

K6-73

球状ロータを用いた 3 次元リアクションホイール
Development of Three-Dimensional Reaction Wheel Using Spherical Rotor

○増田開¹, 内山賢治²

○Kai Masuda¹ and Kenji Uchiyama²

Abstract: This paper describes the development of three-dimensional reaction wheel using a spherical rotor. The device enables three-dimensional motion in terms of rotation of the rotor without mechanical constraints. Most of system to generate three-dimensional motion requires very complex mechanism using gears and links, and special mechanism. Using three piezoelectric actuators as stator, the proposed system reduces size and weight in comparison with conventional mechanical system. The developed reaction wheel, therefore, can be applied to small satellites with inherent problems such as space and weight limits. We explicate the driving method for the spherical rotor using piezoelectric actuator and prototype model of the reaction wheel.

1. 緒言

宇宙機における姿勢制御方法の一つとして、リアクションホイールを用いたものがある。しかし、この方法で 3 軸姿勢制御を行う場合、各軸に対してリアクションホイールを配置する必要があり、姿勢制御システムの軽量化・小型化が難しい。この問題に対して、リアクションホイールを球体とすることで、一つのシステムで 3 軸姿勢制御を行う方法が考えられる^[1]。しかし、球体を回転させるためには、ギアなどを用いた複雑な機構や球体の位置を保つための特別な保持機構が必要となり、故障等のリスクを高めることとなる^[2]。そこで我々は圧電素子による振動を原理とすることで、より単純な球体の回転機構の設計・開発を行った。

球体の回転機構であるアクチュエータは球体を保持する機能としての役割も持つため、ベアリング等の保持部品を必要とせず、部品点数を減らすことができる。またアクチュエータは機械的駆動部が少ない。よって軽量化・小型化が 3 軸姿勢制御システムが期待できる。

本稿では、この 3 次元リアクションホイールの回転原理及び試作品について解説する。

2. 駆動原理

3 次元リアクションホイールのステータを図 1 に示す。このアクチュエータは 2 つの積層圧電セラミックスによる支柱、及び球体が接触するステータヘッドからなる。ステータヘッドは、磁石を内蔵し、球体ロータを吸着することができる。図 1 に示したアクチュエータ A には、アクチュエータ B に対して任意の位相差をつけて交流電圧を印加する。交流電圧の角周波数を ω_v 、アクチュエータ A 及び B の圧電効果によって生じる歪みをそれぞれ ε_A 、 ε_B とし、圧電素子の電圧と変位の関係が線形であると仮定すると、ステータヘッド

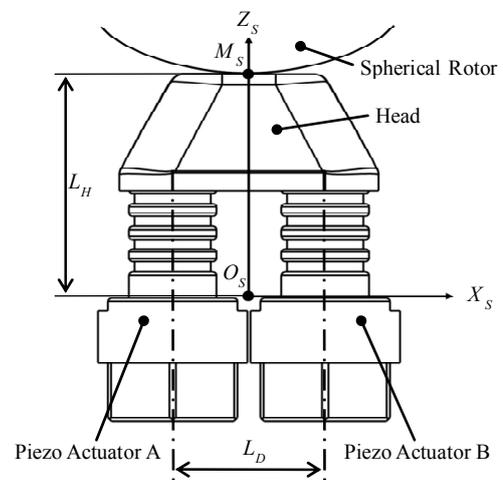


Figure 1. Stator

上の点 M_S (X_{M_S} , Z_{M_S}) の軌跡は、 $0 \leq \omega_v t < \pi/4$, $5\pi/4 \leq \omega_v t < 2\pi$ の範囲で

$$X_{M_S} = L_D \left\{ \frac{(2-L_D)\varepsilon_A + L_D\varepsilon_B + 2}{2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)} \right\} \left[\cos \left\{ \frac{L_H}{L_D} (\varepsilon_B - \varepsilon_A) \right\} - 1 \right] \quad (1)$$

$$Z_{M_S} = L_D \left\{ \frac{(2-L_D)\varepsilon_A + L_D\varepsilon_B + 2}{2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)} \right\} \sin \left\{ \frac{L_H}{L_D} (\varepsilon_B - \varepsilon_A) \right\} \quad (2)$$

となり、 $\pi/4 \leq \theta < 5\pi/4$ では

$$X_{M_S} = -L_D \left\{ \frac{(2-L_D)\varepsilon_A + L_D\varepsilon_B + 2}{2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)} \right\} \left[\cos \left\{ \frac{L_H}{L_D} (\varepsilon_B - \varepsilon_A) \right\} - 1 \right] \quad (3)$$

$$Z_{M_S} = -L_D \left\{ \frac{(2-L_D)\varepsilon_A + L_D\varepsilon_B + 2}{2(\varepsilon_B - \varepsilon_A)} \right\} \sin \left\{ \frac{L_H}{L_D} (\varepsilon_B - \varepsilon_A) \right\} \quad (4)$$

と表わせる。圧電アクチュエータの仕様とステータのパラメータを表 1 と表 2 に示す。図 2 に点 M_S の軌跡の計算結果を示す。ステータヘッドとロータの接触点の軌跡は楕円形状を描き、これによりロータを回転させる。アクチュエータの位相をそれぞれ 180° ずらせば、楕円の回転方向が反対になるのでロータも逆回転する。

1 : 日大理工・学部・航宇, 2 : 日大理工・教員・航宇

Table 1. Specification of Piezo Actuator

Type	ASB170C801NP0LF
Rated Voltage	150[V]
Stroke	17.0[um]
Force	800[N]

Table 2. Stator Parameter

L_D	20.0[mm]
L_H	19.4[mm]

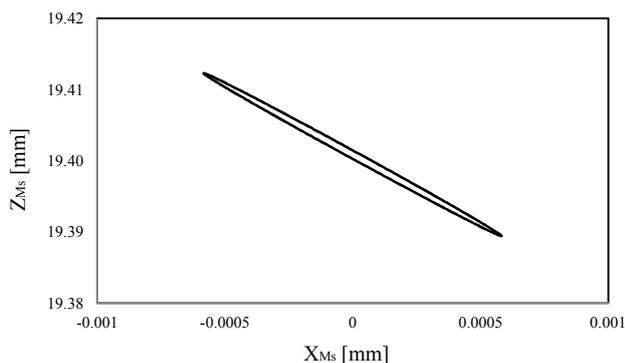


Figure 2. Trajectory of Contact Point Ms

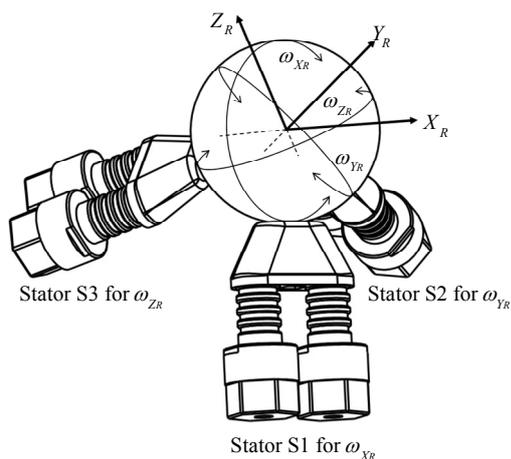


Figure 3. Configuration of Each Stator

ここで図3に示すようにステータを配置する。ロータの座標系 $X_R Y_R Z_R$ に対する角速度は ω_{Xr} , ω_{Yr} , ω_{Zr} で、それぞれステータ S1, S2, S3 に対応している。座標系 $X_R Y_R Z_R$ は慣性座標系 XYZ を X 軸まわりに角度 ϕ , Y 軸まわりに角度 θ , Z 軸まわりに角度 φ , 回転させた座標系である。慣性座標系 XYZ の単位ベクトルをそれぞれ i , j , k とし、角速度を ω_x , ω_y , ω_z とすると

$$\omega = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \cdot \tan \theta & \cos \phi \cdot \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi \cdot \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Xr} \\ \omega_{Yr} \\ \omega_{Zr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ϕ , θ はそれぞれ $\pi/4$ 回転しているので、慣性座標系から見た角速度は

$$\omega = \omega_{Xr} i + \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_{Yr} j + \frac{1}{2} \omega_{Zr} k \quad (7)$$

となる。つまり、ステータにより各軸まわりに発生させる角速度により、ロータの角速度を任意に決定することができる。これにより、単一のホイールで小型人工衛星の3軸姿勢制御が可能となることが分かる。

3. 試作機の開発・実験・結果

基礎実験を行う際のパラメータを表3に示す。炭素クロム合金製の球体ロータはステータヘッドに内蔵されたネオジウム磁石によって保持される。この実験では回転方向の制御の検証を目的とするため、一定周波数で圧電素子を駆動する。

図4に試作機を示す。ステータへの入力電圧にい操作を加えることで、ロータを任意の方向に回転させることができた。このときの角速度は約 7.5[rpm]であった。

Table 3. Each Parameter

Input Voltage	50.0[V]
Input Frequency	0.50[kHz]
Diameter of Rotor	50.0[mm]
Weight of Rotor	533[g]



Figure 4. Prototype of Three-Dimensional Reaction Wheel

4. 結言

本稿では、圧電素子により球体ロータを任意方向に回転させる方法を示した。また基礎実験により本手法の妥当性を検証した。今後はセンサを搭載し、正確な方向制御を行うとともに、入力周波数変調等により、ロータの速度制御を行う。

参考文献

- [1] F.K.Mueller : “SPHERICAL-FLYWHEEL ATTITUDE CONTROL SYSTEM”, U.S.patent, 1963
- [2] R.Bertoni : “SPHEAICAL MOTOR”, U.S.patent, 1971