

全方向移動型自動段差昇降を可能としたレスキューロボットの研究開発

北海道苫小牧工業高等学校 電子機械科3年（平成29年3月卒業）

日向寺 倫・南出 真輝・本間 優樹

公益財団法人産業教育振興中央会「翔」第26集（平成28年度版）掲載原稿（一部改訂）

1. 研究目的

レスキューロボットには、陸上や建物内を走行するタイプの他に、がれき内に潜り込んで探査を行う蛇型ロボット、上空から要救助者を探すインテリジェントエアロボットなどがある。

本研究では、段差のある建物内を自由に移動可能なロボットを設計製作し、更に危険物の除去作業及び搬出作業を見据えた基礎研究を行うことで、救助活動の現場で活用ができる研究開発を目的とした。このロボットに、私達は「すわんちゃん」と名付けた。

2. ロボットの仕様

表1に製作したロボットの構成を示す。

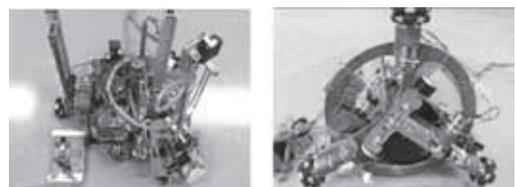
表1 ロボットの構成

重量	5.6 kg（電源バッテリー含む）
サイズ	最小サイズ 500×500 高さ500mm 最大サイズ 1000mm 高さ1100mm
車輪までの距離	d : 207mm（中心から）
ホイール直径	60mm
電源	HYPERION LiPo1300mAh(2S/7.4V)
使用マイコン	ルネサス テクノロジ株式会社 HS/3048F-ONE(2個)
制御周期 (制御周波数)	モータ PWM : 0.5ms(2kHz) サーボモータ PWM : 20ms(50Hz)

2-1 全方向移動可能な機構と制御方法

(1) 全方向移動可能な機構の設計製作

設計製作を行った全方向移動型ロボットは、3個のオムニホイールを用いる Roller Wheel 方式を採用した。図1(a)に製作した全方向移動型ロボットの外観、(b)にオムニホイールの配置を示す。オムニホイールとは、車輪の外周に複数のフリーローラを円周方向に配置することにより、一方向にのみ駆動力を発生させることができる特殊な車輪である。全方向移動機構は駆動部のモジュール数を最低限の3個とし、オムニホイールを120度毎に配置した。



(a) ロボットの外観 (b) オムニホイール

図1 全方向移動機構

(2) 全方向移動可能な制御方法

図2に3輪駆動の全方向移動方向を示す。(a)前方移動、(b)右方移動、(c)旋回移動時の例である。前後への移動は、車体前方の車輪のみで行い、左右への移動は全ての車輪の回転を微妙に調整することで行っている。また、その場旋回は、全ての車輪を同一方向に回転させることで

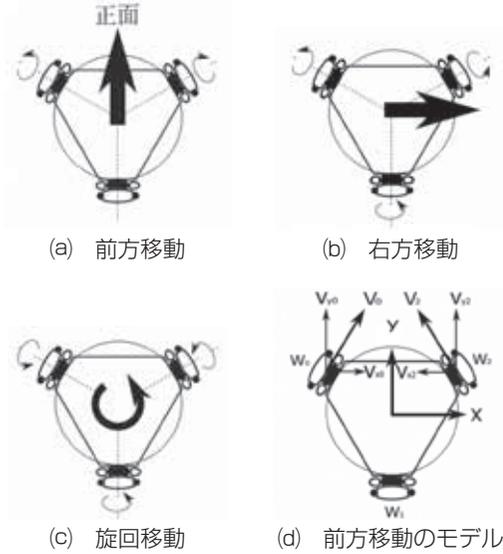


図2 3輪駆動 Roller Wheel の移動モード

旋回を可能としている。(d)は3輪駆動全方向移動機構の前方に進む時の例である。 W_i はそれぞれの車輪の番号、 V_i は各車輪の回転により発生する速度ベクトルとしている。ここで、 (V_{x0}, V_{y0}) 、 (V_{x2}, V_{y2}) は速度ベクトル V_0 、 V_2 の x 成分と y 成分を表し、車輪にオムニホイールを用いることにより、車輪の回転で発生した V_{x0} と V_{x2} が打ち消され、スムーズに前進することができる。

図3は3輪駆動全方向移動機構の構造をモデル化したものである。車輪の半径を r 、ロボット中心から車輪までの距離を d 、左前の車輪から時計まわりに3つの回転角を ϕ_0 、 ϕ_1 、 ϕ_2 とした。各車輪の回転によって進む方向の単位ベクトル \dot{e}_0 、 \dot{e}_1 、 \dot{e}_2 とし、 e_0 、 e_1 、 e_2 は次のように表すことができる。

$$e_0 = \left(-\frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{3}}{2}\right), \quad e_1 = (1, 0), \quad e_2 = \left(-\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

また、ロボット中心が速度 V で並進運動し、ロボットが $\omega = \dot{\theta}$ で回転運動している時、各車輪 i の接地面の速度 p_i は式①のように表すことができる。

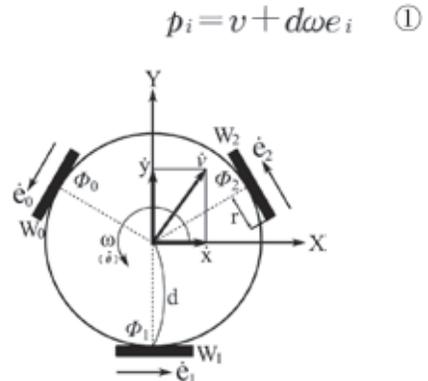


図3 3輪駆動全方向移動機構のモデル

各車輪が回転することで得られる速さ $r\dot{\phi}_i$ は p_i と e_i の内積と等しいため、図の車輪の回転速度とロボットの移動速度との関係式②が得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_0 \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & d \\ 1 & 0 & d \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \omega \end{bmatrix} \quad \text{②}$$

実際の制御では、ロボットの移動速度として $(\dot{x}, \dot{y}, \omega)$ を与え、②式により各車輪の回転速度を求めている。

また、ロボットの速度制御は、10 bit/A/D 変換を用いたパルス幅変調（以下 PWM と略）で変化をさせている。

2-2 段差昇降機構と自動システム

(1) 段差昇降機構の設計製作

設計製作を行った段差昇降機構は、ロボットを3つの部分に分け、上下動可能な駆動輪を有する。各部分は動作が連動し、段差昇降をさせる機構である。図4①から⑨は、段差を自動で昇る連続写真である。また、段差昇降を全自動で行うために、段差検出用の測距モジュール（以下 PSD センサと略）、高さの移動量を検出するセンサを搭載し自立動作を図っている。

なお、任意の段差を昇降させるために、通過型フォトインタラプタからロータリーエンコーダに変更をすることで、単純な機構とすること

ができた。図5(a)(b)はラック・アンド・ピニオンとロータリーエンコーダの外観である。

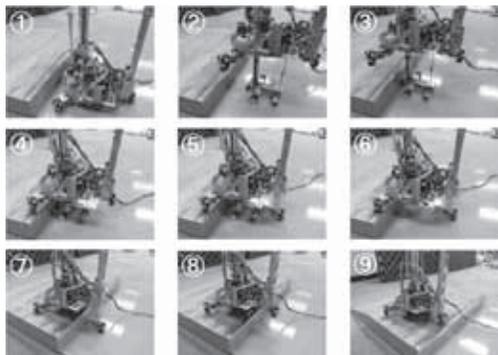
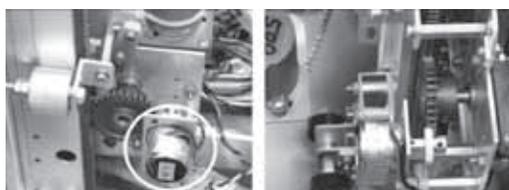


図4 段差を自動で昇る連続写真



(a) 外観正面から (b) 歯車による伝達

図5 ラック・アンド・ピニオンとロータリーエンコーダの外観

各脚の全長は約490[mm], そのうち272[mm]が可動域である。よってロボット本体のサイズを考慮すると, 255 [mm] までの階段の乗り越えが可能である。また, ウォームギヤヘッドの減速機を用いることにより, 比較的トルクの小さなモータでも本体, 脚を持ち上げることが可能である。

(2) 自動段差昇降機構の制御方法

この動作は, ロボットを段差手前からはじめ, 階段の高さが既知という条件で行っている。これにより, ロボットが上昇する高さ, 段差の幅分の走行距離をあらかじめ決め, オープンループでプログラムを作成している。

連続写真①から⑨までの動作は, 約7秒であり, 段差の検出から自動で行うことができる。

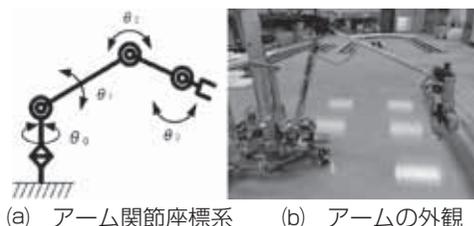
オープンループの動作においても, 高さが既知であれば, ほぼ問題なく動作することが可能である。また, ロータリーエンコーダを活用することで, 階段の高さが変わった場合にも, プ

ログラム内の指定値をリモコンボタンの入力回数で変更させることが可能なため, 容易に踏破することができる。

2-3 4自由度アームの機構と制御方法

(1) 4自由度アーム機構の設計製作

設計製作を行ったアーム機構は, 2個の自作サーボモータと4個の市販のサーボモータで構成している。図6(a)は今回設計したアーム関節座標系であり, 各関節の角変位を $\theta_0 \sim \theta_3$ と表す。(b)に製作したアームの外観を示す。



(a) アーム関節座標系 (b) アームの外観

図6 4自由度アーム

θ_0 と θ_1 は, 自作サーボモータで変位をさせている。図7に関節の外観を示す。

関節軸にポテンショ・メータを用いて, 角度に応じて変化する電圧をマイコンの 10 bit A/D コンバータで取り込み, フィードバック制御(以下 PID 制御と略)としている。



図7 関節部の自作サーボモータ外観

θ_2 と θ_3 は, 市販サーボモータで変位させている。プログラムはオープンループで作成し, 任意の角度指定を行っている。そのため, 関節がどのような変位にあるのかは, 実際にはわかっていない。

但し, 除去荷重を 2.5 N (質量 255 g) までと設定し, 必要軸トルクの概算と動作確認ができていたため, 問題が無いと判断をした。図8に θ_2 と θ_3 の関節部の外観を示す。

(2) 4自由度アーム機構の制御

H8 マイコン「3048 Fone」2個のマイコンを



図8 関節部の市販サーボモータ外観

連動制御させ、動作の効率化を行った。自作サーボモータの制御は、自動制御方法の中で最もよく使用されているPID制御である。

P: Proportional (比例) I: Integral (積分)

D: Differential (微分) の3つを組み合わせることで即応追従、継続追従、予見追従を実行する方法であり、連続的に変化する量を適切に制御することが可能になる。プログラムでは、デジタルPID制御の基本式を用いた。

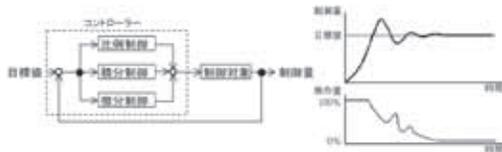


図9 PID制御のブロック図と制御量の変化

① アナログ系PID制御の基本式

$$MV = K_p \times e + \frac{K_i}{T_i} \int edt + K_d \times T_D \frac{de}{dt}$$

$$= \boxed{\text{比例動作}} + \boxed{\text{積分動作}} + \boxed{\text{微分動作}}$$

② デジタルPID制御の基本式

$$MV_n = MV_{n-1} + \Delta MV_n$$

$$\Delta MV_n = K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d(e_n - e_{n-1}) - (e_{n-1} - e_{n-2})$$

MV _n : 今回の操作量	e _n : 今回の偏差	K _p : 比例係数
MV _{n-1} : 前回操作量	e _{n-1} : 前回の偏差	K _i : 積分係数
ΔMV _n : 今回操作量差分	e _{n-2} : 前々回の偏差	K _d : 微分係数

なお、θ₂とθ₃の制御とアーム先端部の市販サーボモータは、IC「74HC238」(3to8ラインレコーダー)を活用することで、1つのPWM信号を擬似的に4つに分けて、サーボモータを

同時にかつ独立した制御を可能にした。

更に、1秒毎に、ロボットの状態をEEPROMに保存しデバッグやロボットの解析に使用した。

3. まとめ

ロボットで目的の動作を確実にを行うためには、PDCAサイクルを常に回すことが必須であった。センサの追加・変更、機構の改良・改善、プログラム調整・検証には長い時間が必要であったが、除去作業及び搬出作業の機能を効果的に組み込むことができた。

特に、このロボットの開発過程で学んだ機械工学やマイコン制御の技術、回路設計の技術、組込み技術は、今後も工業界で求められる技術であり、それらを学習できたことは、私たちに確かな成長と自信を与えてくれた。

本研究は、機械工作研究部の歴代の先輩方による様々な研究と、先生方からの御支援があったからこそここまで取り組むことができた。心より厚く御礼申し上げ謝辞とする。

4. 参考文献

- ・ルネサス テクノロジ株式会社発行；
RY 3048 Fone 用 24 サーボ基板製作マニュアル
- ・榎勇人；「マイコンを活用したロボットの自動制御」平成27年度産業教育振興中央会生徒研究文・作文コンクール
- ・日本工業出版株式会社発行；
ゼロから学ぶPID制御
- ・山下淳，浅間一，新井民夫，太田順，金子透；
「ロボットの移動機構に関する研究動向」日本ロボット学会誌 Vol.21 No.3, pp.282-292

工業教育資料 通巻第 375 号
(9月号)

2017年9月5日 印刷
2017年9月10日 発行
印刷所 株式会社インフォレスト

© 編集発行 実教出版株式会社

代表者 戸塚雄武

〒102 東京都千代田区五番町5番地
- 8377 電話 03-3238-7777

http://www.jikkyo.co.jp/