

物資を搬送する球殻移動ロボットに関する研究

Research on a spherical mobile robot for transporting luggages

○山浅航也*, 南斉俊祐*, 星崎みどり*, 長縄明大*

○Koya Yamaasa*, Shunsuke Nansai*, Midori Hoshizaki*, Akihiro Naganawa*

*秋田大学

*Akita University

キーワード： 球殻ロボット (Spherical robot), 移動制御 (Movement control), 物資搬送 (Transporting luggages), 内部駆動装置 (Inner drive unit), 複合機構 (Combined mechanism)

連絡先： 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学大学院理工学研究科
長縄 明大, Tel.: (018)-889-2726 E-mail: naganawa@gipc.akita-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 物流業界の人手不足が顕在化しており, その解決策として無人物資搬送が注目されている. 現在, 主に検討されている無人搬送手段として, 自動運転車とドローンによる搬送が挙げられる. しかし, 自動運転車は, 入り組んだ道での配送効率が低いことに加え, 不整地への輸送が考慮されておらず, また, ドローンは, エネルギー効率が悪く長時間輸送に適していない, 悪天候時には使用できないなどの問題がある.

著者らは, 物資搬送を可能とする球殻移動ロボットの開発を行っている. 球殻移動ロボットは, 球殻内に球殻を移動させるために必要なモータやバッテリー, 機構などを持つロボットであり, 転倒のリスクが無く安全性が高いこと, 球形であるためどの方向からの衝突に対しても転がることのできるため衝撃を和らげることのできること, 駆動機構の全てを球殻に内包しているため, 防水・防塵などの耐環境性に優れているなどの特徴がある. さらに, 同程度の大きさの車輪

型ロボットと比較すると, 球全体を車輪とみなすことができるため, 高い悪路走破性を持つ構造であるといえる. このため, 従来の車輪型や追従型の移動ロボットに比べ, 月面探査や社会福祉施設, 地震などの災害現場といった未知の領域や, 環境が変化する領域でのナビゲーションに優れている¹⁾.

しかし, これまで開発されてきた球殻移動ロボットは, 駆動に必要な部品を, 球殻内全体に配置する構造のものが提案されており, 球殻内部に荷物を搭載し移動できるロボットは提案されていない. 著者らは, この問題を解決するため, 先行研究において, 球殻内にレール構造を導入したロボットを提案し, その移動性能を報告した²⁾.

本研究では, 球殻移動ロボットの性能を向上させるため, レールにラックアンドピニオン機構を導入した場合について検討したため, その構造と移動性能について報告する.

2. 球殻移動ロボットの構成

2.1 設計コンセプト

Fig. 1 に本研究で検討した球殻移動ロボットのコンセプトを示す。本ロボットは、球殻内部に物資を収容する空間を確保するため、Fig. 1 に示すようなレール上を内部機構が移動する構造としている。その結果、移動に必要な駆動装置が球殻内の下部に配置されることになり、球殻内の上部に荷物を搭載できる空間を確保することができ、さらに、各種センサなどを搭載することが可能となる。

2.2 ラックアンドピニオン機構

本研究では、駆動輪にピニオン、レールにフレキラックをそれぞれ代用しラックアンドピニオン機構を採用している。これは駆動輪とレールの場合と比較したときに、駆動輪とレール間の滑りが少なく、モータトルクをより効率的に伝達可能という利点がある。

2.3 駆動原理

本研究で試作した球殻ロボットは、前後方向への移動と左右への旋回動作で異なる駆動原理

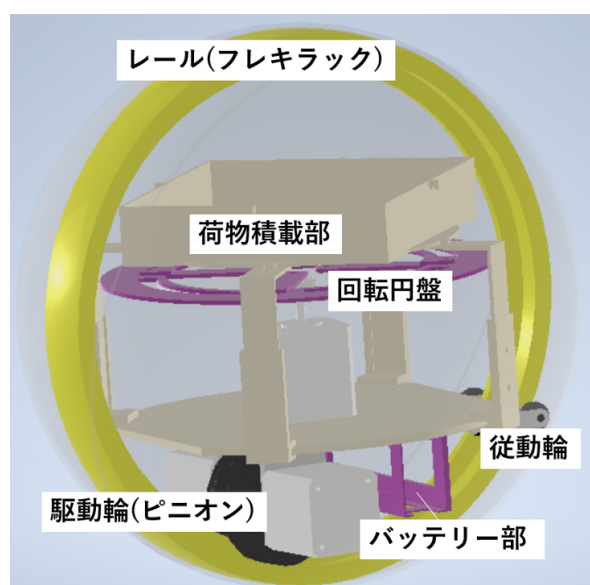


Fig. 1 設計コンセプト

を採用した。まず、前後方向への移動については重心移動による駆動を採用した。本研究で試作した球殻ロボットについては、4輪構成とし、前輪の2輪を駆動輪とした。駆動輪が本体を前方に動かし、元の平衡状態に戻ろうとする際に前進する仕組みである。

つぎに、旋回動作については、反作用トルクを採用した。Fig. 1 に示すような回転円盤を内部機構の中央に実装し、回転の加減速によって得られる反作用トルクを用いてロボットが左右方向に回転する。この方法の特徴として、得られる反作用トルクと円盤の角速度は比例関係にあり、円盤の角速度が大きくなると反作用トルクも大きくなることが挙げられる³⁾。

2.4 装置構成

Fig. 2 に本研究で試作した球殻ロボットを示す。ロボットのサイズは、球殻内に物資を入れるスペースが必要であるため、直径 300 mm とした。Table 1 に部品構成を示す。本ロボットのアクチュエータとしては、ステッピングモータを3台使用し、2台は駆動輪に、残り1台は回転円盤に使用した。回転円盤は、直径 210 mm、重量 240 g とし、より大きな角運動量が得られるように円周上に重りを配置した。また、姿勢角検出には InvneSense 社の MPU6050 を搭載した

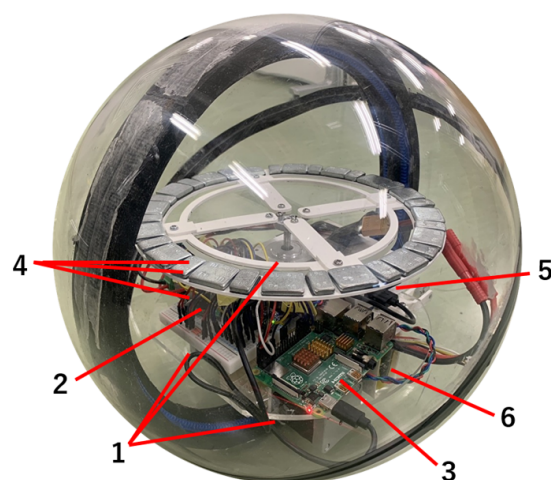


Fig. 2 装置構成

Table 1 部品構成

No.	品名
1	42 mm ステッピングモータ 12 V (MERCURY MOTOR)
2	6 軸センサ MPU6050
3	Raspberry Pi4
4	モータドライバ L6470 (Strawberry Linux)
5	モバイルバッテリー 5 V
6	リポバッテリー 11.4 V

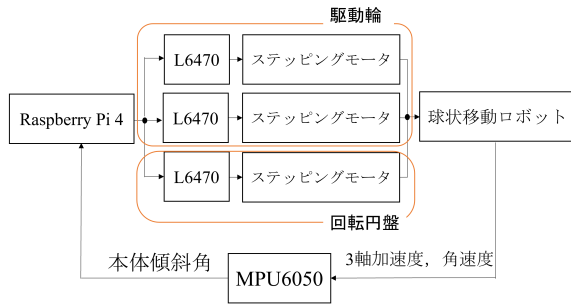


Fig. 3 ハードウェアのブロック線図

センサモジュールを使用した。このモジュールは、3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサが組み込まれており、姿勢角検出に優れている。その他のレールや車輪などのパーツは、3Dプリンタを用いて作成し、球殻は2つのアクリルドームを合わせることで球殻とした。Fig. 3にハードウェア構成のブロック線図を示す。

2.5 荷物積載部

Fig. 1に示すように回転円盤上部の空きスペースにボックスを設置し、荷物積載部とした。収容可能な物資の寸法は幅145 mm、奥行145 mm、高さ75 mmである。これは、定形外郵便の厚さ最小規格対応の段ボール（幅91 mm、奥行141 mm、高さ27 mm）を収容可能な寸法である。

3. ロボットの制御

3.1 制御ソフトウェア

本ロボットの制御プログラムの開発は、Pythonの統合開発環境ソフトウェア Thonny を使用して Raspberry Pi 上で行った。

Fig. 4に本ロボットの直進駆動時に実行されるプログラムのフローチャートを示す。図に示すように、プログラムを実行するとまず初期化が行われる。つぎに、駆動輪が定速回転を行い、前進を開始する。その後、6軸モーションセンサから検出される角速度からロボットのヨー角がフィードバックされる。このヨー角の値をもとに、回転円盤のステッピングモータにヨー角を0°にするための回転速度が与えられる。

3.2 速度指令および制御

本ロボットは、回転円盤を用いて旋回を行う。旋回角度が大きいほど回転円盤を速く回転させる必要がある。本研究では、ロボットのヨー角の値をもとに回転円盤の回転方向・速度の制御を行い、直進・旋回を行う。制御手法は、PIフィードバック制御を採用する。速度指令式は、次式のようにして制御ソフトウェアに使用する。

$$u = u_{old} + K_P(e - e_{old}) + K_I \cdot T_s \cdot e \quad (1)$$

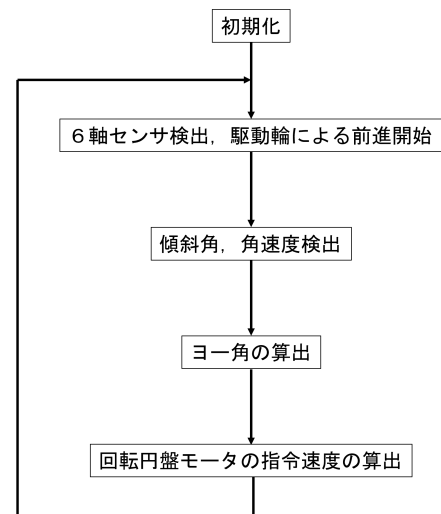


Fig. 4 制御フローチャート

ここで、 e は目標値と出力値の偏差、 u_{old} , e_{old} は前回の入力と偏差、 T は制御周期、 K_P , K_I は比例ゲイン、積分ゲインである。ゲインについては実験的に試行錯誤により決定した⁶⁾。

4. 動作検証

4.1 移動速度の測定

本ロボットの前進時の移動速度の測定を行った。球殻上にビニールテープを用いて印をつけ、球殻を走行させ、その印が一周するのに要する時間をストップウォッチで5回測定した。この移動時間の平均値と球殻の円周の長さを用いて、移動速度を算出した。測定は、物資を収容しない無負荷状態で行った。その結果、移動速度は、無負荷状態で 28.9 cm/s (1.04 km/h) であった。

4.2 直進性能検証

本ロボットの直進性能の検証を行った。制御状態と非制御状態において、ロボットを床に貼ったテープの上に乗せ、ロボットを前進させた。

Fig. 5, Fig. 6 にそれぞれの移動の様子を示す。Fig. 5, Fig. 6 を比較すると、制御状態にある方が時間が経過しても床の線に対して直進できていることがわかる。一方、非制御状態の方は時間経過とともに右方向へとずれていっていることがわかる。

4.3 旋回性能検証

本ロボットの旋回性能の検証を行った。ロボットが前進している状態からヨー角に対して、 30° , 60° , 90° の目標値を与え、任意の角度での旋回が可能か検証を行った。本実験の制御周期に関しては、 30° の場合は 1 Hz, 60° , 90° の場合は 0.5 Hz とした。Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 にそれぞれの検証の結果を示す。

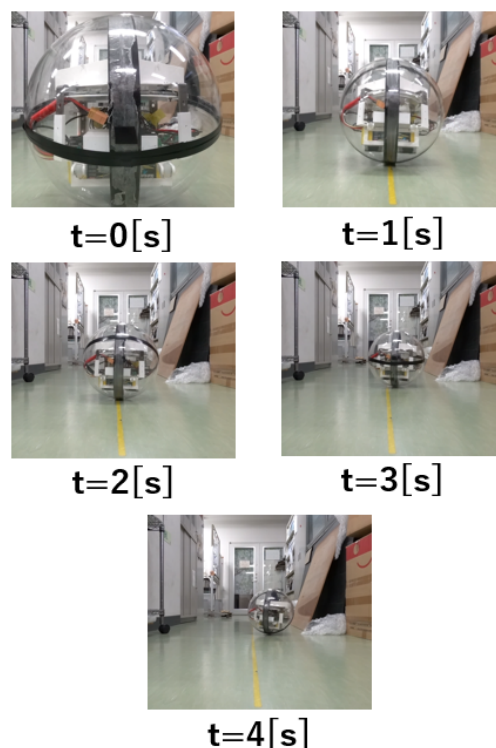


Fig. 5 非制御状態での直進の様子

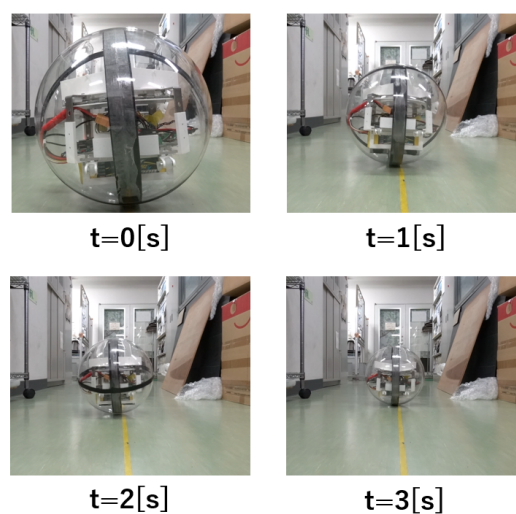


Fig. 6 制御状態での直進の様子

4.4 悪路走破性能検証

本ロボットの悪路走破性能の検証を行った。床にベニヤ板などを置き、3 mm の段差を作り出した。ロボットが十分加速した状態で段差に進入したところ、大きな減速はともなったものの乗り上げ、通過することができた。3 mm よりも高い段差でも検証を行ったが、乗り越えることはできなかった。

5. 考察

5.1 移動速度について

現行の物資搬送用の4輪ロボットの移動速度が3~5 km/hであることを考慮すると、モータの性能向上とロボット本体の軽量化による移動速度の向上が求められる。

5.2 直進性能について

制御状態と非制御状態での直進に明確な差があることから、直進制御の有効性は確認されたといえる。

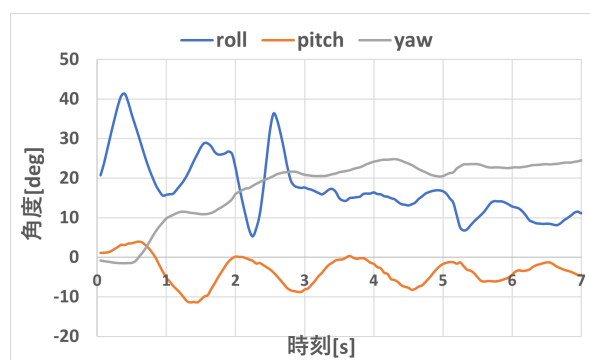


Fig. 7 目標値 30° 旋回の各パラメータ

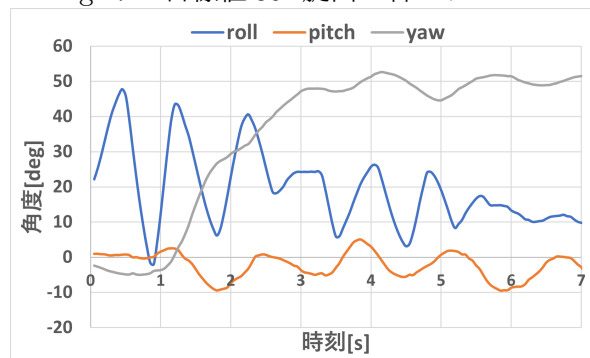


Fig. 8 目標値 60° 旋回の各パラメータ

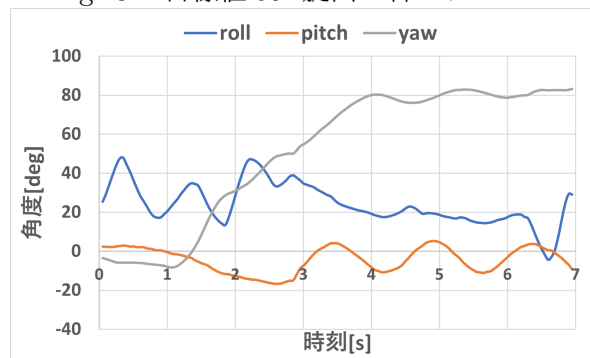


Fig. 9 目標値 90° 旋回の各パラメータ

5.3 旋回性能について

各グラフから見て取れるように、旋回自体はスムーズにできたが各目標値に対して、全体的に約10°足りていないことがわかる。これはラックアンドピニオン機構の噛み合いの影響やモータトルク不足が原因だと考えられる。また、Fig. 8では、50°近くに達したときヨー角に揺動が見られる。これは回転円盤の減速の際に発生するトルクが原因と考えられる。

5.4 悪路走破性能について

3 mm よりも高い段差でも検証を行ったが、球殻内で内部機構の傾斜角が大きくなると重心が後方に寄り、モータトルク不足の影響で駆動輪であるピニオンが回らず、乗り上げることができなかった。Gregory C らの研究⁴⁾によると、球殻ロボットの乗り上げることのできる高さ h (Fig. 10 に模式図を示す) は、球殻の半径を R 、球殻の中心と内部機構の重心の距離を x とすると次式で求められる。

$$h = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad (2)$$

式 (2) より、内部機構の重心を球殻の中心から遠ざけるほど乗り上げ可能な高さが h 大きくなることがわかる。本研究では球殻の中心と内部

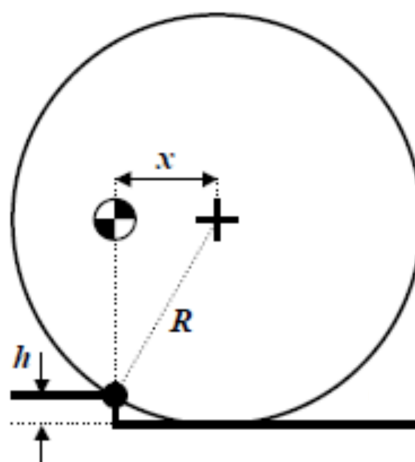


Fig. 10 乗り上げ可能な段差⁴⁾

機構の重心の距離 x を，球殻半径 R の $2/3$ と仮定する．式 (2) より，球殻ロボットの乗り上げることのできる高さ h は 38 mm と求まる．

したがって，現在乗り上げ可能な段差は理論値の約 8%であることがわかる．この点に関しては，速度との深い関係性が考えるので，今後，モータトルクの向上やラックアンドピニオン機構の噛み合いの改善の検討を行う予定である．

6. 結言

本研究では，物資搬送を目的とした球殻移動ロボットにラックアンドピニオン機構を導入して試作を行い，その性能を検証した．移動性能については，移動速度，旋回性能，悪路走破性能のどれについても各目標値には届かない結果となったが，正常に動作ができることを確認した．

今後は，高トルクなモータの採用やラックアンドピニオン機構の噛み合いの改善等を行い，さらなる移動性能・搬送性能の向上を実現する予定である．

参考文献

- 1) Jiazhen Chen, Ping Ye and Hanxu Sun Qingxuan Jia: Design and Motion Control of a Spherical Robot with Control Moment Gyroscope, 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics(ICAI), 114/120, 2016.
- 2) 浅利太地, 長縄明大: 物資搬送を目的とした球殻ロボットに関する研究, 計測自動制御学会東北支部 第 340 回研究集会, 資料番号 340-2, 2022.
- 3) B. Alexey, K. Alexander, K. Yury and K. Anton: Stabilization of the Motion of a Spherical Robot Using Feedbacks, Applied Mathematical Modelling, **69**, 582/592, 2019.
- 4) Gregory C, Schroll: Dynamic Model of a Spherical Robot from First Principles, Colorado State University Masters Theses, 2010.
- 5) Richard Chase and Abhilash Pandya: A Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots, Robotics, **1**, 3/23, 2012.
- 6) 南裕樹: Python による制御工学入門, オーム社, 2024.