球状リアクションホイールによる人工衛星の三軸姿勢制御の発展 Development of spherical Reaction Wheel for three-axis Satellite Attitude Control

○竹花諒¹,朴成彦²,内山賢治³

*Ryo Takehana¹, Hidehiko Paku², and Kenji Uchiyama³

Abstract: This paper describes a driving principle and a validness of a spherical reaction wheel. The conventional reaction wheel system generally becomes huge and heavy because it needs three or four flywheels to control a three-dimensional attitude of a satellite. As a solution to this problem, a spherical reaction wheel system was proposed. The attitude control system is applied to a model of small satellite, and control experiments showed good results. Nevertheless, it is difficult to achieve downsizing of the system with the principle. We propose a new system that uses a spherical reaction wheel, and its validity is verified through experiments.

1. 諸言

従来のリアクションホイールシステムは三軸の姿勢 制御を行うために,各軸に一つ以上の円板状のフライ ホイールを配置している.この円板状のホイールは高 トルクを発生させるために大きく重いホイールが必要 となり,装置の大型化につながっていた.そこで,球 状のフライホイールを用いた姿勢制御装置がこれまで に提案されてきた.球状にすることと小型化の関係は Fig 1. が示すように,同一慣性モーメントの場合,球 状ホイールのほうが円板のものに比べ半径及び質量に おいても小さくなることが分かる^[1].つまり球状リア クションホイールシステムは姿勢制御に必要なトルク に対する装置の大きさが従来の物より小型化すること が可能となる.しかし,球状ホイールを回転方向制御 は非常に難しく,これまでに開発された球状リアクシ ョンホイールは^[24],いずれも実用化されていない.

筆者等は、これまでに球状ホイールを駆動装置に圧 電素子を適用した製作し、回転制御実験等を行い装置 の有効性を検証してきた^[5].しかし、この手法では、 積層圧電セラミックスの配置から、装置の小型化に限 界が生じた.また、積層圧電セラミックスの駆動には 交流電源が必要となり、電源装置の大型化などいくつ かの問題を抱えていた.

そこで本稿では、モータによる新たな駆動方式の球 状リアクションホイールシステムを考案し、球状ロー タの角速度制御実験を通して開発した装置の有効性を 検証する.

2. 球状リアクションホイールシステム
 2.1 駆動方式

積層圧電セラミックスを用いることで生じる問題点 を解決するため、球状ホイールの駆動原理を見直した. 本研究では、小型モータを組み合わせて球状ホイール を駆動する方法を採用した.この回転機構は、モータ の先に取り付けたローターキッカーを回転させ、モー タのトルクを球状ホイールに伝達することで、球状ホ イールの任意方向の回転を実現することが可能となっ ている.Figure 2.に駆動方式の図を示す.また本装置は 3 軸の回転を実現のため、ホイールの各軸にモータを 2 つずつ設置している.Figure 3.にモータの配置と蔵置の 座標系を示す.

70 4.5 60 3 5 50 Mass [kg] 40 Ĩ Sadi 30 1.5 M Cylinder · · M Sphere R Cylinder 0.5 - R Sphere 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0 Moment of inertia [-] Figure 1. Quantitative analysis



Rotor kicker

Figure 2. Driving principle



Figure 3. Coordinate system Figure 4. Optical sensor

2.2 関係式

本節ではローターキッカーと球状ロータの角速度の 関係式を導く. ローターキッカーの角速度を ω ,球状 ロータの角速度を β とする. その他の定数は Table 1. に示したとおりである. フライホイールとローターキ ッカー間のすべりが存在しないと仮定すると, $\omega \ge \beta$ の関係は $\beta = (r/R)\omega \ge \alpha$ る. 装置本体の慣性モーメ ントを*I*,角速度を Ω とすると,角運動量保存則より (1)式が示される. また,(1)式より $\omega \ge \Omega$ の関係は(2)

1:日大理工・学部・航宇 2:日大理工・院(前)・航宇 3:日大理工・教員・航宇

式のように表される.

$$[2I_r\omega + 2(R+r)^2 m\Omega] - N\beta + I\Omega = 0 \tag{1}$$

$$\Omega = \frac{N\frac{I}{R} - 2I_r}{I + 2(R+r)^2 m}\omega$$
(2)

上式の角速度の関係を用いて,球状ホイールの制御及 び衛星モデルの姿勢制御を行う.

3. 実験

3.1 実験装置

Figure 4.と Figure 5.に実験装置を示す.また Table 1. に実験装置の仕様, Table 2.に光学センサの仕様を示す. 本実験では Figure 4.に示した光学センサで球状ロータ の角速度を取得する^[6].この装置を各軸に対して設置 することにより 3 軸の角速度を取得する.本実験の制 御は,光学センサから得られた情報をフィードバック して行われる.

3.2 実験結果

実験は、球状ロータが静止している状態からモータ を駆動させ、Z 軸周りに球状ロータを回転させる. 球 状ロータの初期角速度を0[rad/s]とし,そこから6π, 4π, -4π[rad/s]の3種の目標角速度を設定した. 制御は PID コントローラで行われ、光学センサの情報をフィード バックする. 各目標角速度での球状ロータの角速度の 時間応答を Figure 6.に示す. Figure 6.から球状ロータの 角速度は目標値付近での振動が起ってはいるが、目標 値に収束していることがわかる.この振動を除去する ためには、モデルを含めた制御系を設計が必要である と考えられる.以上の結果より本駆動方式で球状ロー タの回転を制御することが可能であることが示された. また宇宙空間においては、角運動量が成り立つため球 状ロータの角速度の制御は姿勢制御につながる.よっ て本装置は姿勢制御装置としても有効であることが示 された.

4. 結言

本稿では球状のフライホイールを回転させるために モータを用いた新たな駆動方式を考案し,その有効性 を球状ロータの Z 軸周りの回転の制御実験から検証し た.また,実験では,PID 制御により様々な設定角速 度に制御が行えることを確認した.今後は,ローター キッカーの形状を改良し,抵抗を軽減させる形状にす ることやロバスト性やモデル化誤差を考慮したコント ローラの設計である.

参考文献

 Masuda K., Uchiyama K.: Development of Three Dimentional Reaction Wheel Using Spherical Rotor J, AIAA, pp,11, 2012.
 Kurt M. F.: Spherical Flywheel Attitude Control System, U.S. Patent No. 3105657, 1963.

[3] Riccardo B: Spherical Motor, U.S. Patent No. 3556696, 1971.

[4] Toyama S.: Multi Degree of Freedom Spherical Ultrasonic Motor, Proc. The International conference on Industrial Electronics, Control and Instruments, Vol.2, pp.900-905, 1994.

[5] 増田開,内山賢治: 球状リアクションホイールによる三 軸姿勢制御,日本航空宇宙学会論文集 Vol.62, No.3, pp.85-92, 2014.

[6] Watanabe H., Uchiyama K.: Satellite Attitude Control System Using Three-Dimensional Reaction Wheel, SciTech, AIAA 2015-1782, 2015.

Table 1. Specification of system using spherical wheel	
Size [mm]	76.5×76.5×76.5
Radius of flywheel R [mm]	25
Radius of rotor kicker r [mm]	7.5
Moment of inertia offlywheel N [Kg m ²]	1.275×10^{-4}
Moment of inertia of rotor kicker I_r [Kg m ²]	1.23×10^{-7}
Mass of rotor kicker m [Kg]	6×10^{-3}

Table 2. Specification of optical sensor	
Туре	ADNS-9500
Maximum frame rate [fps]	11750
Resolution [dpi]	5670
Pixel [pixel]	900





(a) Spherical reaction wheel (b) Rotor kicker Figure 5. Reaction Wheel System



(c) Target angular velocity is -4 [rad/s]

Figure 6. Rotational Control Experiment around Z axis