

# 6 軸センサを用いた並行二輪型倒立振子の作成と制御 —モーションキャプチャによるモデル化と最適制御器の付加—

2014SC018 飯島淳

指導教員：大石泰章

## 1 はじめに

倒立振子は容易に実験が行える不安定な制御対象であり、倒立振子の姿勢制御は制御理論の有効性を実証する実験例として数多くの報告がなされている。このなかには、二足歩行ロボットなどへの応用を目的とした多重倒立振子などがあり、制御理論の発展のみならず不安定な工学的対象の実用化に寄与してきている [1, 2].

本研究では、並行二輪型倒立振子を自作し、6 軸センサにより車体の角度を測定し、PD 制御により倒立させる。また、制御性能を向上させるため、モーションキャプチャを使って閉ループ系のモデル化を行い、最適制御器を追加することを考える。

## 2 製作した倒立振子

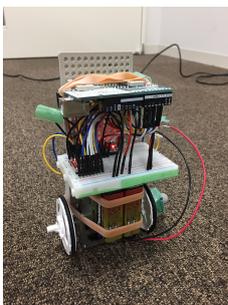


図 1 製作した倒立振子

並行二輪型倒立振子を文献 [3] に基づいて製作する。その概観を図 1 に示す。制御部にはマイクロコンピュータ「Arduino UNO」を用い（以下、Arduino と表記する）、その他の部品として、TAMIYA のユニバーサルプレート、タイヤ、DC モータに加え、ジャンパワイヤ、ブレッドボードを使用している。文献 [3] とは違い、加速度センサの代わりに 6 軸センサ「GY521」(MPU6050) を使用し、モータドライバをデュアルモータドライバ「TB6612FNG」に変更した。変更の理由は、センサ数を増加させてより多くの姿勢情報を得たかったから、そして、2 つのモータを独立に操作して性能を向上させたかったからである。また、どちらも参考となる文献やサポートプログラムがあり、利用しやすいことも理由である。このデュアルモータドライバは、車輪が接続されたモータを 2 つ独立に正転、逆転、ブレーキ、空転をさせることができ、さらに、PWM 制御で回転速度を調整できる。

6 軸センサ GY521 は、3 軸加速度計、3 軸ジャイロセンサを内蔵しており、本研究では倒立振子の車体の角度を計測するため、加速度計の測定範囲は  $\pm 2g$ 、ジャイロの

測定範囲は  $\pm 250\text{deg/s}$  として使用する。3 軸加速度計では重力加速度を測定することで振子の角度を計算する。しかし、加速度計は重力以外の加速度が加わると正しく測定ができないため、3 軸ジャイロセンサで測定した角速度を使って修正していく。修正には、カルマンフィルタを用いてオフセットやドリフトの影響の少ない適正な振子の角度を求める [4].

## 3 PD 制御を用いた倒立

測定した振子の角度に基づき、振子を PD 制御により倒立させる。モータへの入力を  $u(t)$  ( $-255 \sim 255$ ) とし、倒立した状態を基準にした振子の角度を  $\theta(t)$ 、この時間微分を振子の角速度とする。車体の目標角度は  $\theta(t)=0$  である。目標角度に安定化するためにゲインを  $K_p$ 、 $K_d$  とし、次の制御によって入力を定める：

$$u(t) = K_p\theta(t) + K_d\dot{\theta}(t). \quad (1)$$

試行錯誤により  $K_p=30$ 、 $K_d=0.1$  に設定したとき倒立に成功した。

## 4 最適制御器の追加による制御性能の向上

制御性能を向上させるため、図 2 のように制御器を追加することを考える。PD 制御によって倒立した振子の動特性をモーションキャプチャを使ってモデル化し、得られたモデルに対して最適制御器を設計してこれを追加する。また、運動方程式を使ってモデル化をしないのは、未知のパラメータを多く含んだ複雑な式を 6 軸センサのみで同定するのは困難であったためである。

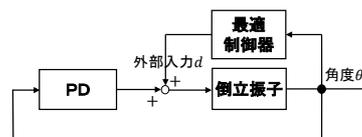


図 2 制御器を追加したシステムのブロック線図

### 4.1 モーションキャプチャ

モーションキャプチャとは、図 3 のような複数のカメラを用いたシステムで、測定範囲内にある指定したマークを 3 次元の座標軸で読み取り、正確な物体の動きを捉えることができる。図 3 のモーションキャプチャは、フレームレートが毎秒およそ 120 フレーム [5] のため、6 軸センサ並みの正確な角度を測ることができる。今回は、2 つの



図3 モーションキャプチャ Optitrack V120:Trio [5]

マーカの座標から振子の角度を求めることでモータへの入力値に対する出力角度のモデル化を行うことに利用する。

#### 4.2 モデル化の手順

PD 制御によって倒立した振子の動特性をモーションキャプチャを使ってモデル化を行う。振子が倒立した時刻を  $t=0$  とするとき、外部入力  $d(t)$  を  $0 \leq t < 5$  では  $d(t)=0$ ,  $5 \leq t < 5.5$  では  $d(t)=0.24$ ,  $t \geq 5.5$  では再び  $d(t)=0$  とする。ただし、入力の最大値を  $d(t)=1$  としている。得られた出力  $\theta(t)$  のグラフを図4に示す。 $\theta(t)$  がおよそ8度のときに倒立した状態である。入力  $d(t)$  から出力  $\theta(t)$  への動特性から一次遅れ系：

$$\frac{k}{Ts + 1} \quad (2)$$

で表せると仮定し、 $t \geq 5.5$  での出力にあうようにパラメータを調整する。結果を図4に示す。

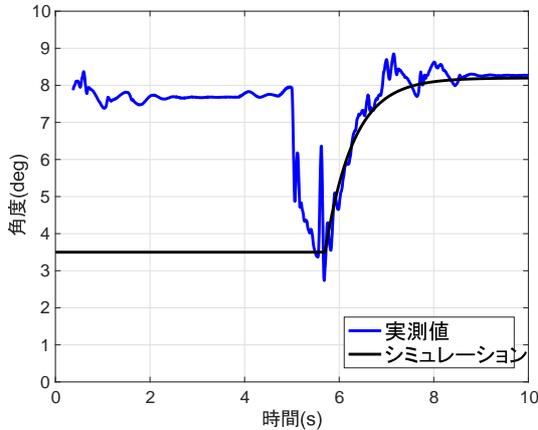


図4 外部入力に対する振子の角度の応答とそれに合わせたモデル化

$k=0.0783$ ,  $T=0.6$  のとき、図4のグラフとなった。

#### 4.3 最適制御器の実装

4.2 節で得たモデルに対して最適制御器を設計し、倒立振子の制御を行う。重み変数  $Q$ ,  $R$  を

$$Q = 40, R = 1 \quad (3)$$

とすると、状態フィードバックゲインとして

$$K = 1.4808 \quad (4)$$

が得られる。このゲイン  $K$  を用いて、次のように入力を定める：

$$d(t) = K\theta(t). \quad (5)$$

これらを用いてシミュレーションを行う。また、得られたゲインを導入して実験を行い、倒立振子の動きをモーションキャプチャで取得する。図5にシミュレーションと実測値の倒立振子の傾きを示す。図5より、角度が一定値に収

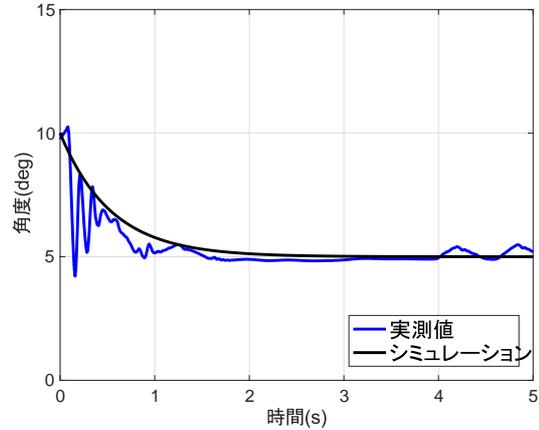


図5 LQR のシミュレーションと最適制御器導入後の振子の傾き

束しているため倒立振子が安定していることがわかる。また、実測値はシミュレーションと同じような応答になっている。ただ、実測値の細かい振動が表せておらず、これはモデル化が不十分なためだと考えられる。

#### 5 おわりに

自作の倒立振子を作成し PD 制御による倒立は成功した。また、モーションキャプチャ、現代制御を用いた倒立の安定化にも成功した。ただし、モデル化が不十分なためか、完全な制御はできなかった。このことから、モデル化の見直しや新たなセンサ（エンコーダ）の追加が必要だと考えられる。

#### 参考文献

- [1] 坂元, 堀江, 吉田, 宮崎: ジャイロを用いた倒立振子の制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 5, pp. 597-599, 1994
- [2] 下山, 小谷, 平田: 車輪型倒立振子ロボットの適応安定化制御, 東海大学紀要電子情報学部, Vol. 12, No. 2, pp. 9-15, 2012
- [3] <http://www.instructables.com/id/Another-Easier-Inverted-Pendulum-in-Japanese/>
- [4] [blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it/](http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it/)
- [5] <http://www.optitrack.com/products/v120-trio/>