

スライディングモード制御と適応制御を用いた コントロールモーメントジャイロスコプのロバスト制御

M2017SC004 神谷直樹

指導教員：高見勲

1 はじめに

Control Moment Gyroscope (以下, CMG) は, ジャイロ効果を利用して回転トルクを発生させる装置であり, 国際宇宙ステーションなどの大型の宇宙機の姿勢制御に用いられている. CMG は非線形性が強いシステムで, 摩擦外乱があることが知られている. 先行研究では, CMG の非ホロノミック拘束を用いてシステムを Chained Form に変形し, 状態に偏差の積分を入れることで, 摩擦をはじめとする外乱を補償し, バックステッピング法を用いて駆動源を持たないジンバルの目標値追従制御を行っている [1]. また, CMG を駆動源として用いている国際宇宙ステーションは, 物資補給等を目的としたパーツをドッキングしたり, 分離したりすることがある. そのため, 国際宇宙ステーションの慣性モーメントが変動することがあると考えられる. その上で, 摩擦を外乱, 慣性モーメントを不確かなパラメータとする. そして, CMG に対して, スライディングモード制御と適応推定機構を用いる. 文献 [2] では, 粘性摩擦とクーロン摩擦の係数や, 回転する足の重さを不確かなパラメータとして, 不確かなパラメータに対して, システムに対してロバスト性を補償するためにスライディングモード制御を適用しており, 慣性モーメントの不確かさを分離して, リアプノフ関数に入れることで扱いやすくしている. 本研究では, バックステッピングの考えに基づいて制御器を設計し, 粘性摩擦や不確かなパラメータに対して適応推定機構を用いることで, 粘性摩擦係数や慣性モーメントを推定する. また, 推定されるパラメータを用いてスライディングモード制御で, 系の安定化を図り, 非線形摩擦に対してロバスト性を保証する. その上で, 推定値や不確かさを含むリアプノフ関数を定義して, 制御器設計を行う.

2 モデリング

図1にCMGの概略図を示す. Rotor1を回転させるモー

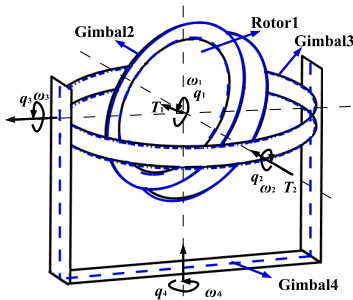


図1 CMGの概略図

タ1のトルクを $T_1(t)$, Gimbal2を回転させるモータ2の

トルクを $T_2(t)$ とする. $q_1(t)$ を Gimbal2 に対する Rotor1 の角度をとし, $q_2(t)$ を Gimbal3 に対する Gimbal2 の角度とし, $q_4(t)$ を Gimbal4 の角度とする. また, $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\omega_4(t)$ を, それぞれ q_1 , q_2 , q_4 の角速度とする. 本研究では, Gimbal2 の駆動角度を $0 < q_2 < \frac{\pi}{2} [\text{rad}]$ とし, Gimbal3 を固定した場合を考える. Rotor1, Gimbal2, Gimbal4 の運動方程式は, 式 (1)-(3) になる.

$$I_{R1y}\dot{\omega}_1 + I_{R1y}\dot{\omega}_4 \sin q_2 + I_{R1y}\omega_2\omega_4 \cos q_2 = T_1 \quad (1)$$

$$(I_{G2x} + I_{R1x})\dot{\omega}_2 - I_{R1y}\omega_1\omega_4 \cos q_2 - I_1\omega_4^2 \sin q_2 \cos q_2 = T_2 \quad (2)$$

$$I_{R1y}\dot{\omega}_1 \sin q_2 + (I_2 + I_1 \sin^2 q_2)\dot{\omega}_4 + I_1\omega_2\omega_4 \sin 2q_2 + I_{R1y}\omega_1\omega_2 \cos q_2 = 0 \quad (3)$$

$$I_1 = I_{G2y} + I_{R1y} - I_{R1x} - I_{G2z}$$

$$I_2 = I_{R1x} + I_{G2z} + I_{G3x} + I_{G4x}$$

3 システムの構成

式 (1)-(3) より, 摩擦からなる外乱 $F_i (i = 1, 2, 4)$ を加えた CMG のシステムは, 式 (4) になる. ここで, q_1 , ω_1 を制御量とすると, 2 入力 3 出力のシステムとなり, バックステッピング法では扱えないため, 式 (4) から外す.

$$\begin{aligned} [T_1, T_2] &= [u_1, u_2] \\ \begin{cases} \dot{q}_2 = \omega_2 \\ \dot{\omega}_2 = f_2(q, \omega) + \Delta f_2 + g_2 u_2 \\ \dot{q}_4 = \omega_4 \\ \dot{\omega}_4 = f_4(q, \omega) + \Delta f_4 + g_4(q) u_1 \end{cases} & \quad (4) \\ f_2(q, \omega) &= \frac{I_{R1y}\omega_1\omega_4 \cos q_2 + I_1\omega_4^2 \sin q_2 \cos q_2}{I_{G2x} + I_{R1x}} \\ f_4(q, \omega) &= \frac{I_{R1y}\omega_2\omega_4 \sin q_2 \cos q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \\ &\quad - \frac{I_1\omega_2\omega_4 \sin 2q_2 + I_{R1y}\omega_1\omega_4 \cos q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \\ g_2 &= \frac{1}{I_{G2x} + I_{R1x}} \\ g_4(q) &= -\frac{\sin q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \\ \Delta f_2 &= \frac{F_2}{I_{G2x} + I_{R1x}} \\ \Delta f_4 &= \frac{-F_1 \sin q_2 + F_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \end{aligned}$$

外乱 $F_i (i = 1, 2, 4)$ が粘性摩擦と非線形摩擦 $d_i(t)$ から成り立つと仮定して, 粘性摩擦係数を $F_{iv} (i = 1, 2, 4)$ とすると, $F_i (i = 1, 2, 4)$ は以下の式となる.

$$F_i = F_{iv}\omega_i + d_i \quad (|d_i| < d_{iN}) \quad (5)$$

そこで、粘性摩擦係数及び慣性モーメントを含む係数を $a_i (i = 1, 2, 3)$ とし、非線形摩擦を含む剰余項を $D_i (i = 1, 2)$ とすると、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta f_2 &= \frac{F_2}{I_{G2x} + I_{R1x}} \\ &= a_1 \omega_2 + D_1(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta f_4 &= \frac{-F_1 \sin q_2 + F_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \\ &= \frac{a_2 \omega_1 \sin q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \\ &\quad + \frac{a_3 \omega_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} + D_2(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$a_1 = \frac{F_{2v}}{I_{G2x} + I_{R1x}}$$

$$a_2 = -F_{1v}$$

$$a_3 = F_{4v}$$

$$D_1 = \frac{d_2}{I_{G2x} + I_{R1x}}$$

$$D_2 = \frac{-d_1 \sin q_2 + d_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2}$$

Gimbal4の変動する慣性モーメント \bar{I}_{G4x} は、慣性モーメントの変動を ΔI_{G4x} 、初期値を I_{G4x} とすると、以下の式で表される。

$$\bar{I}_{G4x} = I_{G4x} + \Delta I_{G4x} \quad (8)$$

式(6), (7), (8)より、式(4)は、慣性モーメントの変動を含む項を J とすると、以下の式で表される。ただし、 $|D_i| < D_{iN} (i = 1, 2)$ である。

$$\begin{aligned} [T_1, T_2] &= [u_1, u_2] \\ \begin{cases} \dot{q}_2 = \omega_2 \\ \dot{\omega}_2 = f_2 + g_2 u_2 + a_1 \omega_2 + D_1 \\ \dot{q}_4 = \omega_4 \\ J \dot{\omega}_4 = f_4 + g_4 u_1 + \frac{a_2 \omega_1 \sin q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \\ \quad + \frac{a_3 \omega_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} + D_2 \end{cases} & \quad (9) \\ J &= 1 + \Delta J \\ \Delta J &= \frac{\Delta I_{G4x}}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \end{aligned}$$

指令軌道をそれぞれ q_{2d} , q_{4d} として、軌道偏差を以下の式で定義する。

$$\begin{cases} z_1 = q_2 - q_{2d} \\ z_2 = q_4 - q_{4d} \end{cases} \quad (10)$$

式(4), (10)より、偏差システムは、以下となる。

$$\Delta_1 : \begin{cases} \dot{z}_1 = \omega_2 - \dot{q}_{2d} \\ \dot{\omega}_2 = f_2 + g_2 u_2 + a_1 \omega_2 + D_1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta_2 : \begin{cases} \dot{z}_2 = \omega_4 - \dot{q}_{4d} \\ J \dot{\omega}_4 = f_4 + g_4(q) u_1 + \frac{a_2 \omega_1 \sin q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \\ \quad + \frac{a_3 \omega_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} + D_2 \end{cases} \quad (12)$$

4 適応推定機構

適応推定機構とは、不確かなパラメータを推定して、不確かさを打ち消す機構のことである。リアプノフの安定定理を用いることによって、適応則と呼ばれる推定値の微分を求め、積分することによって推定値を導出する。具体的な手順を以下に示す。パラメータ a が不確かなパラメータであると仮定する。ただし、 a は定数である。以下のような簡単なシステムを考える。

$$\frac{d}{dt} x = f(x) + g(x)u + \bar{a}x_1 \quad (13)$$

このとき、 a の推定値を $\hat{a}(t)$ 、推定値と実際の値の偏差を \tilde{a} とすると、 \tilde{a} は以下の式で表される。

$$\tilde{a} = a - \hat{a} \quad (14)$$

また、式(14)より、 \tilde{a} の微分 $\dot{\tilde{a}}$ は、以下の式となる。

$$\dot{\tilde{a}} = -\dot{\hat{a}} \quad (15)$$

制御入力 u を以下の式で表す。

$$u = -\frac{f + \hat{a}x + cx}{g} \quad (16)$$

適応則 $\dot{\hat{a}}$ を以下の式で表す。

$$\dot{\hat{a}} = -\frac{1}{\gamma} x^2 \quad (17)$$

リアプノフ関数を、以下で示すような \tilde{a} を含む関数の式で表す。

$$V = \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{2} \gamma \tilde{a}^2 \quad (18)$$

式(15)より、リアプノフ関数の微分 \dot{V} は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x\dot{x} + \tilde{a}\dot{\tilde{a}} \\ &= x(f + gu + \bar{a}x_1) + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}}) \\ &= x(-cx + (\bar{a} - \hat{a})x) - \tilde{a}\dot{\tilde{a}} \\ &= -cx^2 + \tilde{a}x^2 - \tilde{a}x^2 \\ &= -cx^2 < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

したがって、 $\dot{V} < 0$ より、 $x \rightarrow 0$ となる。

5 制御器設計

CMGのシステムを、Gimbal2とGimbal4のシステムとしてそれぞれ分離する。その後、各々のシステムに対して、リアプノフの安定定理を用いて、仮想入力 ω_2^* , ω_4^* を求める。切換面 s_1 , s_2 を設計し、スライディングモード制御理論より、制御入力 u_1 , u_2 を求める。また、制御入力 u_1 , u_2 に不確かなパラメータに対する推定値とリアプノフの安定定理を用いて、適応則と呼ばれる推定値の微分値を求め、積分することで推定値を不確かなパラメータに収束させる機構を設計する。以下に、閉ループ系の概略図を図2に示す。Adaptive algorithmでは、適応則を積分して推定値を導出する。

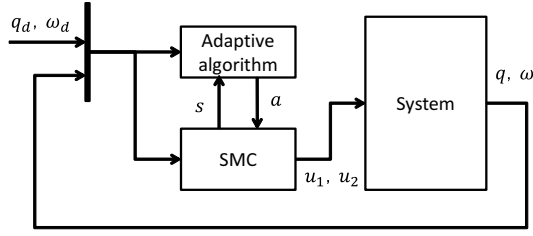


図 2 閉ループ系の概略図

5.1 制御入力 u_2 の設計

サブシステム Δ_1 に対して、コントローラを設計する。まず、 ω_2 を仮想入力として、 $z_1(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となる仮想入力 ω_2^* を求める。リアプノフ関数 $V_1(t)$ を下式で定義する。

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (20)$$

このとき、式 (20) の微分 $\frac{d}{dt} V_1$ は、以下となる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_1 &= z_1 \dot{z}_1 \\ &= z_1 (\omega_2 - \dot{q}_{2d}) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 ω_2^* が以下の式を満たすものとする。

$$\omega_2^* = -C_1 z_1 + \dot{q}_{2d} \quad (C_1 > 0) \quad (22)$$

よって、 ω_2 を ω_2^* に取り替えると、式 (21) は以下の式となる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_1 &= z_1 (\omega_2 - \dot{q}_{2d}) \\ &= -C_1 z_1^2 < 0 \end{aligned} \quad (23)$$

次に、 $\omega_2 \rightarrow \omega_2^* (t \rightarrow \infty)$ となる u_2 を求める。切換面を s_1 、 a_1 の推定値を \hat{a}_1 とする。ここで、推定値と実測値の偏差 \tilde{a}_1 と切換面 s_1 を以下で定義する。

$$s_1 = \omega_2 - \omega_2^* \quad (24)$$

$$\tilde{a}_1 = a_1 - \hat{a}_1(t) \quad (25)$$

切換面 s_1 について、変形すると以下になる

$$\begin{aligned} s_1 &= \omega_2 - \omega_2^* \\ &= \omega_2 + C_1 z_1 - \dot{q}_{2d} \\ &= \dot{z}_1 + C_1 z_1 \end{aligned} \quad (26)$$

よって、式 (26) より、 \dot{z}_1 は以下の式で表される。

$$\dot{z}_1 = -C_1 z_1 + s_1 \quad (27)$$

ここで、リアプノフ関数 V_2 を下式で定義する。

$$V_2 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} s_1^2 + \frac{1}{2} \gamma_1 \tilde{a}_1^2 \quad (28)$$

このとき、式 (28) の微分 $\frac{d}{dt} V_2$ は、以下となる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_2 &= z_1 \dot{z}_1 + s_1 \dot{s}_1 - \gamma_1 \tilde{a}_1 \dot{\tilde{a}}_1 \\ &= z_1 (-C_1 z_1 + s_1) + s_1 (\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_2^*) - \gamma_1 \tilde{a}_1 \dot{\tilde{a}}_1 \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、推定値の微分 $\dot{\hat{a}}_1$ を下式で与える。

$$\dot{\hat{a}}_1 = \frac{1}{\gamma_1} \omega_2 s_1 \quad (30)$$

そのとき、制御入力 u_2 は下式で与えられる。

$$\begin{aligned} u_2 &= -\frac{1}{g_2} (\hat{a}_1 \omega_2 + z_1 + f_2 - \ddot{q}_{2d} \\ &\quad + C_1 (\omega_2 - \dot{q}_{2d}) + C_2 s_1 + \eta_1 \text{sgn}(s_1)) \end{aligned} \quad (31)$$

式 (29) は、制御入力 u_2 を代入すると、以下の式となる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_2 &= z_1 (-C_1 z_1 + s_1) + s_1 (\dot{\omega}_2 - \dot{\omega}_2^*) - \gamma_1 \tilde{a}_1 \dot{\tilde{a}}_1 \\ &= -C_1 z_1^2 - C_2 s_1^2 - (\eta_1 - D_1) |s_1| \\ &< -C_1 z_1^2 - C_2 s_1^2 - (\eta_1 - D_{1N}) |s_1| \end{aligned} \quad (32)$$

したがって、 η_1 を $\eta_1 > D_{1N}$ となるように設定すると、リアプノフ関数 V_2 の微分 \dot{V}_2 は $\dot{V}_2 < 0$ となり、 $\omega_2 \rightarrow \omega_2^* (t \rightarrow \infty)$ となる。

5.2 制御入力 u_1 の設計

サブシステム Δ_2 に対して、コントローラを設計する。 ω_4 を仮想入力として、 $z_2(t) \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ となる ω_4^* を求める。同様に、仮想入力 ω_4^* は、以下の式となる。

$$\omega_4^* = -C_3 z_2 + \dot{q}_{4d} \quad (C_3 > 0) \quad (33)$$

次に、 $\omega_4 \rightarrow \omega_4^* (t \rightarrow \infty)$ となる u_1 を求める。切換面を s_2 、 a_2 の推定値を \hat{a}_2 、 a_3 の推定値を \hat{a}_3 、 ΔI_{G4x} の推定値を \hat{a}_4 とする。ここで、推定値と実測値の偏差 \tilde{a}_2 、 \tilde{a}_3 、 \tilde{a}_4 と切換面 s_2 を以下で定義する。

$$s_2 = \omega_4 - \omega_4^* \quad (34)$$

$$\tilde{a}_2 = a_2 - \hat{a}_2(t) \quad (35)$$

$$\tilde{a}_3 = a_3 - \hat{a}_3(t) \quad (36)$$

$$\tilde{a}_4 = \Delta I_{G4x} - \hat{a}_4(t) \quad (37)$$

切換面 s_2 について、変形すると以下になる

$$\begin{aligned} s_2 &= \omega_4 - \omega_4^* \\ &= \omega_4 + C_3 z_2 - \dot{q}_{4d} \\ &= \dot{z}_2 + C_3 z_2 \end{aligned} \quad (38)$$

よって、式 (38) より、 \dot{z}_2 は以下の式で表される。

$$\dot{z}_2 = -C_3 z_2 + s_2 \quad (39)$$

ここで、リアプノフ関数 V_4 を下式で定義する。

$$V_4 = \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} J s_2^2 + \frac{1}{2} \gamma_2 \tilde{a}_2^2 + \frac{1}{2} \gamma_3 \tilde{a}_3^2 + \frac{1}{2} \gamma_4 \tilde{a}_4^2 \quad (40)$$

このとき、式 (40) の微分 $\frac{d}{dt} V_4$ は、以下となる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_4 &= z_2 \dot{z}_2 + s_2 J \dot{s}_2 - \gamma_2 \tilde{a}_2 \dot{\tilde{a}}_2 - \gamma_3 \tilde{a}_3 \dot{\tilde{a}}_3 - \gamma_4 \tilde{a}_4 \dot{\tilde{a}}_4 \\ &= z_2 (-C_3 z_2 + s_2) + s_2 (J \dot{\omega}_4 - J \dot{\omega}_4^*) \\ &\quad - \gamma_2 \tilde{a}_2 \dot{\tilde{a}}_2 - \gamma_3 \tilde{a}_3 \dot{\tilde{a}}_3 - \gamma_4 \tilde{a}_4 \dot{\tilde{a}}_4 \end{aligned} \quad (41)$$

ここで、推定値の微分 $\dot{\hat{a}}_2$, $\dot{\hat{a}}_3$, $\dot{\hat{J}}$ を下式で表す。

$$\dot{\hat{a}}_2 = \frac{1}{\gamma_2} \frac{\omega_1 s_2 \sin q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \quad (42)$$

$$\dot{\hat{a}}_3 = \frac{1}{\gamma_3} \frac{\omega_4 s_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \quad (43)$$

$$\dot{\hat{a}}_4 = -\frac{1}{\gamma_4} \frac{\dot{\omega}_4^* s_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \quad (44)$$

このとき、制御入力 u_1 は以下の式で与えられる。

$$u_1 = -\frac{1}{g_4} \left(z_2 + f_4 - \left(1 + \frac{\hat{a}_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \right) \dot{\omega}_4^* + C_4 s_1 + \eta_2 \text{sgn}(s_2) + \frac{\hat{a}_2 \omega_1 \sin q_2}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} + \frac{\hat{a}_3 \omega_4}{I_2 + (I_1 - I_{R1y}) \sin^2 q_2} \right) \quad (45)$$

式 (41) は、制御入力 u_1 を代入すると、以下の式となる。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_4 &= z_2 (-C_3 z_2 + s_2) + s_2 (J \dot{\omega}_4 - J \dot{\omega}_4^*) \\ &\quad - \gamma_2 \tilde{a}_2 \dot{\hat{a}}_2 - \gamma_3 \tilde{a}_3 \dot{\hat{a}}_3 - \gamma_4 \tilde{a}_4 \dot{\hat{a}}_4 \\ &= -C_3 z_1^2 - C_4 s_2^2 - (\eta_2 - D_2) |s_2| \\ &< -C_3 z_1^2 - C_4 s_2^2 - (\eta_2 - D_{2N}) |s_2| \quad (46) \end{aligned}$$

したがって、 η_2 を $\eta_2 > D_{2N}$ となるように設定すると、リアプノフ関数 V_4 の微分 \dot{V}_4 は $\dot{V}_4 < 0$ となり、 $\omega_4 \rightarrow \omega_4^*(t \rightarrow \infty)$ となる。

6 実験結果

設計した制御器を用いて、実験を行う。初期値と指令軌道は、それぞれ以下のように設定する。

$$x_0 = [0 \ \frac{\pi}{18} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$q_{2d} = \begin{cases} \frac{\pi}{18} & (t \leq 2) \\ -\frac{5}{36} \pi \sin\left(\frac{\pi}{6}t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{7\pi}{4} & (2 < t \leq 6) \\ \frac{\pi}{3} & (8 < t) \end{cases}$$

$$q_{4d} = \begin{cases} 0 & (t \leq 2) \\ -\frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{6}t + \frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2} & (2 < t \leq 8) \\ 1 & (8 < t) \end{cases}$$

各パラメータは、以下の値を与える。

$$\begin{cases} C_1 = 3, C_2 = 4, \eta_1 = 1, \gamma_1 = 0.01 \\ C_3 = 3, C_4 = 4, \eta_2 = 1, \gamma_2 = 0.001 \\ \gamma_3 = 0.01, \gamma_4 = 0.01, \Delta I_{G4x} = 0.005 \end{cases} \quad (47)$$

図3, 4より、Gimbal2とGimbal4がともに指令軌道に偏差なく追従していることが分かる。Motor1, Motor2のそれぞれのトルク出力範囲は、それぞれ $|T_1| < 0.6[\text{N} \cdot \text{m}]$, $|T_2| < 2.4[\text{N} \cdot \text{m}]$ であるが、図5, 6より範囲内に収まっていることがわかる。また、シミュレーションと実験結果がほぼ一致していることから、モデルが妥当であるといえる。以上から、設計した制御器の妥当性を確認できる。

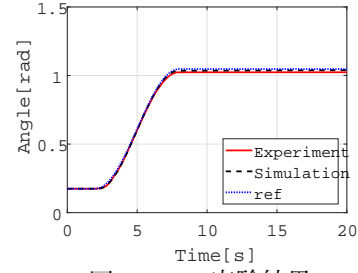


図3 q_2 の実験結果

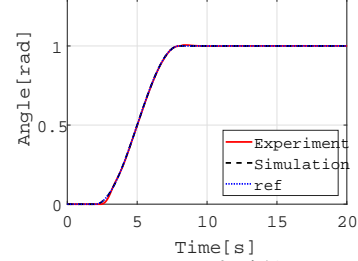


図4 q_4 の実験結果

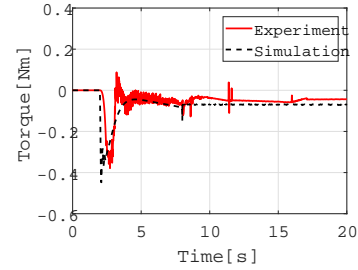


図5 T_1 の実験結果

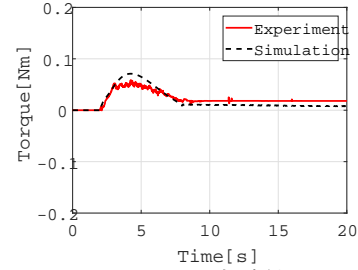


図6 T_2 の実験結果

7 おわりに

本研究の成果として、駆動源のない Gimbal4 の角度制御問題に対して、適応推定機構を用いて、バックステッピングの考え方、スライディングモード制御に基づき制御器設計を行った。また、実験により設計した制御器の有用性を確認した。

参考文献

- [1] 村井千夏, 中上礼奈: 非ホロノミック拘束を持つ CMG の摩擦補償を含む非線形追従制御第 3 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 計測自動制御学会, 2B2-4, 2016.
- [2] T.Madani, B.Daacji, K.Diouani: Adaptive controller based on uncertainty parametric estimation using backstepping and sliding mode techniques: Application to an active orthosis, European Control Conference, 2014.