

二輪倒立振り子ロボットの制御と性能評価

2016SC045 桑原亮太郎

指導教員：大石泰章

1 はじめに

倒立振り子は代表的な制御対象であり、二輪倒立振り子ロボットはその一例である。また、倒立振り子には制御工学の学習を目的とした機材が多く存在し、それらを利用することで、現実の振り子の挙動を確認しながら、制御の方法を工夫することが可能である。

本研究では二輪倒立振り子ロボットである Pololu 社の Balboa 32U4 を製作し、制御によってロボットを倒立させ、倒立しているときに手で触れても、バランスを取り続けられるようにする。また、制御則の改善により、倒立時の振動がどれほど抑制されるか検証する。

2 研究に用いる機材

ロボットは Pololu 社の Balboa 32U4 を使用し、Pololu 社が提供する組み立て図を参考にして製作した [1]。ロボットのコントロールボード ATmega32U4 は Arduino 互換の A-Star32U4 USB ブートローダーにより、Arduino IDE というソフトウェアを使用してプログラミングが可能である。プログラムを書き込む際には、コントロールボードの USB Micro-B コネクタとコンピュータを USB A-Micro-B ケーブルで接続する。

ロボットには二つのマイクロメタルギアモータを使用し、そのモータのシャフト部に取り付けられた磁気ディスクとボードに取り付けられたセンサによって、ロボットの車輪の回転速度と回転角度を検出する。シャフト部の磁気ディスクとセンサを図 1 内の黄色の四角で示す。

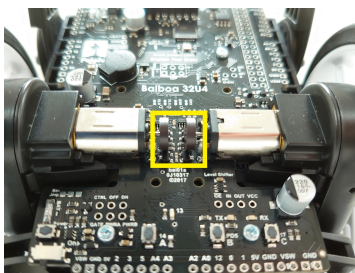


図 1 シャフト部の磁気ディスクとボードのセンサ

加えて、ロボットの基板には 3 軸加速度センサと 3 軸ジャイロセンサを合わせた慣性センサ LSM6DS33 が取り付けられており、基板の加速度および回転速度を検出できる。慣性センサを図 2 内の黄色い四角で示す。

ロボットの動力となるモータは 3 種類存在し、それぞれのモータにギア比が定められている。本研究ではギア比が 50 : 1 のモータと 75 : 1 のモータを使用した二台のロボットそれぞれで制御実験を行う。

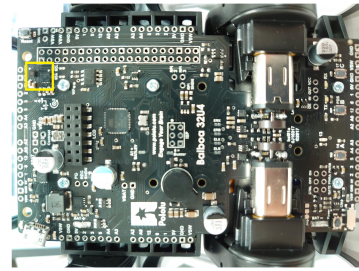


図 2 基板上の慣性センサ LSM6DS33 の位置

3 ロボットを倒立させるための手順

3.1 制御則とゲインの調整

Pololu 社のユーザーズガイドの手順に従い、ロボットが倒立するためのサンプルプログラムを実行し、手で起こしたところ、ギア比 50 : 1 のロボットは倒立したが、ギア比 75 : 1 のロボットは倒立しなかった。その原因は、提供されているサンプルプログラムはギア比が 50 : 1 のモータを使用した場合に適するものであったため、ギア比 75 : 1 のロボットのみが倒立しなかったと考えられた。

そこで、サンプルプログラムを参考にしてロボットの制御則を考えることにした。

ロボットを車輪に垂直な方向から見たときの簡略図を図 3 に示す。

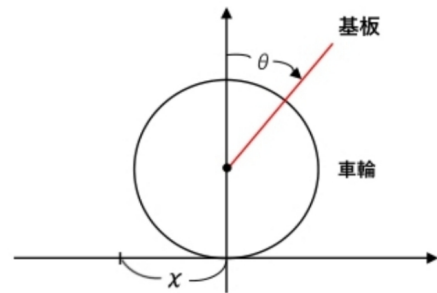


図 3 ロボットを車輪に垂直な方向から見たときの簡略図

鉛直方向を基準とする基板の角度を θ 、基準の位置からの車輪の位置の変化を x 、モータへの入力を u とするとき、サンプルプログラムに実装されたロボットの制御則は次の通りである：

$$u = K_1\theta + K_2x + K_3\dot{x}. \quad (1)$$

これは、基準の位置からの車輪の位置の変化に対しては比例ゲイン K_2 と微分ゲイン K_3 を用いた PD 制御であり、さらに基板の角度 θ に対しては比例ゲイン K_1 を用いた P 制御である。

式 (1) に含まれるゲイン K_1, K_2, K_3 の値を実験しながら変更した結果、ギア比 75 : 1 のロボットも倒立した。

倒立後も、それぞれのロボットの振動が抑制されるようにゲイン K_1, K_2, K_3 の変更を行った。サンプルプログラムが当初用いていた初期値と、変更によって得られた最終的な値を、表 1, 2 に示す。

表 1 ギア比 75:1 のモータを用いたロボット

ゲイン	初期値	最終値
K_1	0.0035	0.0042
K_2	0.0235	0.0242
K_3	1.0645	1.0323

表 2 ギア比 50:1 のモータを用いたロボット

ゲイン	初期値	最終値
K_1	0.0010	0.0019
K_2	0.0066	0.0041
K_3	0.2973	0.3153

振動が抑制されているか検証するために、ジャイロセンサで測定した基板角速度の時間変化を図 4 に示す。青線がゲイン変更前のグラフで、緑線がゲイン変更後のグラフである。

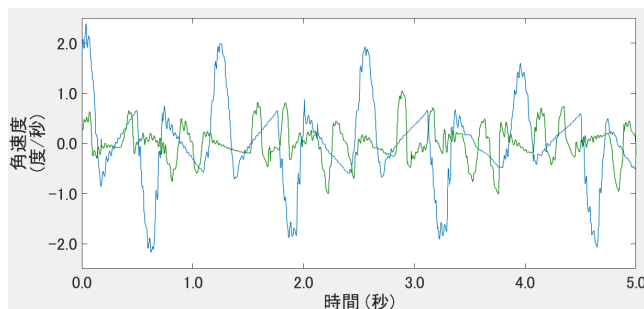


図 4 ギア比 50 : 1 モータを用いたロボットの場合のゲイン変更前後における基板角速度の時間変化

振動の抑制具合を確認するため、ここで基板角速度の平均二乗誤差の平方根を計算したところ、ゲイン変更前の値は 0.590、ゲイン変更後の値は 0.340 となった。このことから、振動抑制性能が上がったとわかる。また、ギア比 75 : 1 モータを用いたロボットでも同様の結果が得られた。

3.2 角速度を用いた制御則の改善

ロボットの制御則である式 (1) に基板角速度 $\dot{\theta}$ の項を追加して制御を行った場合、ロボットの振動がどれほど抑制されるのかを検証した。角速度を用いた制御則を次に示す：

$$u = K_1\theta + K_4\dot{\theta} + K_2x + K_3\dot{x}. \quad (2)$$

式 (2) 中のゲイン K_4 は実験により、ギア比 75 : 1 の

ロボットでは 0.161 とし、ギア比 50 : 1 のロボットでは 0.045 とした。

制御則に角速度を追加した場合に、振動がどれほど抑制されているかを見るために、基板角速度の時間変化を図 5 に示す。

緑線が角速度導入前のグラフで、赤線が角速度導入後のグラフである。

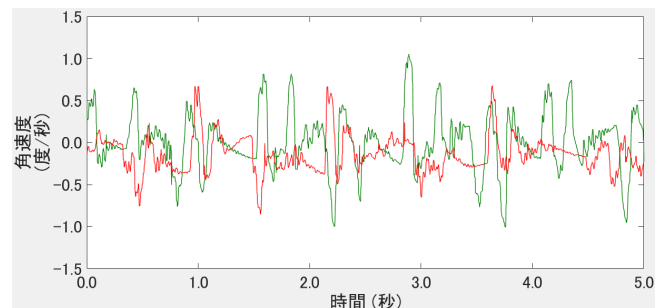


図 5 ギア比 50:1 のモータを用いたロボットの場合の角速度導入前後における基板角速度の時間変化

振動の抑制具合を確認するため、ここで基板角速度の平均二乗誤差の平方根を計算したところ、角速度導入前の値は 0.340、角速度導入後の値は 0.220 となった。このことから、振動抑制性能が上がったとわかる。また、ギア比 75 : 1 モータを用いたロボットでも同様の結果が得られた。

4 おわりに

本研究では、二輪倒立振り子ロボットを組み立て、制御実験にもとづくゲインの調整によって、二台のロボットを倒立させることに成功した。ロボットが倒立している状態のときに手で触れても、バランスをとり続けることにも成功した。

また、ジャイロセンサの出力値を抽出することができたため、制御の改善具合をグラフで確認することができた。今後の課題として、ロボットをモデル化し、モデルに基づいてゲインを定めることで、どれほど制御の精度を向上させられるかを検証することが挙げられる。

参考文献

- [1] Pololu Balboa 32U4 Balancing Robot User's Guide: <https://www.pololu.com/docs/0J70>
- [2] GitHub-pololu/balboa-32u4-arduino-library: <https://github.com/pololu/balboa-32u4-arduino-library/blob/master/examples/Balancer>
- [3] ARDUINO チュートリアル: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Foundations>
- [4] Qiita Arduino で倒立振り子ロボット Balboa 32U4 を制御する (1): <https://qiita.com/norihito-sg/items/d07de4f37bedf91a4389>