

LEGO MINDSTORMS EV3 を用いた 二輪駆動型倒立振子とその制御

2013SE133 中村拓登

指導教員：大石泰章

1 はじめに

LEGO MINDSTORMS EV3 (以下, EV3) は LEGO 社と MIT が共同開発した教育用玩具の最新機種であり, 2013 年に発売された. EV3 は Bluetooth 機能を備え, Linux ベースのオープンソースのソフトウェアを利用して制御を行う. 一世代前の機種である LEGO MINDSTORMS NXT (以下, NXT) と比べると, 基本的な機能に加えて出力ポートが 1 つ増え, microSD カードスロットが搭載された. また, LEGO 社独自のソフトウェアからオープンソースのソフトウェアに変わったため制御がより自由になった.

本研究ではこうした新しい機能を利用し, システム創成工学実習で利用した二輪駆動型倒立振子 [1] を NXT ではなく EV3 を利用して作成する. 具体的には, microSD カードからプログラムを読み込ませ, C 言語によって EV3 を制御する. また, EV3 を使った倒立振子のモデル化を行い, パラメータ同定を行うことで各種パラメータの数値を求める.

2 作成した倒立振子

EV3 を用いて作成した二輪駆動型倒立振子を図 1 に示す.

床と接地しているタイヤに接続されている 2 つのサーボモータを駆動することによって車体の倒立を行う. マイクロコンピュータの背面に搭載されたジャイロセンサで車体の傾きの測定を行い, タイヤのセンサによりタイヤの回転角度の測定を行う.

マイクロコンピュータでは C 言語が実行可能である [2]. 用いる開発プラットフォームは TOPPERS/EV3RT [3] である. センサから読み取ったデータは Bluetooth 通信によって PC に転送される.



図 1 EV3 を利用して作成した二輪駆動型倒立振子

3 モデル化

倒立振子の概要図を図 2 に示す. 入力は電圧 $u(t)$, 左右のタイヤの回転角度は等しいとしてこれを $\psi(t)$, 車体の角度を $\theta(t)$ とする. $\psi(t)$, $\theta(t)$ の微分はタイヤの回転速度と車体の角速度である. 倒立振子の車体の目標角度は $\theta(t) = 0$ である. それを実現するために電圧 $u(t)$ を入力してモータを駆動する. 物理パラメータを表 1 に示す.

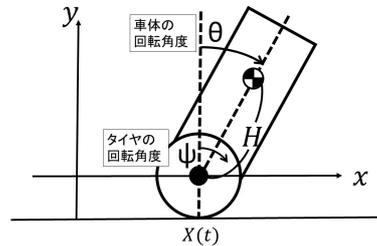


図 2 概要図

表 1 二輪駆動型倒立振子の物理パラメータ

車体の質量	M	$8.15 \times 10^{-1} [\text{kg}]$
重力加速度	g	$9.81 [\text{m/s}^2]$
タイヤの半径	r	$2.80 \times 10^{-2} [\text{m}]$
タイヤの中心から車体の重心までの距離	H	未知
車体とタイヤの間の慣性モーメント	J	未知
モータの粘性摩擦定数	η	未知
未知パラメータ 1	ζ	未知
未知パラメータ 2	ξ	未知

ラグランジュの運動方程式に基づいて, 状態変数を $x(t) = [\theta(t) \psi(t) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t)]^T$ とし, 状態空間表現

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

で表す. 式 (1) の A, B を次のように定める:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{MgH}{MH^2+J} & 0 & -\frac{\eta}{MH^2+J} & \frac{MrH}{\zeta(MH^2+J)} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\zeta} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\xi MrH}{\zeta(MH^2+J)} \\ \frac{\xi}{\zeta} \end{bmatrix}.$$

4 パラメータ同定

4.1 車体の動特性

車体の動特性を求めるため, 倒立振子の車輪を固定し, 振子を吊り下げた状態で自由運動をさせた. 自由運動の運

動方程式 $(J + MH^2)\ddot{\theta}(t) + \eta\dot{\theta}(t) + MgH \sin \theta(t) = 0$ を線形化する。

実験で得られたモータの角速度 $\dot{\theta}(t)$ の時間変化を図3に示す。また、 $H = 19.6 \times 10^{-2}[\text{m}]$, $\eta = 9.41 \times 10^{-2}[\text{Nms}]$ としたときのシミュレーション結果を同じ図3に示す。実験結果にほぼ重なるのでこれを H , η の値とする。

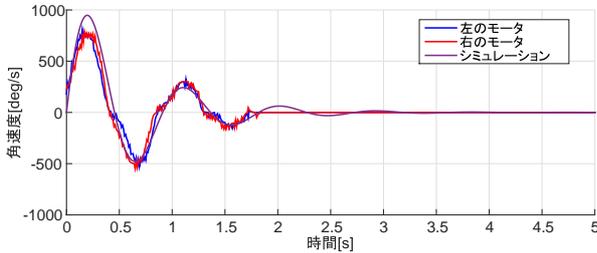


図3 振子の零入力応答とシミュレーションの比較

4.2 モータの動特性

モータの動特性を調べるため、倒立振子に補助輪をつけて立たせ、静止した状態からデューティ比 50% のステップ入力 $u(t)$ を加えた。このときのタイヤの回転角速度 $\dot{\psi}(t)$ の変化を図4に示す。入力 $u(t)$ とタイヤの回転角速度 $\dot{\psi}(t)$ の関係を 1 次遅れ系

$$\dot{\psi}(s) = \frac{\xi}{\zeta s + 1} u(s) \quad (2)$$

で表すことにする。 $\zeta = 9.10 \times 10^{-2}$, $\xi = 130$ としたときのシミュレーション結果を同じ図4に示す。実験結果とほぼ重なることから、これらの値を ζ , ξ の値として使うことにする。

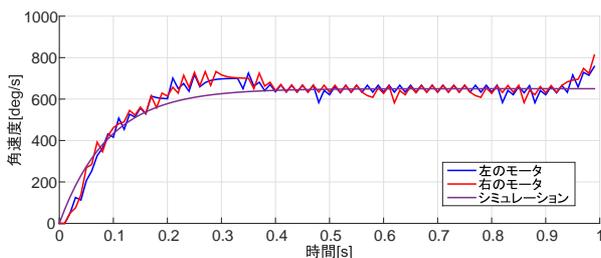


図4 タイヤの回転角速度 $\dot{\psi}(t)$ のステップ応答とシミュレーションの比較

5 最適レギュレータ

最適レギュレータを設計して倒立振子の制御を行う。重み行列 Q , R を次のように設計する：

$$Q = \text{diag}[85, 5.0, 0.1, 0.1], R = 40.$$

このとき、状態フィードバックゲインとして、

$$K = [15.0028 \ 0.3536 \ 1.7082 \ 0.1875]$$

が得られる。このゲイン K を用いてシミュレーションと実験を行い、タイヤの回転角度を図5、車体の角速度を図6に示す。図5から分かるように、左右のタイヤの回転角度 $\psi(t)$ が大きくなり倒立振子は前進してしまっている。試行のたびに振る舞いが異なるので、測定雑音による影響だと考えられる。一方、図6から車体の角速度 $\dot{\theta}(t)$ が零付近に留まっており、安定していることが分かる。

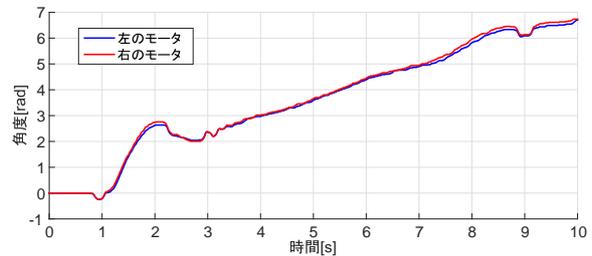


図5 タイヤの回転角度

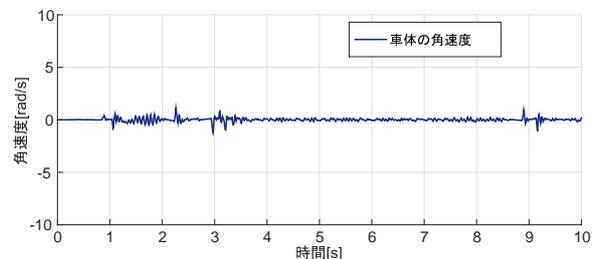


図6 車体の角速度

6 おわりに

EV3の未知パラメータを導き、現代制御を用いた制御に成功した。ただし、タイヤの回転角度 $\psi(t)$ は零に収束せず振子は前進してしまっただけ。このことから、外乱による影響や考慮すべき力の働き等があると考えられる。サーボ系の導入や、より良いモデルの作成が必要だと考えられる。

参考文献

- [1] 75001-001 2015 年度システム創成工学実習 1(ロボット制御実験)
<http://www-p.seto.nanzan-u.ac.jp/classes/ise/2015/75001/chen/robot2015r1.pdf>
- [2] 株式会社アフレル:『教育版 EV3 C言語プログラミングガイド 改訂版』株式会社アフレル, 2015.
- [3] TOPPERS/EV3RT
http://dev.toppers.jp/trac_user/ev3pf/wiki/WhatsEV3RT
- [4] 井上和夫, 川田昌克, 西岡勝博:『Matlab/Simulink によるわかりやすい制御工学』森北出版, 2014.
- [5] 川田昌克:『Matlab/Simulink と実機で学ぶ制御工学』Techshare, 2013.