

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

生産システム工学専攻 小松 晃大

1. 緒言

倒立制御は制御理論の応用の検証のために、よく用いられている。一般に制御対象を駆動させるための入出力装置、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である Arduino や Raspberry Pi, LEGO Mindstorms が出現し、制御系設計ソフトの MATLAB/Simulink を扱えるようになった。そのため、これらのハードウェアを用いることで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、回転型倒立振子装置を製作し、アーム角度の変動を抑制するために制御則に最適ロバストサーボ制御理論を適用させ、振子の安定化制御の検証実験を行った。

2. 研究方法

LEGO を用いて回転型倒立振子を製作し、モデル化するために運動方程式を導出した。その後、MATLAB/Simulink を用いてコントローラを設計し、振子の倒立実験を行った。実験ではアームを任意の角度に維持し、振子を安定して鉛直に倒立させることを目的としている。製作した回転型倒立振子装置を Fig. 1 に示す。線形化した運動方程式を式(1)に、状態方程式を式(2)に示す。

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

θ_1 : アームの角度, θ_2 : 振子の角度, L_1 : アームの長さ, L_2 : 振子の重心までの長さ, m_2 : 振子の質量, 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, g : 重力加速度

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

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

制御則に最適ロバストサーボ制御理論を用いて設計するため、次の評価関数を定義する。

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

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

Q_e : 状態量に掛かる重み関数, R_e : 操作量に掛かる重み関数,

K_1, K_2 : フィードバックゲイン

次に、最適ロバストサーボ則を用いて、アームの目標角度を $\theta_r = 40[\text{deg}]$ とし、重み関数を以下のように設計した。Fig. 2 に本実験のブロック線図を示す。

$Q_e = \text{diag}[1.00 \ 1000 \ 0.01 \ 0.01 \ 100]$, $R_e = 50$

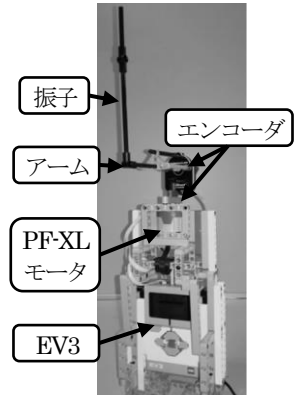


Fig. 1 回転型倒立振子装置

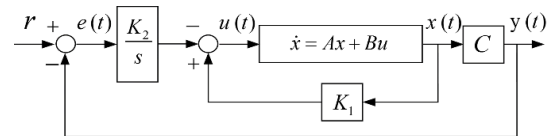


Fig. 2 最適ロバストサーボシステム

3. 研究結果

倒立実験におけるアーム角度の時間応答の結果を Fig. 3 に、振子角度の時間応答の結果を Fig. 4 に示す。なお、5 秒後に制御を開始させており、振子角度は振子が真下で静止している状態を $0[\text{deg}]$ としている。Fig. 3 からアーム角度は 10 秒付近から目標角度である $40[\text{deg}]$ に落ち着き始め、Fig. 4 から振子角度は鉛直状態である $180[\text{deg}]$ を維持しており、安定した倒立が行えていることが分かる。これらの結果から、EV3 を用いた回転型倒立振子の安定化制御に対し、最適ロバストサーボ制御が有効であることが確かめられた。

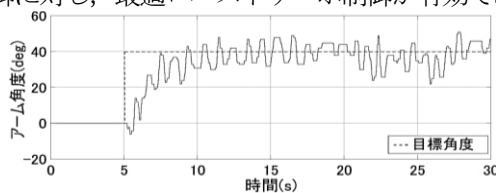


Fig. 3 アーム角度の時間応答

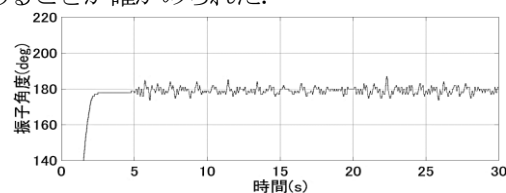


Fig. 4 振り子角度の時間応答