

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14500

研究課題名(和文) 射出型探査機の可能性に関する実証研究

研究課題名(英文) Empirical Research on Feasibility of an Ejection-type Aircraft for Exploration

研究代表者

白山 晋 (SHIRAYAMA, Susumu)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：10322067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：防災時の上空監視や地質計測、さらには惑星探査のために超小型航空機(MAV)が開発されているが、その機構が複雑になるに従い正確に動作しないという危険性が指摘されている。本研究では推進系や電子制御系を有さず、機構が単純な竹とんぼを応用した探査機の開発を行う。このために、(1) 発射装置の構築と飛行実験時のデータ取得技術の確立、(2) 竹とんぼの飛翔体としての性能評価のための低レイノルズ数領域での翼形状の評価手法の確立、(3) 熟練者のノウハウの設計知識化の3つのサブテーマを設定し、各研究内容の相互関係を鑑みながら研究を遂行した。

研究成果の概要(英文)：Although a MAV (Micro Air Vehicle) is considered to be useful for exploration in a severe environment like planetary exploration etc., it has been pointed out that the risk which the functions of MAV do not work correctly as its mechanism becomes complicated. In this research, we apply a flying dragonfly propeller known as "taketombo" which has no propulsion system or electronic control system, and the mechanism is simple to the development of an ejection type aircraft for exploration. We carried out the study based on the following three sub-themes: (1) Development of a launch device capable of ensuring the reproducibility of the flight path and speed, and data acquisition technique during flight experiment, (2) Establishment of evaluation method to determine the wing section in low Reynolds number regime, (3) Establishment of method of extracting the design information for the launch device from the behavior analysis.

研究分野：流体情報学

キーワード：特殊航空機 回転翼 非定常流れの定量的比較法 発射装置 視線計測分析 設計知識化

1. 研究開始当初の背景

防災時の上空監視や地質計測用、さらには惑星探査用として超小型航空機（Micro Air Vehicle: MAV）の開発が進められている。通称ドローンとして知られるもののように既に実用化されたものも多い。しかしながら、電子機器を搭載して複雑になるにしたがい耐障害性が低下し、必要時に正確に動作しないといった問題が指摘されている。このため、MAVの機能を代用できる、機構が単純な飛行体の模索も続いている。例えば、Global Aerospace社の開発した気球誘導システム[1]や凧などである。しかし、気球は測定機器を搭載するための浮力を得るには大きな体積を必要とし、運用面での問題がある[2]。凧型については、カメラや遠隔操作機構を搭載する例が数多く知られているが、微風時の運用やワイヤー処理が問題となる[3]。

このような状況において、本機に推進系や電子制御系を有さず、優れた飛行性能を持つものとして射出型の飛行体が注目されている。プロペラと軸のみで構成された伝統的な飛行玩具である竹とんぼが代表である。近年では、人の手による駆動でありながら、高度50m、飛距離100mに達するスーパー竹とんぼ[4]と呼ばれるものも製作されている。また、竹とんぼには、低空飛行から急上昇し、最高到達地点でしばらく静止するといった多様な飛行経路、および飛行形態が実現できることにも特徴がある。さらに、回転翼の空力性能の向上面で、竹とんぼが注目される場合もある[5][6]。近年、様々な分野で活用が進んでいる回転翼型のドローンにおいて、空力性能の高い回転翼の設計がドローン自体の性能向上の鍵になっているためである。

しかしながら、このような特性を持ちながら、竹とんぼの工学的な応用例はほとんどない。我々は、竹とんぼの研究を続ける中で、その特性が探査用飛行体に適するものと考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の主目的は、推進系や電子制御系を有さず、機構が単純な、射出型探査機の可能性を実証的に検討することである。背景で述べたように、竹とんぼがそのような探査用飛行体に適するものと考えられる。そこで、竹とんぼを利用した射出型探査機の開発を目指し、竹とんぼを用いた実証研究を行う。竹とんぼの飛行の仕組みは、低レイノルズ数領域での翼の空力特性と慣性モーメントによるエネルギー保存則の特性を巧みに生かしたものとなっている。このことから、回転翼型MAVの基礎的研究の推進に貢献することも本研究の目的となる。

3. 研究の方法

本研究では、竹とんぼを利用した射出型探査機の可能性について検討する。(1)発射装置の構築と飛行実験時のデータ取得技術の確立、(2)竹とんぼの飛行体としての性能評価のための低レイノルズ数領域での翼形状の評価手法の確立、(3)熟練者のノウハウの設計知識化の3つのサブテーマを設定し、各研究内容の相互関係を鑑みながら研究を逐行する。

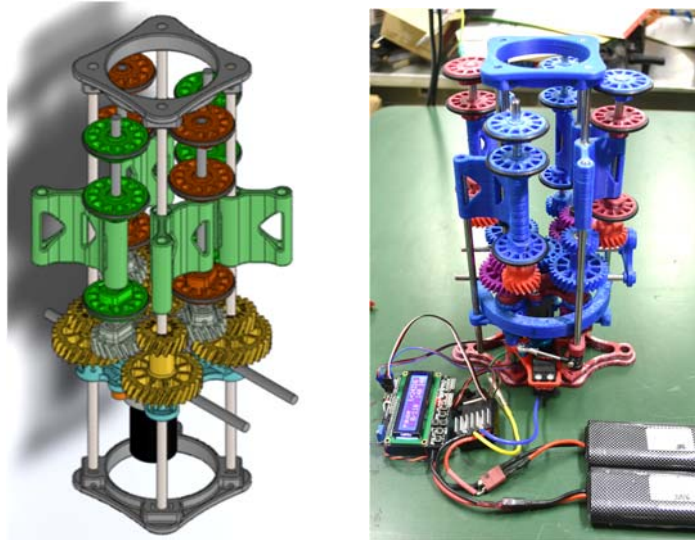
(1)竹とんぼの特徴を活かした、耐障害性の高い飛行体の製作や、回転翼の設計法への展開は難しい。人の手による駆動からの発射（以降、手動発進と呼ぶ）のため、飛行経路、および飛行形態を繰り返し再現することが困難なためである。これに対し、安田は、竹とんぼの発射装置を用いた飛行実験を行っている[6]。しかし、簡易的な発射装置のため、多様な飛行経路や飛行形態は実現できていない。このような理由ため、現状での回転翼の設計は、試行錯誤によって行われている[7][8]。本研究では、風洞などの大きな実験設備を必要とせず、安価に、かつ容易に射出実験が実施できることを発射装置の条件とする。この条件を満たすために、3Dプリンターで作成した部品を利用し、飛行経路、および飛行形態が繰り返し再現できる発射装置を開発する。

(2)射出型探査機として竹とんぼを利用する場合、回転翼断面形状と揚力や抗力の時間変化との関係を調べ、評価する方法が必要になる。2次元翼であっても、レイノルズ数が数千から数万であっても、データ量が膨大になるため、非定常な空力的特性を系統的に調べることは難しい。本研究では、低次元化手法によって、異なるレイノルズ数、異なる迎角の非定常速度場を低次元特徴空間で表現し、比較検討を容易にする手法を開発する。

(3)発射装置は手動発進を模倣して設計する。手動発進での飛ばし方自体は単純なものである。しかし、例えば、低高度、短距離に存在するターゲットに竹とんぼを到達させるためには、回転のさせ方、軸の向きなどにおいて、熟練者の技が必要になる。本研究では、手動発進における手の動きの正確な模倣による発射装置の性能向上を試みる。熟練者へのヒアリング等に基づく飛ばし方の言語化は難しいことが知られているため、動画分析を利用する。動画分析では、分析者の主観に左右されやすいことが問題となる。特に、手の動かし方のどこに注目して分析すべきかを客観性をもって特定することが難しい。そこで、本研究では、分析者、あるいは設計者に、手の動かし方のどこに注目すべきかを提示する方法を提案する。また、飛ばし方の定量的な記述を検討し、飛ばし方の定量的な記述に基づいた発射装置の改善案を考察する。

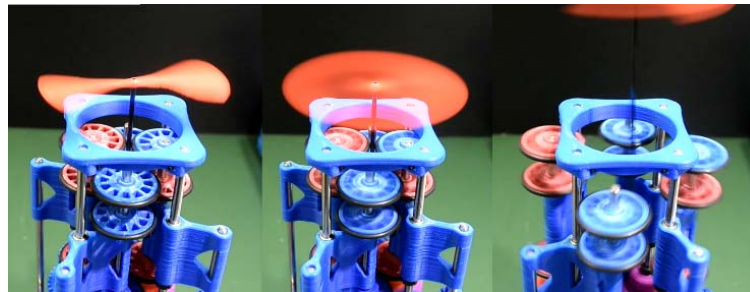
4. 研究成果

(1) H28 年度において、3DCAD と 3D プリンターを援用し、4 種類の発射装置を製作した。また、2 台の USB カメラとコンピュータビジョンを利用した飛翔体の位置計測システムを開発し、原理的に追跡可能であることを示した。しかし、発射装置の大きさと位置計測の精度が課題となった。そこで、H29 年度において、発射装置の軽量化、および狭隘な空間での射出実験を可能にする高性能化を試みた。軽量化と高性能化の効果により、持ち運びが容易、かつ一般的な室内での射出実験を可能にする発射装置を完成させた。主要な部品を、3DCAD と 3D プリンターによって作成し、熟練者でなくても製作可能であることも示した。また、3DCAD と 3D プリンターを用いて竹とんぼ型の飛翔体を作成し、射出実験を行い、発射装置の性能を評価した。さらに、高速度撮影可能なカメラを用いて位置計測を行った。図 1 に試作機と試作機による射出実験の様子を示す。



(a) 3DCAD モデル

(b) 試作した実機



(c) 試作機を用いた竹とんぼの射出の様子

図 1 回転翼発射装置と射出実験

(2) H28 年度において実施したレイノルズ数が数千から数万の範囲の 2 次元翼まわりの流れの計算に対して、H29 年度は、迎角の変化を加え、2 変量のパラメータ空間での計算を系統的に行った。また、深層学習と主成分分析を利用した新しい低次元化手法により、2 変量のパラメータ空間で得られた膨大な時空間データを主成分空間に写像し、異なる物理パラメータでの非定常流れ場の定量的な比較を可能にするという方法を提案した。図 2 に、レイノルズ数 10^4 、迎角 10° の 2 次元翼まわりの非定常流れの低次元表現の例を示す。これにより、異なる翼型を過ぎる非定常流れのより詳細な分析から飛翔体の性能評価までを効率的に実施できる。

(3) 異なる技量を持つ人の竹とんぼの飛ばし方を視線計測分析から明らかにし、ノウハウの設計知識化を試みた。このような視線計測分析からの設計知識化という取り組みは新規なものである。図 3 に失敗時と成功時に対する分析者の見方の違いを示す。この例では、親指と人差し指、および小指の付け根を、軸の回転時からリリース後まで継続して注視していることがわかる。また、人差し指の動きと小指の位置関係が成功の可否に関連していることが読み取れる。このようにして得られた結果は、新たな発射装置の設計に活かされるものである。

以上の 3 つのサブテーマから得られた成果から、竹とんぼを射出型探査機に応用できる可能性は高いと考えられる。また、(1)で開発した発射装置、(2)で構築した低次元化手法は、様々な領域で活用が進められている MAV の翼型の設計サイクルを短縮するものと考えられる。

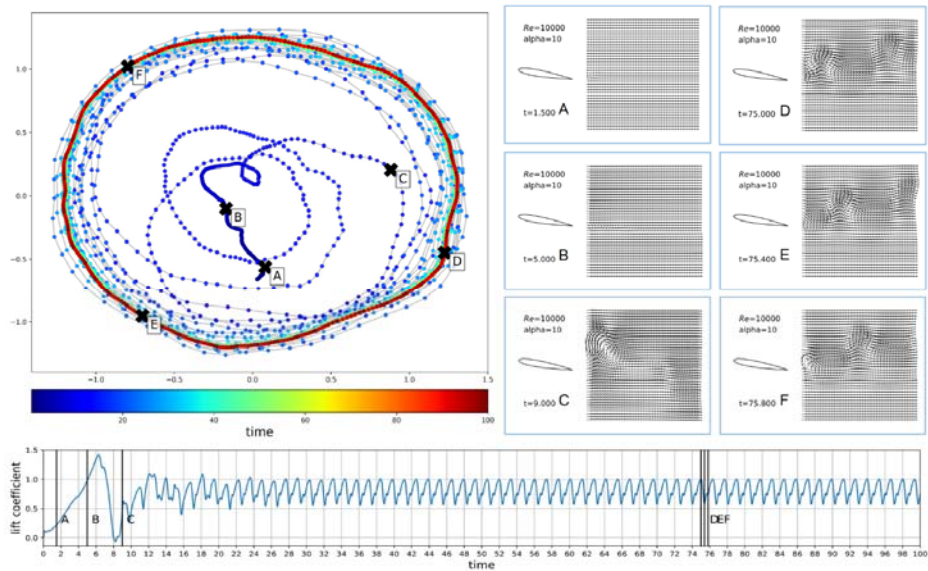


図2 2次元翼周りの非定常流れの低次元表現



(a) 失敗時の視線計測結果



(b) 成功時の視線計測結果

図3 失敗時と成功時の分析者の見方の違い

<引用文献>

- [1] Aaron, K.M., Heun, M. K., and Nock, K. T.: A Method for Balloon Trajectory Control, COSPAR, PSB1-0012, 2000.
- [2] 光岡操, 野村努, 高木方隆: 地すべり GIS のためのバルーン搭載型 CCD カメラによる三次元計測, 地理情報学会平成 13 年度講演会講演論文集, Vol. 10, pp.93-96, 2001.
- [3] 森本幸裕, 吉川 賢, 小橋 澄治: カイトセンシングなどによる中国内モンゴル毛烏素砂漠の緑化状況モニタリング, 日本緑化工学会誌, Vol.15, No.2, pp.9-15,1989.
- [4] 秋岡芳夫: 竹とんぼからの発想 一手が考えて作る, 復刊ドットコム, 2011.
- [5] 安田邦男: 竹とんぼの手動発進と空力特性について, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.56, No.648, pp.29-33, 2008.
- [6] 安田邦男: 竹とんぼの投擲実験について, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.64, No.1, pp.1-5, 2016.
- [7] Brandt, J.B. and Selig, M.S.: Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2011-1255, 2011.
- [8] Shetty, O.R. and Selig, M.S.: Small-Scale Propellers Operating in the Vortex Ring State, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2011-1254, 2011.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

- (1) Takato,K. and Shirayama,S. : Development of a 3D-printed Device Evaluating the Aerodynamic Performance of Rotary Wings, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (Design & Systems), Vol.12, No.1, p. JAMDSM0027, 2018, 査読有
- (2) 尾亦範泰, 白山晋 : 深層学習を用いた低次元表現による 2 次元非定常流れ場の比較法, ながれ, 36 巻, 6 号, [特集] 注目研究 in 年会 2017, pp.363-369, 2017, 査読無
- (3) 尾亦範泰, 白山晋 : 非定常流れ方向データの統計的クラスタリング法, 第 31 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, C09-4, 2017, 査読無
- (4) Omata,N. and Shirayama,S.: Comparison of Unsteady Flow Fields by a Low-dimensionalization Method Using Deep Learning, Proceedings of the 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, 079, 2017, 査読有
- (5) Takato,K. and Shirayama,S. : Development of a 3D-printed Device for Evaluating the Aerodynamic Performance of a Rotary Wing, Proceedings of EcoDesign 2017, D3-1, 査読有
- (6) 尾亦範泰, 白山晋 : ノイズを含む 3 次元非定常流れ方向データの統計的可視化法, 可視化情報学会論文集, Vol. 37, No.10, pp.48-54, 2017, 査読有
- (7) 盆子原直己, 白山晋, 高藤圭一郎 : 視線計測からの動作分析を利用した竹とんぼの発射装置に対する設計情報の抽出, 日本機械学会第 27 回設計工学・システム部門講演会論文集, 3304, 2017, 査読無
- (8) 高藤圭一郎, 白山晋 : 3D プリンターを用いた回転翼の空力性能評価装置の開発, 日本機械学会第 27 回設計工学・システム部門講演会論文集, 3305, 2017, 査読無
- (9) 尾亦範泰, 白山晋 : 3 次元非定常流れ場に対する深層学習を用いた低次元化法, 日本機械学会第 30 回計算力学部門講演会論文集, 326, 2017, 査読無
- (10) 尾亦範泰, 白山晋 : 深層学習を用いた低次元表現による 2 次元非定常流れ場の比較法, 日本流体力学会年会 2017 講演論文集, 156, 2017, 査読無
- (11) Omata,N. and Shirayama,S.: Extracting Quantitative Three-dimensional Unsteady Flow Direction from Tuft Flow Visualizations, Fluid Dynamics Research, Vol.49, No.5, 055506, 2017, 査読有
- (12) 高藤圭一郎, 白山晋 : 3D プリンター製機械部品の強度に関する基礎的研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, S2020206, 2017, 査読無
- (13) 尾亦範泰, 白山晋 : ノイズを含む 3 次元非定常流れ方向データの定量的可視化法, 第 45 回可視化情報シンポジウム講演論文集, D101, 2017, 査読無
- (14) 高藤圭一郎, 白山晋 : 回転翼まわりの流れに対する可視化装置の開発, 第 45 回可視化情報シンポジウム講演論文集, C214, 2017, 査読無
- (15) 高藤圭一郎, 白山晋 : 熱溶解積層型 3D プリンターを用いた工学教育教材の設計と製作及びその教育効果, 日本機械学会講演論文集 No.178-1 (九州支部第 70 期総会講演会), pp.23-24, 2017, 査読無
- (16) 白山晋, 高藤圭一郎, 大澤理恵, 盆子原直己 : 視線分析による竹とんぼの飛ばし方の定量的記述に関する基礎的研究, 人工知能学会研究会資料 SIG-KST-030, SIG-KST-030-062017, 査読無
- (17) 尾亦範泰, 白山晋 : 3 次元非定常速度データの定量的可視化法, 第 30 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, D02-2, 2016, 査読無
- (18) 高藤圭一郎, 白山晋 : 回転方式複数光源によるシート光生成装置の改良, 日本機械学会第 94 期流体力学部門講演会講演論文集, GS22, 2016, 査読無
- (19) 白山晋 : 移動軌跡に注目した非定常速度場の比較法, 日本流体力学会年会 2016 講演論文集, 176, 2016, 査読無
- (20) 安達健二, 白山晋 : 実環境下での 3 次元流速の簡易計測法に関する研究, 日本流体力学会年会 2016 講演論文集, 175, 2016, 査読無
- (21) 高藤圭一郎, 白山晋 : PBL 教育としての竹とんぼまわりの流れの可視化実験, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, G2000104, 2016, 査読無

[学会発表] (計 18 件)

- (1) Omata,N. and Shirayama,S., Comparison of Unsteady Flow Fields Using a New Low-dimensionalization Method, US-Japan Workshop on Bridging Fluid Mechanics and Data Science, (国際会議), (招待講演), 2018.
- (2) 尾亦範泰, 非定常流れ方向データの統計的クラスタリング法, 第 31 回数値流体力学シンポジウム, 2017.
- (3) Omata,N., Comparison of Unsteady Flow Fields by a Low-dimensionalization Method Using Deep Learning, 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, (国際会議), 2017.

- (4) Takato,K., Development of a 3D-printed Device for Evaluating the Aerodynamic Performance of a Rotary Wing, EcoDesign 2017, (国際会議), 2017.
- (5) 盆子原直己, 視線計測からの動作分析を利用した竹とんぼの発射装置に対する設計情報の抽出, 日本機械学会第 27 回設計工学・システム部門講演会, 2017.
- (6) 高藤圭一郎, 3D プリンターを用いた回転翼の空力性能評価装置の開発, 日本機械学会第 27 回設計工学・システム部門講演会, 2017.
- (7) 尾亦範泰, 3次元非定常流れ場に対する深層学習を用いた低次元化法, 日本機械学会第 30 回計算力学部門講演会, 2017.
- (8) 尾亦範泰, 深層学習を用いた低次元表現による 2次元非定常流れ場の比較法, 日本流体力学会年会 2017, 2017.
- (9) 高藤圭一郎, 3D プリンター製機械部品の強度に関する基礎的研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017.
- (10) 尾亦範泰, ノイズを含む 3次元非定常流れ方向データの定量的可視化法, 第 45 回可視化情報シンポジウム, 2017.
- (11) 高藤圭一郎, 回転翼まわりの流れに対する可視化装置の開発, 第 45 回可視化情報シンポジウム, 2017.
- (12) 高藤圭一郎, 熱溶解積層型 3D プリンターを用いた工学教育教材の設計と製作及びその教育効果, 日本機械学会九州支部第 70 期総会講演会, 2017.
- (13) 大澤理恵, 視線分析による竹とんぼの飛ばし方の定量的記述に関する基礎的研究, 人工知能学会研究会 SIG-KST-030, 2017.
- (14) 尾亦範泰, 3次元非定常速度データの定量的可視化法, 第 30 回数値流体力学シンポジウム, 2016.
- (15) 高藤圭一郎, 回転方式複数光源によるシート光生成装置の改良, 日本機械学会第 94 期流体力学部門講演会, 2016.
- (16) 白山晋, 移動軌跡に注目した非定常速度場の比較法, 日本流体力学会年会 2016, 2016.
- (17) 安達健二, 実環境下での 3次元流速の簡易計測法に関する研究, 日本流体力学会年会 2016, 2016.
- (18) 高藤圭一郎, PBL 教育としての竹とんぼまわりの流れの可視化実験, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白山 晋 (SHIRAYAMA, Susumu)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 1 0 3 2 2 0 6 7

(2) 研究分担者

高藤 圭一郎 (TAKATO, Keiichiro)
西日本工業大学・工学部・教授
研究者番号: 1 0 4 6 1 4 8 5