

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02107

研究課題名（和文）自然風を乗りこなすドローンの実現に向けた革新的停空飛行技術の創出

研究課題名（英文）Development of innovative hovering flight technology to realise drones riding the natural wind

研究代表者

中田 敏是（Nakata, Toshiyuki）

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80793190

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、鳥類のように風を利用する飛行ロボットのための停空飛行技術の開発である。このために、（1）冗長に空気力・空気モーメントを調整可能な形状可変機体、（2）羽根規範型風況センサ、（3）風況センサの情報に基づいて変動風の影響を抑制する制御器を開発した。特に、この風況センサは、翼上面に貼り付けたフィルムによって、外乱を抑制することが可能であり、また、失速の直前に反応するという点で、従来の風速センサと比較して斬新な特性を持っている。これらの基盤技術は、変動風への対応というドローンの課題に対して、新しいアプローチをもたらすと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な応用が期待されるドローン等の飛行ロボットは、自然環境での変動する風に抗うために、大きな推力を絶え間なく調整する必要があり、変動風下では、効率・安定性が低下する。この、自然風に抗うことが前提である飛行ロボットに、新たに自然風を利用し乗りこなすという新しい観点をもち、そのための基盤的な技術となる形状可変機体・風況センサ・制御器の設計指針を提案した点に、本研究の大きな学術的意義がある。本研究の成果である技術や知見に基づいて、生物のように自然風を利用する飛行ロボットへの道が開拓でき、「空の産業革命」への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to develop the suite of technologies for hovering flight of wind-assisted flying robots inspired from birds. To this end, (1) morphing aerial vehicle for adjusting aerodynamic forces and torques redundantly, (2) wind sensors inspired from bird feathers, and (3) controllers that suppress the effects of variable wind based on information from the wind sensors have been developed. In particular, this wind sensor has novel characteristics compared to conventional wind speed sensors because it can suppress disturbance by its passive response to the wind and it responds just before a stall. These fundamental technologies are expected to bring a new approach to the challenges of drones in dealing with fluctuating winds.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：飛行ロボット 風況センシング ドローン 停空飛行 生物飛行

1. 研究開始当初の背景

情報収集等の様々な応用が期待されるドローン (Floreato & Wood *Nature* 2015) は、プロペラの運動を制御することで、安定した自律飛行を実現できる (Kendoul *et al. J. Field Robotics* 2010)。しかし、都市や沿岸などでの変動する自然風下では、変動する風に抗うため、大きな推力を常に調整しながら発生する必要があり、姿勢変動による安定性が低下し、飛行時間が短縮される (Clark *Comput. Law Secur. Rev.* 2014)。これは、「空の産業革命」の実現に向けて大きな課題である。固定翼型ドローンは、輸送・情報収集への応用が期待されるが、強風下ではやはり効率や安定性の低下が問題である。

一方、羽ばたき翼によって飛行する鳥は、時に羽ばたきを止め、上昇気流や季節風などの自然風を有効に利用することで、長距離・長時間飛行を実現している (Harvey *et al. J. R. Soc. Interface* 2019)。このような自然風を利用した飛行は、エネルギーの節約の観点から、飛行ロボットにおいても極めて有用である。

情報収集等の明確なミッションがある飛行ロボットは、エネルギーを節約しながら、さらに高精度に安定飛行する必要がある。そこで、チョウゲンボウという鳥の飛行に着目する。チョウゲンボウは、探餌のために、変動する自然風 (平均 4-12 m/s) の中で、大きく羽ばたかずエネルギーを節約しながら、翼・尾羽の形態を変化させることで風を受け流し、ほとんど目や重心の位置を変動させず (それぞれ 6, 40 mm 程度) に飛行 (停空飛行) できる (Videler *et al. J. Exp. Biol.* 102, 1983)。そのサイズ (翼スパン 700 mm 程度) を考えるとこの変動は驚くほど小さい。現在のドローンの形態では、このように風に乗りながら高精度な飛行を実現するのは難しい。しかし、自然風を利用しつつ高精度に情報収集するには、この停空飛行技術は不可欠であり、この飛行のための身体・知能の設計原理の解明が必要である。

研究代表者の中田らは、本研究の開始前まで、生物の羽ばたき飛行の性能に関する研究とその知見を活かした飛行ロボットの開発に従事してきた (Nakata *et al. Acta Mech. Sin.* 2018; Bomphrey, Nakata *et al. Nature* 2017 など)。羽ばたき翼は、その非定常性や柔軟性によって、回転翼と比較して、変動風下でより安定であると考えられ、世界的に様々なグループが羽ばたきロボットを開発してきた (Nakata *et al. Bioinsp. Biomim.* 2011; Keennon *et al. AIAA2012-0588, 2012* など)。しかし、どの形態の飛行ロボットでも、自然風には抗うのが前提であり、生物のように自然風を利用した安定飛行は注目されておらず、飛行ロボットにおいてもその実現には至っていなかった。

2. 研究の目的

上記の背景から、自然風中で安定した高効率な飛行が可能なドローンの実現を最終目的とし、その第一歩として、変動風中での高効率・高精度な情報収集のために極めて重要な、変動風中での停空飛行に着目し、鳥のように自然風を有効に利用しながら、高効率・高精度に情報収集できるドローンのための基盤的な技術となる停空飛行に必要な技術を創出することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、ロボットの性能評価のために、複数の送風機を用いた傾斜風洞 (図 1) を構築した。本風洞は、水平面から 20 度まで傾斜可能であり、12 m/s までの風速を安定して生成することができる。この傾斜風洞の上流に、サーボモータによって制御された振動版を配置することで、様々な変動風を生成することが可能である。この傾斜風洞を、後述の実験に有効に利用した。また、実機での飛行試験を行わずに機体の性能を評価するために、高速な性能評価が可能な流体解析モデルに基づく仮想環境を構築した。これらの環境で空気力調整のための形態変化機構および風況センシングシステムを開発し、これらを統合した実験モデルを構築した。各要素の開発では、流体解析・実験モデルにおいて評価を繰り返すことで各要素の最適化し、自然環境中での安定飛行のための身体的・知能的な設計原理の解明を目指した。

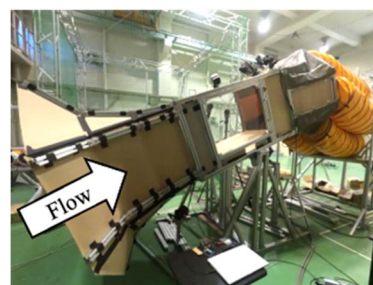


図 1 飛行ロボットの性能評価用の傾斜風洞。

4. 研究成果

(1) 高速流体解析モデル 実機を用いずに試行を繰り返し、機体・センシングシステム・制御手法の最適化を図るための、流体解析モデルを新たに構築した。まず、数値シミュレーションによって、ランダムに運動する翼・胴体に加わる空気力を算出した (図 2)。この、運動と空気力の相関を基に、従来の知見に基づいて、流体解析モデルを構築した。さらに、自由飛行を行う鳥ロボットの翼・胴体の空気力学的モデルを、非線形システムの支配方程式の発見に応用可能なスパース同定手法 (Brunton *et al. PNAS* 2016) を用いて改善した。従来の知見に基づく空気力学的

モデルは、誤差が 24%であったのに対して、誤差が 19%程度に抑えられた。本モデルによって、機体の翼・胴体・尾羽に加わる流体力を精度よく高速に算出できる。また、評価の精度が向上するため、仮想環境から実環境への移行をより円滑に行うことが可能となる。

(2) 形状可変機体と尾翼による空力制御
迎角変化と羽ばたき運動が可能な翼と、向き・広がりを変化できる尾翼を持つ機体を構築した(図3)。それぞれの角度変化は8個のサーボモータ(各翼に2個、尾羽に4個)によって精度良く実現可能であり、3 Hz程度で羽ばたくことが可能である。特に、3軸周りの姿勢および面積を調整可能な尾翼機構の空気力学的性能について、詳しく調査した(図3右)。本ロボットを、6軸力覚センサを介して風洞に固定し、尾翼の各方向の角度の変化が、各方向の空気力・空気トルクに及ぼす影響を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(A) 尾翼の姿勢は機体に加わる空気力に強く影響を与え、各方向の姿勢制御に有用である(図4)。

(B) 尾翼の冗長な姿勢制御によって、効率を維持・向上させながら、機体に加わる3軸方向のモーメントを制御できる。

この尾翼機構は、モーメントの組合せを複数の姿勢で実現できるという点で冗長であり、尾翼機構を有効に利用することで、様々な外乱に瞬時に対応しながら、安定性と機動性の両立を実現できる可能性がある(Murayama, Nakata & Liu *J. Biomech. Sci. Eng.* 2023)。

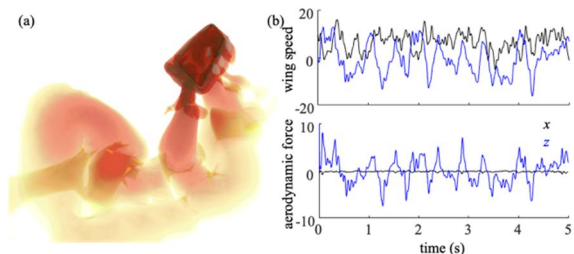


図2 流体シミュレーションに基づく高速流体解析モデルの構築。(a) シミュレーションによる流れ場。(b) 翼運動(上)と流体力(下)。

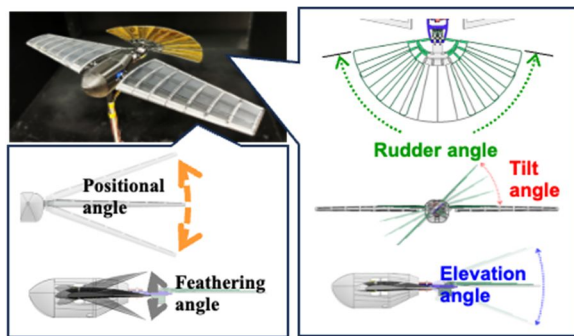


図3 鳥類を規範とした形状可変機体。翼角度を変化させながら(左下)尾翼の形態・角度を変化させることができる(右)。

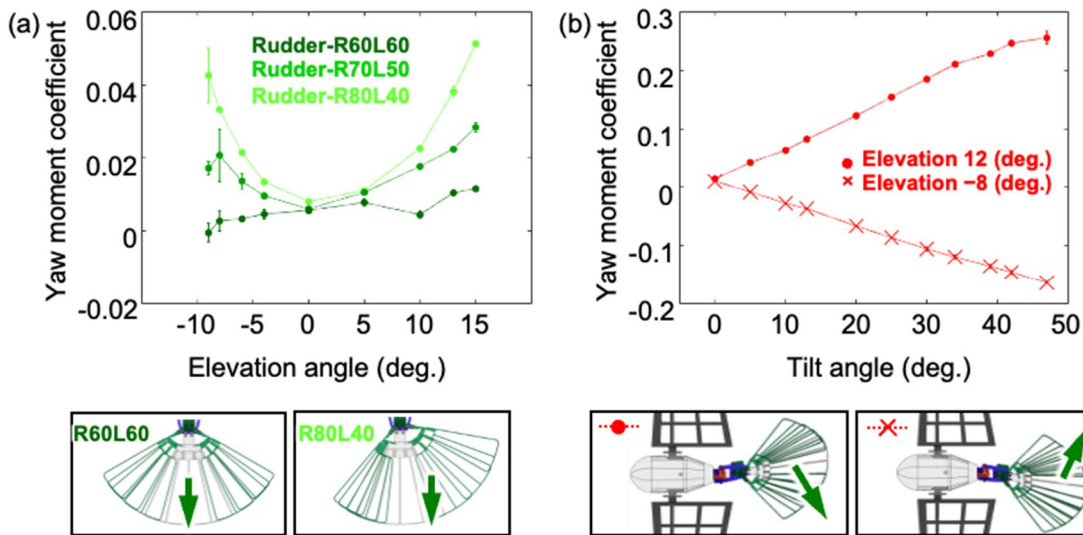


図4 尾翼のラダー角が、ヨー方向のモーメントに及ぼす影響。尾翼のラダー角の非対称性と、(a)エレベーションの組合せや、(b)ティルト角との組合せによって、ヨーモーメントを制御することができる。

(3) 風況センサによる渦の緩和と失速検知
本研究で構築した風速センサは、鳥の羽根のような翼面上の柔軟なフィルムに磁石・ホールセンサを貼り付けたものであり、翼面内の磁石・ホールセンサとの距離の変化を電気的に検出することで、フィルムの変形を検出することができる。

まず、翼上面のフィルムが、翼の空気力学的性能に及ぼす影響を、外乱を振動板によって誘起した風洞実験によって調べた。風洞実験の際には、翼に加わる空気力と共に、高速度カメラの映像に基づいて、フィルムのめくれと、粒子画像測定法によって流速を同時に測定した(図5)。その結果、以下のことが明らかとなった。

(A) 翼上面のフィルムは、外乱による渦の剥離に応じて、受動的にめくれる。フィルムの剛性が、このめくれの振幅や位相に強く影響を与える。

(B) 特に、渦の剥離に近いタイミングでフィルムがめくれる場合、外乱の影響を受動的に抑制でき、力の変動を強く抑制できる。

自然環境中では、予測不可能に風が変動し、姿勢の検知によってこの外乱に対応するのは非常に困難である。特に自然環境中での飛行においては、このような柔軟な構造の受動的な応答による外乱の影響の抑制は、非常に有用であると考えられる (Murayama, Nakata & Liu *Frontiers Biotech. Bioeng.* 2020)。

また、フィルムによる風速センシングの性能を、上記と同様な風洞実験によって評価した。フィルムは翼の根元から翼端まで7つ配置し、それぞれのセンサからの信号を取得した (図6)。この結果、以下のことが明らかとなった。

(A) 静的に迎角を変化させた試験の結果、翼上面に配置した風速センサは、揚力が正常に生成されている状況ではほとんど反応せず、失速直前から失速後の迎角で、強く反応する。

(B) 動的 (10-20 deg/s) に迎角を変化させた場合、揚力は徐々に増加し、ある迎角で失速するが、静的試験の場合と同様に、この失速角に到達する付近でフィルムが強く反応する。

上記の結果から、本研究で新たに開発した、鳥を規範とした風速センサを用いることで、翼が完全に失速する直前に、センサの応答から失速を予測できる可能性がある。通常の姿勢センサは、外乱要因による空気力の変化を、姿勢の変化を介して測定できるが、失速のような急激な揚力の低下を検知できるのは失速が起こった後であり、失速を未然に検知できるという点で、本風速センサには優位性があると考えられる。

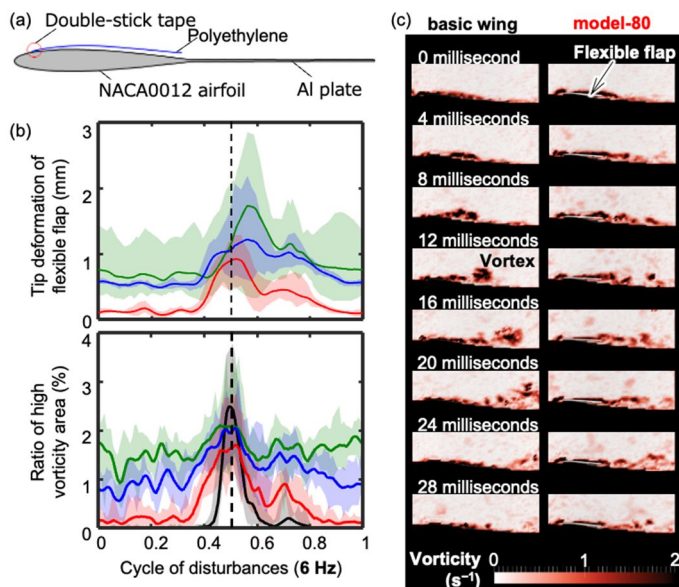


図5 (a) 翼表面の柔軟フィルム。(b) フィルムの剛性が翼表面のフィルムの変形と渦の面積(大きさ)に及ぼす影響。適切な剛性のフィルム(赤)によって渦の生成を抑制することができる。(c) 風洞実験の際の翼近傍の流れ場。フィルムによって渦の生成が抑制されていることがわかる。

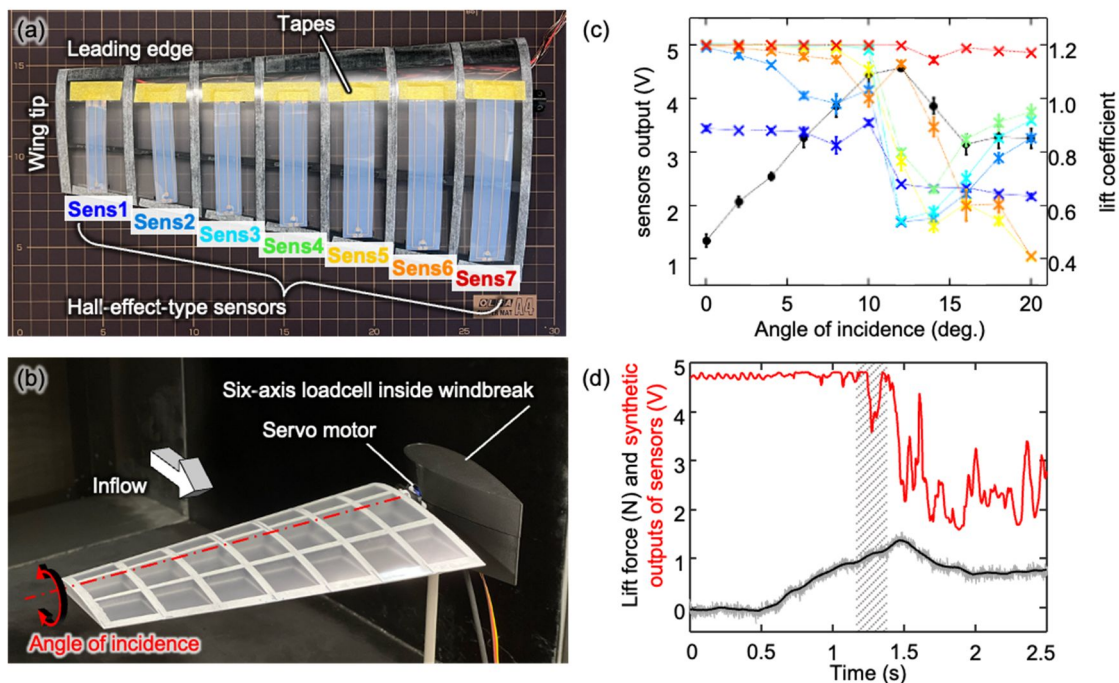


図6 (a) 翼表面に配置した風況センサ。(b) 風況センサの性能評価のための実験システム。(c) 静的に迎角を変化させた場合の風況センサの応答。揚力(黒)が低下するよりも低い迎角で、センサ信号が変化していることがわかる。(d) 動的に迎角を変化させた場合も同様に、失速によって揚力(黒)が低下する直前に、センサ信号(赤)が変化する。

(4) 姿勢安定化のための制御器の構築と風況センシングの有効性の検証 上記の機体と風況センシングシステムを統合した実験モデルを構築した。本システムは、ロール方向のみに運動可能であり、翼の迎角の制御によって、そのロール角を制御できる。通常時はPID制御によってロールの姿勢を安定化するが、風洞上流に配置した回転板によって生じる外乱によって、そのロール角は著しく変化する(図7)。羽根規範型センサは、この姿勢変化の前に、失速に応じて機敏に反応するため、この羽根規範型センサを用いた姿勢制御器を構築した。流体解析モデルと実験による試行を繰り返し、羽根規範型センサの反応時に、通常時からPID制御の定数を切り替えることで、失速に対してより迅速に対応でき、姿勢の変化を抑制できる可能性があることが明らかとなった。

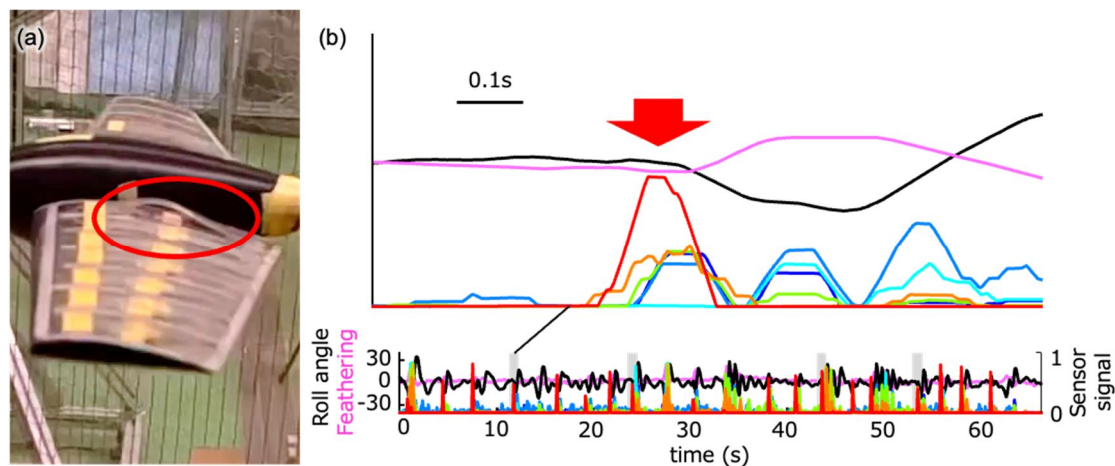


図7 (a) ロール角のみ自由度を持つ機体と、外乱によるセンサの反応(赤丸)。 (b) ロール角、PID制御によるフェザリング角の変化と、センサ信号。外乱によってロール角が変化する前にセンサ信号が反応するため、この信号に基づいてフェザリング角を変化させることで、姿勢の変動を抑制することが可能となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuta Murayama, Toshiyuki Nakata, Hao Liu	4. 巻 9
2. 論文標題 Flexible Flaps Inspired by Avian Feathers Can Enhance Aerodynamic Robustness in Low Reynolds Number Airfoils	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 612182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbioe.2021.612182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Murayama, Toshiyuki Nakata, Hao Liu	4. 巻 18
2. 論文標題 Aerodynamic performance of a bird-inspired morphing tail	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Biomechanical Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 22-00340
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jbse.22-00340	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuta Murayama, Toshiyuki Nakata, Hao Liu
2. 発表標題 Development of bird-inspired wings with flexible flaps inspired by avian covert feathers for flight robots
3. 学会等名 SICB Annual Main Meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村山友太、中田敏是、劉浩
2. 発表標題 鳥の羽根を規範とした柔軟翼を用いたカイトプレーンの外乱応答特性
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2020 in Kanazawa
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田敏是
2. 発表標題 飛翔生物を規範としたドローンの高性能化
3. 学会等名 第68回飛行機シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 保科潤，村山友太，中田敏是，劉浩
2. 発表標題 鳥の羽根を規範とした風速検知による 飛行ロボットの姿勢安定化
3. 学会等名 日本機械学会第33回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村山友太，中田敏是，劉浩
2. 発表標題 ロボットを用いた鳥類の尾羽の空力性能評価とその進化に関する考察
3. 学会等名 日本機械学会第33回バイオフィロントニア講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 保科潤，村山友太，中田敏是，劉浩
2. 発表標題 鳥の羽根を規範とした風センサによる失速の検知
3. 学会等名 日本機械学会第34回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村山友太, 中田敏是, 劉浩
2. 発表標題 高口バラストローンの創製に向けた羽根規範フレキシブル風況センサの特性評価
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大川 一也 (Okawa Kazuya) (50344966)	千葉大学・大学院工学研究院・准教授 (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
英国	The Royal Veterinary College		