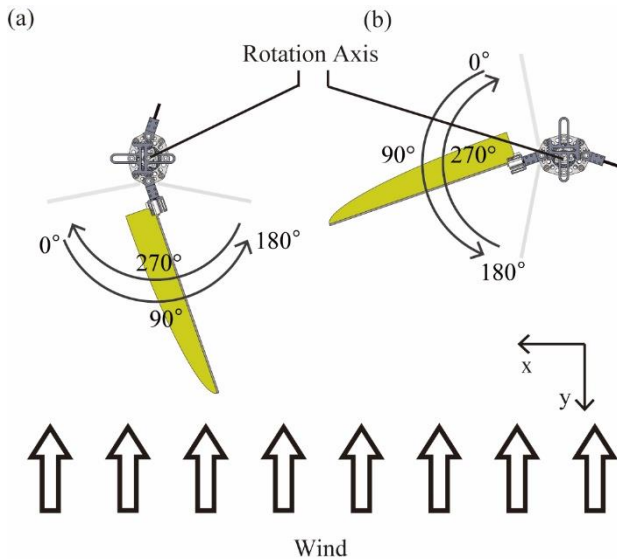


Figure 2 Definition of flapping phase and flapping mechanism when rotation station is set as (a)  $0^\circ$  and (b)  $90^\circ$

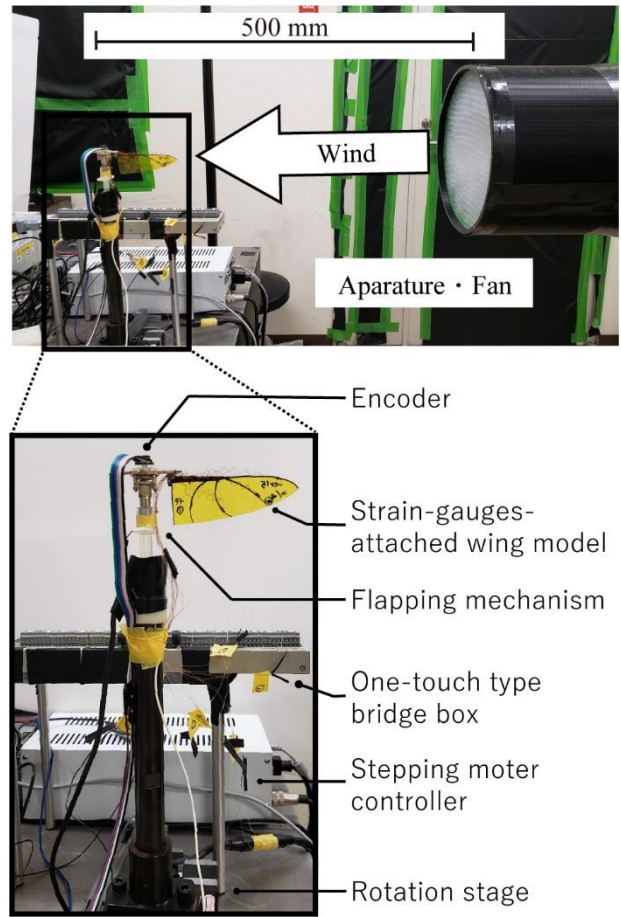


Figure 3 Experiment setup

を変え、羽ばたき機の位置、x軸正の方向約 $10\text{cm}$ の位置、y軸正の方向約 $10\text{cm}$ の位置の風速を1軸風速センサ(アネモマスター MODEL6305, 日本カノマックス)で、約1秒ごとの風速を10回記録し、その平均をとることで確認した。測定結果はそれぞれ $0.99\text{m/s}$ 、 $0.42\text{m/s}$ 、 $1.06\text{m/s}$ であった。風向きは回転ステージを回転させ、ファンに対する鉛直軸周りに羽ばたき機を回転して変えた。

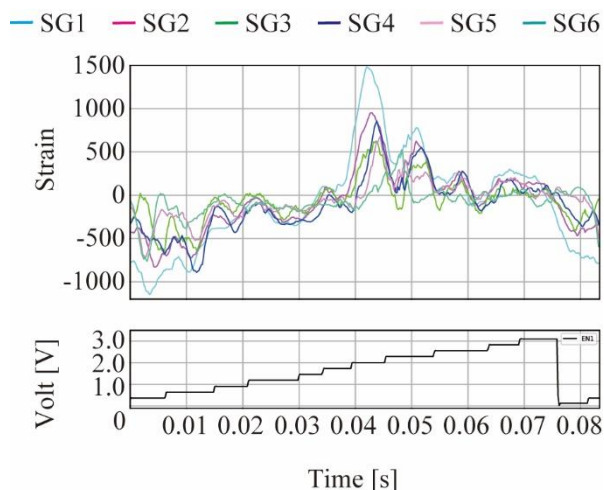
実験で識別する風況は、 $0^\circ$ から $90^\circ$ まで $10^\circ$ 毎の風向に風無しの風況を含め、計11種類の風況を設定した。

### 2.2.4 歪の時系列データ取得方法

ワンタッチ式ブリッジヘッド(DBV-120A-8, 共和電業)に各歪ゲージを接続して1ゲージ法ブリッジ回路を構成。その後、ひずみ電圧測定ユニット(EDX-15A, 共和電業)及びコンパクトトレーディングシステム(EDX-10B, 共和電業)を用いて抵抗変化率を計測した。サンプリングレートは $5\text{kHz}$ とし、計測1回当たりのサンプリング時間は10秒間とした。

風況の変更中は羽ばたき機の電源を切り、ファンと羽ばたき機の間仕切りを設置。この状態で、データロガーによりオフセットを実行した。

また、機械学習時の過学習を防ぐため、1秒間計測する毎に、風況を変えた。ExcelのRAND関数で0から1の範囲でランダムな数値を11個生成し、それ



Graph 1 A-period-length raw data of strain and flapping phase when rotation stage angle is  $0^\circ$

らの大きさ順に計測した。この計測は歪ゲージ外側配置、内側配置のそれぞれ2枚、1つの翼当たり2回実施し、風況ごとに計40秒間、480周期分のデータを取得した。

## 2.2 機械学習モデル構築

### 2.2.1 データ整形

回転ステージ角が  $0^\circ$  の時の歪データ及びエンコーダーの1周期分の生データをグラフ1に示した。

大きな値を持つ学習データはCNNの学習に大きな影響を及ぼす。そのため、この影響を緩和するためにデータを正規化する。

CNNは位相調整なしでも、正確な推測が可能である。[5] 従って、歪データは位相を揃えずに処理する。また、1周期以下の時間長の短いデータでもCNNによる風況推測の正答率が高い[5]。そこで、機械学習に必要なデータを増やすために、1周期、0.5周期、0.2周期で分割する。

### 2.2.2 CNNモデル構築

CNNを用いて、機械学習モデルを構築した[5]。学習モデルには10個の歪ゲージから取得した歪データとエンコーダーの位相データを使用する。正解ラベルのクラスは風況の11種類を使用する。

## 3. 結果と考察

風況推測の結果は表1の通りである。学習データがAllの時のみエンコーダーのデータを学習データに使用している。

長い学習データ(1周期)の場合、エンコーダーの使用が正答率を下げるが、学習データの時間が短くなるにつれ、エンコーダーを含むモデルの正答率の減少は緩やかとなり、短い学習データ(0.2周期)を用いた場合には、エンコーダーを含むモデルの方が正答率が高い。羽ばたき位相の情報が風況分類のノイズになるとは考えにくいので、本研究の結果にはエンコーダーの低解像度及び位相検知の不正確さが

Table 1 Accuracy of CNN's wind environment classification

Strain gauges' distribution	Train data	1.0 period	0.5 period	0.2 period
Outside	All	86%	76%	49%
	SG1,2	85%	63%	41%
	SG3,4,5,6	92%	76%	41%
	SG 1,2,3,4,5,6	93%	78%	46%
Inside	All	79%	65%	47%
	SG1,2	72%	60%	36%
	SG3,4,5,6	78%	67%	39%
	SG 1,2,3,4,5,6	80%	67%	45%

影響していると考えられる。この前提から、1周期分のデータがあるときは歪ゲージがエンコーダーより正確な羽ばたき位相を推測でき、一方、0.2周期分のデータの場合、エンコーダーがより正確な羽ばたき位相を検出できることが考察できる。

また、外側配置の学習データを用いた方が、内側配置の学習データを用いた場合よりも、概して正答率が高い。このことから翼縁付近に風況把握に重要な情報があることが読み取れる。これはトンボやズメガの鐘状感覚器は、エネルギー消費量が大いに関わらず後縁側付近に点在する[2,4]ことを説明する一つの理由になるのではないかと。

## 4. 結言

本研究では、歪データの配置が機械学習を用いた風況推測にどう影響するかを調査した。その結果、飛行生物のように翼縁周辺に歪ゲージを配置することが有効であることを明らかにした。

また、エンコーダーは0.2周期程度の時間長の短い歪データに基づく風況推測に有用であることが示された。一方、1周期のデータを用いた風況推測では、エンコーダーの羽ばたき位相情報が正答率を下けている。羽ばたき位相情報が風況推測にどの程度影響を及ぼすかを詳細に調査するためには、より高解像度かつ精度の高いエンコーダーを用いた追加実験が必要である。

## 参考文献

- [1] S. Sterbing-D'Angelo, M. Chadha, C. Chiu, B. Falk, W. Xian, J. Barcelo, J. M. Zook: "Bat wing sensors support flight control," PNAS Early Edition, doi: 10.1073/pnas.1018740108, 2011.
- [2] B. H. Dickerson, Z. N. Aldworth, T. L. Daniel: "Control of moth flight posture is mediated by wing mechanosensory feedback," The Journal of Experimental Biology, vol. 217, pp. 2301-2308, 2014.
- [3] R. E. Brown, M. R. Fedde: "Airflow sensors in the avian wing," Journal of Experimental Biology, vol. 179, pp. 13-30,

DOI: 10.1242/jeb.179.1.13, 1993.

- [4] J. Fabian, I. Siwanowicz, M. Uhrhan, M. Maeda, R. J. Bomphrey, H. T. Lin: “Systematic characterization of wing mechanosensors that monitor airflow and wing deformations,” *iScience*, vol. 25, 104150, DOI: 10.1016/j.isci.2022.104150, 2022.
- [5] 久保田, 田中: “羽ばたき飛行体の翼変形の機械学習による感覚付与の研究”, 日本機械学会 2022 年度年次大会予稿集, J151p-04, 2022.
- [6] K. Tanaka, S. H. Yang, Y. Tokudome, Y. Minami, Y. Lu, T. Arie, S. Akita, K. Takei, K. Nakajima: “Flapping-Wing Dynamics as a Natural Detector of Wind Direction,” Published by Wiley-VCH GmbH, DOI: 10.1002/aisy.202000174, 2020.
- [7] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton: “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,” in *Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012)*.
- [8] T. Fujii, J. Dang, H. Tanaka: “Hummingbird-bat hybrid wing by 3-D printing”, *IEEE The International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3404-3410, May 2023.
- [9] M. Maeda, T. Nakata, I. Kitamura, H. Tanaka, H. Liu: “Quantifying the dynamic wing morphing of hovering hummingbird,” *Royal Society Open Science*, vol. 4, no. 9, 170307, 2017.
- [10] J. E. Niven, S. B. Laughlin: “Energy limitation as a selective pressure on the evolution of sensory systems,” *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, no. 11, pp. 1792–1804, DOI: 10.1242/jeb.017574, 2008.
- [11] J. Dang, T. Fujii, H. Tanaka: “Design of a hummingbird-mimetic flexible wing with soft limiter of passive feathering,” *ISABMEC 2022*, Paper No. 5573, 2022.