

全方向移動ロボットの開発

Development of Omnidirectional Mobile Robot

多胡 英典[†], 加藤 厚生^{††}

Hidenori TAGO[†], Atsuo KATO^{††}

Abstract We developed an omnidirectional mobile robot using four omniwheels. The system where the robot autonomous run from current position to the target position was constructed. The robot was setting up the omniwheel every 90 offset degrees. The kinematics of it was derived. The position and posture of the robot were acquired from the video camera set up outside. The robot controlled by positional feedback of the PID control. The color mark was put up on the robot. The position of the color mark was acquired by image data processing using the color threshold. The velocity command value was calculated from the position and posture of the robot and the target position. The value was transmitted to the robot through CUNet.

1. はじめに

1-1 研究の背景

近年,介護やコミュニケーションといった人間の生活支援や人間と協調作業を行うロボットの研究・開発が盛んに行われている。それに合わせてオフィスや病院内など人間の居住空間で全方向に移動可能な機構を持ったロボットの研究・開発も行われている。全方向移動ロボットとは,あらゆる方向に移動,旋回のできる移動特性を持つロボットを指し,この移動特性により進行方向に複数の障害物が存在する複雑な作業環境や,従来の4輪自動車のように旋回に余分な経路をとらなくてもよく,狭い空間での移動が楽にできる。実際に全方向移動型のパワーアシストカート¹⁾が病院内の配膳車として利用され始めており,今後も全方向移動ロボットの利用はますます期待が高まって

いる。

これまでに開発された移動ロボットの多くは機構面に重点をおいて開発されており,その多くは車輪機構が占めている。その理由として,車輪機構の制御が簡便で,長年に渡る技術的な蓄積の多いことなどが挙げられる。しかしその反面,段差の乗上げ性能や車輪のすべり,坂道での状態維持などいくつかの問題点もある。一方,全方向移動ロボットの機構には特殊車輪を利用するものが多く,フリーローラー付きの車輪や球面タイヤを利用した機構²⁾があり,これらは通常の子輪と異なり車輪そのものがあらゆる方向への移動を可能としている。

本研究の対象とする全方向移動ロボットは主に家庭内や屋内など平坦な地形での運用を目的とするので,段差乗り越え能力を必要としないことから,利点の多い車輪型の移動機構を持った全方向移動ロボットの研究・開発をした。

1-2 研究の目的

本研究は全方向移動特性を持ったロボットを外部からの指

[†] 愛知工業大学 大学院工学研究科 (豊田市)

^{††} 愛知工業大学 工学部 機械学科 (豊田市)

令により目標位置へと自動走行させることを目的として行った。

自動走行させるには、まずロボットの位置と姿勢をロボットが認識できなければならない。また、ロボットが向かうべき目的場所を設定する必要がある。そこで、以下のシステムを構築する。

移動ロボットの本体は全方向移動を実現させるため、オムニホイールと呼ばれる特殊車輪を4つ配置し、それぞれにモータ、およびモータドライバを組み合わせ個々を車輪が独立して駆動する独立4輪機構で構成する。本体機構に関しては3.1章に述べる。

移動ロボットの自動走行システムには2台のPCと外部カメラを使用する。1つのPCはロボットへの指令値計算や目的位置の指定に使用し、もう一方のPCで外部カメラから送られてくる画像情報を処理しロボット本体の位置と姿勢を測定する。位置と姿勢情報を取得から速度指令値を算定してフィードバックし、ロボットが走行する予定軌道を外れても修正することが可能とした。また、操作補助としてジョイスティックを用いてロボットに速度指定値を与え、任意の方向へ駆動する。外部カメラによる位置と姿勢測定は3.2章で、コントローラと制御に関しては3.4章に述べる。

2. 4輪独立移動ロボット

2.1 全方向移動ロボット

全方向移動機構は、どのような姿勢からでも任意の方向に移動することが可能である。例えば、任意方向に回転可能な球をロボットの車輪として用いることにより、あらゆる状態において、全方向(x, y, θ)の3自由度)に移動することが可能となる。また、姿勢を変化させながら任意の方向へ移動することができるので移動方向への制限がない特徴がある。

本研究で開発した全方向移動ロボットを写真1に示す。本機は駆動輪にオムニホイールという外周に6個のフリーローラを有した車輪を用いた。フリーローラ付きの車輪は、ある1方向にのみ駆動力を発生することができ、それと直角方向には、フリーローラが自由に回転し、抵抗なく移動可能である。

フリーローラの配置方式に、3車輪を 120° ごとに配置³⁾したものや4車輪を 90° ごとに配置⁴⁾したものがある。車軸方向が一致しないように3車輪を配置すれば全方向移動を実現できる²⁾が、4輪設置の方が安定性が高いことや車輪が直交していると制御が容易であることから、本ロボットは写真2に示すように配

置することによって全方向移動を実現した。

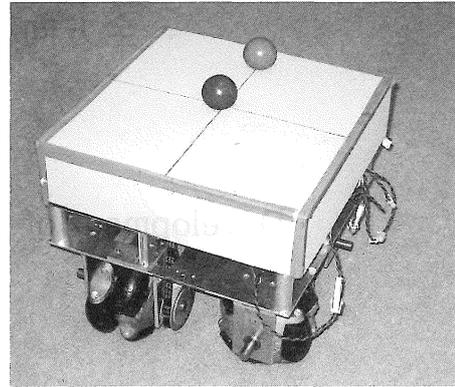


写真1: 概観

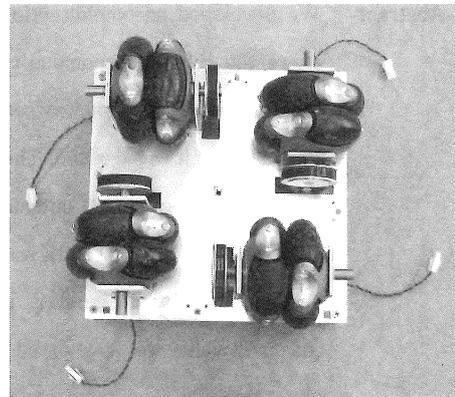


写真2: 配置

2.2 運動学モデル

ロボットのワールド座標上での位置と姿勢を図1に示す。

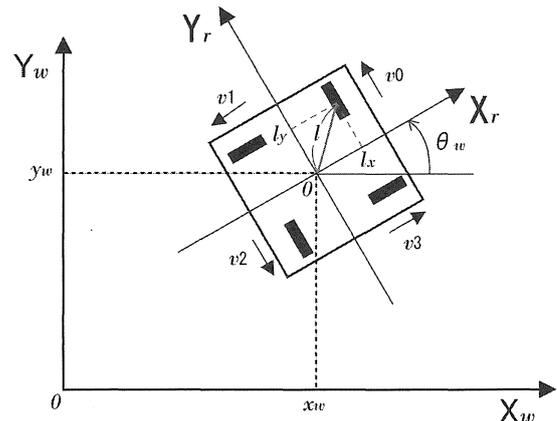


図1: 運動学座標系

ロボットの中心位置は各軸の中心に置き、中心位置の運動をワールド座標上での運動学モデルを式(1)に示す。各車輪の速度 $v = (v_0, v_1, v_2, v_3)$ 、ロボットの移動速度 $v_r = (v_x, v_y, v_\theta)$ 、ロボットの中心位置から車輪の距離 l とする。

$$v = B^{-1}v_r \quad (1)$$

$$B^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_w & \sin \theta_w & / \cos \theta_l \\ -\cos \theta_w & -\sin \theta_w & / \cos \theta_l \\ \sin \theta_w & -\cos \theta_w & / \cos \theta_l \\ -\sin \theta_w & \cos \theta_w & / \cos \theta_l \end{pmatrix}$$

よって、各車輪の速度を求めることができる

2・3 軌道追従制御系

ロボットを走行させる際に、オムニホイールがスリップしやすく、与えられた軌道に対する追従性が悪い。そこで制御系にPID型のフィードバック制御を適用した。

ロボットの目標値を $X_t = (x_t, y_t, \theta_t)$ 、測定位置を $x_p = (x_p, y_p, \theta_p)$ 目標値との偏差を $e = x_t - x_p$ とし、比例ゲインを K_p 、積分ゲインを K_I 、微分ゲインを K_D とする。前回の目標指令値を $x_{m-1} = (x_{m-1}, y_{m-1}, \theta_{m-1})$ 、新たな目標指令値を $x_m = (x_m, y_m, \theta_m)$ とすると制御式⁵⁾を式(2)に示す。

$$\dot{X}_m = \dot{X}_r + K_p e + K_I \int e dt + K_D \dot{e} \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入することで、各車輪の速度を求めることができる。

3. システム構成

3・1 全体のシステム構成

全方向移動をおこなうために、ロボットは各車輪を独立で駆動可能な機構とした。システム構成を図2に示す。

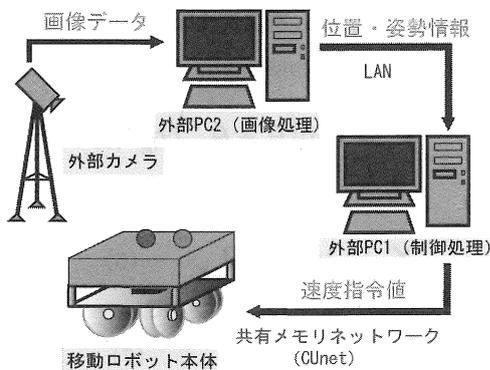


図2: システム構成

移動ロボット本体にはモータドライバ1つを1つのモータに組み合わせた。モータドライバにはマイコンを搭載させるデジタルでのフィードバック制御を行った。ロボットの位置と姿勢の測

定は、ビデオカメラ画像を処理することで求めた。ロボットの中心位置に球状カラーマークを、その周りに別の色の球状カラーマークを設置した。カメラ画像情報をカラー2値化処理し、2つのカラーマークの位置を割り出し、そこからロボットの位置と姿勢を取得した。取得した位置と姿勢の情報を有線LANを介して外部PC1に送信した。外部PC1では目標地点までの軌道生成、ロボットに対する速度指令、外部PC2から送られてくる位置・姿勢情報をもとに軌道上を移動するようフィードバック補正をかけてロボットに与える指令値を算出した。また、メモリー空間をリアルタイムで共有できるCUnetと呼ばれる技術で各モータドライバと外部PC1のネットワークを作り、外部PC1から指令値がモータドライバに与えられるようにした。

3・2 駆動機構

ロボットの駆動機構はギヤードモータで発生するトルクをベルトとプーリで伝達し車輪を駆動する簡単でメンテナンスしやすい機構(図3)にした。

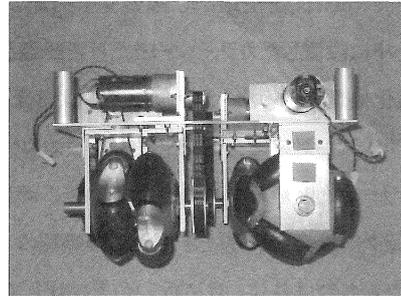


図3: 側面

ロボットのサイズを小型化するために、モータと車輪の配置は上下に重ねて並置した。モータ、車輪の軸にプーリを取り付け、歯付きベルトを介し車輪を駆動した。モータの出力トルクは車輪の駆動に十分ではあるが、進行方向の変化による速度変化を抑えるために、モータと車輪のプーリ比をおよそ1:5に設定⁶⁾した。最高速度値は低下するが、走行する空間が狭いことを考慮すると最高速度よりも滑らかな動きのほうが重要である為このような設定とした。この結果、出力トルクが増加し最高速度に達するまでの加速期間が短縮され、進路方向の変化による速度変化を抑えることが可能である。

3・3 外部カメラによる自己位置・姿勢の測定

3・3・1 構成

ロボットの位置と姿勢を測定するためにビデオカメラ(以降:外部カメラと言う)を用いる。外部カメラは作動空間を撮影できる高さに設置し,斜め下に傾け,固定した状態でロボットを撮影し,撮影画像からマーク位置を取得する。外部カメラの画像情報をカラー2値化処理してロボットに取り付けられた2つの異なるカラーマークの位置を取得し,外部PC1に位置情報を送信する。外部カメラはあらかじめ位置と姿勢を測定しておき,カラーマークの位置をカメラ座標からワールド座標に変換するとき使用する。ロボットの中心に青色のカラーマークを設置することで,位置を測定し,もう1つの緑色のカラーマークをX軸の正の方向に設置することで姿勢を測定した。

3・3・2 画像処理

外部カメラからの画像を外部PC2のビデオキャプチャボードで取り込み,DirectXのDirectShowを用いて画像データを抽出し,画像処理を行い,ロボットに取り付けたカラーマークを認識させる。外部カメラにSONY製NetworkHandycam,画像処理にCPU Pentium4[3GHz]を使用した。画像サイズは320×240で行った。ロボットに設置したカラーマークだけを認識させるためにカラー2値化処理を行った。カラーモデルは蛍光灯等の照明条件が変化しても対応できる⁷⁾,HSV色体系のカラーモデルを用いた。カラー2値化処理では抽出したい色の範囲を指定し,色はその範囲内にあるか判別をさせた。この処理のみでは,実際に抽出したいもの以外に,特に近い色を抽出してしまうので,この後にラベリング処理とノイズ処理を追加して行った。この処理を追加することによって目標の色だけを抽出することができた。そして,抽出した物体の中心を求めた⁸⁾。この中心を物体の位置として用いる。

3・3・3 位置・姿勢の測定法

ワールド座標系(X,Y,Z)はカメラの真下に原点を置いた三次元直交座標系とし図4に示す。図4より,地面に垂直な方向で外部カメラの焦点を通る線をZ軸,カメラの光軸方向にY軸とした。外部カメラ座標(X',Y',Z')は外部カメラの画像上の座標で画像中心を原点とし画像に向かって上向きをY'の正方向,画像に向かって右向きをX'の正方向,カメラの光軸をZ'とした。このとき,外部カメラはX軸周りにのみ回転させる。床に垂直な方向で外部カメラの焦点を通るワールド座標軸をZ軸とし,カメラの原点を(0,0,h_c)とした。θ_cがカメラの角度、ワールド座

ワールド座標系

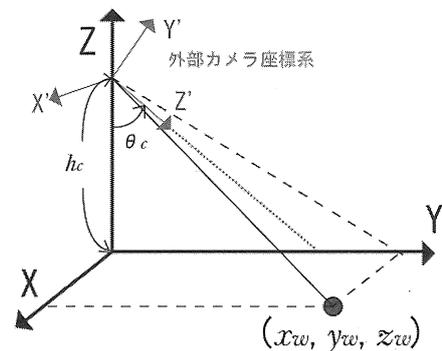


図4:ワールド座標系と外部カメラ

標系での目標物を (x_w, y_w, z_w) とする。

目標物が外部カメラ座標系(図5)から見た成す角 θ_{cx}, θ_{cy} は式(3),式(4)に示す。

$$\theta_{cx} = \tan^{-1} \left(\frac{X_{img}}{f} \right) \quad (3)$$

$$\theta_{cy} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{img}}{f} \right) \quad (4)$$

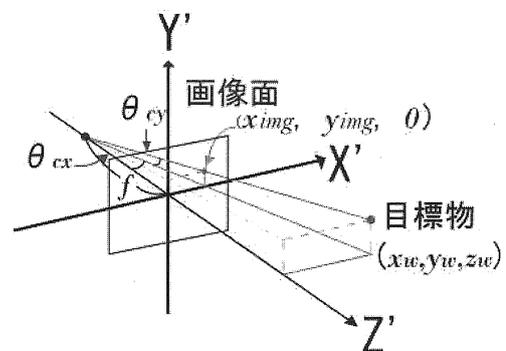


図5:透視変換図

また,外部カメラとy軸方向の関係より,

$$y_w = \tan(\theta_c + \theta_{cy}) h_c \quad (5)$$

そして, y_w より,

$$X_w = y_w \tan \theta_{cx} \quad (6)$$

また, Z_w は目標物の高さ(h_{robo})なので,

$$Z_w = h_{robo} \quad (7)$$

となり,ワールド座標系での目標物を求めることができた。

目標物をカラーマークとすると,それをロボットの中心に設置することで,ロボットの位置を測定することができる。また,中心周りに別の色のカラーマークを設置することで,ロボット姿勢角が

求められる。

4. 実験

4・1 走行実験

開発した実機を用いてロボットの全方向移動が実現できるか動作検証を行った。ロボットへの指令値はジョイスティックからの操作入力で、そしてジョイスティックの傾きから進行方向と移動速度を算出し与えた。また、押しボタンで右、左旋回が可能ないように設定した。走行環境は車輪のスリップを抑えるため、摩擦を得やすいように絨毯の上で走行させた。走行時の映像を図5～図9に示す。これらの走行実験より、全方向への移動が実現できることを確認した。

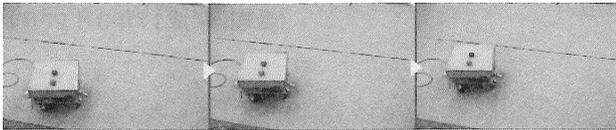


図5: 前進移動

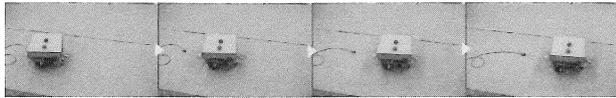


図6: 横移動



図7: 斜め移動



図8: 旋回移動

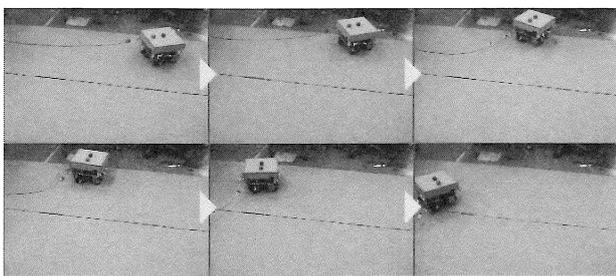


図9: 円移動

4・2 軌道追従実験

4・2・1 実験方法

ロボットに目標位置(40[cm]),200[cm])を与え、現在位置から目標位置までの直線走行を行った。実験環境は、車輪がスリップするので床に絨毯を敷き、床上には障害物がなく、カラーマークと同じ色のものは排除した。ビデオカメラは広範囲が撮影

できるようにできるだけ高く設置した。ビデオカメラの設置条件は高さ183cm,Z軸との成す角は45.47°とした。ビデオカメラ映像を外部PC2に入力し、カラー2値化処理を行いロボットの位置・姿勢を取得し、その情報を有線LAN経由で外部PC1に送信し、外部PC1でその情報を元にロボットへの指令値を計算をさせ、CUnet経由でロボットに指令値を送信した。カラーマークはピンポン(直径4[mm])を使用し、カラーズプレー(青,緑)で色を付けた。

4・2・2 実験結果

走行映像を図10に示す。

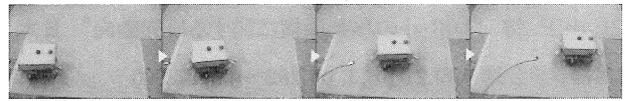


図10: 実験映像

図11は軌道追従実験時のビデオカメラから取得した軌道をグラフ化したものである。

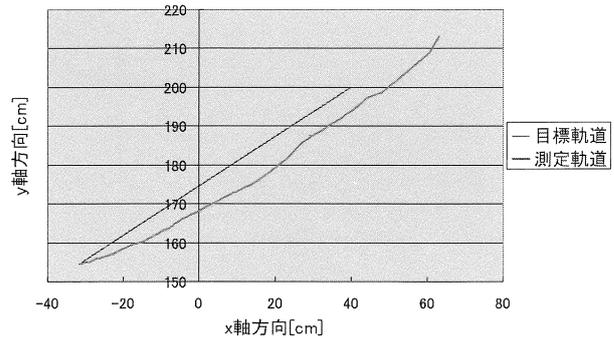


図11: 軌道グラフ

太い線はロボットが実際に走行した軌道で、細い線は目標軌道である。目標位置との誤差が生じているが、目標軌道に沿った軌道を取りつつ走行したといえる結果となった。誤差の原因として、制御系におけるPIDコントローラのチューニング不足のため理想的な制御がかからず目標軌道とのずれを生じたと考えられる。また、カメラ座標からワールド座標に変換した値と実測値との誤差等の要素が挙げられる。

5. 結論

オムニホイールを用いた4輪独立駆動機構で全方向移動を実現した。そして、ロボットの運動学モデルと軌道追従制御をシミュレーション上で検証し有効性を確認したあと、実機実験で外部カメラを用いてロボットの位置と姿勢を測定し軌道追従制御をかけてロボットの現在位置から目標位置まで走行させ動

作確認をした.今後の課題として,今使用しているオムニホイールのフリーローラ部の素材では床上でスリップしてしまうので,摩擦係数が大きいウレタン素材などに変更し,スリップを低減させる必要がある.また,障害物との衝突は絶対に避けるべきことなので障害物回避を行うセンサ類の搭載は必要である.

参考文献

- 1) 藤原 茂喜 “全方向移動型パワーアシストカートの操作性向上” 日本ロボット学会誌 Vol.22 No.2 pp.223~229,2004
- 2) 山下 淳 “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~p.292,2003
- 3) 湯 軍 “直交車輪機構を用いた全方向移動ロボット車の自律制御” 日本ロボット学会誌 Vol.17 No.1 pp.51~60, 1999

- 4) 藤沢 正一郎 “四輪独立駆動型全方向移動ロボットの運動学と走行特性” 日本機械学会論文集(C編) 62巻604号 (1996-12)
- 5) 広井 和男 “シミュレーションで学ぶ自動制御技術入門” CQ出版社
- 6) 嶋田 真人 “対話型全方向移動ロボットの製作” 平成15年度3月 愛知工業大学工学部電子工学科卒業論文
- 7) 高橋 友一 “小型ロボットの基礎技術と製作—RoboCup 小型リーグへの挑戦” オーム社出版局
- 8) 川合 康司 “自律電動車椅子の知的制御系の構築” 平成15年度3月 愛知工業大学大学院工学研究科修士課程論文

(受理 平成17年3月17日)