

# 車輪型倒立振子教材による実験導入の検討

青木 悠祐\* 杉山 隆介\* 戸塚 拓伸\* 脇坂 久\* 佐藤 康平† 片山 晃次郎\* 金子 裕哉\*  
鈴木 秀\* ムハマド イッサト ビン モハマド イドロス\* 舟田 敏雄\*

\*沼津工業高等専門学校 電子制御工学科

†沼津工業高等専門学校 制御情報工学科

本発表では、学生実験においてロボットをテーマとした実験を考えた際に必要となる要素、すなわちメカ、回路、ソフト、理論の総合的な習得を目的とした実験テーマの立ち上げに関する検討について述べる。題材として扱ったのは車輪型倒立振子であり、今回は特にマイコンによるハードウェアの制御と現代制御理論による姿勢制御に的を絞り、実機による実験を通じて制御パラメータが与える影響を考察したので報告する。

Keywords: 車輪型倒立振子, PID 制御, 工学実験, ロボット教育

## 1 はじめに

沼津高専電子制御工学科は機械、電気・電子、制御、情報の融合学科である特色を活かし、4年次に開講される小型自律移動ロボット (Micro Intelligent Robot System: MIRS)<sup>[1]</sup> の設計・製作をエンジニアリングデザイン教育の中核科目として実施している。そのため、MIRS 開発に向けた導入教育として、1年次における LEGO によるロボット製作実験や2年次における PIC による I/O 制御<sup>[2]</sup>等、体系的に学習するカリキュラムを構築してきた。しかし、4年次以降の高学年科目として開講している制御工学やシステム制御工学、ロボット制御工学を学習するに先駆けて、3年次の工学実験においてロボット制御、特に実機とシミュレーション、理論値と実測値を比較・検討することを通じて制御の本質を学習する実験テーマ開設の必要性も感じていた。一方、昨今制御工学の学習を目的としたメカトロニクス教材が多く開発・販売されており、その代表に倒立振子があることが知られている。倒立振子に関する研究は現在も数多くの研究機関で進められている分野でもある<sup>[3]</sup>。そこで本論文では、車輪型倒立振子教材を用いて、倒立振子の原理及び「倒れないように制御する」「同じ場所で止まり続ける」ための制御パラメータ設定に関する実験テーマを構築したので報告する。

## 2 車輪型倒立振子について

本研究では、Fig.1 に示す Beauto Balancer Duo (ヴイストーン株式会社)<sup>[4]</sup>を用いて実験を行う。この教材は基礎的な現代制御理論の学習を目的に開発・販売されており、授業において学生1人に教材1つを割り当てられることに大きな意義があると考え、安価

な教材を目標とした点をはじめ、以下のような特徴がある。

- 前後、旋回自在な移動が可能 (左右のモータが独立)
- 無線コントロール・ライントレース可能

無線コントロールおよびライントレースはオプションが必要となるが、倒立振子としてだけでなく、発展したロボット教育も可能である。倒立振子の制御法としては、ジャイロセンサとロータリエンコーダの2つのセンサの入力値を用いており、センサ情報に対してPID制御を行うことでモータの出力値を調整し、不安定な倒立振子を安定して立たせている。



サイズ	52mm×91mm×128mm
重量	約172g
モータ構成	専用モータ ×2
搭載センサ	センサジャイロセンサ×1、エンコーダ×1
CPUボード仕様	・H8/36064G・アナログ入力6ch取得可能 ・LED×1搭載 ・USB接続 ・基板単体でのプログラミング可能
制御方法	・ゲイン調整用ソフトウェア ・C言語開発環境「HEW」「FDT」を利用可能
電源	単3アルカリ乾電池2本(別売)
販売価格	¥12,600(税込)

Fig.1 Beauto Balancer Duo

## 3 制御パラメータ設定による倒立振子の安定化実験

### 3.1 倒立振子のPID制御

本来であればモデリングを行い、運動方程式を立てた上で安定化のための状態方程式を導くべきであるが、3年次における工学実験として導入を考えた際、まずは目で見て、触って、試行錯誤の上でロボットを動かすことが第一歩であると考え、そこで本

実験では理論 実験の順ではなく、実験 理論の流れで車輪型倒立振子を理解することとし、モデリングについては次の実験テーマとして今後の展望とする。そのため、実験では(3.1)式に示す左右のモータ出力に対するPID制御<sup>[5]</sup>のみをまずは理解することを目指す。

$$u(t) = K_{PE}l(t) + K_{DE} \frac{dl(t)}{d(t)} + K_{PG}\theta(t) + K_{DG} \frac{d\theta(t)}{d(t)} + K_{IG} \int_0^t \theta(\tau)d(\tau) \quad (3.1)$$

ここで、 $u(t)$  はモータ出力、 $l(t)$  はエンコーダから取得される車輪の移動距離、 $\theta(t)$  はジャイロセンサにより取得される倒立振子の角度、 $K_{PE}, K_{DE}$  はエンコーダに対する比例、微分ゲイン、 $K_{PG}, K_{DG}, K_{IG}$  はジャイロセンサに対する比例、微分、積分ゲインである。すなわち、Balancer Duo は5つのPIDゲインを調整することで「倒れないように制御する」「同じ場所で止まり続ける」を実現していることになり、エンコーダゲイン、ジャイロゲインのどちらをより重視するかには個人差が生じるといえる。その点をいかに決定するかが制御工学の本質であるだけでなく、このように複数のセンサを用いたロボット制御は一般的であるため、この実験を通して複数のセンサに対するPIDゲインを設定する手法を学ぶことは今後のロボット開発に対して有用であるといえる。

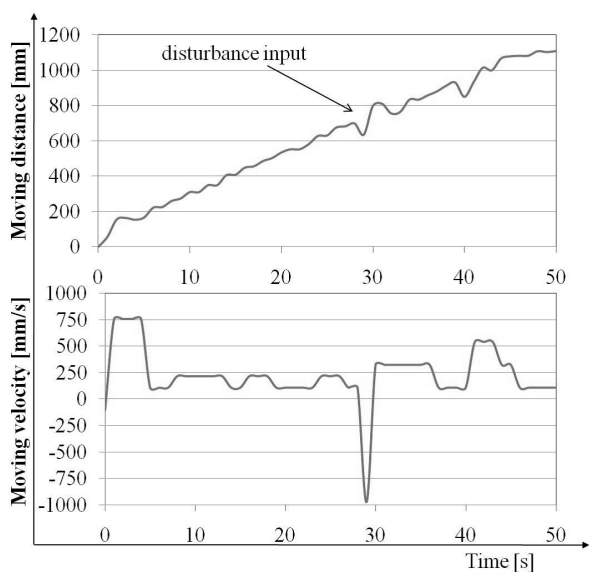


Fig.2 エンコーダによる測定データ

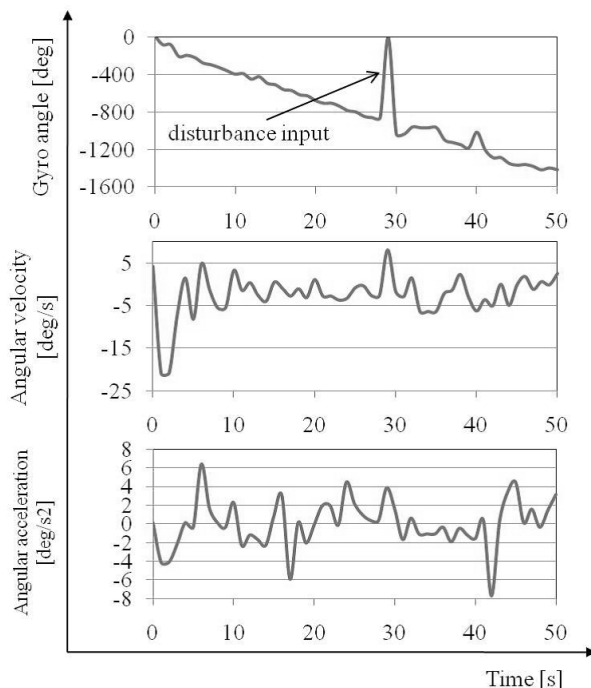


Fig.3 ジャイロセンサによる測定データ

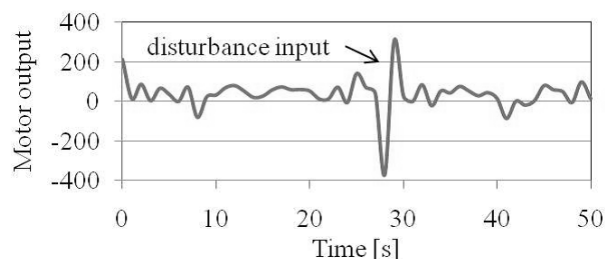


Fig.4 初期パラメータによるモータ出力結果

### 3.2 初期パラメータによるセンサ出力の計測

PIDゲインを調整するにあたり、出荷時に設定されたパラメータを用いて動作実験を行った。Beuto Balancer Duoからは出力としてジャイロセンサの角度・角速度・角加速度、左右のロータリエンコーダそれぞれから、移動距離・速度角度・角速度、左右モータへの出力の全9つの値を測定することができる。そこで、倒立振子を50[s]駆動させた際の各出力結果をFig.2,3,4に示す。今回は左右のモータは同様の傾向を示したため、左のモータのエンコーダ出力およびモータ出力を示す。なお、初期状態では、各ゲインパラメータは $K_{PE} = 0.4$ 、 $K_{IE} = 2.8$ 、 $K_{PG} = 10.0$ 、 $K_{IG} = 2.2$ 、 $K_{DG} = 5.0$ に設定されている。Fig.2より、エンコーダより計算される移動距離が時間とともに増加していることが見られる。それに対して移動速度は一定値を保持しようと制御されている結果をみると、倒立振子は倒れることなく制御できてい

るものの、一定方向に動き続けていることが考察される。Fig.3におけるジャイロセンサからも同様の結果が見られており、角度のグラフより外乱に対しては収束するようにバランスを保っているものの、角速度は0付近ではなく、平均-3[deg/s]と倒立振り子が常に傾いた状態になっていることを示している。この原因として考えられるのは、Balancer Duoを組み立てた際に取り付けたパーツ、はんだ付け、オプションパーツによって、重心の位置がメーカー側が計算した位置とずれたことにより初期出荷時のパラメータと実際のパラメータにずれが生じたことが挙げられる。そこで、この結果を踏まえ、倒立振子を静止させるために制御パラメータをどのように決定したら良いか、各パラメータが制御にどのような影響を与えているかの考察を目的に、学生に協力を仰ぎ実験を行った。

#### 4 PID パラメータ設定実験

今回は3名の学生に対して、前述の初期パラメータの不具合を説明し、さらに(3.1)式の解説および各パラメータが与える影響をレクチャーした上で、PIDパラメータ設定実験を行った。実験条件として以下の2つを与えた際の、各個人が決定したパラメータをTable 1に示す。

1. 「倒れないように制御する」だけでなく「同じ場所で止まり続ける」ようにパラメータ設定をすること
2. エンコーダゲインのみを変更する場合と、ジャイロゲインのみを変更する場合で設定を行うこと

PID制御のパラメータ決定法としてはステップ応答法<sup>[6]</sup>や限界感度法<sup>[7]</sup>が一般的であるが、本実験では学生自身にパラメータを見つけてもらいたいこと、また理論ではなく、実験を通じて様々なパラメータを試しながら決定してもらいたいことから試行錯誤法とした。

Table 1 制御パラメータ決定実験結果

	$K_{PD}$	$K_{ID}$	$K_{PG}$	$K_{IG}$	$K_{DG}$
Control	2.8	0.4	10	2.2	5
Subject 1	2.8	0.4	4.7	5.5	10
	43	0.37	10	2.2	5
Subject 2	2.8	0.4	7.7	1.8	6
	3.63	0.51	10	2.2	5
Subject 3	2.8	0.4	8	8	8
	3.5	0.5	10	2.2	5

この結果、パラメータに個人差がかなり見られた。学生には他の人の結果を知らせず、また安定化の条件等は一切提示せずに行ったが、いずれの設定したパラメータにおいても倒立振子を駆動させた際、移動量が抑えられている、外乱を与えた際に収束時間が早いというように初期パラメータに比べて大きく改善する結果となった。代表例として、エンコーダゲインを変更した場合の移動量、およびジャイロゲインを変更した場合の角度の結果をFig.5,6に示す。

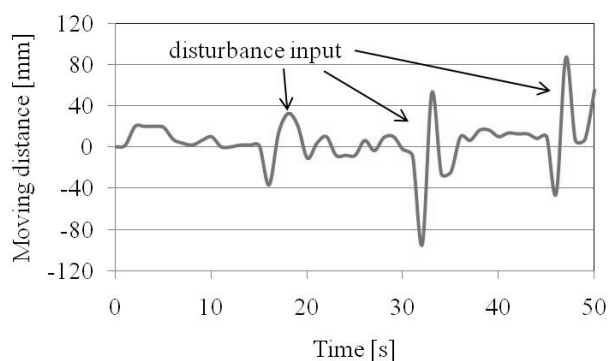


Fig.5 パラメータ決定による倒立振り子移動距離(例)

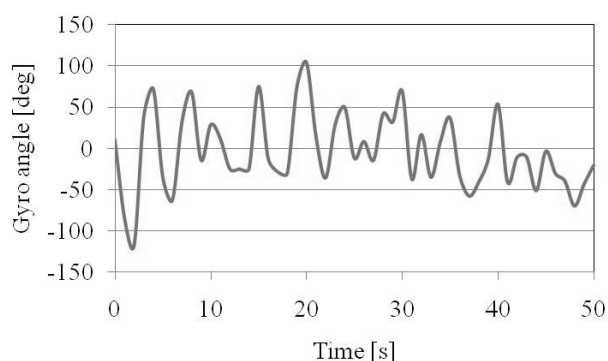


Fig.6 パラメータ決定による倒立振り子傾き角度(例)

初期パラメータによる実験結果とは異なり、エンコーダの移動距離、ジャイロセンサの角度ともに0[mm]/0[deg]付近を振動していることから、倒立振子は原点付近で静止しようとしていることがわかる。その後、3人の学生に各々のパラメータによる駆動実験結果を確認してもらったところ、Subject2のジャイロゲインを変更したものを最適と判断したため、その出力を測定し、再度比較した。測定結果をFig.7,8,9に示す。その結果、初期パラメータ時には倒立振子が静止せず動き続けてしまっていたのに対して、最適パラメータではその場に静止し続けているだけでなく、外乱も強い制御となっていることを確認した。しかし、移動距離、角度を除いた結果については、初期パラメータによるものと、最適パラメータによる



ものとでグラフを比較してみても、その結果からは静止できているか移動してしまっているかを直感的に判断することは容易ではない。この点からも、決定したパラメータの検証を行うには実機による実験だけでなく、シミュレーションによる理論値との比較の必要性が理解されるだろう。この実験経験をもとに、次のステップとしてはモデルから運動方程式を導出し、状態方程式を求めた後、シミュレーションによって最適パラメータを計算し、今回の実機による実験と比較することでさらなる制御工学の知識定着を図れる実験テーマを構築していく。

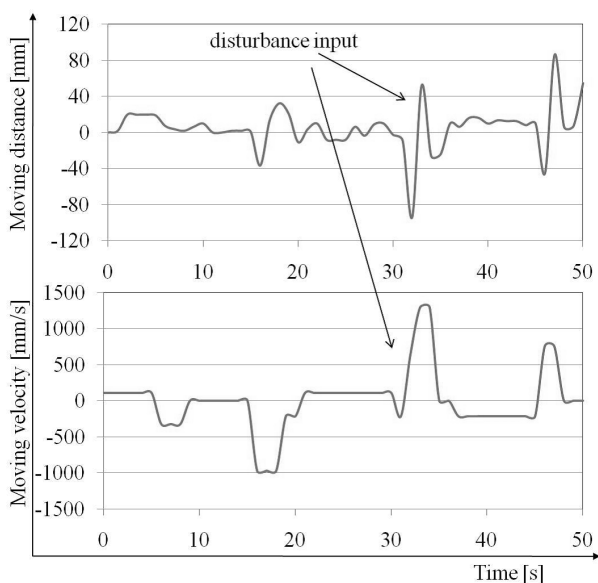


Fig.7 エンコーダによる移動距離，移動速度の計測結果 (Table 1 Subject2 上段)

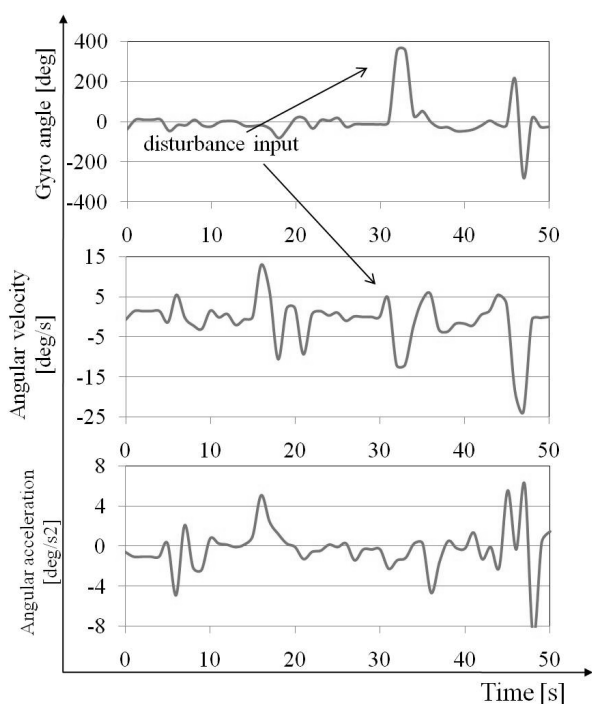


Fig.8 ジャイロセンサによる角度，角速度，角加速度の測定結果 (Table 1 Subject2 上段)

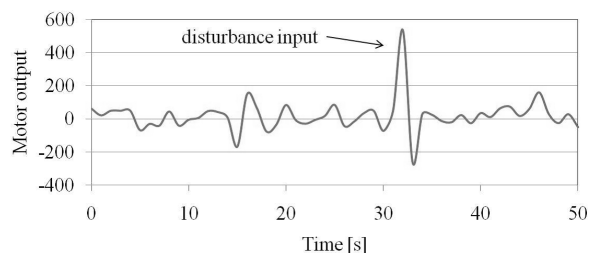


Fig.9 最適パラメータによるモータ出力結果

## 5 おわりに

本論文では、本科3年次における新たな実験テーマとして、制御工学やシステム制御工学、ロボット制御工学の学習に先駆けた車輪型倒立振子を用いた制御パラメータ決定に関する予備実験について述べた。その結果、「倒れないように制御する」「同じ場所で止まり続ける」という単純な目的の基、実機を触りながら制御パラメータを決定する実験は有用であり、学生からも理解度が深まったとの意見を得た。今後は理論によるパラメータ導出と連動して、より意義のある実験テーマ構築を検討し、導入に向けてさらに検証していく予定である。

本研究並びに関連研究遂行にあたり、本校の校長リーダーシップ経費による支援を受けたことをここに記して、柳下福蔵校長に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] MIRS 開発データベース  
<http://www2.denshi.numazu-ct.ac.jp/mirsdoc2/>
- [2] 大庭 勝久, 青木 悠祐, 中村 玲治: "PIC を活用した低学年導入実験の教材改定" 第30回高等専門学校情報処理教育研究発表会 (2010).
- [3] 落合 恭也, 熊谷 正朗: "玉乗りロボットの段差乗り越えに関する研究" 計測自動制御学会東北支部第254回研究集会 (2009).
- [4] Beauto Balancer Duo  
<http://www.vstone.co.jp/robot/bb-duo/>
- [5] 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 (2002).
- [6] 須田信英: "PID 制御" 朝倉書店 (2002).
- [7] J.G. Ziegler and N.B. Nichols: Process Lags in Automatic-Control Circuits, Trans. ASME, 65, pp.433-444(1943).