

# Space Humming Bird のフィードバック姿勢制御

## Feedback Attitude Control of Space Humming Bird

学 木村一貴 (武蔵工大) 正 D. N. Nenchev (武蔵工大)  
正 妻木勇一 (弘前大学)

Kazutaka KIMURA, Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo  
Dragomir N. NENCHEV, Musashi Institute of Technology  
Yuichi TSUMAKI, Hirosaki University

**Abstract:** The Space Humming Bird is an intra-vehicular free flying system (IVFFS) to be used in micro gravity environment. Propulsion is done by means of six propellers. We apply an attitude controller with feedback linearization and attitude parameterization via roll-pitch-yaw angles. The inherent singularity problem is treated with the help of the Singularity-Consistent method developed for robot control.

**Key Words:** Space Humming Bird, Feedback Control, Teleoperation, Singularity-Consistent Method

### 1 序論

現在国際宇宙ステーション (ISS) の建設が進められている。しかし、これまでのところ ISS には 3 人の宇宙飛行士しか滞在できない。将来的にも当初予定されていた 7 人の宇宙飛行士の滞在は、予算の都合により危ぶまれている。そのため宇宙飛行士をサポートするロボットの開発が不可欠である。そこで妻木らにより船内フリーフライヤシステム (Intra-Vehicular Free-Flyer System : IVFFS) が提案された [1] [2]。また、IVFFS に用いる小型自由飛行型ロボットとして、SHB (Space Humming Bird) が提案されている [3]。本論文では、自律移動を行うための SHB のフィードバック姿勢制御について述べる。

### 2 Space Humming Bird (SHB)

図 1 に SHB のモデルを示す。 $q_1 \sim q_5$  は、一般座標系である。 $q_1, q_2, q_3, q_5$  は回転を表し、 $q_4$  は並進を表している。このように関節を配置することにより、全身を用いた平面 3 自由度のマニピュレーション機能を実現することができる。ただし、今回は姿勢制御だけを考えるので、SHB を一つの剛体として考える。すなわち人工衛星と同じように考えることができる。ただし、人工衛星の姿勢制御では

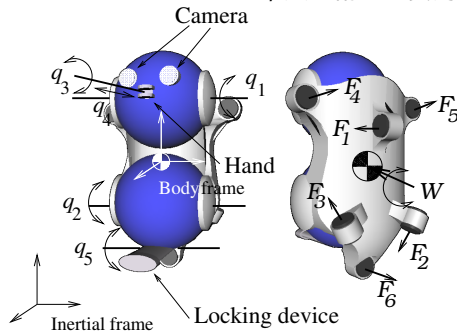


Fig.1: Model of SHB

クオータニオンが用いられる場合が多いが、本論文では、ロール・ピッチ・ヨーを用いて姿勢制御を行う。

### 3 運動方程式

今回は姿勢制御だけを考えるので、SHB を一つの剛体として考える。そのため並進運動は重心に働く力のみ考えれば良い。図 1 に SHB のプロペラが出力する力の方向について示す。 $i$  番目のプロペラの出力を  $F_i$  とする。

$$F_i = f_i e_i \quad (1)$$

$f_i$  と  $e_i$  は、それぞれプロペラによる出力の大きさと出力方向の単位ベクトルを示している。なお、問題を単純化するため今回プロペラ回転により発生する反モーメントは考慮していない。作用反作用の法則より各プロペラが受ける力はプロペラの推力とは逆向きの力となる。SHB の重心位置から  $i$  番目のプロペラの重心位置を示す位置ベクトルを  $r_i$  とおく。SHB の質量を  $m$ 、ボディ座標系における SHB の慣性行列を  $I_B$ 、SHB の重心の速度を  $v$ 、SHB の角速度を  $\omega$  とする。剛体の運動方程式より次式が求まる。

$$\begin{bmatrix} m\dot{v} \\ I_B\dot{\omega} + \omega \times I_B\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ T \end{bmatrix} = W \quad (2)$$

$W$  は SHB の重心回りの力  $F$  とトルク  $T$  から成る。ここで  $W$  を各プロペラの出力  $f_i$  で表すと次式を得る。

$$W = A\mathcal{F} \quad (3)$$

$$\mathcal{F} = [f_1 \ \cdots \ f_6]^T$$

$$A = [A_1 \ \cdots \ A_6] \quad A_i = \begin{bmatrix} -e_i \\ -r_i \times e_i \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{6 \times 1}$$

$A$  は、 $6 \times 6$  の正方行列である。 $\det A \neq 0$  より、逆行列  $A^{-1}$  を求めることができる。

$$\mathcal{F} = A^{-1}W \quad (4)$$

したがって各プロペラの出力の大きさ  $f_i$  について求めることができる。

## 4 制御方法

### 4.1 基礎式

慣性座標系における重心の目標加速度を  $\dot{v}_c$ 、剛体の目標角加速度を  $\dot{\omega}_c$  とする。ここで  $\dot{v}_c$  を回転行列を用いてボディ座標系における重心の加速度  ${}^B\dot{v}_c$  に変換する。式 (4) の加速度  $\dot{v}$  と角加速度  $\dot{\omega}$  を  ${}^B\dot{v}_c$  と  $\dot{\omega}_c$  に変換することにより SHB の姿勢制御則が求まる。

$$\mathcal{F} = A^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} m {}^B\dot{v}_c \\ I_B \dot{\omega}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \times I_B \omega \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

式 (5) より、 $\mathcal{F}$  について解くことで各プロペラの出力の大きさ  $f_i$  を求めることができる。これらに基づいてシミュレーションを行った。

### 4.2 フィードバック姿勢制御

姿勢に関する制御則は、線形化したため次式になる。

$$T = I_B \dot{\omega}_{ref} + \omega \times I_B \omega \quad (6)$$

ここで  $\dot{\omega}_{ref}$  は入力角加速度である。剛体の運動方程式である式 (2) と式 (6) より次式を得ることができる。

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{ref} \quad (7)$$

今回はロール、ピッチ、ヨーを用いてフィードバック姿勢制御を考えるため、角速度  $\omega$  との関係について述べる。ロール、ピッチ、ヨーの3つの角をそれぞれ  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  とする。ロール、ピッチ、ヨーの3つの角の角速度  $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$  と SHB の角速度  $\omega$  の関係について以下に示す。

$$\omega = J_{rpy} \dot{\theta} \quad (8)$$

$$J_{rpy} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \cos \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & \sin \theta_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式 (8) を時間微分すると次式が求まる。

$$\dot{\omega} = J_{rpy} \ddot{\theta} + \dot{J}_{rpy} \dot{\theta} \quad (10)$$

新たな入力であるロール、ピッチ、ヨーの角加速度  $\ddot{\theta}_{ref}$  を導入すると  $\dot{\omega}_{ref}$  は下記の式に示す。

$$\dot{\omega}_{ref} = J_{rpy} \ddot{\theta}_{ref} + \dot{J}_{rpy} \dot{\theta} \quad (11)$$

式 (10) と式 (11) を式 (7) に代入することより次式が成り立つ。

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_{ref} \quad (12)$$

ただし、 $\det J_{rpy} = \cos \theta_3 \neq 0$  の場合のみである。

ここで目標値について考える。目標値は、SHB の姿勢変化の所要時間  $t_f[s]$ 、慣性座標系における SHB の一定の回転軸  $k^c$  および回転角  $\alpha^c(t_f)$  である。目標値から五次補間法を用いて時間に連続な関数  $\alpha^c(t)$  を使用する。回転に関する誤差  $e(t)$  を求めるため、目標値である回転軸  $k^c$  と回転角  $\alpha^c(t)$  から回転行列  $R_{IB}^c(t)$  を求める [4]。姿勢誤差  $e(t)^\times$  を次式で示す。

$$e(t)^\times = R_{IB}^c(k^c, \alpha^c(t)) R_{IB}^T(\theta(t)) - I \quad (13)$$

ここで、 $R_{IB}(\theta(t))$  は、現在の姿勢を表す回転行列である。また、 $I$  は、 $3 \times 3$  の単位行列である。 $\alpha^c(t)$  を追従することにより微小変位の回転となる。そのため  $e(t)^\times$  が歪み対称行列になるので、3つの要素を持つベクトル  $e(t)$  と置き換えることが可能になる。

次に SHB の角速度誤差  $\dot{e}(t)$  について考える。回転軸  $k^c$  と回転角  $\alpha^c(t)$  より  $\omega^c$  が求まる。

$$\omega^c(t) = \dot{\alpha}^c(t) k^c \quad (14)$$

式 (14) を時間微分することにより、 $\dot{\omega}^c(t)$  を求めることができる。角速度に関する誤差  $\dot{e}(t)$  は、次式になる。

$$\dot{e}(t) = \omega^c - \omega \quad (15)$$

$\omega$  は、SHB の現在の角速度である。

次に、エラーダイナミクスを次式で表すことができる。

$$\dot{\omega}^c - \dot{\omega} = -d\dot{e}(t) - ce(t) \quad (16)$$

$c, d$  はフィードバックゲインである。式 (7) を考慮することにより式 (16) から  $\dot{\omega}_{ref}$  を得る。

$$\dot{\omega}_{ref} = \dot{\omega}^c + d\dot{e}(t) + ce(t) \quad (17)$$

特異点適合法を適用することにより、式 (11) と式 (17) から以下の式が得られる。

$$\ddot{\theta}_{ref} = J_{rpy}^T H^* (d\dot{e} + ce - \dot{J}_{rpy} \dot{\theta}) + b(\text{adj } J_{rpy}) k^c \quad (18)$$

$$\ddot{\alpha}^c = -k^{cT} H^* (d\dot{e} + ce - \dot{J}_{rpy} \dot{\theta}) + b(\det J_{rpy}) \quad (19)$$

ただし、 $H^* = (J_{rpy} J_{rpy}^T + k^c k^{cT})^{-1}$  となる。式 (19) より、 $b$  を求める。

$$b = \frac{\ddot{\alpha}^c + k^{cT} H^* (d\dot{e} + ce - \dot{J}_{rpy} \dot{\theta})}{\det J_{rpy}} \quad (20)$$

ただし、 $\det J_{rpy} = 0$  となる特異点付近では、特異点適合法より  $\det J_{rpy} = \text{const}$  として考える。

## 5 シミュレーション結果

今回シミュレーションに用いるソフトは、Open Dynamics Engine (ODE) である [5]。回転角  $\alpha^c(t)$  において時間に対して連続的な関数を作るために五次補間法を用いた。図 2 に特異点を含まない場合のシミュレーション結果を示す。SHB の初期状態を回転角  $\alpha(0) = 0 \text{ rad}$ 、回転軸  $k = [1 \ 0 \ 0]^T$  とする。シミュレーションに関する各パラメーターを所要時間  $t_f = 10 \text{ s}$ 、回転角  $\alpha^c(t_f) = \frac{4\pi}{9} \text{ rad}$ 、回転軸  $k^c = [1 \ 0 \ 0]^T$ 、フィードバックゲイン  $c = 10 \text{ s}^{-2}$ 、 $d = 3 \text{ s}^{-1}$  に設定する。図 2 より、角度、角速度、角加速度の誤差は非常に小さい値になった。これより、 $\alpha^c(t)$  を追従できていることがわかる。 $\det J_{rpy}$  は、0 になっていないので特異点の影響を受けていない。

図 3 に目標姿勢を特異点にした場合のシミュレーション結果を示す。回転角  $\alpha^c(t_f) = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$  に設定する。目標値を特異点に設定したため特異点適合法を用いた。 $\det J_{rpy}$  が 0.01 より小さい場合  $b = -10$  として行った。角度、角

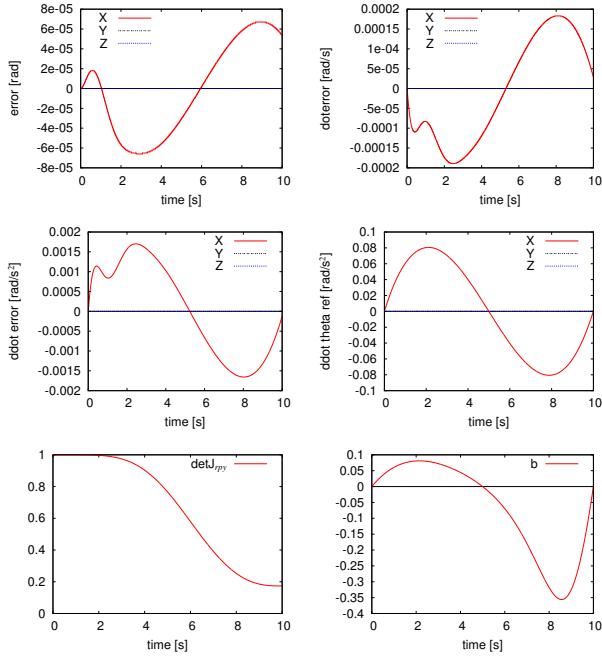


Fig.2: Rotation of SHB around X axis

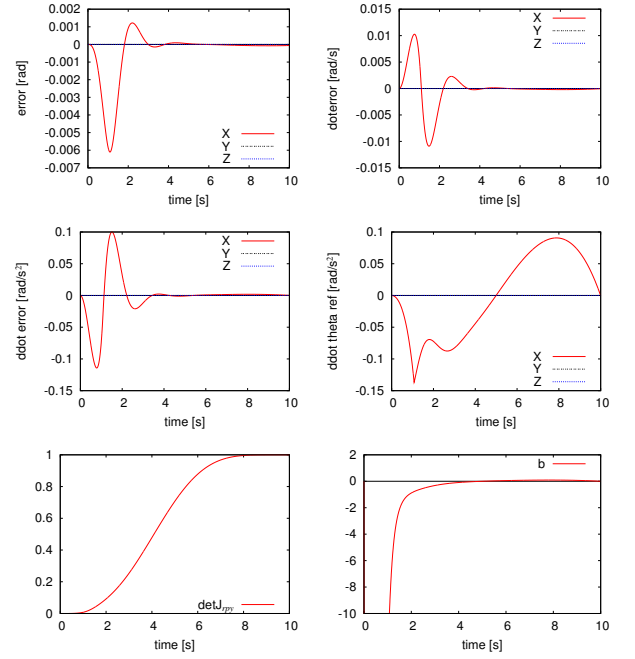


Fig.4: Rotation of SHB around X axis

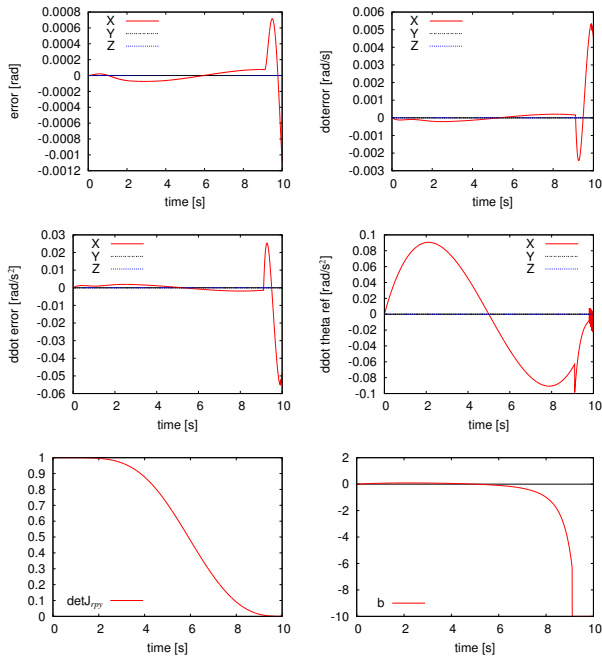


Fig.3: Rotation of SHB around X axis

速度，角加速度の誤差は，特異点適合法を用いる前つまり 0 s から 9 s までの間では非常に小さくなっている．しかし，特異点適合法を用いた 9 s 以降は，角度，角速度，角加速度の誤差が用いる前に比べてかなり大きくなっていることがわかる．これは入力値である  $\alpha^c(t)$  を追従できていないと考えられる．

図 4 に初期姿勢を特異点にした場合のシミュレーション結果を示す．SHB の初期状態を回転角  $\alpha(0) = \frac{\pi}{2}$  rad，回転軸  $k = [1 \ 0 \ 0]^T$  とする．シミュレーションに関する各パラメータを回転角  $\alpha^c(t_f) = 0$  rad，回転軸  $k^c = [1 \ 0 \ 0]^T$  に設定する．図 4 において， $\det J_{rpy}$  が 0 から始まっているため初期状態が特異点になっていることがわかる． $b$  が

-10 より小さい場合  $b = -10$  として行った． $b$  において， $\det J_{rpy} = 0$  なので 0 s から 1.5 s の間は特異点適合法を用いて  $b = -10$  となっていることがわかる．角度，角速度，角加速度の誤差は特異点適合法を用いている場合，目標値である  $\alpha^c$  を追従していないので大きくなってしまっていることがわかる．しかし，誤差は小さく，4 s 以降 0 に収束しているため特異点適合法は有効な手段であると言える．

## 6 結論

特異点適合法を用いることにより，目標値が特異点の場合の姿勢制御と初期姿勢が特異点の場合の姿勢制御は制御可能であることを示した．今後の課題として特異点を通過して目標値までの姿勢制御が考えられる．

## 文 献

- [1] 妻木勇一, D. N. Nenchev: “船内フリーフライヤースステム”, 第 45 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2001, 01-2D17
- [2] Y. Tsumaki, M. Yokohama, D. N. Nenchev: “Intra-Vehicular Free-Flyer System,” Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Conf. on Intelligent Robot and Systems, Las Vegas, Nevada, October, pp.2547-2552, 2003
- [3] 妻木勇一, D. N. Nenchev: “船内活動用フリーフライングロボット”, 日本機械学会 [No.02-6] ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 2002, 1P-A01
- [4] D. N. Nenchev, Y. Tsumaki: “Singularity-Consistent Attitude Motion Analysis and Control Based on Euler Angle Parameterization,” Proc. of SICE Annual Conference in Fukui, Fukui, Japan, August, pp.881-889, 2003
- [5] ODE: <http://ode.org/>