

設計手法評価のための気球ゴンドラ姿勢制御系フライト実験

莊司泰弘（大阪大学），中野壽彦（大分高専），高橋幸弘（北海道大学），田口真（立教大学），
今井正堯（北海道大学），白藤祐稀子（立教大学）

Flight Experiment of the Attitude Control System of a Balloon Gondola for the Verification of Design Method
Yasuhiro Shoji (Osaka Univerisy) , Toshihiko Nakano (National Institute of Technology, Oita College) ,
Yukihiro Takahashi (Hokkaido University), Makoto Taguchi (Rikkyo University),
Masataka Imai (Hokkaido University), Yukiko Shirafuji (Rikkyo University)

Abstract

姿勢制御系の設計においては、外乱力の周波数成分の他、その大きさが重要である。しかし気球本体の姿勢運動は計測が技術的に困難で、外乱力の大きさに関する知見が不足していた。筆者らはピギーバック実験により気球の姿勢運動を計測することに成功し、外乱力の大きさについて明らかになりつつある。本発表では、今年度得られた姿勢データから導かれる外乱力推定値を用いて気球望遠鏡のゴンドラ姿勢制御系の性能推定を行い、平成31年度にフライト実験を行って推定の妥当性を検証することを提案する。

1. はじめに

大型気球を用いた気球実験におけるゴンドラの姿勢制御（方位角制御または2軸または3軸の制御）の重要性は近年増している。特に高精度が要求される天体観測においては、SunriseIIやBOPPSなどが欧米において実施されており、高精度ポインティングミラーを含めた観測ポインティング精度は1/100秒角を獲得している。このような高精度観測を行うためにはポインティングミラーの動作範囲内に対象天体を導入する制御が前段階としてあり、SunriseIIでは方位角（Yaw）方向をリアクションホイールによるゴンドラの方角制御により、仰角（Pitch）方向を望遠鏡の仰角制御により実現したり、BOPPSではリアクションホイールでYawとRollを制御し、Pitchと日周運動の追尾を望遠鏡の2軸制御により実現している²⁾。しかし、これらの報告の多くがフライトシステムの構成や性能といった設計の結果を述べるとどまり、工学的に第三者による再現や応用が難しい。アクチュエータ性能の記述があったとしてもその決定過程が述べられていることはまれである。

他方、人工衛星の姿勢制御系の設計においては、モデルによる姿勢外乱力の予測と構造や搭載装置に起因する内部擾乱の推算からアクチュエータの性能決定に至るプロセスはおおよそ確立している。気球ゴンドラの姿勢制御系設計において試行錯誤的原因は、外乱力モデルが不足していることが一因であると考えられる。これを解決するために飛行中

の気球、吊紐、ゴンドラの各部に姿勢ロガーを設置し、記録された挙動から外乱力の特徴を推定する研究が進められている。平成29年度までに姿勢記録手法が確立し、データの蓄積が始まった³⁾。また気球の運動がゴンドラに外力を与えるモデルの検討も進められており、ゴンドラの姿勢制御システムを定量的に設計評価するプロセスが構築されつつある。

2. 研究・実験の目的および意義

2-1 研究の目的

本研究では、気球の挙動に関する既存のデータを用いてゴンドラ姿勢制御システムを定量的に設計、評価するプロセスの構築を目的とする。そのため、一例として気球望遠鏡を想定してゴンドラ姿勢制御システムを設計し、これを過去に得られた飛行中の気球挙動データに基づいた数値シミュレーションと、実際の飛行実験の両方で評価し、手法の妥当性を検証する。

2-2 研究の意義

過去のデータによる数値シミュレーションによってある程度実際の飛行結果を予測できた場合、飛行データの蓄積が設計に有用であることが示される。異なる気球のより多くの飛行データの獲得により、ゴンドラ姿勢制御系の汎用的な評価手法を確立できると期待される。評価手法の確立は、新規設計のゴンドラ姿勢制御システムの信頼性向上のほか、B500型気球などのより大きな気球を必要とするゴンドラ

のシステムを、スケールモデルによる国内の実験で信頼性を維持したまま評価することが可能になると期待される。

2-3 提案する実験の位置づけ

本実験は、ゴンドラ姿勢制御システムの設計、評価プロセスの妥当性を、実環境において検証するために行われる。参考文献 3)で示したデータの蓄積は始まったばかりであり、そこから予想される外乱モデルも相当のばらつきを持っていると考えられる。本実験を通して、ばらつきの程度とそれを踏まえた制御系が持つべき設計余裕の程度を検討することができると思う。

3. 実験の概要

3-1 各年度計画

提案する実験は平成 31 年度の実施を希望し、予備年として平成 32 年度を設定する。平成 30 年度は、姿勢制御系の設計、外乱モデルを用いた制御性能の評価を行う。また、並行してフライトシステムの製作、試験を行う。平成 31 年度 4 月までに一連の開発を完了し、平成 31 年度国内春実験への参加を目指す。

平成 31 年度は国内の春実験または夏実験で振り回し実験を行う。フライト実験後は速やかに事前評価との比較検討を進める。平成 32 年度は、平成 31 年度に気象不良等で実験を実施できなかった場合の予備年とする。

表 1: 各年度計画

平成 30 年度	ゴンドラフライトモデルの設計、数値シミュレーションによる評価、製作、試験
平成 31 年度	5~6 月または 7~9 月にフライト実験、フライト結果による事前評価の検証。
平成 32 年度	(予備年)

3-2 実験項目

姿勢制御目標は TBD であり、方位角、仰角ともに 1 分角程度を今後の検討のベースとする。仰角は気球吊り紐を振子の腕とする振幅数度程度の振動の影響を受けることが経験的に予想される。そのため多くの気球望遠鏡と同様に、仰角を制御できる架台をゴンドラに搭載し、姿勢制御実験に架台の制御を含める。以上をまとめると本実験の実験項目は以下のようになる。

- ・ゴンドラへの外乱を事前に予測し、これに対応する制御系を構築する。

- ・水平浮遊に移行後早期に外乱由来のゴンドラ姿勢運動を静定させ、目標方位角にゴンドラを指向する。
- ・ゴンドラ上の架台を用いて、吊り紐を腕とする振子運動の影響を打ち消す。

3-3 運用プロファイル

高度 25 km 以上で水平浮遊時間 1 時間以上を希望する。実施時期に希望はない。ただし使用する気球は平成 29 年度に姿勢データが得られている B5 型または B30 型を希望する。また、平成 30 年度の検討結果によっては、吊紐の様態を一本吊りか、またはラダー型で幅を標準よりも狭くしたものとする要望を出す可能性がある。

フライト中の運用パターンとして、a)従来通り水平浮遊に移った後制御シーケンスを開始する、b)上昇末期の水平浮遊に移行する以前からレートダンピング制御を開始し、水平浮遊に移行次第指向制御を実施する、c)上昇中の早い段階から方位角速度をある程度の範囲内に制御によって制限し、上昇末期のレートダンピングにつなげる、などを検討している。表 2 に水平浮遊高度を 28km と仮定したときの、a)~c)のパターンと放球からの経過時間、高度との関係を示す。b)と c)では共通して高度 22km 程度からゴンドラのレートダンピングを開始し、目標高度の 28km に到達し、上昇速度が緩まり次第目標姿勢を得るための姿勢制御を開始する。b)は高度 22km 程度から 20 分程度でゴンドラの姿勢レートを十分に小さくすることができると思込まれる場合のパターンであり、c)は b)では不十分な場合に姿勢レートをある程度の範囲に収める弱い制御をより早い段階で開始することを想定している。a)は従来の運用のように上昇が止まってから姿勢レートのダンピングを開始する。a)は水平浮遊時間が 1 時間またはそれ以下と短いため、b)、c)の実現可能性を 2017 年の気球フライトデータを元に検討する。

3-4 フライトシステムの概要 (いずれも TBD)

表 3 にフライトシステムの構想を示し、図 1 にゴンドラの概念図を示す。

ゴンドラ寸法は我々がこれまでに開発した気球望遠鏡ゴンドラ⁴⁾の構造を踏襲し、アルミニウムフレーム構造 1.2×1.2×3.0 m、重量 500 kg 程度、バラスト込み 800 kg 程度とする。姿勢センサはゴンドラ姿勢制御用として磁場センサ、MEMS ジャイロ、加速度センサ、太陽センサを搭載する。また 1 分角以下の

表 2：実験シーケンス (TBD)

Time (min)	高度 (km)	気球運用	運用パターン a)	運用パターン b)	運用パターン c)
X	0	放球	待機		
X+43	13		↓	↓	ゴンドラレート制限開始
X+73	22		↓		ゴンドラレートダンピング開始
X+93	28	水平浮遊	ゴンドラレートダンピング→姿勢制御	姿勢制御	
Y	28	切り離し	CMG ホイール減速開始		
Y+54	5		電源 OFF		
Y+66	0	着水	↓		

表 3：フライトシステムの主な諸元 (TBD)

外形寸法	1.2 × 1.2 × 3.0 m
質量	約 500 kg (バラスト含まず)
フロート	約 800 kg
構造	アルミニウムフレーム構造
姿勢センサ	太陽センサ, 地磁気センサ, ジャイロ加速度センサ, 望遠スターセンサ
姿勢アクチュエータ	よりもどしモータ(mDCP), 4-SGCMG, 望遠スターセンサ架台
搭載計算機	Intel Atom E680T 1.6GHz 2台
ストレージ	NAND Flash MEM
気密容器	あり
通信	シリアル 57.6 Kbps (気球 UIF) 画像 (TBD)
電源	リチウムイオン 2 次電池, 外部電源 (AC100V, 立ち上げ時)
動作時間	満充電で 10 h

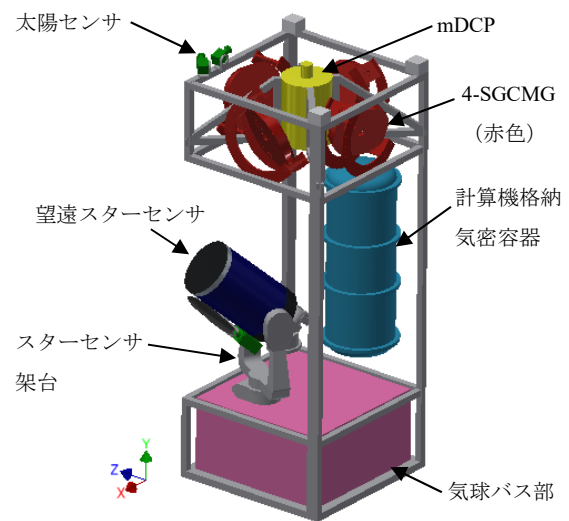


図 1：ゴンドラの構想図

精度で姿勢計測するため、望遠光学系により明るい天体の追尾を行う。姿勢アクチュエータは FUJIN1, 2 開発品を流用し、よじれ戻しモータ (motored Decoupling: mDCP), 4 台 Single Gimbal Control Moment Gyro (4-SGCMG), 望遠鏡経緯台モータ (2 軸) とする。搭載計算機には Atom 1.6GHz CPU を搭載した産業用ファンレス PC を用いる。ストレージにはフラッシュメモリを用いる。計測記録データはフライトシステムの House Keeping データと姿勢, 制御履歴とする。原則として搭載ストレージに保存し, 飛行中のモニタリングをするために間引いたデータをテレメトリで地上に伝送する。また, TBD ではあるが太陽センサ, スターセンサの画像を地上に伝送することも選択肢である。フライト中の電源には搭載リチウムイオン 2 次電池を用いる。太陽電池は搭載しない。システムの立ち上げ時は CMG ホイールのスピンアップなど特に電力を必要とするため, 外部

電源を用いる。外部電源は気球へのガス入れ直前まで接続する。

ゴンドラフライトシステムとは別に, 気球一吊り紐-ゴンドラの姿勢運動を過去のデータと比較するために, 姿勢ロガーシステム一式 (6 台を予定) をピギーバックとして気球頭部, 尾部, パラシュート頭部, パラシュート尾部, 放球プレート直近, およびゴンドラに設置する。

3-5 実験成功基準 (TBD)

実験成功基準を以下に示す。ただしいずれも TBD であり, 平成 31 年度実験公募まで議論を進める。1) 2) は設計プロセスを検証するための基準であり, 3) は実際の気球望遠鏡ミッションへの適用可能性を検証するための基準である。

1) 最低成功基準 (TBD)

- A) 水平浮遊終了まで全てのシステムが健全でありデータを記録できること

B) 水平浮遊開始から 10 分 (TBD) 以内にゴンドラ吊点まわりの振動を静定させられること

2) 高度成功基準 (TBD)

C) 目標天体をセンサ視野内に導入すること

D) 設計プロセス, 姿勢運動計測精度の改善に有用な知見を得られること

3) 最高高度成功基準 (TBD)

E) 目標天体へのポインティング制御を誤差 (TBD) 内で時間 (TBD) 以上継続する

4. おわりに

本発表では, 気球の挙動に関する既存のデータを用いたゴンドラ姿勢制御システムの定量的設計評価法を検証するためのフライト実験を提案した. 提案する実験では, 単に過去のデータ解析にとどまらず, 実際に気球望遠鏡を想定してゴンドラ姿勢制御システムを設計し, 実際の飛翔実験で評価することで, 手法の妥当性を検証する.

過去のデータによる数値シミュレーションによってある程度実際の飛翔結果を予測できれば, ゴンドラ姿勢制御系の汎用的な評価手法を確立できると期待される. 評価手法の確立は, 新規設計のゴンドラ姿勢制御システムの信頼性向上に資するほか, 大型気球用フライトシステムを, スケールモデルによる国内の実験で信頼性を維持したまま評価することが可能になると期待される.

参考文献

- 1) T. Kremic, et al.: Stratospheric balloons for planetary science and the Balloon Observation Platform for Planetary Science (BOPPS) mission summary, Proc. Aerospace Conference, 2015 IEEE,
- 2) A. Lecincki, et al.: The Design and Performance of the Gondola Pointing System for the Sunrise II Balloon-Borne Stratospheric Solar Observatory, J. Astron. Instrum. Vol.6, No.2. June, 2017
- 3) 莊司, 飯嶋: ピギーバックによる気球系各部の In-situ 姿勢計測結果と今後の展開, 本シンポジウム, isas17-sbs-007, 2017 年
- 4) 莊司 他: 惑星観測用成層圏望遠鏡 FUJIN-1 の開発とポインティング制御系の性能評価(大気球研究報告),宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 13, pp 87-105, 2014