ホロノミック全方向移動ロボットの開発

和田 正義^{*1} 森 俊二^{*2}

Development of a Holonomic and Omnidirectional Mobile Robot

Masayoshi Wada^{*1} and Shunji Mori^{*2}

This paper presents a new type of holonomic and omnidirectional mobile robot. A steered driving wheel for holonomic and omnidirectional robots is proposed which has an offset distance between the steering axle and the wheel axle along a direction of wheel traveling like a caster which can use a conventional tires (a rubber tire or a pneumatic tire). A kinematics of the wheel mechanism is analyzed and a new control strategy is introduced to avoid a nonholonomic constraints on the wheels. The driving wheel realizes an active "caster motion" which enables 2DOF motions in the two dimensional plane. The concept of a holonomic robot with the proposed driving wheels is implemented and tested on a two-wheeled vehicle prototype. Experimental results show that the prototype robot realizes smooth holonomic and omnidirectional motions and precise mobility.

Key Words: Holonomic system, Non-holonomic Constraints, Omnidirectional Robot, Kinematic Modeling

1. はじめに

現在、ロボットの移動機構として、車輪型機構が広く用いられている。2輪独立駆動型、乗用車型（駆動輪＋操舵輪）などがその代表的なものであるが、これらは非ホロノミックなシステムであり、その動作は非ホロノミック拘束と呼ばれる拘束条件を機構的に有しており、高度な移動性が妨げられている。また、全輪操舵型の全方向移動ロボットが開発されている[3]。この車両に用いられている駆動輪は、車輪駆動用および操舵軸用の計2個のモータを有しており、それぞれ独立に車輪軸および操舵軸を駆動できるよう操舵軸を車輪の進行方向に対して横に配置することで機構的に非干渉化を施している。しかし、ロボットの並進動作や旋回動作を行う際に車輪の向きをそろえる、いわゆる準備動作が必要であり、このロボットも非ホロノミックなシステムの一つである。

このような非ホロノミックな移動機構を制御するためには、上述の拘束条件を満たすような目標軌道（ロボットが動きうる軌道）を設計する必要があるが、また、ロボットの高精度制御のためのフィードバック制御器の設計が困難であるという問題がある。

一方、高度な移動性能を有する車輪型移動機構として、ホロノミック全方向移動ロボットの研究が進められている。ホロノ

ミック全方向移動ロボットは、その動作に拘束条件がなく、前述の非ホロノミックな移動ロボットの問題を解決するものである。このタイプのロボットは、あらゆる方向に移動、旋回できる（全方向性）だけでなく、いつでも任意な3自由度（平面X、Yおよび姿勢 ϕ ）の速度を発生することができる（ホロノミック性）ので、各自由度において独立な設計を行うことができ、また、従来の線形フィードバック制御による高精度制御が可能となる。つまり、XY- ϕ ステージのように制御ができる移動機構といえる。この制御性および高度な移動性から、狭い環境での作業や複雑な動作が要求される作業、あるいは多数の移動ロボットのシステムなどへの適用が期待されている。ホロノミック全方向移動ロボットは、これまでも提案されているが、これらの多くは、駆動車輪、あるいはクローラの周囲に受動的に回転するフリーローラを多数配置した特殊な形態の車輪機構[4]～[6]を使用している。これらの機構は、接地するフリーローラの切り替えに伴い、接地点の位置が駆動輪に対して変動するために、動作、および速度計測の精度に限界があること、高速走行時に振動が発生しやすいこと、あるいは段差乗上げ能力が低いこと、などが問題点として指摘されている[8]。また、球状の車輪を二方向に駆動する機構も一方で提案されているが[7]、車輪を摩擦により駆動するため、駆動トルクに限界があり、すべりが発生する可能性があることが問題である。

さらに、これらの機構の共通の問題点として、機構の複雑さ、接地面積の低下による耐荷重の低さが挙げられる。

以上をまとめると、非ホロノミックな移動機構は機構的には簡易であるが、制御性、移動性に問題があり、また、ホロノミッ

原稿受付 1996年9月24日

^{*1}富士電機(株)

^{*2}(株)富士電機総合研究所

^{*1}Fuji Electric Co., Ltd.

^{*2}Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

くな移動機構は、制御性、移動性については優位であるが、機構の複雑さ、耐荷重性、段差乗上げ能力などの機構的問題を含んでいると言うことができる。

本論文では、これらの欠点を解決する車輪機構を有するホロノミック全方向移動ロボットを提案する。

今回用いる車輪機構では、キャスタと同様な軸配置を有する車輪をロボットの駆動輪として使用するため、ゴムタイヤや空気圧タイヤのような通常のタイプのタイヤが装着可能である。この形態の車輪機構は、非ホロノミックシステムとして知られているが、提案する全方向移動ロボットでは、車輪の非ホロノミックシステムの特性を回避する制御を施し、かつこれを2輪以上組み合わせることで、ロボットのホロノミックな動作特性を実現することができるものである。

以下、駆動輪のモデル化とその制御方法、および2輪駆動移動ロボットのモデル化と制御方法を述べ、シミュレーションにより検討する。また、これを実現する試作機の設計の概要、および試作機を使用した走行実験結果について報告する。

2. オフセット駆動輪のモデル化と制御

2.1 オフセット駆動輪の概念

前章で述べたこれまでに開発されたホロノミックな移動ロボットのための車輪機構は、すべて車輪自体がホロノミックな特性を有するものであり、受動軸、能動軸をあわせると平面3自由度(X, Y, ϕ)のいずれにも運動が可能な機構であった。したがって、操舵機能を持った車輪機構はなく、すべてロボット本体に固定されていた。しかしながら、ホロノミックなロボットの運動においてロボットの任意の1点に注目すると、その点は平面上の任意の方向に任意の大きさで移動をしていることが分かる。したがって、平面3自由度の系に対して、ホロノミックな特性を有する車輪機構を使用する必要は必ずしもなく、任意の方向に任意の速度を発生する2自由度の機構を用いることで十分であることが分かる。

ここで通常の操舵車輪について考察する。操舵車輪は二つのアクチュエータを有しているにもかかわらず、運動の各瞬間にはロボット本体に対して、1自由度の運動(車輪の転動方向への速度)しか与えていない。これは、二つのアクチュエータのうち、操舵用のアクチュエータは車輪の方向を変えるためのみ使用されており、かつ車輪の操舵の運動は、ロボット本体の運動に直接影響しないように、機構上非干渉化されているためである。これは、接地点と交わるように車輪操舵軸が配置されていることが要因である。したがって、これを意識的にずらすことにより車輪操舵用アクチュエータの運動とロボット本体の運動を干渉させることができ、操舵車輪が2自由度の運動能力を持つ可能性が生じる。

Fig. 1 に各種の操舵車輪の模式図(上面図)を示す。ロボット本体は操舵軸を介して車輪と接続されているので、操舵軸の水平面上の並進運動は、ロボット本体に与えられる運動と考えられる。Fig. 1 (a) は従来の操舵車輪であり、車輪の接地点と交差するように操舵軸が配置されている。このとき、操舵軸は車輪の回転により速度 V_w で車輪の転動方向に移動する。しかし操舵軸の駆動によっては、操舵軸の水平面上の移動は起こらず

Fig. 1 Series of steered driving wheel

Fig. 2 Schematic of offset steered driving wheel

車輪の方向が変化するのみである。

Fig. 1 (b) は操舵軸を車輪の転動方向に対して垂直方向に偏差を持たせて配置した車輪である。従来の操舵車輪同様、操舵軸は車輪の回転駆動により速度 V_w で車輪の転動方向に移動する。しかし、この車輪機構において操舵軸を回転駆動させるとき、駆動トルクの反作用により操舵軸自身が接地点を中心に円運動を行うことが予想される。このとき操舵軸中心に発生する並進速度を V_s とすると V_s は常に車輪に対して平行となる。これより車輪軸、操舵軸を同時に駆動したときの操舵軸の移動速度 V は常に車輪に対して平行となるので各瞬間には1自由度の運動しか達成できず、移動性としては、従来の操舵車輪と同様であることが分かる。前述の全輪操舵全方向移動ロボット[3]はこの車輪の軸配置を用いている。

Fig. 1 (c) は操舵軸を車輪の転動方向に偏差を持たせて配置した車輪である。このとき、操舵軸の駆動により発生する並進速度 V_s は常に車輪に対して直角方向をとり、また車輪の駆動による並進速度 V_w は車輪進行方向であるので、 V_s と V_w とは常に直交する速度を操舵軸にそれぞれ与えることになる。したがって、 V_s と V_w を制御することで、任意の方向の任意の大きさの操舵軸の移動速度 V を発生させられることが期待できる。

以降、Fig. 1 (c) の車輪機構(以下オフセット駆動輪)について検討する。

2.2 オフセット駆動輪のモデル化

オフセット駆動輪の運動学モデルについて考える。駆動輪には、Fig. 2 に示すように、操舵軸の回転中心に車輪座標系

($O_w-X_wY_w$) を X 軸が車輪の進行方向と一致するように設定する。

このとき、車輪の状態は、絶対座標系 ($O-XY$) 上における車輪座標系の原点 O_w の位置 (x_w, y_w) と、絶対座標系 X 軸と車輪座標系 X_w 軸のなす角度 ϕ_w により表される。

また車輪に対する操作量としては、車輪の回転角速度 ω_w と操舵軸の回転角速度 $\dot{\xi}_w$ を入力することができる。

このとき、車輪の状態ベクトル $\mathbf{x}_w = (x_w, y_w, \phi_w)^T$ の時間微分と入力ベクトル $\mathbf{u}_w = (\omega_w, \dot{\xi}_w)^T$ との関係の求め線形化を行うと、以下に示すオフセット駆動輪の運動学モデルが求められる。

$$\dot{\mathbf{x}}_w = \mathbf{B}_w \mathbf{u}_w \quad (1)$$

ただし、

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} r \cos \phi_w & -s \sin \phi_w \\ r \sin \phi_w & s \cos \phi_w \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

r : 車輪半径

s : 車輪軸と操舵軸のオフセット量

この形態の車輪は非ホロノミックシステムとして知られ、古代のまさかりプラニメータとしても紹介されている [11]。

式 (1) のような非ホロノミックシステムの場合、マトリクスの各行の方程式を用いて入力ベクトルの要素を消去することができ、以下に示す状態ベクトルの時間微分の各要素間の変換関係式が得られる。

$$\mathbf{G}_w \dot{\mathbf{x}}_w = \mathbf{0} \quad (2)$$

ただし、

$$\mathbf{G}_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{s} \sin \phi_w & -\frac{1}{s} \cos \phi_w & 1 \end{bmatrix}$$

この形態の関係式は、状態ベクトルの時間微分 $\dot{\mathbf{x}}_w$ の各要素の独立性を拘束するものであり、非ホロノミック拘束と呼ばれている。この拘束は、車輪型ロボットに共通の式 (2) の形式で表現され、機構の構造に固有のものである。

2.3 オフセット駆動輪の制御

2.3.1 運動学モデルに基づく制御

次にオフセット駆動輪の制御方法について考える。

前節で導出された運動学モデルに基づき駆動輪の運動を制御するためには、逆運動学モデルを求める必要がある。

提案する駆動輪は 2 入力 3 出力のシステムであり、 $\mathbf{B}_w$ マトリクスは正方行列ではないので、逆行列を求めることは不可能である。このような場合、擬似逆行列を用いて逆運動学モデルを求めることが通常行われる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_w &= \mathbf{B}_w^{-1} \dot{\mathbf{x}}_w \\ &= \{[\mathbf{B}_w]^T \mathbf{B}_w\}^{-1} [\mathbf{B}_w]^T \dot{\mathbf{x}}_w \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \cos \phi_w & \frac{1}{r} \sin \phi_w & 0 \\ -\frac{s}{s^2+1} \sin \phi_w & \frac{s}{s^2+1} \cos \phi_w & \frac{1}{s^2+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\phi}_w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

しかし、非ホロノミックシステムを制御する場合、この擬似逆行列を用いた制御手法は不可能であることが知られている [9]。ここで例えば、式 (2) の拘束を満足しないような $\dot{\mathbf{x}}_w$ ベクトル ($[\dot{x}_w, \dot{y}_w, \dot{\phi}_w] = [0, \dot{y}, 0]$ など) を入力した場合でも、入力ベクトル $\mathbf{u}_w$ の解を得ることができる ($\mathbf{u}_w = [\dot{y}/r \sin \phi_w, \dot{y}s/(s^2+1) \cos \phi_w]$)。しかし、要求した動作は、“車輪の姿勢を変化させずに横方向に速度 $\dot{y}$ で移動すること”であり、この機構でこの動作を達成することは不可能であることは明らかである。

これは、式 (3) がすでに機構の非ホロノミック拘束条件を満足していないことを意味する。したがって、非ホロノミック拘束を満たす $\mathbf{x}_w$ ベクトルを計画する必要が生じ、2 輪独立駆動方式の車両制御と同様な問題を解決しなければならない。これより、従来の制御方法では、非ホロノミックシステムの問題を回避することができない。そこで、以下に示す低次元運動学モデルに基づく制御方法を提案する。

2.3.2 低次元運動学モデルに基づく制御

車輪型移動ロボットの非ホロノミックシステムにおける問題は、最終的に制御したい状態ベクトル $\mathbf{x}_w$ の各要素は独立であるにもかかわらず、直接制御できる状態ベクトルの時間微分 $\dot{\mathbf{x}}_w$ は、拘束条件が存在するために、各要素が独立でない（自由度が低い）ということである。

車輪型ロボットを制御対象とする場合は、ロボットの位置、姿勢すべてを制御することが要求されるため、拘束の存在する $\dot{\mathbf{x}}_w$ のすべての要素を計測、制御せざるを得ない。これに対して、制御対象が車輪である場合には、 $\dot{\mathbf{x}}_w$ のすべての要素を制御する必要は必ずしもない。そこで、制御する要素の数を、拘束条件の数に応じて減らすことを考える。今回のシステムには一つの拘束条件が存在するので、制御量を一つ減らすことができる。

2.1 節の検討から、車輪に必要とされる機能は、ロボット本体のある点に対し任意の方向の任意の大きさの速度を発生させることであった。これは、運動学モデルにおける $\dot{\mathbf{x}}_w$ 、および $\dot{\mathbf{y}}_w$ を制御することにほかならない。したがって、車輪の姿勢 ϕ_w を積極的に制御しようとするのをあきらめ、制御量から除いても今回の制御の目的に反しない。これより、状態ベクトルの要素から、 ϕ_w を除いたものを新たに状態ベクトル $\mathbf{x}_{w0}$ とし、車輪の運動学モデルを求めると、

$$\dot{\mathbf{x}}_{w0} = \mathbf{B}_{w0} \mathbf{u}_w \quad (4-1)$$

$$\dot{\phi}_w = \frac{1}{2} \sin \phi_w \dot{x}_w + \frac{1}{s} \cos \phi_w \dot{y}_w \quad (4-2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{w0} &= \begin{bmatrix} r \cos \phi_w & -s \sin \phi_w \\ r \sin \phi_w & s \cos \phi_w \end{bmatrix} \\ \mathbf{x}_{w0} &= [x_w \ y_w]^T \end{aligned}$$

を得る。このとき、制御量から除外された $\dot{\phi}_w$ は、無制御状態とはならず、制御される $\dot{x}_w, \dot{y}_w$ との非ホロノミック拘束式 (4-2) によって必然的に、しかも一意に決定される内部変数として扱われる。したがって、駆動輪の姿勢の角速度 $\dot{\phi}_w$ 、および姿勢 ϕ_w は、意図的に制御することはできないが、 $\dot{x}_w, \dot{y}_w$ を

安定に制御することにより、駆動輪全体を安定に制御できることが保証される。

式(4-1)において B_{w0} マトリクスは正方行列となり、逆運動学モデルは以下のように容易に得ることができる。

$$\begin{aligned} u_w &= B_{w0}^{-1} \dot{x}_{w0} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \cos \phi_w & \frac{1}{r} \sin \phi_w \\ -\frac{1}{s} \sin \phi_w & \frac{1}{s} \cos \phi_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \end{bmatrix} \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、 $\dot{x}_w, \dot{y}_w$ 間には拘束条件が存在しないので、それぞれ独立に選択することが可能である。また、式(5)より車輪のいかなる状態(いかなる ϕ_w)においても B_{w0}^{-1} は計算可能であることから、特異点は存在しないことが分かる。

2.4 車輪シミュレーション

2.2節で求めたオフセット駆動輪の運動学モデルを用い、2.3節で提案した制御方法の有効性をコンピュータシミュレーションによって検討した。シミュレーションでは、以下の仮定を設けた。

- 1) 車輪と床は点接触している(車輪幅は零)
- 2) 車輪と床の間には滑りがない
- 3) 床は完全な平面である

また、各パラメータは以下のように設定した。

- 車輪半径 $r = 100$ [mm]
- オフセット距離 $s = 200$ [mm]
- 車輪初期位置 $x_{w0} = 500$ [mm]
 $y_{w0} = 250$ [mm]
- 車輪初期姿勢 $\phi_{w0} = 0$ [deg]

Fig. 3 にシミュレーションの結果の一例を示す。

ここでは、車輪の初期姿勢に対し、後方 45 [deg] の方向に直線軌道が与えられ、この目標軌道に車輪の操舵軸の中心を追従させるよう制御することが目的である。駆動輪は、はじめのうち姿勢を左に変化させながら、車輪を後進の方向に回転させ、その後方向転換を行うと同時に、車輪の回転を前進の方向に切替え、駆動輪自体の姿勢が目標軌道である直線の向きと同じになるように移動していることが分かる。

Fig. 3 Simulation result of the single wheel (Top view)

ここで、これら一連の動作は、いわゆるキャスタの動作と同様であることが分かる。キャスタは、操舵軸が上部のロボットのフレームからの力により動かされるのに従って車輪軸や、操舵軸が受動的に回転するのに対して、オフセット駆動輪は、車輪軸や操舵軸を能動的に駆動することで操舵軸を移動させる。つまり、キャスタとオフセット駆動輪は、位置、姿勢、または速度的には同様な動作を行うが、力の伝達が逆であると言えることができる。

これより、キャスタが追従できるロボットの動作は、オフセット駆動輪により実現できることが期待できる。

3. 全方向移動ロボットの制御

3.1 全方向移動ロボットのモデル化

前章では、オフセット駆動輪の制御とその動作について検討し、同駆動輪が、キャスタと同じ動作を実現することで、任意の方向、任意の大きさの速度を操舵軸の回転中心に発生させることができる2自由度の速度発生機として機能することが分かった。

移動ロボットは、並進2自由度(X, Y)、および姿勢1自由度(ϕ)の合計3自由度を有するので、必要とする駆動輪の最小数は2となる。

Fig. 4 に2輪駆動全方向移動ロボットの模式図を示す。ロボット座標系($O_v-X_vY_v$)はロボットの中心に X_v 軸がロボットの前方向と一致するように設定する。また、各駆動輪 A, B の座標系は($O_k-X_kY_k: k=a, b$)とし、前章と同様に設定する。

このとき、ロボット座標系原点 O_v の絶対座標系における各軸方向の速度およびロボットの姿勢角速度($\dot{x}_v, \dot{y}_v, \dot{\phi}_v$)と、各操舵軸中心の絶対座標系における速度($\dot{x}_a, \dot{y}_a, \dot{x}_b, \dot{y}_b$)との関係を求め、線形化を行うと、以下のロボットの運動学モデルを得る。

$$\dot{x}_v = B_v u_v \quad (6)$$

ただし、

Fig. 4 Overview of the two-wheeled omnidirectional robot

$$B_v = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{W} \cos \phi_v & \frac{1}{W} \sin \phi_v & -\frac{1}{W} \cos \phi_v & -\frac{1}{W} \sin \phi_v \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_v = [x_v \ y_v \ \phi_v]^T$$

$$\mathbf{u}_v = [\dot{x}_a \ \dot{y}_a \ \dot{x}_b \ \dot{y}_b]^T$$

また、ロボットの逆運動学モデルは以下のように得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_v &= B_v^{-1} \dot{\mathbf{x}}_v \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{W}{2} \cos \phi_v \\ 0 & 1 & \frac{W}{2} \sin \phi_v \\ 1 & 0 & -\frac{W}{2} \cos \phi_v \\ 0 & 1 & -\frac{W}{2} \sin \phi_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\phi}_v \end{bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

入力ベクトル $\mathbf{u}_v$ には、幾何学的拘束条件（車輪の操舵軸間の距離は一定）が存在するので、四次元入力ベクトル $\mathbf{u}_v$ は、三次元ベクトル $\dot{\mathbf{x}}_v$ から一意に決定することができる。

3.2 ロボット走行シミュレーション

ロボット、およびオフセット駆動輪のモデル、式 (1) (6) に対して、提案する制御方策式 (5) (7) をコンピュータシミュレーションによって検討した。

シミュレーションにおける仮定は、2.4 節と同様とし、各パラメータは以下のように設定した。

- 車輪半径 $r_a = r_b = 100$ [mm]
- オフセット距離 $s_a = s_b = 200$ [mm]
- 車輪間距離 $W = 500$ [mm]
- ロボット初期位置 $x_{v0} = 500$ [mm]
 $y_{v0} = 250$ [mm]
- ロボット初期姿勢 $\phi_{v0} = \pi/2$ [rad]

Fig. 5 にシミュレーション結果の一例を示す。ロボットは旋回動作を行いながら、前方 45 [deg] の方向に並進運動を行っている。初期状態において、車輪は互いに対向するように設定されており、従来の全輪操舵型ロボットであれば、車輪の初期化が必要である。これに対して本全方向移動ロボットは、いかなる車輪の向きからでも即座に並進、および回転運動を開始することができることが確認された。

4. 試作機的设计

4.1 車両機構設計

試作機はオフセット駆動輪を 2 輪搭載、対角に配置し、他方の対角にキャスタを配置する構成とした。試作機の仕様を以下に、また、外観を Fig. 6 に示す。

- 車両寸法: $w 750 \times d 1150 \times h 340$ [mm]
- 車両質量: 約 115 [kg]
- 許容荷重: 300 [kg]
- 車輪径: 150 [mm]
- 車輪幅: 60 [mm]

Fig. 5 Simulation result of the omnidirectional robot

Fig. 6 Holonomic and omnidirectional mobile robot

Fig. 7 Offset steered driving wheel

オフセット距離: 55 [mm]

駆動モータ: AC サーボモータ (300 [W])

Fig. 7 にオフセット駆動輪の外観を示す。操舵軸が多回転構造を有しているため、二つのモータをロボットフレームに設置し、ギアによりトルクを伝達することで配線の問題を回避した。また、車輪用モータをフレームに設置することで、操舵軸モータからの干渉が生じるが、制御により補正することで解決している。

Fig. 8 Robot control system

4.2 ロボット制御システム

ロボットの制御システムは Fig. 8 に示すように、ロボット制御レベル、車輪制御レベル A, B からなる階層構造を有する。各階層では、それぞれロボットの運動学モデル、車輪の運動学モデルに基づき、下位レベルへの指令値の計算、上位レベルへの計測値の計算（デッドレコニング法）、およびモータの速度制御、ロボットの位置決め制御を行っている。

これらの処理は、マルチバス II により結合された 3 枚の 80186 ボードコンピュータに割り当てられ、制御周期 2 [ms] により一連の処理が実行される。

5. 試作機走行試験

5.1 移動性能試験

ロボットの全方向性、およびホロノミック性が実現されているか、試作機による移動性能試験を行った。

ロボットには二つの豆電球を対角の隅に取り付け、これらの軌跡を写真に露光させることでロボットの軌跡を記録した。試験では、3 種類の走行パターンをプログラム動作により実行させた。以下のいずれの試験においてもロボットの初期状態はすべての車輪を車両進行方向に揃えている。

Fig. 9 はクランク動作であり、1.25 [m] 直進後、1 [m] 横行、再び 1.25 [m] 直進している。各動作の間には、待機時間を設定せず、前動作にて減速停止後、ただちに次の動作の方向への加速を開始している。Fig. 10 は 360 [deg] のスピントーン動作で、初期状態から旋回を開始している。Fig. 11 は旋回と並進の複合動作で、1,080 [deg] (3 回転) まで一定角速度にて旋回動作を行いながら、2.5 [m] 並進している。

これらの走行試験により、ロボットは 3 自由度をそれぞれ独立に制御でき、全方向性、ホロノミック性を必要とする動作をなめらかに実現できることを確認した。

5.2 移動精度試験

Fig. 12 に示すテストパターンによって、ロボットの移動精度試験を行った。ロボットのフレームの隅の 2 辺に二つの超音波センサを互いに直交するように取り付け、直角をなす壁に沿って走行させた際の各方向の壁からの距離を測定した。

ロボットには A, B, および C 点を、A—B—C—A の順に、姿勢を一定 ($\phi_0 = 0$) にした並進動作をプログラム動作モード

Fig. 9 Crank motion

Fig. 10 Spin turn

で行かせた。この試験においても各点における待機時間は設定せず、即座に次の動作に移行している。各試験において A 点での走行前後の位置誤差を測定し、移動精度とした。

Fig. 13 にロボットの走行軌跡の実験結果の例を、また Fig. 14 に A 点での走行前後の位置誤差の結果 (10 回の試行) を示す。10 回の試行中、位置誤差の最大値は 64 [mm] であった。これはテストパターンの総長 $(1+1+\sqrt{2})$ [m] の 1.8% にあたる。

Fig. 11 Translational motion with rotation

Fig. 12 Test pattern of the experiment

Fig. 14 Position errors at the point A (10 trials)

Fig. 13 Actual path of the robot

6. お わ り に

ホロノミック全方向移動ロボットののための駆動機構として、キャストと同様な軸構成を持ち、操舵軸に並進2自由度の速度を発生することができる車輪（オフセット駆動輪）について検討、その運動学モデルを解析した。また、車輪の非ホロノミック拘束を回避する制御手法を提案し、その有効性をシミュレーションにより検討した。

このオフセット駆動輪を2輪搭載した全方向移動ロボットの

試作機を設計、製作し、動作試験により全方向性、ホロノミック性を有する動作をなめらかに実現できることを確認した。さらに、動作精度を測定し、動作性能が実用上問題のないことを示した。

参 考 文 献

- [1] M. Wada, Y. Tominaga and S. Mori: "Omnidirectional Holonomic Mobile Robot Using Nonholonomic Wheels," 1995 IEEE Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems (IROS'95), pp.446-453, Aug., 1995.
- [2] M. Wada and S. Mori: "Holonomic and Omnidirectional Vehicle with Conventional Tires," 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3671-3676, April 1996.
- [3] E. Nakano and N. Koyachi: "An Advanced Mechanism of the Omni-Directional Vehicle (ODV) and Its Application to the Working Wheelchair for the Disabled," 1983 Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.277-284, 1983.
- [4] H. Asama, M. Sato, L. Bogoni, et al.: "Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Mechanism," 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1925-1930, May 1995.
- [5] S. Hirose and S. Amano: "The VUTON: High Payload High Efficiency Holonomic Omni-Directional Vehicle," 6th Int. Symp. on Robotics Research, Oct., 1993.
- [6] F.G. Pin and S.M. Killough: "A New Family of Omni-directional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation,

- vol.10, no.4, pp.480-489, 1994.
- [7] M. West and H. Asada: "Design and Control of Ball Wheel Omnidirectional Vehicles," 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1931-1938, May 1995.
- [8] L. Ferriere, B. Raucent and G. Campion: "Design on Omnimobile Robot Wheels," 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3664-3670, April 1996.
- [9] Y. Zhao and S.L. BeMent: "Kinematics, Dynamics and Control of Wheeled Mobile Robots," 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.91-96, May 1992.
- [10] 中村仁彦: "『非ホロノミックロボットシステム』講座第2回", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.5, pp.655-662, 1993.
- [11] 中村仁彦: "知りたい用語, 気になる概念『非ホロノミック』", 日本機械学会誌, vol.97, no.908, pp.590-593, 1994.

和田正義 (Masayoshi Wada)

1965年8月2日生。1990年東京理科大学工学部1部機械工学科卒業。同年富士電機(株)入社。1996年よりMITにて客員研究員。点検ロボット, 移動ロボット等の開発, 設計に従事。IEEEの会員。
(日本ロボット学会正会員)

森 俊二 (Shunji Mori)

1950年9月30日生。1974年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。同年富士電機(株)入社。自動機械, ロボット等の開発, 設計に従事。現在, (株)富士電機総合研究所電子機器開発研究所主任技師。計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)