4 個の球を用いた全方向移動機構に関する研究*

山田 健介^{*1}, 宮本 共生^{*2}, 臼井 清一^{*3}

A Study on a Holonomic Omnidirectional Vehicle using 4 Ball Wheels

Kensuke YAMADA, Tomoiki MIYAMOTO and Seiichi USUI^{*4}^{**} Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology,
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

The paper presents a design and characteristics of a new holonomic omnidirectional moving vehicle, which simultaneous and independently controlled translational and rotational motions. The moving vehicle has four rubber balls instead of wheels. Each ball is driven by two rotating rollers. But the system has only four actuators. The kinematics of the moving vehicle is analyzed and the control algorithms are derived for the holonomic and omnidirectional moving vehicle. The experimental results show that the proposed new type of moving mechanism has good characteristics and the sensor on board is useful for autonomous moving under relatively large disturbance.

Key Words: Motion Control, Moving Robot, Positioning, Holonomic Omnidirectional Vehicle, Ball Wheel, Feedback Control

1. 結 言

近年、移動機械や移動ロボットの機構として、車輪、脚、クローラなど様々な機構・方式が環境や目的に応じて研究・開発⁽¹⁾されている。比較的平坦な場所での移動を対象にする場合は、車輪による移動方式がエネルギー効率や構造・制御系の簡易さなどの点から有利であり、広く応用されている。

平面上での移動を対象とする場合、その運動は、前後・左右および回転の 3 自由度の運動になる。車輪式移動機構として最も一般的な方式である自動車などの 4 輪機構においては、車輪の駆動による前後方向の運動と車輪操舵による回転運動を組み合わせ、平面内での任意の位置・姿勢への移動を実現しているが、左右方向への移動ができないという非ホロノミックな拘束条件があるために、左右方向に位置を変えるためには、前後方向の移動および操舵による方向変換操作を組み合わせる切り返し動作が必要であり、複雑な制御動作、広い移動領域、長い移動時間を要するという問題がある。

これに対し、切り返し動作などを行わなくても、前後、左右、回転の 3 自由度の運動が自在に行えるホロ

ノミックな全方向移動機構は、室内等の狭い移動領域に適用可能であり、これまでに、球⁽²⁾⁽³⁾や車輪の外周上にいくつかのローラを取り付けた特殊な車輪⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾などを用いた各種の機構⁽⁷⁾が提案・開発されている。しかし、球を用いた方式では、機構や制御システムは比較的簡単であるが、すべりを生じる可能性があり、運動の精度や安定性の確保が課題となる。また、ローラホイールなどの特殊な車輪あるいは機構を用いた方式では、一般に、機構や制御システムが複雑であり、直進性・旋回性が問題になることがある等の改善すべき課題が残されている。

そこで、本研究では簡単な機構と制御方法によりホロノミックな全方向移動機構を実現することを目的として、4 個の球駆動機構を用いた全方向移動機構を提案し、開発した。そして、その基本的な移動特性を検証するとともに、センサを搭載してフィードバック制御を行い、その有効性の検討もあわせて行う。

2. 全方向移動機構

2.1 球の駆動・支持機構 本研究では、4 個の球を用いて全方向移動機構を構成する。そして、各球の駆動および支持には、球の中心を挟んで対向する側面にそれぞれ駆動用ローラおよび支持用ボールキャストを押しつける圧接駆動方式を採用する。図 1 に示すように、この駆動用ローラおよび支持用ボールキャストを一对として、二組を互いに直交する形で配置し、車

* 原稿受付 2004 年 8 月 23 日。

^{*1} 東京都立科学技術大学大学院工学研究科 [現: ミツミ電気(株)]。^{*2} 東京都立科学技術大学大学院工学研究科 [現: マツダ(株)]。^{*3} 正員, 東京都立科学技術大学工学部 (〒191-0065 日野市旭が丘 6-6)。

E-mail: susui@cc.tmit.ac.jp

体に対して球の保持・駆動を行う。また、車体と球とは、各球の頂部で 1 個のボールキャストを介して接している。なお、走行時の摩擦力を考慮すると、駆動用ローラ、支持用ボールキャストは球の中心を含む水平面内で球と接触するのが望ましいが、走行中に球が支持機構に完全に保持されず離脱気味になる（車体が浮き上がる）可能性があるため、駆動用ローラは、球の中心を通る水平面内で球との接点を有するが、支持用ボールキャストは、これより少し走行面に近いところで球と接触するように配置し、球を車体に包み込む形で支持する。

ここで、2 個の駆動用ローラのうち 1 個だけが駆動されている場合、もう 1 個のローラは球の回転軸に接触している形となり、摩擦による抵抗の影響は小さく、また、球は回転軸を支持されることで安定した回転が可能となる。このとき、ボールキャストは球の回転軸とは異なる位置で球との接点を有するが、キャストにはめ込まれたボールは自由に回転できるため摩擦力の影響は少ない。さらに、ローラの駆動にはステッピングモータを使用するため、停止しているローラにはホ

ールディングトルクが働き、横滑りによる球の回転の乱れを防ぐ効果が期待できる。

両方のローラが同時に駆動される場合は、それぞれのローラによって生成される回転運動のベクトル和が球の回転ベクトルになる。

本機構では、接地部分は 4 個の球のみであり、また、全てが駆動球であることから安定して走行することが可能になると考えられる。

2.2 運動学 本機構では、図 2 に示すように、4 個の球は、それぞれ長方形の各頂点の位置に配置される。そして、駆動用ローラは、長方形の辺上で球との接点を有し、支持用ボールキャストは、辺の延長線上で球との接点を有するように配置される。

基準となる走行面固定座標系を Σ_0 とし、走行面に一致して x_0, y_0 面をとる。そして、図 2 に示すように、移動機構に固定した座標系を Σ_v とし、原点 O_v は球が配置される長方形の対角線の交点に、 x_v, y_v 軸は、長方形の辺に平行にとる。また、 x_0 軸と x_v 軸のなす角を θ とする。次に、各球 i ($i = 1, \dots, 4$) の中心を O_i とし、 x_i, y_i 軸はそれぞれ x_v, y_v 軸に平行にとり、座標系 Σ_v で表した球 i の中心 O_i の座標を $(x_i, y_i) = (a_i, b_i)$ とする。ここで、各球は、 x_v, y_v 軸に関して対称な位置にあるので、図 2 に示すように、第 1 象限にある球から順に、1, 2, 3, 4 と番号を付けると、

$$\begin{aligned} a_1 &= a_4 = l_x \\ a_2 &= a_3 = -l_x \\ b_1 &= b_2 = l_y \\ b_3 &= b_4 = -l_y \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。

Fig.1 Ball support/drive system

Fig.2 Vehicle coordinate system

Fig. 3 Angular velocity of ball

各球は、移動機構本体に対して3軸周りの回転自由度を有するが、2個の駆動用ローラにより、 x_i, y_i 軸周りの回転のみが与えられ、鉛直軸周りには回転しないものとする。さらに、各球は走行面との接点において、すべらずに転がり接触を行うものと仮定する。

図3に示すように、球*i*が x_i, y_i 軸周りにそれぞれ $\dot{\xi}_i, \dot{\eta}_i$ の角速度で駆動される場合、球*i*が接地点*P_i*において転がり接触をするならば、座標系 Σ_v から見て、球*i*の中心*O_i*の速度 $\dot{\mathbf{v}}_{O_i}^v$ は、球の半径を r_b として、

$$\dot{\mathbf{v}}_{O_i}^v = \begin{bmatrix} r_b \dot{\eta}_i \\ -r_b \dot{\xi}_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される。一方、図2に示すように、移動機構の目標並進速度を $\mathbf{v}^v = [v_x \ v_y]^T$ 、原点 O_v 周りの目標角速度を $\dot{\theta}$ とすると、点 O_i の目標速度 $\dot{\mathbf{v}}_{O_i}^v$ は、

$$\dot{\mathbf{v}}_{O_i}^v = \begin{bmatrix} v_x - b_i \dot{\theta} \\ v_y + a_i \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表される。目標とする移動機構の運動を実現するためには、式(2), (3)より、

$$\begin{aligned} r_b \dot{\eta}_i &= v_x - b_i \dot{\theta} \\ r_b \dot{\xi}_i &= -v_y - a_i \dot{\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

の関係が成立する必要がある。この関係を各球にあてはめると、各球の x_i, y_i 軸周りの角速度は、式(1)より、

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \dot{\xi}_4 = -(v_y + l_x \dot{\theta}) / r_b \\ \dot{\xi}_2 &= \dot{\xi}_3 = -(v_y - l_x \dot{\theta}) / r_b \\ \dot{\eta}_1 &= \dot{\eta}_2 = (v_x - l_y \dot{\theta}) / r_b \\ \dot{\eta}_3 &= \dot{\eta}_4 = (v_x + l_y \dot{\theta}) / r_b \end{aligned} \quad (5)$$

となる。すなわち、 y_v 方向に隣接した球 (1と4, および、2と3) の x_i 軸周りの回転角速度、および、

x_v 方向に隣接した球 (1と2, および、3と4) の y_i 軸周りの回転角速度はそれぞれ同じになる。したがって、これらの隣接する球について、1個ずつのアクチュエータを用いて駆動すれば、全体で4個のアクチュエータを用いて、移動機構本体を並進速度 $\mathbf{v}^v = [v_x \ v_y]^T$ 、原点 O_v 周りの角速度 $\dot{\theta}$ で運動させることが可能であることがわかる。

さらに、機構本体の姿勢角 θ が変化しない($\dot{\theta} = 0$)ときは、4個の球の x_i, y_i 軸周りにそれぞれ同じ回転を与えればよいことがわかる。

ここで、球1と球2を y 軸周りに駆動するアクチュエータの回転角速度を $\dot{\lambda}_{12}$ とし、以下順に、球2と球3を x 軸周りに、球3と球4を y 軸周りに、球4と球1を x 軸周りに駆動するアクチュエータの回転角速度をそれぞれ、 $\dot{\lambda}_{23}, \dot{\lambda}_{34}, \dot{\lambda}_{41}$ とすると、減速比は各球共通で n として、

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{12} \\ \dot{\lambda}_{23} \\ \dot{\lambda}_{34} \\ \dot{\lambda}_{41} \end{bmatrix} = \frac{1}{r_b n} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_y \\ 0 & 1 & -l_x \\ -1 & 0 & -l_y \\ 0 & -1 & -l_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

と表される。

3. 実験システム

図4に製作した全方向移動機構の下面図を示す。移動機構本体の外形は、一辺の長さ440mmの正方形である。球はゴム製で半径 $r_b = 31$ mmであり、正方形の各頂点の位置に配置され、 $l_x = l_y = 165$ mmである。各球は、それぞれ、2個の駆動用ローラ、3個の支持用ボールキャスタを介して車体本体に支持・駆動される。球側面の2個のボールキャスタは、バネで球に押

Fig. 4 Omnidirectional vehicle (bottom view)

しつけられている。そして、隣接する2個の球は、中間部に配置されたステッピングモータからギア、タイミングベルトを介して、駆動用ローラにより同方向に同一の回転が与えられる。ステッピングモータのステップ角は 1.8 deg/step であり、 $1/4$ のマイクロステップ駆動を用いている。また、駆動用ローラはアルミ合金製で、半径 $r_r = 15 \text{ mm}$ であり、ステッピングモータから駆動用ローラまでの減速比は、 $n = 3.0$ である。

また、機構本体の姿勢角の検出のために、レートジャイロを搭載し、その角速度データを数値積分することによって角度を取得する。さらに、測距のためのセンサとして2個の超音波センサを、車体の端に取り付け、 x_r 方向、 y_r 方向の壁面との距離を測定する。

図5に、実験に用いたシステムの構成を示す。目標移動量、移動速度をもとに台形速度パターンを生成し、コンピュータからの動作指令により、モーションコントロールボードからドライバを介して、各ステッピングモータを駆動する。また、レートジャイロおよび超音波センサからの情報は、AD変換器を介してコンピュータに入力されるが、フィードバック制御を行わない場合は、単に、状態のモニタ用として使用する。

4. 動作実験

4.1 基本動作実験 基本動作実験として、直進走行、回転運動の2種類についての走行実験を行った。

まず、基本的特性を把握するために、直進走行、回転運動のオープンループ制御を行ったところ、目標移動距離および目標回転角度に対して、実際の移動距離および回転角度が8.5パーセント程度下回る結果が得られた。この原因としては、球とローラおよび走行面間におけるすべり、あるいは球の弾性変形等の影響が

考えられる。これらの値は何回かの試行において、大きな違いはなくほぼ同程度の値であった。そこで、センサ情報をフィードバックしない場合の実験では、あらかじめこのことを考慮して、球の目標回転角を補正した実験も行うこととした。そして、補正した場合と補正しない場合とでは、最終的な移動距離、回転角が異なるだけでその他の特性に差異は見られないので、以降の実験結果では、フィードバックなしは、この補正した場合の結果を示す。

1) 直進走行実験 (前後/左右)

移動距離の目標値を 1000 [mm] 、目標移動速度を 100 [mm/s] として x_r 方向への直進走行実験を行った結果を図6、7に示す。図6は、上方 2.5 [m] の位置に設置したビデオカメラで撮影した連続画像から、走行開始から停止まで一定時間ごとに8枚の画像を抽出し、それらを重ね合わせた合成画像である。左から右へ移動している様子を示す。図7に、超音波センサによる位置の検出データを示す。超音波センサで壁面との距離をセンシングしたフィードバック制御では、実際の移動距離は 1004 [mm] であり、フィードバックなしの場合でも、 996 [mm] とフィードバック制御を行った場合と同程度の結果が得られた。また、レートジャイロを用いて検出した車体の状態姿勢角の変化については、

Fig.5 Control system

Fig.6 Translational motion along x_r - axis

Fig.7 Moving distance of the vehicle

Fig.8 Translational motion along oblique line

フィードバックの有無にかかわらず、 ± 1 [deg] 以内に収まっており、安定して直進走行することが確認された。

2) 直進走行実験 (斜め方向)

x_v 方向 (あるいは y_v 方向) への直進走行は、4 個のモータのうち対辺にある 2 個のモータのみを動作させて実行されるが、斜め方向の直進はすべてのモータを駆動することになる。図 8 に、左 30 度方向への直進走行の実験結果を示す。図 8 は、走行開始地点から目標位置までの移動の様子を示す 8 枚の抽出画像を合成したものである。図中の白線は目標の 30 [deg] の方向を示しているが、車体の左手前の一角がほぼこの直線に沿って移動していることがわかる。移動量の誤差は、フィードバックなし、フィードバック制御ともに、 x_v 方向への直進走行の場合と同程度の精度であった。また、状態姿勢角についても、姿勢変化が ± 1 [deg] 以内に収まっており、安定した高精度の斜め方向の直進走行ができることが確認された。

3) 旋回運動

車体中心 O_v の周りに 1 回転する旋回運動実験を行った結果を図 9, 10 に示す。図 9 は、開始点から停止点までの連続画像から一定時間ごとに 9 枚の画像を抽出し重ね合わせた合成画像を示す。2 枚の画像の合成であるかのように見えるが、これは本移動機構の外形が正方形で、1 回転の運動を 8 分割した画像で表したために、1 枚おきにほぼ重なって見えることによる。図 10 に、レートジャイロを用いて検出した姿勢角の実験結果を示す。これらの結果から車体中心 O_v 周りに一定角速度で旋回していることがわかる。レートジャイロによる姿勢角の検出値を用いたフィードバック制御では、実際の回転角が 359.7 [deg] と指定通りの運動が実現できた。フィードバックなしの場合においても、363.2 [deg] と若干誤差はあるもののほぼ目標通りの動作ができた。

Fig.9 Spin motion

Fig.10 Posture angle in spin motion

以上の基本動作実験の結果から、本機構では、一定の環境下においては、直進運動、旋回運動ともに、比較的安定し、再現性のある運動が可能であることが確認できた。さらに、センサを用いたフィードバック制御の有効性も示すことができた。

4.2 応用動作実験

フィードバック制御の効果を検証するために、応用動作実験として、走行中に大きな外乱を与えられた場合の動作実験を行った。外乱は、走行面に薄いシートを敷き、移動機構がこのシート上を走行中に、シートとともに移動機構の位置・姿勢を変える方法で与える。

斜め方向への直進中に、姿勢に外乱を与えた場合の実験結果を、図 11 に合成画像として示す。左から右へ進行している様子を示す。図中の黒線は初期の車体

Fig.11 Translational motion under disturbance

の姿勢を示し、スタート直後に外乱により車体の方向が変化しているが、その後も車体中心は図中の白線で示す目標軌道に沿って走行している様子がわかる。なお、本機構では、旋回運動により、姿勢を修正することも可能であるが、本実験では、途中で姿勢の修正は行わず、目標地点に到達後に修正している。

次に、移動機構を任意の位置にセットした状態から、目標位置へセンサの情報をもとに自律的に移動させる位置決め動作実験を行った。走行途中で位置・姿勢に大きな外乱を作用させた場合の実験結果を図 12, 13 に示す。経過時間 7.7 ~ 9 秒の間に外乱が作用し位置、姿勢が大きく変化している。本実験では、姿勢が ± 1 [deg] 以上変化した場合は、まず、姿勢角を修正することになっているため、図 12 からわかるように、姿勢角を修正の後に、目標地点 (図 13 の×印) に向かって移動している。最終的には、目標地点からの誤差は、 x, y 方向ともに 15 [mm] 未満であった。

これらの応用動作実験の結果から、本機構は位置および姿勢に大きな外乱の入力があっても、フィードバック制御により、精度のよい走行が行えることが確認できた。

Fig.12 Results under disturbance

Fig.13 Trajectory of vehicle

5. 結 言

本研究では、4 個の球駆動機構を用いた全方向移動機構を提案、製作し、その走行特性の検討を行った。

その結果、簡単な機構と制御システムによって、ホロノミックな全方向移動システムが実現できることを示した。そして、走行条件が一定で大きな外乱の作用しない環境においては、フィードバック制御を行わない場合でも、直進運動・旋回運動ともに安定した走行が可能で、再現性も良好であることを検証できた。また、センサを用いたフィードバック制御を行うことにより、より精度の高い走行が可能であること、さらには、外乱によって位置および姿勢角が大きく変化した場合でも、安定した動作が可能であることなど、フィードバック制御の有効性を確認した。

文 献

- (1) 山下, 浅間, 新井, 太田, 金子, ロボットの移動機構に関する研究動向, ロボット学会誌, 21-83(2003), 282-292.
- (2) 藤沢, 大久保, 師玉, 山浦, 四輪独立駆動型全方向移動ロボットの運動学とその走行特性, 機論, 62-604, C (1996), 4573-4579.
- (3) 松本, 竹田, 飯田, 伊東, 3つの球を使った全方向移動機構の運動と制御, 機論, 60-576, C (1994), 2756-2763.
- (4) 浅間, 佐藤, 嘉悦, 尾崎, 松元, 遠藤, 3自由度独立駆動型全方向移動ロボットの開発, ロボット学会誌, 14-2, (1996), 249-254.
- (5) M. Wada, H. Asada, Design and Control of a Variable Footprint Mechanism for Holonomic Omnidirectional Vehicles and its Application to Wheelchairs, IEEE Trans on robotics and automation, 6-15, (1999), 978-989.
- (6) F. G. Pin, S.M. Killough, A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots, IEEE Trans on robotics and automation, 10-4 (1994), 480-489.
- (7) 和田, 森, ホロノミック全方向移動ロボットの開発, ロボット学会誌, 15-8, (1997), 1139-1146.
- (8) R. Damato, S. Hirose, Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle "Vuton-II" with Omni-Discs, Journal of robotics and Mechatronics, 14-2, (2002), 186-192.