

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

A Basic Study of Quantitative Description of How to Fly a Taketombo Using Eye Tracking Analysis

白山 晋¹, 高藤圭一郎², 大澤理恵¹, 盆子原直己¹

Susumu SHIRAYAMA¹, Keiichiro TAKATO², Rie OSAWA¹, Naoki BONKOHARA¹

¹ 東京大学大学院工学系研究科

¹ Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

² 西日本工業大学

² Nishinippon Institute of Technology

惑星探査などの用途に有用とされる射出型飛翔体の実用化には、飛行経路や飛翔形態の再現性を確保できる発射台が必要になるが、その設計法は確立されていない。一方、人間の飛ばし方を模倣した発射台が有力とされているが、人間の模倣という点では多くの定性的な要素が含まれ課題も多い。このため、設計法の確立には、人間の飛ばし方の定量的記述が必要になっている。これに対し、本研究では、視線分析を用いた飛ばし方の定量的な記述法の確立を目指す。

1. はじめに

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、機構が単純な飛翔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翔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翔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、および飛翔形態が実現できることにも特徴がある。

耐障害性だけでなく、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、竹とんぼの特徴を活かした耐障害性の高い飛翔体の作成や、回転翼の設計法に展開することは難しい。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、および飛翔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翔形態は実現できていない。一方、我々のグループでは、発射台の開発を行っている[7][8][9][10]。その発射台は、手動発進を模倣したものである。図1に模倣した手動発進の模式図を示す。図2と図3は、模倣した手動発進を機械的に実現するための機構である。また、図4に実機を示す。

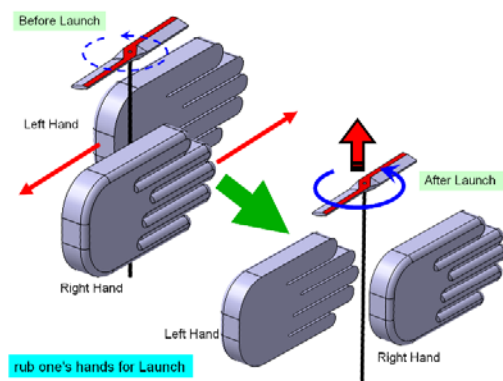


図1 手動発進の模式図

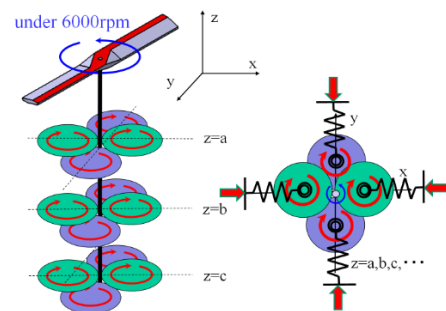


図2 機械的発進の機構 (回転軸の把持状態)

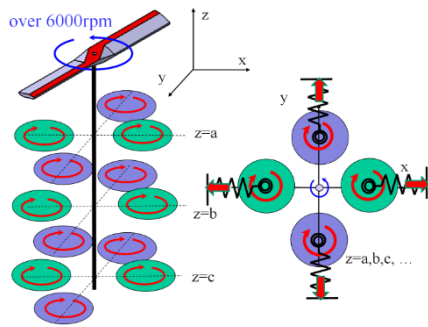


図3 機械的発進の機構（リリース状態）

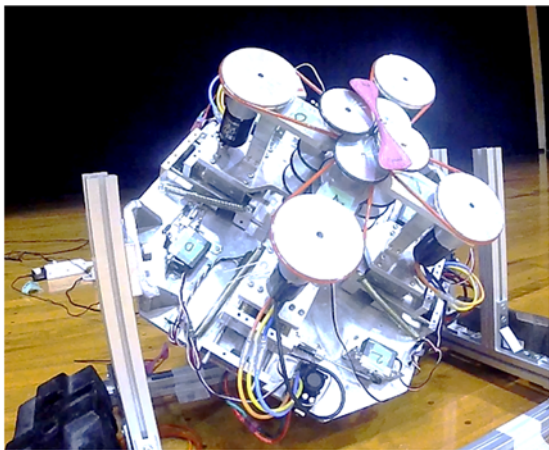


図4 発射台の実機

この発射台では、竹とんぼの軸の回転は、複数段のタイヤ部によって実現されている。ただし、回転数は一定である。また、回転軸の把持とリリースを2重マウント構造で実現している。内側のマウント部は、回転中の軸と常に接触を保持するためにスライドブッシュで浮かせた状態にして小型バネ付きサスペンションを設けたものである。このマウント部全体を大型バネによって支持し、ロック解除と共に竹とんぼのリリースを瞬時に進行。これらは手動発進の最も単純な模倣に基づくものである。

製作した発射台によって同一の竹とんぼを同一の条件で飛ばした場合、ほぼ同じ飛行経路、飛行形態となることが確認できている。ただし、高速で回転させ、十分に揚力が生じている場合に限定される。

一方で、リリースした場所から低高度、短距離に存在するターゲットに到達させることは難しい。この低高度、短距離に存在するターゲットへの到達は、回転翼の性能評価において重要になる。統計分析に必要な数の実験を行うためには、実験実施の容易さが要求されるためである。また、竹とんぼのような射出型飛行体の場合、射出時に飛行経路、飛行形態が決定されるため、発射台側の制御によって異なる性能の飛行体を同一のターゲットに到達させる必要が生じるためである。

ところで、手動発進の場合、試行錯誤は必要になるが、

低高度、短距離に存在する目標に竹とんぼを到達させることはできる。このことから、手動発進における手の動きをより正確に模倣することで発射台が改善できると考えられる。

しかし、手の動きは速く、手の形状は複雑なため、モーションキャプチャー等を利用した分析は難しい。また意識して手を動かすというものではなく、ヒアリング等に基づく飛ばし方の言語化も難しい。さらに、飛ばし方を撮影した動画を分析するという方法が考えられるが、記憶の曖昧さから分析には時間がかかる。また、分析者の主観に左右されやすい。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、本稿では、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に関して検討する。さらに、飛ばし方の定量的な記述に基づいた発射台の改善案を考察する。

2. 提案手法

はじめに、被験者をA群とB群に分ける。また、分析者をC群、設計者をD群とする。

次に、A群に対して、図5に示すように椅子に座った状態から、点Pに到達するように竹とんぼを飛ばしてもらい。何度かの練習後に、手動発進の様子を高速度ビデオにより撮影する。撮影条件は、視点と視対象の関係として、近景、中景の2種類、フレームレートは、30fps、120fps、240fpsの3種類の計6種類とする。表1に示す基本識別子によって動画を管理する。これらの動画が次のステップの視線計測時の視覚刺激となる。

また、A群の被験者を A_n で示し、基本識別子に追加する。さらに、撮影した動画には、手動発進後に、竹とんぼが点P近傍に到達した場合を成功(S)、到達しなかった場合を失敗(F)とした成否のラベルを付与する。このラベルも基本識別子に追加する。例えば、M1A1Sという動画の識別子は、「中景」、「30fps」、「被験者A1」、「成功」を表す。なお、画像処理等による加工は行わず、誰が飛ばしたかを識別できるようにする。

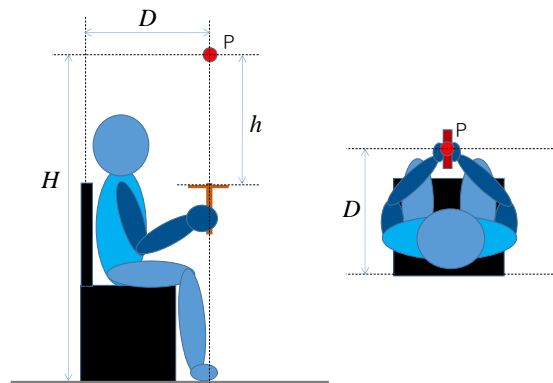


図5 実験に用いた空間の模式図

表 1 動画の基本識別子

基本識別子	視点と視対象	フレームレート
M1	中景	30fps
M2	中景	120fps
M3	中景	240fps
M4	近景	30fps
M5	近景	120fps
M6	近景	240fps

次に、B 群の被験者に対して、飛ばし方に注目して動画を見るように指示し、視線計測を行う。

C 群の分析者は、B 群の被験者の視線計測結果に対して、手の動かし方のどこに注目しているかを中心とし、成功した場合と失敗した場合の違いを含めて、見方の共通点、相違点を明らかにする。また、他人の見方と自身の見方の共通点、相違点についてもヒアリング等を介して明らかにする。これらの情報に基づいて、飛ばし方の定量的な記述を試みる。

また、A 群、B 群ともに習熟度を考慮することも考える。習熟度の差から、発射台の改良に結びつく情報が得られる可能性はある。

さらに、同一の被験者を A 群と B 群に割り当てることも考える。また、役割分担を明確化にせず、C 群の分析者、D 群の設計者を A 群、B 群に含めることも考える。これにより、自分自身の飛ばし方に対する自分自身の見方、他人の見方との差を知ることができる。また、場合によっては、自分自身の飛ばし方を確認することになり、メタ認知能力の向上に結びつく可能性がある。そのような被験者実験と分析を繰り返せば、より良い飛ばし方のデータが得られる可能性が高くなると考えたからである。

3. 実験

はじめに、被験者を A 群と B 群に分ける。A 群は大学院学生 2 名、B 群は大学院学生 6 名である。A 群と B 群に共通する被験者は 1 名である。また、C 群の分析者は 2 名であり、被験者は含まれていない。

次に、A 群の被験者に対して、手動発進によって竹とんぼを飛ばしてもらい、その様子を撮影する。図 6 に実験に用いた竹とんぼを示す。また、図 7 に撮影の様子を示す。



図 6 用いた竹とんぼ



図 7 撮影の様子

次に、被験者 B 群に撮影した動画を見せ、視線計測を行う。本稿では、表 2 に示す順序で動画を連続して提示し、視線計測を実施した。図 8 に視線計測の様子を示す。視線計測装置には、Tobii EyeX を用いた。また、視線計測結果の一部を図 9 に示す。図中の赤丸が視線の位置である。



図 8 視線計測の様子

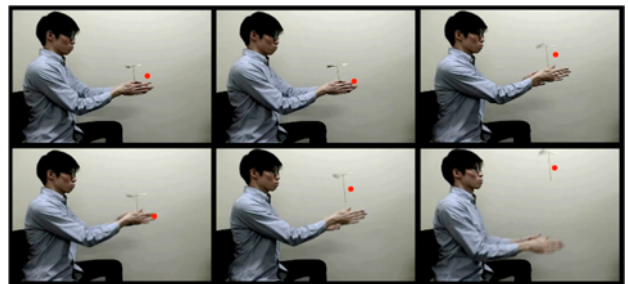
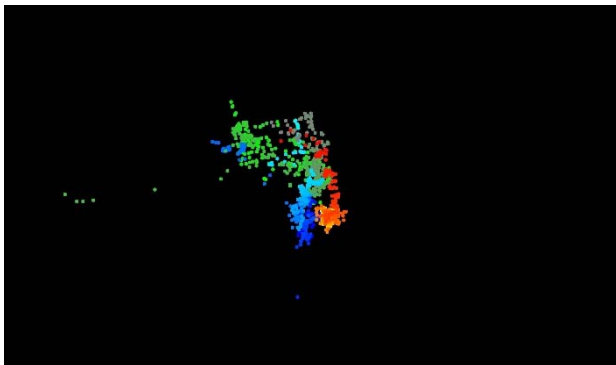


図 9 視線計測結果の一部

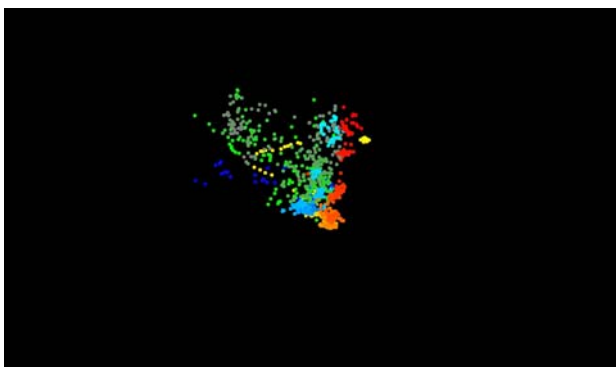
表 2 視線計測に用いた動画 ($n = 1,2$)

識別子	視点と視対象	フレームレート	成否
M1A _n F	中景	30fps	F
M1A _n S	中景	30fps	S
M4A _n F	近景	30fps	F
M4A _n S	近景	30fps	S
M2A _n F	中景	120fps	F
M2A _n S	中景	120fps	S
M5A _n F	近景	120fps	F
M5A _n S	近景	120fps	S
M3A _n F	中景	240fps	F
M3A _n S	中景	240fps	S
M6A _n F	近景	240fps	F
M6A _n S	近景	240fps	S

図 9 に示すような視線の位置を重畳した動画 (視線重畳動画と呼ぶ) では、動画毎、また被験者毎の差違を捉えることが難しい。そこで、視線の動き (gaze plot) によって比較する。図 10 に一例を示す。図は、動画 M6A2F と M6A2S に対する B 群の被験者 3 名分の gaze plot を色の系列 (青, 赤, 緑の 3 系列) を変えて示したものである。また、時間の経過を各系列色のグラデーションで表現している。視覚刺激が動画という性質上背景が変化するため、どこを見ていたかは示されていないが、被験者毎の差違はわかる。



(a) M6A2F に対する gaze plot



(b) M6A2S に対する gaze plot

図 10 動画に対する被験者毎の視線の動きの差違

なお、本稿では、A 群被験者の習熟度の違いはないものとしている。実際、成功率において差はない。

C 群の分析者は、図 9 に示すような視線の位置を重畳した動画 (視線重畳動画と呼ぶ) を見た後に、図 10 に示すような gaze plot を参照しながら、再度、視線重畳動画を分析する。

分析の結果、

- ・ 回転時には、基本的には、手の甲と竹とんぼの軸が注目されていること
- ・ 軸の傾きを調整している際には、人差し指と小指の動きに加えて親指の動きが注目されていること
- ・ リリース時には、人差し指、小指、手の甲の動き、親指の上下運動が注目されていること
- ・ 投げ上げ時には、親指と人差し指、手首と上腕が注目されていること

などが示された。また、定量性を欠くが「軸の傾きを修正する場合、人差し指と小指を連動させ、指の付け根を動かす」というような言語化が可能であることも示された。

4. 結論

射出型飛行体の実用化には、飛行経路や飛行形態の再現性が確保できる発射台が必要になる。人間の飛ばし方を模倣した発射台が有力とされているが、飛ばし方の定量的記述が欠如しているため、単純なものしか実現できていない。

本稿では、はじめに、定量的記述の欠如の理由を、手動発進時における手の動かし方のどこに注目すべきかの特定の難しさにあることに言及し、どこに注目すべきかを明示する方法を提案した。

本稿での提案手法は、飛ばし方の動画を見せたときの視線計測結果に対して、成功した場合と失敗した場合の違いを含めて見方の共通点、相違点を明らかにし、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というものである。

提案手法を用いた実験によって以下が明らかにされた。

- ✓ 回転時の手のひらの運動
- ✓ 軸の傾きを修正する際の人差し指と小指の連動と親指の運動
- ✓ リリース時の人差し指、小指、手のひらの運動、および親指の上下運動
- ✓ 投げ上げ時の親指と人差し指、手首と上腕の動きが注目されている。

これらは、

- A) 回転方向の複数回の変更と、手のひらの摺り合わせによる回転速度の調整方法
- B) 人差し指と小指の連動と、親指の運動による軸の傾きの制御方法
- C) 軸の回転、把持、リリースにおける力の加え方
- D) 上腕と手首を用いた投げ上げと投げ上げ方の検討に結びつけられる。

これらには、部分的には実験するまでもなく想定できることもある。しかし、実験のない想定には、分析者の想像、あるいは主観が含まれる。提案手法を用いた実験によって客観性を持って認識できたという点に意義がある。

本稿では、飛ばし方の定量的な記述にまでは至らなかったが、そのために必要となるポイントが明らかになった。例えば、我々の先行研究で開発した発射台では、竹とんぼの軸を複数段のタイヤ部によって同じ力によって把持し、同時にリリースする。一方、本稿の実験の結果は、タイヤ毎に異なる力での把持と異なるタイミングでのリリースによって高性能化が可能になることを示唆している。これは人間から機械に伝えるポイント(人間の動作を機械に反映させるポイント)を、より客観的なデータから明らかにできたということでもある。本研究は、人間と機械の共進化という点でも意義があると考えている。

課題と今後の展望は、

- ・ 言語化された飛ばし方を定量的な記述に結びつけること
- ・ 飛ばし方の定量的な記述に基づいて発射台を改良すること

である。また、改良した発射台を用いた回転翼型飛行体の性能評価も今後の展望である。

本研究は、JSPS 科研費 26350207 と科研費 16K14500 の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [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] Takato, K. and Shirayama, S.: An Engineering Education Toward Sustainable Society Through Manufacturing a Flying Toy "Taketombo", Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.6, No.7, pp1143-1153, 2012.
- [8] 高藤圭一郎, 白山晋: 探査用射出型回転翼機に関する研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, G051024, 2013.
- [9] 高藤圭一郎, 白山晋: 回転方式複数光源による回転翼まわりの流れの可視化, 可視化情報全国講演会論文集, E211, 2015.
- [10] 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.