

地球外天体におけるジャイロ応用システムの開発

研究代表者 長谷部 信行
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

ジャイロスコープはセンサーとしての利用が良く知られているが、動力源としての利用はあまり知られていない。しかし、モータなどの動力源に比べてジャイロスコープの回転数に比例した大きな力を発生することが可能である。一方、モータは回転方向と力の発生方向が同一なのに比べて、回転方向と 90 度の方向に力が発生するという性質のため、その扱いは容易ではない。

しかし、この課題を解決することにより、ドローンへの応用、輸送システム（2 輪車・自動車・航空機・ロケット・人工衛星）、ロボット、建築物（揺れ止め・振じれ止め）、産業機械（クレーン）など多くの分野での活用が期待できる。

申請者らは独自開発の 2 段独楽の理論を使って、ジャイロアクチュエータ搭載のロボットバイクを開発した。また、独楽の運動方程式を基にしてドローンに関する基本的な運動方程式を導出している。

本研究では、この結果を基に地球外天体における飛行体の開発、また既に開発している自立走行 2 輪車をベースにして、ローバとしての 2 輪車の基盤開発を行う。

2. 主な研究成果

2.1 2 段独楽の動的解析

高速で回転するフライホイールの軸の方向を自由に変えることができる装置（ジャイロアクチュエータ）は、主に 2 つの特徴的な性質を有する。

- ① “外部からの力がないとき、回転軸は一定方向を指す”（慣性の法則）
- ② “外部から回転軸に力が加えられると回転軸はその力と 90° 方向に回転する”（プリセッション）

このようなジャイロ効果を利用した動力源は、船の揺れ止め、クレーン吊り荷の振れ止め、また 2 輪車の自立走行制御、人工衛星の姿勢制御などに利用されている。さらに、ジャイロアクチュエータを用いたドローンの姿勢制御の開発を目標とする。

そこで、初めに、これらの研究のベースとなる独楽のモデリング、さらに独楽が 2 段に重なった 2 段独楽(Fig.1)のモデリング及び動作解析を行った。Fig.2 に、自転速度一定、独楽に一定の傾きを持たせた場合のシミュレーション結果を示す。独楽の重心の軌跡より、独楽の回転によるジャイロ効果としての歳差運動が再現されていることがわかる。また Fig.3 には 2 段独楽のシミュレーション結果を

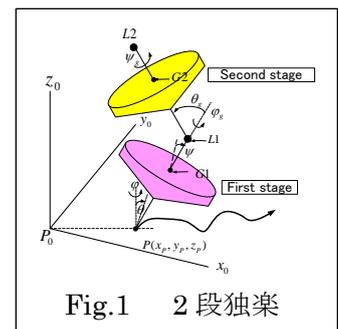
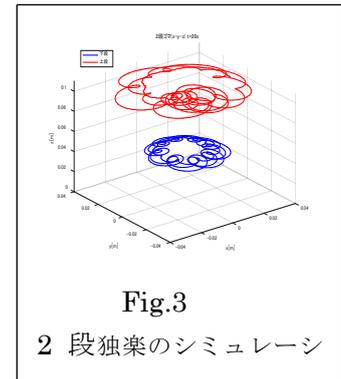
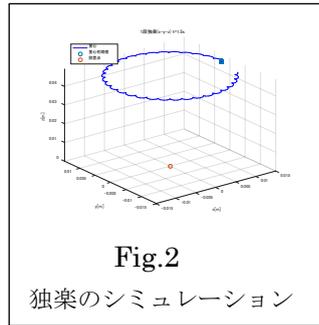


Fig.1 2 段独楽

示す。青が独楽の一段目、赤が2段目の独楽の重心の軌跡を示している。

これらの知見は、船、クレーン、2輪車、人工衛星さらにドローンのモデリング及びジャイロアクチュエータを用いたこれら構造体の制振制御の基礎を与えるものである。



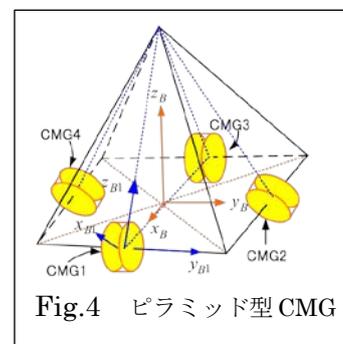
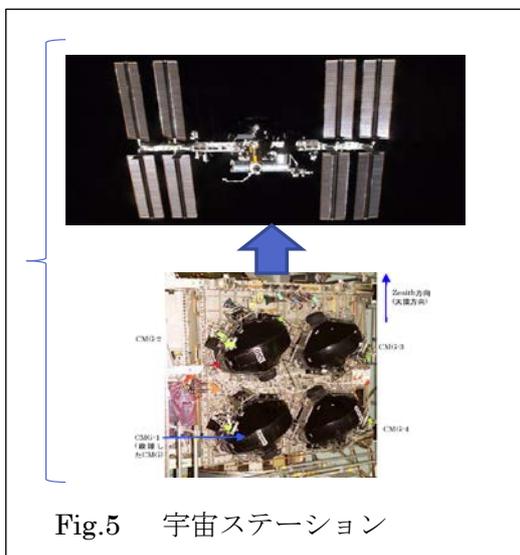
2.2 ピラミッド型 CMG による人工衛星の姿勢制御

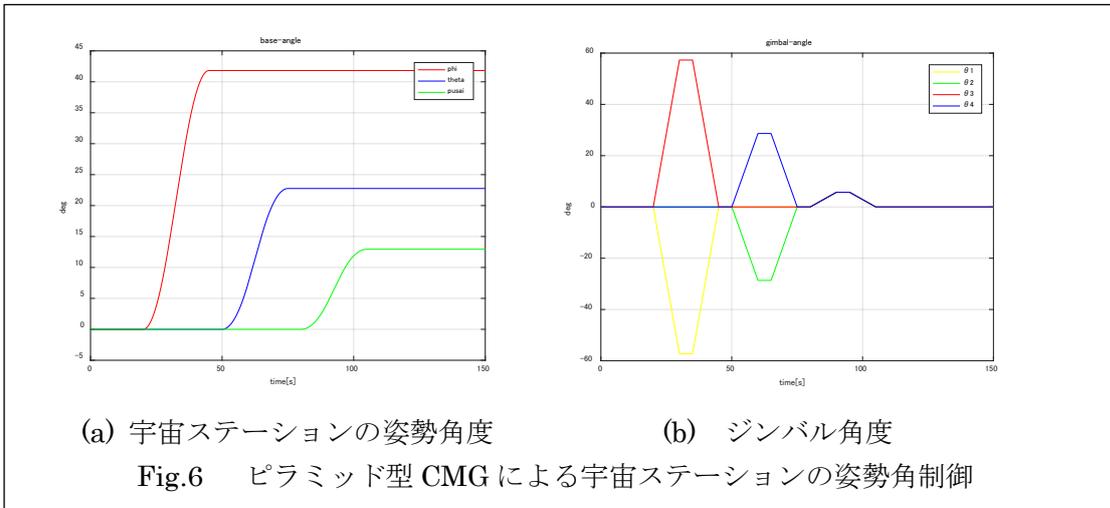
CMG(コントロールモーメントジャイロ)は、ジンバル軸によりフラーホイールを回転した場合、トルクがゼロとなる特異点が存在するが、4つのCMGをFig.4のようにピラミッド型に配置することにより特異点の発生を最小限にすることができることが知られており、宇宙ステーション(Fig.5)の姿勢制御等に使用されている。

本研究では、月や火星等の地球外天体におけるジャイロ応用システムとしてドローンや2輪車の開発を目指しているが、それに先立ち宇宙ステーションに使用されているピラミッド型CMGの厳密なモデル(Eq.1)の開発を行い、Fig.6に示すシミュレーションにより、その動作を確認した。

$$\begin{aligned}
 & J_{G1} \begin{bmatrix} \sin \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & \sin \beta & 0 & -\sin \beta \\ \cos \beta & \cos \beta & \cos \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + J_{G2} \begin{bmatrix} -\cos \theta_1 \cos \beta & \sin \theta_2 & \cos \theta_3 \cos \beta & -\sin \theta_4 \\ -\sin \theta_1 & -\cos \theta_2 \cos \beta & \sin \theta_3 & \cos \theta_4 \cos \beta \\ \cos \theta_1 \sin \beta & \cos \theta_2 \sin \beta & \cos \theta_3 \sin \beta & \cos \theta_4 \sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi}_1 \dot{\theta}_1 \\ \dot{\psi}_2 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\psi}_3 \dot{\theta}_3 \\ \dot{\psi}_4 \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \\
 & + \left(\begin{bmatrix} 0 & (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos \beta & -(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin \beta \\ -(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \cos \beta & 0 & (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \sin \beta \\ (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4) \sin \beta & -(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_3) \sin \beta & 0 \end{bmatrix} J_{G1} + \begin{bmatrix} 0 & \delta_3 & \delta_2 \\ -\delta_3 & 0 & \delta_1 \\ \delta_2 & -\delta_1 & 0 \end{bmatrix} J_{G2} \right) \Omega_B \\
 & + e_B \sum_{i=1}^4 I_i^T \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \psi_i - \sin \beta \cos \theta_i \sin \psi_i \\ \sin \theta_i \sin \psi_i \\ -\sin \beta \cos \psi_i - \cos \beta \cos \theta_i \sin \psi_i \end{bmatrix} \tau_i \\
 & \left\{ \begin{aligned} \delta_1 & := -(\dot{\psi}_1 \sin \theta_1 - \dot{\psi}_3 \sin \theta_3) \cos \beta - \dot{\psi}_2 \cos \theta_2 + \dot{\psi}_4 \cos \theta_4 \\ \delta_2 & := \dot{\psi}_1 \cos \theta_1 - \dot{\psi}_3 \cos \theta_3 - (\dot{\psi}_2 \sin \theta_2 - \dot{\psi}_4 \sin \theta_4) \cos \beta \\ \delta_3 & := (\dot{\psi}_1 \sin \theta_1 + \dot{\psi}_2 \sin \theta_2 + \dot{\psi}_3 \sin \theta_3 + \dot{\psi}_4 \sin \theta_4) \sin \beta \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Eq.1 ピラミッド型 CMG による人工衛星の姿勢制御モデル

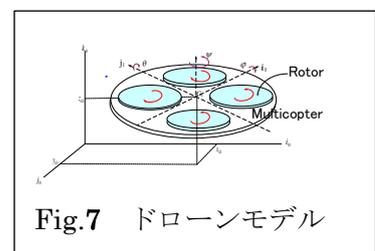
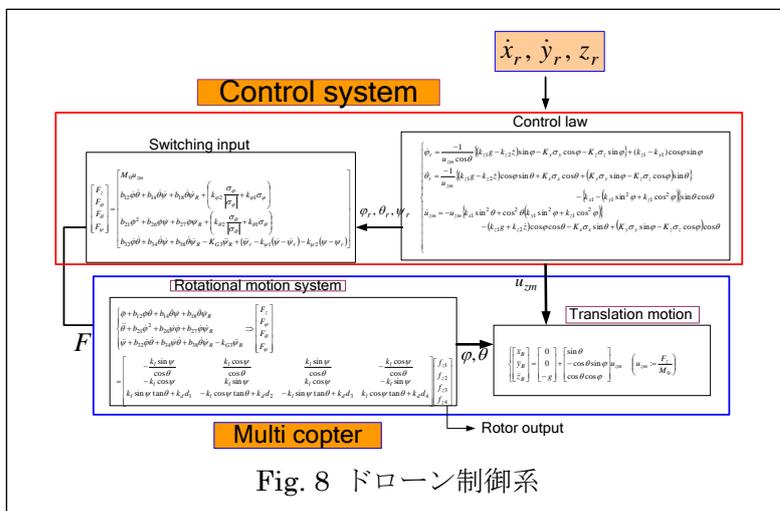


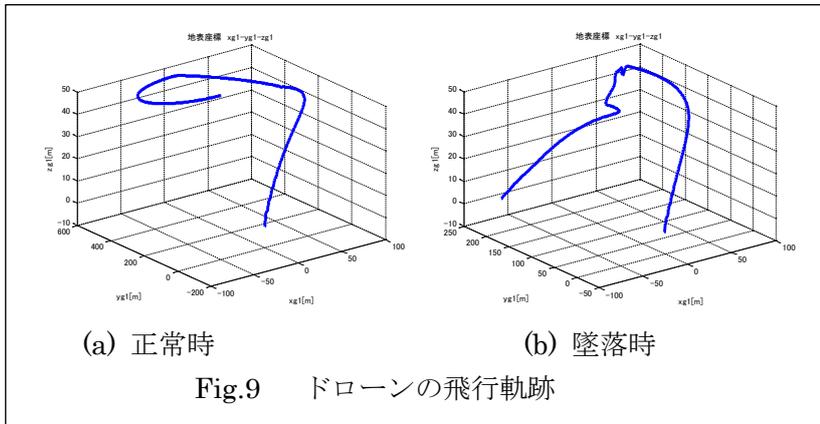


2.3 CMG によるドローンの姿勢制御

近年、複数のロータの回転により浮力を得て飛行する小型飛行体としてのマルチコプタが目ざされており、物資運搬、農薬散布、航空写真撮影、構造物点検、災害調査、動画撮影など、その用途は多岐に渡っている。しかし、航続時間、天候などの使用環境や軽量化、制御性能など多くの問題が存在する。これらの問題を解決するためには、マルチコプタの構造を厳密に定量的に理解することが重要である。しかし、現状では、上昇下降、左右方向、前後方向の飛行に対して、複数のロータの回転数、回転方向をどうすれば良いかなどの定性的な議論がほとんどであり、訓練による操縦の上達が求められているという状況である。

本研究では、人工衛星の姿勢制御に用いられる設計法であるピラミッド型 CMG 設計法に基づいてドローンの運動モデルとその制御系の設計を行った。Fig.7 は機体のモデル図、Fig.8 は制御系である。Fig.9 は x 方向の速度 5[km/h]、 y 方向の速度 10[km/h]、高度 50m で飛行中、100 秒後に x 方向に風速 2[m/s]、 y 方向に風速 15[m/s] の突風を与えた場合の (a) 正常時と (b) 墜落時のシミュレーションである。(a) はフィードバックが良好な場合、(b) はフィードバックが適正でない場合を示している。(a) は、突風に流されながらも飛行を継続しているが、(b) では突風時には墜落していることがわかる。





3. 共同研究者

大内茂人(研究院客員教授), 清水創太(研究院客員準教授)
 長岡 央(研究員講師), 内藤雅之(研究院助手)
 氣賀 信太郎(院生M1), 長谷部隆崇道(B4)

4. 研究業績

4.1 学術論文

- (1) S.Kiga,S.Ouchi, N.Hasebe, N.Kodani ,Y.Takamoto and M.Mubin: Attitude Control of Drones by Back-stepping Control, SICE Annual Conference 2017
- (2) T.Yamazaki,S.Shimizu,N.Hasebe: Considerations about Saliency Map from Wide Angle Fovea image,26th IEEE International Symposium on Industrial Electronics

4.2 総説・著書

クレーンの振れ止め制御, ロボット制御学ハンドブック, pp26. 4. 4(大内)

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

なし

4.5 学会および社会的活動

- (1) S.Kiga, S.Ouchi, N.Hasebe:Attitude Control of Drones by back-stepping method :Application of the Pyramid Type CMG System,27th Workshop on JAXA
- (2) S.Kiga, S.Ouchi, N.Hasebe: Self Sustaining Drive Control of Gyro-Bike, Workshop in South Korea
- (3) 大谷, 大内: 無人二輪車の旋回自立走行制御, 平成 29 年度神奈川県ものづくり技術交流会

5. 研究活動の課題と展望

今後は, CMG 搭載ドローンに関する運動方程式及び制御系の導出を行い, 得られた結果に基

づいたシミュレーションさらに実機による飛行実験を目指していく。また、ツイン CMG 搭載 2 輪車の開発を行う。