

# ロボットコンテストにおける倒立振り子ロボットの自動制御

田中将樹・山添誠隆・西野智路  
保坂真志\*・辻尚史・三浦翔平

Automatic Controlled System of Inverted Pendulum Type Robots for the Robocon Competition

Masaki TANAKA, Nobutaka YAMAZOE, Tomomichi NISHINO,  
Masashi HOSAKA\*, Naofumi TSUJI and Shohei MIURA

(令和3年2月26日受理)

This report presents an outline of our robots, which participated in the NHK Kosen Robocon competition in 2020, and describes the development of the inverted pendulum type robots. We attempted to manufacture robots that can have their positions controlled by rotary encoders and inertial measurement units (IMUs). A proportional-integral-differential (PID) controller was adopted for the automatic robot positioning. The pulses of two rotary encoders were counted to assess PID controller effects on forward and backward movement of the automatic robot. Good stability of the inverted pendulum was obtained using the PID controller and successful positioning of the robot was achieved at this Robocon competition.

## 1. はじめに

高専ロボコン（アイデア対決・全国高等専門学校ロボットコンテスト）は、全国から57校62キャンパスの高等専門学校が参加する教育イベントで、1988年から始まり今回第33回を数えた大会である。これまで本校は、第1回大会を除くすべての大会に参加し、9回の全国大会出場を果たしている。最近では、2015年、2017年と全国大会に出場し、東北地区大会でもベスト4以上や各賞を受賞する結果を残してきている[1]。

2020年の高専ロボコンはコロナ禍の下でオンライン方式で行われた。10月18日に開催された東北地区大会では2チーム（Aチーム：Run-turn, Bチーム：シューター坊）が出場し、Aチームが技術賞を受賞し、さらに全国大会に推薦された。11

月29日に開催された全国大会では、残念ながら予選リーグ敗退であったが、高い技術力を評価されて特別賞を受賞した。

本稿では、今年度のロボットコンテストで製作したロボットのうち、倒立振子を制御した自動ロボットに焦点を当ててロータリーエンコーダによる自動制御の概要を述べ、実験による検討を加えてまとめた。

## 2. 競技課題の概要

今年の高専ロボコンの競技課題は、「はぴ☆ロボ自慢」というテーマで、ロボコン大会初のオンライン大会となり、テーマ設定も含めて高専生の技術とアイデアとロボットパフォーマンスを通して「暮らしを豊かに、人を幸せに」するアイデア対決となった。テーマ設定として、Aチームは今年中止となった地元の秋田市の竿燈まつりをロボッ

---

\*秋田高専学生

トで再現することをテーマに、竿燈を倒れないように制御する倒立振り子の制御技術に挑戦した。また、B チームは延期となった東京オリンピックを意識して開会式の聖火点火の再現をテーマとして、ギヤとバネによる機構を駆使した射出技術にチャレンジした。特にA チームは、一昨年[1]、昨年の「自律化・自動化」ロボット製作で培った技術を倒立振り子制御にも活用した。

本年度のロボコンの競技課題におけるロボットの主な制限は、1 チームのロボット台数の無制限、ロボット1 台のサイズはパフォーマンスを通して、縦 0.5 m×横 0.5 m×高さ 0.8 m 以内、重量 5 kg 以下、コントロール方式を問わずに自発的な動力を持つこと、圧縮空気の使用禁止、駆動系電源容量は 30Wh 以下であった。



図1 A チームのパフォーマンスの様子



図2 B チームのロボットの外観

図1にA チームの大会での様子を、図2にB チームのロボットの外観を示す。A チームの自動ロボットは最終的に長さ 4.26 m、重さ 2.257 kg の竿燈をバランスよく倒立させることができた。

### 3. 自動ロボットの詳細

#### 3.1 自動ロボットの概要

本稿ではバランスを取りながら竿燈を倒立させるA チームの自動制御ロボットについて紹介する。全国大会では2 台の竿燈を倒立させるロボットを出場させたが、外観の形状は一部異なるが基本的な構造は同じであるため、主に最初に製作したロボットについて述べる。

図3にA チームの自動ロボットの三面図を示す。ギヤードモーターによる駆動2 輪と従動輪による3 輪となっており、倒立振り子制御としては基本的に前後進するのみの構造となっている。図4にロボット上側からの写真を示す。POM 樹脂製の従動輪にロボットの位置観測用のロータリーエンコーダと制御用に銅板によるブレーキを取り付けている。ロータリーエンコーダには静電容量式のエンコーダ AMT102-V (CUI Devices 社製) を採用した。ロータリーエンコーダの分解能は 125 PPR (パルス/回転) であるが、プログラム上で2 相のパルス信号の立ち上がりと立ち下り信号を読み取ることで 500 PPR とした。

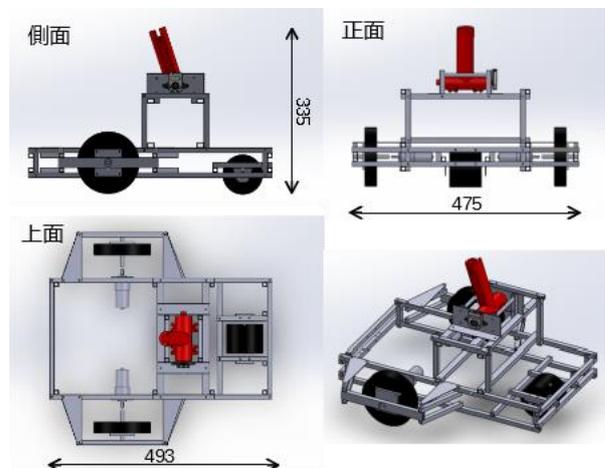


図3 自動ロボットの三面図

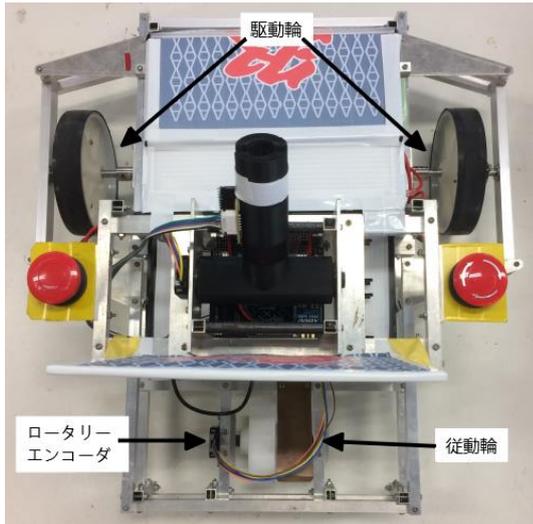


図4 自動ロボットの上側からの写真

図5に竿燈とロボットを繋ぐ接合部分の写真を、図6に接合部の模式図を示す。ロボットにある竿燈との接合部は3Dプリンタを使用してPLA（ポリ乳酸）樹脂で作製し、竿燈の下部を差し込むことで竿燈がロボットに固定されるようにした。この接合部はロボットとベアリングを介してつながっており、図6に示すように自由に動くことができる。接合部の回転角度を計測するために図5に示すようにロータリーエンコーダ（CUI Devices社製AMT102-V）を取り付けた。ロータリーエンコーダの分解能は2048 PPRであるが、プログラム上で2相のパルス信号の立ち上がりとしち下り信号を読み取ることで8192 PPRとした。さらにロータリーエンコーダの測定値を補正するために、接合部に慣性計測装置（IMU：Inertial Measurement Unit）を取り付けた。IMUは3軸の加速度センサと3軸のジャイロセンサを内蔵したIC（LSM6DS33, ST社製）を使用したAltIMU-10（Pololu社製）を採用した。IMUの出力データレート（ODR：output data rate）は1.66 kHz、ジャイロセンサの角速度レンジは±1000 dps、加速度センサの測定レンジは±2 g、アンチエイリアスローパスフィルタの帯域は50 Hzとした。ジャイロセンサはマイコンの読み込み間隔625 μsで1000回読み込んで平均した値を最初のオフセット

値とした。

図7に自動ロボットの動作を示す。ロボットは前進あるいは後進のみの一軸方向に駆動する。ロボット上部に取り付けた竿燈が前方方向に倒れるとロボットは前進し、後方方向に倒れたときは後進することでバランスをとって竿燈を倒立させ続けるように動作する。

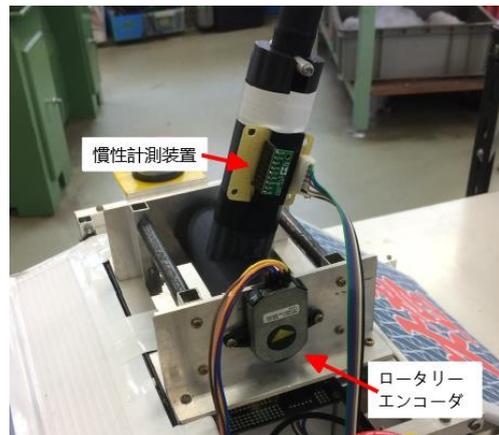


図5 竿燈とロボットの接合部の写真

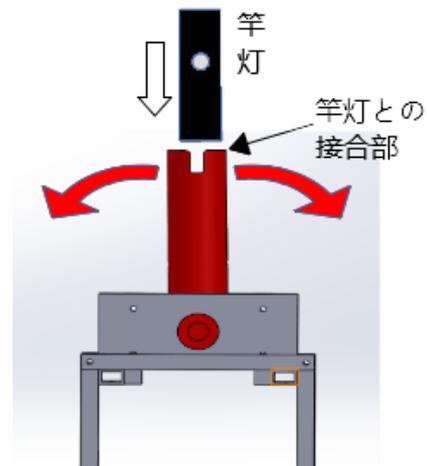


図6 竿燈とロボットの接合部の模式図

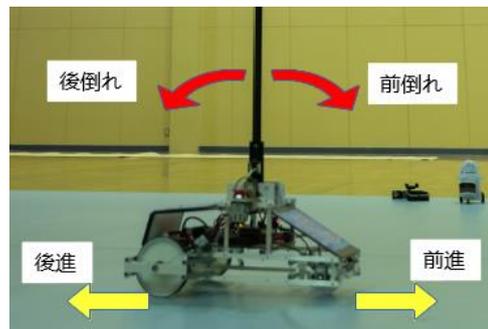


図7 自動ロボットの動作

### 3.2 自動ロボットの倒立制御

自動ロボットの倒立制御は、2つのエンコーダとIMUから出力された信号をマイコンに入力し、2つのPID制御による補正処理をしてモータドライバへのPWM出力に反映させた。マイコンはFPU搭載で浮動小数点演算が早く、クロックが180MHzと高速、安価で入手可能なSTM32F446RE（STマイクロエレクトロニクス社）を使用した。自動ロボットの動作は前後進の一軸方向のみのため、加速度センサはロボットの進行方向と垂直方向の2軸を、ジャイロセンサは竿燈との接合部の回転する方向の一軸の計測値を利用した。ロータリーエンコーダおよびIMUからの計測値はノイズ除去のためローパスフィルタ（LPF）処理を行った。ローパスフィルタとして、時系列データを平滑化する手法の一つである指数移動平均（EMA：Exponential Moving Average）を使用した。EMAは以下の式で表される。

$$y_n = ax_n + (1-a)y_{n-1}$$

ここで、 $x_n$ はセンサからの計測値、 $y_{n-1}$ は一つ前の時間の値、 $a$ は平滑化係数と呼ばれる。

図8に竿燈の角度を算定する部分のブロック線図を示す。竿燈との接合部に取り付けたロータリーエンコーダとIMUからの信号をセンサ入力として使用している。加速度センサから算出した角度の結果は、ロータリーエンコーダおよびジャイロセンサから求めたそれぞれの角度を補正するために使用した。そしてそれぞれの算出結果を加重平均して竿燈の角度とした。この加速度センサによる補正は竿燈の倒立の安定性を向上させる要因となった。

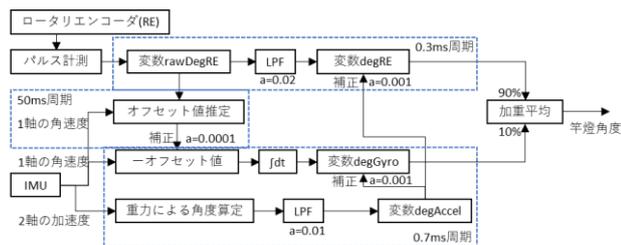


図8 竿燈角度算定のブロック線図

図9にロボット全体の制御の流れを示す。従動輪に取り付けたロータリーエンコーダからの信号により求めたロボットの現在位置と操縦者により指示される目標位置から竿燈の目標とする角度を決定するためにPID制御を行っている。PIDの出力から目標角度 $t_n$ を決定する関数を以下に示す。

$$b_n = ab_{n-1} + (1-a)(b_{n-1} + d_n)$$

$$t_n = b_n + d_n$$

ここで、 $b_n$ は基準目標角、 $d_n$ はPID出力（角度の差分）であり、係数 $a=0.999$ とした。基準目標角はロボット起動時に操縦者によっておおよそ調整し、その後は目標角決定関数によって自動で調整され、最適な値となることを目指している。これによりロボットが設置している床の傾きや竿燈の加工による重心位置の変化などに対し、自動的に調整することが可能となった。

上記で決定された目標角度はモータ出力決定用PIDに入力され、竿燈角度を検出値として、駆動輪の前後進が決定される。なお、2台のロボットおよび2本の竿燈間に無線通信システムを構築し、竿燈の電飾に外乱を受けていることを示す色表示をした。また、この通信システムにより竿燈電飾の色の同期や操縦者による点灯・消灯の他、PIDのパラメータ調整なども可能とした。

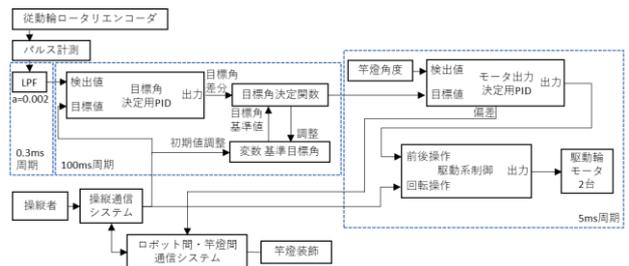


図9 全体の制御のブロック線図

### 4. 実験

Aチームの自動ロボットの倒立させる竿燈の長さおよび前後進移動におけるPID制御によるPIDパラメータの影響について検討を行った。測定はモータ出力決定用PIDへ入力される竿燈角度の検

出値と目標角決定関数の出力値を 10 ms 毎にモニタすることで行った。また、ロボットの現在位置を従動輪に取り付けたロータリーエンコーダから算出された値を記録した。床面は大会時と同じロンリウムシート上で、ロボットに竿燈を倒立させた状態で実験を行った。

図 10 に竿燈角度の時間変化を示す。竿燈の長さは  $L = 2200$  mm, モータ出力決定用 PID パラメータは、比例ゲイン  $K_p = 0.004$ , 積分ゲイン  $K_i = 0.00847$ , 微分ゲイン  $K_d = 0.00005348$  とした。横軸はロボット起動後の操縦者の操作直後からの時間を示す。図より PID 目標値に対して竿燈角度の計測値はほぼ追従していることがわかる。図 11 および図 12 に竿燈の長さを  $L = 3600$  mm および  $L = 4260$  mm とした場合の竿燈角度の時間変化を示す。竿燈の長さが長くなると角度変化の周期が短くなり、角度の変化量も大きくなっているが、いずれの場合も 3 周期程度で定常状態になっていることがわかる。図 13 に竿燈の長さを変えたときのロボットの現在位置の時間変化を示す。竿燈の長さが大きいほど最初のロボットの移動量が大きくなっているが、30 s 経過後はいずれも  $\pm 100$  mm の範囲で移動を繰り返していることがわかる。

次に PID パラメータの影響について実験を行った。PID の 3 つのパラメータのうち、積分ゲインおよび微分ゲインについて検討を行ったが、微分ゲインを増加するとセンサのノイズの影響が増大されるため本稿では積分の影響についてのみ観測した。測定はいずれも竿燈長さ  $L = 2200$  mm で行った。図 14 に積分ゲイン  $K_i = 0$  とした場合の竿燈角度の時間変化を示す。竿燈の角度は PID の目標値と同様に変化はしているが、目標とする角度に到達していない。図 15 に積分ゲイン  $K_i = 0.0847$  と図 10 と比べて 10 倍とした場合の角度変化を示す。角度計測値は目標値に追従してほぼ一定値になっていることがわかる。図 16 にロボット位置に対する  $K_i$  の影響を示す。図より積分ゲインがゼロの場合は竿燈のバランスをとるためにロボットの

位置も大きく変動している。積分ゲインが大きくなるとロボットの位置変化も小さく、バランスよく安定して竿燈を倒立できている。ロボコン大会時では各パラメータは試行錯誤して決定していたが、今回使用した 2 つの PID 制御により、竿燈を安定的に倒立させることができた。

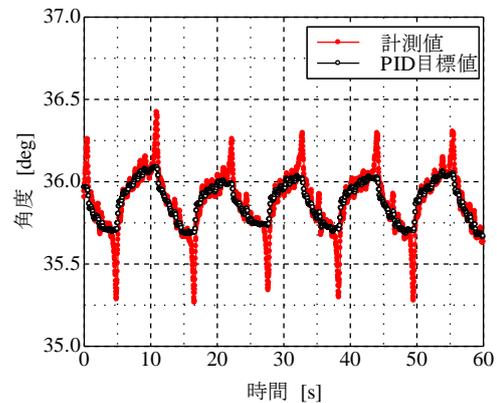


図 10 竿燈角度の変化 ( $L = 2200$  mm)

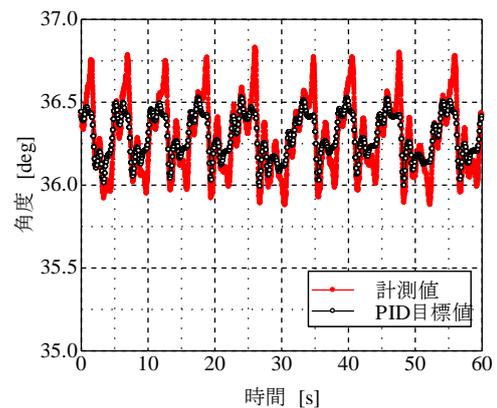


図 11 竿燈角度の変化 ( $L = 3600$  mm)

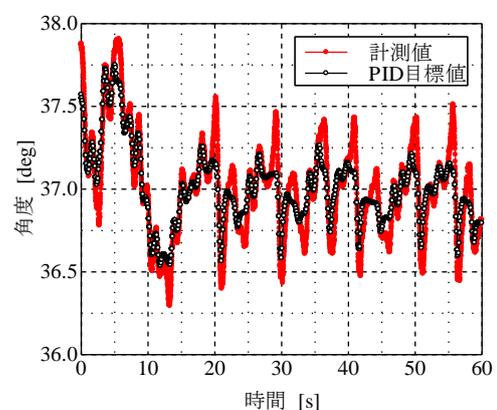


図 12 竿燈角度の変化 ( $L = 4260$  mm)

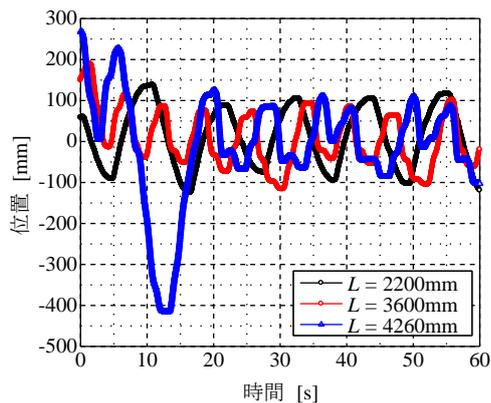


図 13 ロボット位置の変化

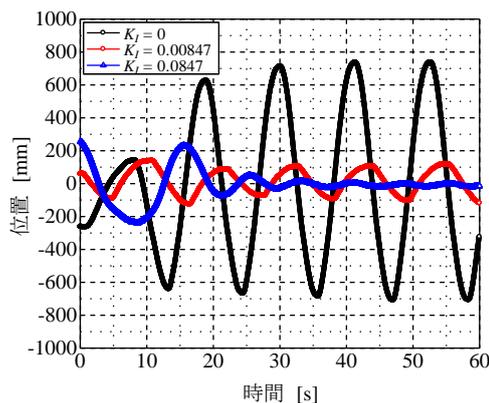


図 16 ロボット位置に対する  $K_I$  の影響

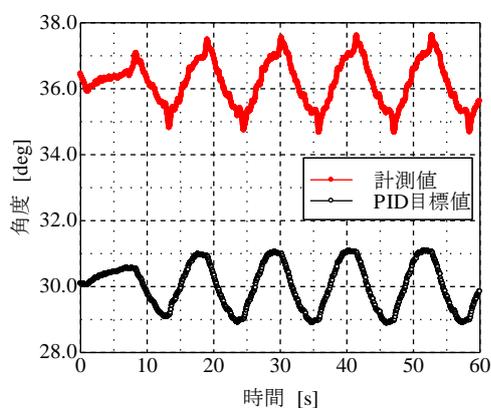


図 14 竿燈角度の変化 ( $K_I = 0$ )

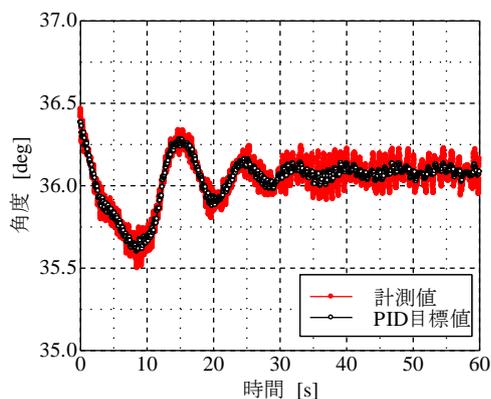


図 15 竿燈角度の変化 ( $K_I = 0.0847$ )

## 5. まとめ

本稿では、高専ロボコンに出場したロボットのうち倒立振り子ロボットの自動制御の機構と PID 制御による実験結果について報告した。本年度の競技課題では、竿燈の接合部とロボットの駆動輪に取り付けたロータリーエンコーダと IMU から出力された信号をマイコンに入力して PID 制御することにより竿燈の倒立の安定性を実現できた。ロボットの自動化に向けた今後の競技課題に要求される複雑な制御に対しても、今回開発した複数のセンサからの情報を組み合わせる技術が適用できるものとする。

## 謝辞

ロボコン活動において、ご協力頂いた本校教職員の方々およびコロナ禍にも関わらず大会に臨んだロボコンの学生に心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] 田中将樹, 西野智路, 中嶋龍一朗, 奈良雄斗, 松橋達也, 保坂真志, 渡部秀崇, 伊藤大地: ロボットコンテストにおける自動ロボットの開発, 秋田工業高等専門学校研究紀要, 54, pp. 9-14, (2019)