

Lego Mindstorms EV3 を用いた回転型倒立振子の最適ロバストサーボ制御

○小松晃大¹, 木澤悟¹

¹ 秋田工業高等専門学校

1. 緒言

倒立制御は制御理論の応用の検証としてよく用いられている。これまで本研究でも提案した制御理論の検証実験に回転型倒立振子を利用してきた。一般に制御対象を駆動させる入出力装置、デジタルコントローラは高価である。しかし近年、入出力デバイスを搭載した高性能かつ低価格のハードウェアが出現し、MATLAB/Simulink を扱えるようになった。これにより、様々な制御理論を組み込んだ制御応用が手軽に行えるようになった。そこで本研究では、企業から教育機関まで幅広く普及し始めている Lego Mindstorms EV3 に着目し、回転型倒立振子制御装置を製作し、アームの過変動を防ぐために制御則に最適ロバストサーボ制御理論を利用し、振子の安定化制御の検証実験を行った。

2. 回転型倒立振子のシステムの概要

図 1 に製作した回転型倒立振子装置を示す。図 2 には回転型倒立振子をモデル化したモデル図を示す。

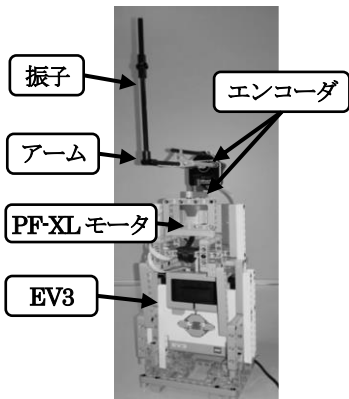


Fig.1 回転型倒立振子

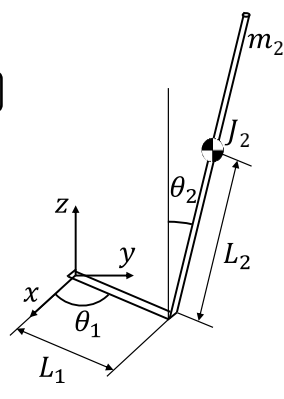


Fig.2 モデル図

式(1)には、モデル図から導出された運動方程式を示す。さらに式(2)は導出された状態方程式である。

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_1(t) = -a\dot{\theta}_1(t) + bu(t) \\ m_2 L_1 L_2 \ddot{\theta}_1(t) + J_2 + m_2 L_2^2 \ddot{\theta}_2(t) - m_2 g L_2 \theta_2(t) + c_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_e(t) = A_e x_e(t) + B_e u(t) \\ y = C_e x_e(t) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、

$$A_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -a & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_2 g L_2}{J_2 + m_2 L_2^2} & \frac{m_2 L_1 L_2 a}{J_2 + m_2 L_2^2} & -\frac{c_2}{J_2 + m_2 L_2^2} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \\ -\frac{m_2 L_1 L_2 b}{J_2 + m_2 L_2^2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_e = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$x_e(t) = [\theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \dot{\theta}_1(t) \ \dot{\theta}_2(t) \ \int_0^t \theta_r - \theta_1(t)]^T$$

a, b : モータの諸特性パラメータ,

θ_1 : アームの角度, θ_2 : 振子の角度, θ_r : アームの目標角度,

J_2 : 振子の重心周りのモーメント, c_2 : 振子の粘性摩擦係数

本研究の目的は、アームが任意の位置で振子を倒立させることが目的であるため、制御則に最適ロバストサーボ制御理論を用い、コントローラを設計した。この場合の評価関数は式(3)に与えられる。

$$J_e = \int_0^\infty \{x_e^T(t) Q_e x_e(t) + R_e u(t)^2\} dt \quad (3)$$

ただし、 Q_e, R_e : 重み関数

この制御則を満たす制御入力は次式で与えられる。

$$u = K_1 x(t) - K_1 x(0) - K_2 \int_0^t e(t) dt$$

図 3 に制御則を組み込んだシステムのブロック線図を示す。

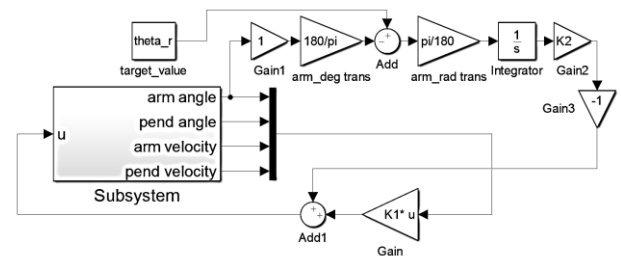


Fig.3 システムのブロック線図

3. 安定化倒立制御実験

本研究では 1 例としてアームの目標角度を $\theta_r = 40[\text{deg}]$ とした。その場合重みを以下のように設計した。

$$Q_e = [1 \ 1000 \ 0.01 \ 0.01 \ 100] \quad R_e = 50$$

アーム角度の時間応答、振子角度の時間応答の結果を図 4 を示す。なお、5 秒後に制御を開始させている。

図 4 から分かるように、アーム角度は 10 秒付近から目標角度付近に落ち着き始め、振子は $180[\text{deg}]$ を維持しており、安定した倒立が行えている事が分かる。これらの結果から、EV3 を用いた回転型倒立振子に対し、最適ロバストサーボ制御を適用できることが確かめられた。

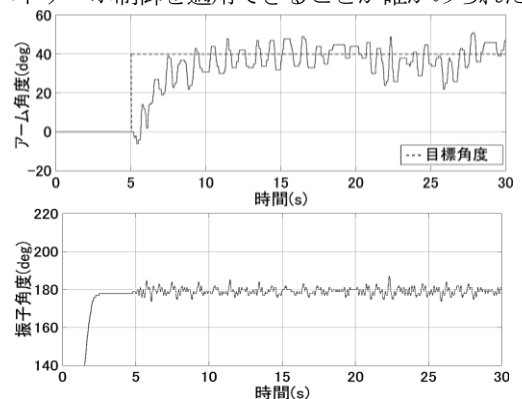


Fig.4 アームと振子の角度の時間応答