双輪キャスト型駆動機構を用いたホロノミック 全方向移動ロボット

和田 正義* 高木 昭* 森 俊二*

A Mobile Platform with a Dual-wheel Caster-drive Mechanism for Holonomic and Omnidirectional Mobile Robots

Masayoshi Wada*, Akira Takagi* and Shunji Mori*

In this paper, a new wheel mechanism for holonomic and omnidirectional mobile robots is presented. The caster-drive technique is one of the feasible solutions to allow a vehicle to have holonomic and omnidirectional mobile capability with standard wheels. The caster-drive is applied to a differential-drive mechanism. A drive unit equips with two drive wheels driven by individual motors. The rotational stage, driven by the third motor, is mounted on the drive unit with its rotational center locating at the off-centered position from the mid-point of the two driving wheels. The translational position and velocity of a mobile base are controlled by the differential-drive mechanism executing a caster like behavior. The orientation of the mobile base is controlled by the rotational stage decoupled with the translational motion of the drive unit. The vehicle 3DOF are controlled by the three motors, hence the system includes no over constraint problem. In addition, the drive mechanism is very simple and could be implemented by using a traditional differential-drive mechanism.

Key Words: Holonomic Omnidirectional Vehicle, Caster-drive, Dual-wheel Caster, Over-constraint, Differential-drive Mechanism

1. は じ め に

三つのアクチュエータにより制御可能で、通常の形態のタイヤを用いたホロノミック全方向移動ロボット[†]を提案する。この移動機構には双輪キャストの形態の駆動機構が用いられる。つまり、2輪の車輪はある距離を隔てて、互いに平行に駆動機構に備えられ、また操舵軸は2輪の駆動輪の中点から車輪の進行方向にある距離隔てた駆動機構上の位置に配置される。車両にはこの駆動機構が一つ搭載され、2輪の駆動輪と、操舵軸をそれぞれ独立なアクチュエータにより駆動し、車両の3自由度を制御する。この双輪キャスト型の駆動機構に搭載される2輪の駆動輪は、操舵軸の中心が任意の方向に任意の速度で移動するように制御される。その結果、駆動機構は通常の受動的な双輪キャストと同様な動作を能動的に行い、車両本体の水平面上の位置、速度を制御する。また駆動機構上にて操舵軸を回転駆動し、駆動機構に対して車両本体を旋回運動をさせることで、車

両本体の姿勢、旋回速度を制御する。この機構によれば、車輪の転がり方向の速度、車輪の横方向の速度、および車両の旋回速度を三つのアクチュエータにより制御することが可能となることから、機構の簡単化、システムの簡素化ができるばかりでなく、過拘束の問題を根本的に解決することができる。本文では、双輪キャスト型駆動機構を用いた全方向移動車両の運動学を解析し、その結果から同車両の制御則を導出する。続いて試作機の設計を行う。さらに、試作機を用いて提案する機構、および制御則の有効性と実用性を実験により確認する。

2. 結 言

車輪型移動ロボットにおいて、ホロノミックな移動特性を持たせることは、操縦型、自走型問わず多くの利点があるものと考えられる。まず、操縦型の車両においては、その移動特性と、操縦の直感性が良く、特別な訓練を行わなくとも容易に操作ができるという点が挙げられる。特に非ホロノミックな全方向移動車両のように、操作者が車輪の状態、つまり拘束を受けている方向、動作に伴う車両の動作モードを考慮する必要がなく、また動作モード変更の準備時間もない。これは特に伝達情報量が限られ、情報伝送系に時間差の存在する遠隔操作の移動ベースでの利点として大きいものと考えられる。また、自走型の車両における利点は、従来の線形フィードバック制御により軌道

原稿受付 1999年12月13日

* (株)富士電機総合研究所

† Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

車輪型移動機構においてホロノミックな移動特性とは、移動平面内での全方向性をすでに含んでいる。ホロノミックな全方向移動という言葉は非ホロノミックな全方向移動との区別を明確にするため通例使用されている。本文においても通例に従ってこの表現を用いるものとする。

制御, 位置決めなどが可能であるという点である. よって外界センサ, 自己位置認識システムなどを併用した場合には, 高い位置検出精度を確保することができるので, 線形フィードバック制御により位置, 姿勢制御を行った場合, 極めて高精度な車両の位置決めが期待できる. さらに, 平面3自由度(位置2自由度, 姿勢1自由度)の目標軌道を各自由度間の拘束条件を考慮することなくそれぞれ独立に設計できるので, 軌道計画が極めて容易に行うことができることも大きな利点の一つである.

従来からホロノミックな特性を有する移動機構の研究は広く行われ, また多くの車両が開発された[1]~[4]. しかし, これらの多くはその動輪に特定な方向に受動的に転がることのできる機構, あるいは機能を備えている. その代表的なものは, 駆動機構の外周に沿って車輪の横方向, あるいは45度の方向に自由に回転するローラを多数取り付けけたもの[1][2], 球形の車輪を用いるもの[3][4]などがある.

しかし, これらの車輪機構はその形状の複雑さのみならず, 走行時の振動や耐荷重の低下, 走破できる段差の高さなどの問題が指摘されている[6]. さらに, 車両動作の実現には車輪数は3で十分であるにもかかわらず, 車両の安定性, レイアウトなどの問題から実用の車両の設計においては四つの車輪が搭載される場合が多く, このとき車両の3自由度は独立に駆動される四つの車輪により制御されるので, 過拘束の問題が生じる. 過拘束を含む機構では, 各アクチュエータの動作が完全に同期していないと, アクチュエータ同士が互いに力を及ぼしあい, 車両のフレームに内力が発生したり, あるいは車輪と床との間に滑りが生じる結果となる. また, このときの挙動を解析的に解くことが困難であるという問題もある. フリーローラを備えた車輪を用いた全方向移動車両の過拘束の問題を解決するために, 三つのアクチュエータにより4輪の駆動輪を同時に, しかも車両の x, y, θ をそれぞれのアクチュエータが非干渉に駆動することのできる機構が提案されている[5].

一方, キャスタ型の駆動輪(オフセット駆動輪)を用いた全方向移動車両が筆者らにより開発された[7]. これは, 通常のタイヤを装着できるキャスト型の駆動輪, つまり, 操舵軸を車輪の進行方向に偏心させた位置に配置したもので, 車輪と操舵を独立なアクチュエータによりそれぞれ駆動することで, 車輪の2自由度の運動能力を実現するものである. この車輪機構を用いて全方向移動車両を構成するとき, 少なくとも二つの駆動輪が必要となるため, 車両には少なくとも四つのアクチュエータが必要になる. つまり, 少なくとも1自由度の冗長性を有することになり, ここで過拘束の問題が生じる. この問題は特に, どちらか一つの車輪機構のみが裏返り動作[†]を行うときに顕著な現象となって現れ, 四つのアクチュエータの動作間の同期性が崩れる結果, 車輪機構の速度と, 速度指令値との間に偏差が生じる場合がある. これは, 車両フレーム内に内力が作用するばかりでなく, 車両の走行軌跡, 特に車両姿勢に偏差を生じる原因

にもなる.

本文では, この過拘束の問題を回避するため, 新しい構造のキャスト型動輪を用いた全方向移動車両を提案する. 双輪キャスト型動輪機構は, 二つの駆動輪を駆動機構に平行に搭載し, 二つの車輪の midpoint から前方に離間した位置に操舵軸が配置される. これら二つの駆動輪と, 操舵軸は三つのアクチュエータによりそれぞれ独立に駆動される. 以降, 3章では機構の構造と制御方式の概要を説明し, 4章では運動学モデルの解析, およびシミュレーションによる動作確認を行う. 5章では試作機の設計について述べ, 試作機を使用した実験結果を6章に示し, ここで提案する機構と制御方式の有効性を確認する. 7章では本文の結論を述べる.

3. 車 輪 機 構

3.1 双輪キャスト型動輪機構

Fig. 1は双輪キャスト型動輪機構を備えた全方向移動車両の概念図である. 駆動機構には, 従来の二輪速度差の車両と同様な構成にて, 二つのモータによりそれぞれ独立に駆動される平行二輪の駆動輪が搭載される. また, 鉛直軸まわりに回転する旋回軸が, 上記2輪の駆動輪の midpoint から, 駆動輪の前方向にある距離をおいて設置され, 第三のモータにより回転駆動される. この旋回軸上には車両本体が, その中心を旋回軸の軸心と一致するように取り付けられている. また, 駆動輪の確実な接地を確保するため, それぞれの駆動輪には独立なサスペンションが備えられる. 駆動輪を駆動する各モータ軸には, エンコーダが取り付けられ, 各車輪の回転速度を検出する.

次に動作について説明する. Fig. 2に双輪キャスト型駆動機構の動作の例を示す. 二つの駆動輪が同じ速度にて前方向に回転するとき, 駆動機構は旋回をせずに速度 V_w にて直進する(Fig. 2(a)). また, 駆動輪が同じ速度にて互いに逆方向に回転するときには, 駆動機構は二つの駆動輪の midpoint を中心に旋回運動を行う(Fig. 2(b)). しかしこのとき, 車両本体は旋回軸中心に取り付けられており, この旋回軸上には駆動輪の midpoint を中心とした円の接線方向の速度 V_s が発生する. この速度 V_s の方向は駆動輪に対して横の方向であり, かつ速度 V_w と常に直交する. これらの速度 V_w と V_s はそれぞれ独立に制御可能であることから, これらの大きさを状況に応じて制御することで,

Fig. 1 Omnidirectional vehicle with a dual-wheel caster-drive mechanism

[†] 台車がキャストの向きと異なる方向に移動するとき, キャスタは徐々にその向きを変え, 最終的に台車の移動方向に向く. しかし, 台車の移動の方向と, キャスタの初期姿勢に90度以上の差がある場合, 動作の途中で車輪の向きが急激に変化し, 同時に車輪の回転が逆転する現象が現れる. この現象はキャスト型駆動輪にも同様に発生することが確認されている. 本文では, この動作をキャストの裏返り動作と呼ぶ.

Fig. 2 Instantaneous motions of the caster drive mechanism

駆動輪の横方向を含むあらゆる方向に旋回軸を移動させることが可能となる。

これは基本的には、単輪キャスト駆動機構[7]の動作を双輪キャストの形態に拡張したものであり、どちらも2自由度の運動能力を持つ車輪機構である。しかし、単輪キャスト型の駆動機構の場合には一点にて床に接地することから、車両の回転を制御することができず、車両の全方向動作を制御するために少なくとも二つの駆動機構の搭載が必要であった。これに対して双輪キャスト型の駆動機構の場合には、一つの駆動機構が二つの駆動輪を備え、2点にて床に接地するため、車両の並進方向の位置のみでなく、姿勢をも拘束することが可能である。よって、双輪キャスト型駆動機構を用いた場合には、車両に一つの駆動機構を搭載すれば十分である。

3.2 全方向車両

車両本体の並進位置、速度は駆動機構に備えられる二つの駆動輪により制御される。しかし、後に詳述するように、車両本体の姿勢を並進運動と独立して、二つの駆動輪によって制御することは不可能であるため、駆動機構上にて、第三のモータにより旋回軸を介して車両本体を回転駆動する。つまり、駆動輪は、車両本体の並進動作の制御に使用され、また、旋回軸は車両の旋回動作の制御に使用される。旋回軸駆動用モータは、エンコーダを備え、その回転速度が制御されると共に、エンコーダカウンタを用いて、車両本体と、駆動機構の相対角度を計測する。各軸を駆動するモータ、モータドライバ、制御装置はすべて駆動機構に搭載される。

また、車両本体の安定性を確保するため、その四隅をキャストにより支持する。しかし、車両本体が円形、もしくは正方形に近い形態である場合には、駆動機構前方に一つ、あるいは二つのキャストを設置することで、車両本体をキャストにより支持する必要はなくなる。

4. 運動学モデル

4.1 双輪キャスト型駆動機構

Fig. 3に双輪キャスト型駆動機構を用いた全方向移動車両の座標系の設定を示す。二つの駆動輪は距離 W を隔てて平行に備えられ、また、二つの駆動輪の midpoint から距離 s 離れた位置に旋回軸が設置されている。はじめに、二つの駆動輪の midpoint の運動について考えると、2輪速度差駆動方式による車両の運動学と同様であり、車輪の回転と駆動輪の midpoint の運動の関係は以下の式として知られている。

Fig. 3 Coordinate systems on the vehicle

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_o \\ \dot{y}_o \\ \dot{\theta}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{r}{W} & -\frac{r}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\dot{x}_o$: 駆動機構の Σ_o 座標系 x 方向の瞬間速度
 $\dot{y}_o$: 駆動機構の Σ_o 座標系 y 方向の瞬間速度
 $\dot{\theta}_o$: 駆動機構の Σ_o 座標系での瞬間旋回角速度
 r : 駆動輪の車輪半径 (左右共)
 W : 駆動輪の間の距離
 ω_R : 右駆動輪の回転速度
 ω_L : 左駆動輪の回転速度

式(1)は駆動輪の midpoint に原点が一致する座標系 ($\Sigma-O_oX_oY_o$) における、各駆動輪の回転と駆動機構の瞬間速度との関係を示したものである。双輪キャスト型駆動機構においては、駆動輪の midpoint ではなく旋回軸が設置されている位置の動作に注目することから、旋回軸中心に基準座標系 $\Sigma-O_dX_dY_d$ を設定する。式(1)に記述される運動の関係を座標系 $\Sigma-O_oX_oY_o$ から $\Sigma-O_dX_dY_d$ に変換することにより、基準座標系における駆動輪の回転と、車両の瞬間速度との関係が以下のように得られる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \\ \dot{\theta}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_o \\ \dot{y}_o \\ \dot{\theta}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{rs}{W} & -\frac{rs}{W} \\ \frac{r}{W} & -\frac{r}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

これが駆動機構の運動学モデルとなる。式(2)によれば、 y 方向、つまり車輪の横方向、への速度は零ではないことが分かる。

また、入力数は2であるのに対して出力数は3であり、この駆動機構の3自由度の速度はすべて独立には制御できない。しかし、出力の三次元ベクトルの各要素間にはある拘束条件が存在するので、二つの入力に対して、三つの出力が一意に決定される。式(2)から入力の項を消去するとその拘束条件が以下のように求められる。

$$\dot{y}_d = s\dot{\theta}_d \quad (3)$$

式(3)は非ホロノミック拘束と呼ばれ、機構的な構造に固有

な速度間の変換係数を表す条件式であり、制御などによりこれを変更することはできない。つまり、駆動機構自体は非ホロノミックなシステムであり、駆動機構の三つの状態変数は常にこの条件を満たすように変化する。この拘束条件を実際の機構の動作として考えると、駆動機構の姿勢を一定にしたまま、その横方向の速度を発生することはできないということを意味している。

以上より、駆動機構は非ホロノミックシステムであり、その3自由度はある拘束条件を満たす範囲で、二つの駆動輪の回転により決定されることが分かった。前述したように、駆動機構の拘束条件は、回転速度と y 方向の並進速度の関係を示しており、両方は独立に制御できない。一方、今回の駆動機構の制御目的は、回転軸を全方位に移動させることであるので、駆動機構の姿勢は被制御変数としないこととし、状態変数から除く。ここで、駆動機構の姿勢は式(3)の非ホロノミック拘束によって、 y 方向の速度により一意に決定され、無制御状態とはならないことに注意する。これより、式(2)は低次元化され、以下の2入力2出力の運動学モデルを得ることができる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{rs}{W} & -\frac{rs}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに含まれる駆動機構のヤコビ行列は逆行列が計算可能であり、これを用いて駆動輪の制御則が導出される。

$$\begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{W}{2rs} \\ \frac{1}{r} & -\frac{W}{2rs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

以上、式(5)に基づいて駆動輪の回転数を制御すれば、回転軸は任意の方向に任意の速度を持って移動することができる。ただし、駆動機構の姿勢変化を考慮した上で、床座標系に対して定義された目標軌道に対する、駆動機構の方向変化を逐次計算し、回転軸中心の目標速度ベクトル $\dot{x}_d, \dot{y}_d$ を決定する必要がある。Fig. 4 にシミュレーション結果の一例を示す。これは、与えられた直線軌道に対して5度と90度の初期角度を伴ったそれぞれの初期状態（紙面右側の状態、太線にて表示）から、その直線軌道に駆動機構の回転軸を追従させる動作を行わせたものである。このように駆動機構の回転動作は、初期姿勢と目標

Fig. 4 Dual-wheel caster-drive simulations

軌道の相対角度に依存するので、同じ軌道に回転軸中心を追従させる動作であっても駆動機構の回転の状態は大きく異なることが分かる。

4.2 全方向移動車両

Fig. 3 に示すように車両本体の基準座標系 $\Sigma-O_v X_v Y_v$ はその原点を駆動機構の回転軸中心上に置き、 x 軸を車両本体の進行方向に一致させるように設定する。前節にて述べた駆動機構の動作に伴い、車両基準座標系の原点 O_v は任意の方向に、任意の速度で移動する。しかし、駆動機構の姿勢は独立には制御できないことから、第三のモータによって駆動機構上に回転軸を回転駆動させることにより車両本体の姿勢を制御する。駆動機構の回転速度は、目標値としては計画できないものの、駆動輪のエンコーダを用いたデッドレコニングによる観測値や、速度指令値からの予測値として以下に示す式(6)から知ることができるので、駆動機構の姿勢変化を補償し、車両本体の床に対する姿勢を制御することが可能である。式(2)から、駆動輪の回転と、駆動機構の回転速度との関係のみを抜き出すと、以下の関係が得られる。

$$\dot{\theta}_d = \frac{r}{W}(\omega_R - \omega_L) \quad (6)$$

また、車両の状態変数と、駆動機構の状態変数の関係は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_v &= \dot{x}_d \cos \theta_s - \dot{y}_d \sin \theta_s \\ \dot{y}_v &= \dot{x}_d \sin \theta_s + \dot{y}_d \cos \theta_s \\ \dot{\theta}_v &= \dot{\theta}_d + \dot{\theta}_s \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 θ_s は、回転軸の角度、つまり、車両本体に対する双輪キャスト型駆動機構の相対角度である。

式(7)をベクトル形式に直し、式(2)を代入、整理すると、各軸の回転角速度と、車両の速度、角速度の関係が以下に示す車両の運動学モデルとして得られる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_v \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 0 \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \\ \dot{\theta}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_s \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta_s - \frac{rs}{W} \sin \theta_s & \frac{r}{2} \cos \theta_s + \frac{rs}{W} \sin \theta_s & 0 \\ \frac{r}{2} \sin \theta_s + \frac{rs}{W} \cos \theta_s & \frac{r}{2} \sin \theta_s - \frac{rs}{W} \cos \theta_s & 0 \\ \frac{r}{W} & -\frac{r}{W} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \\ \omega_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 ω_s は回転軸の駆動角速度である。式(8)に含まれる 3×3 の行列は車両のヤコビ行列 J であり、正方行列でかつ行列式も零でないことから、逆行列が求められ、車両の逆運動学モデルは以下のように得られる。

$$u_v = J^{-1} \dot{x}_v \quad (9)$$

ただし、

$$\dot{x}_v = [\dot{x}_v \ \dot{y}_v \ \dot{\theta}_v]^T$$

Fig. 5 Omnidirectional vehicle simulation

$$u_v = [\omega_R \ \omega_L \ \omega_s]^T$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta_s}{r} - \frac{W \sin \theta_s}{2rs} & \frac{\sin \theta_s}{r} + \frac{W \cos \theta_s}{2rs} & 0 \\ \frac{\cos \theta_s}{r} + \frac{W \sin \theta_s}{2rs} & \frac{\sin \theta_s}{r} - \frac{W \cos \theta_s}{2rs} & 0 \\ \frac{\sin \theta_s}{s} & -\frac{\cos \theta_s}{s} & 1 \end{bmatrix}$$

ここで、これらヤコビ行列 J 、逆ヤコビ行列 J^{-1} はいかなる θ_s に対しても計算可能であり、車両の運動学モデルには、特異点が存在しないことが確認できる。また、これは3入力3出力のシステムであり、冗長性、過拘束の問題を含まない。つまり、駆動機構は非ホロノミックシステムであるにもかかわらず、ホロノミックな動作特性を有する車両を構成することができる。車両本体の基準座標系 $\Sigma-O_v X_v Y_v$ で定義される任意の並進速度、および旋回速度を式(9)に入力することで、それを実現する駆動輪軸、旋回軸の回転速度を求めることができる。Fig. 5は車両のシミュレーション結果の一例である。ここでは、車両の後方への直進を目標値として与えている。駆動機構の姿勢が車両本体と5度ずれている初期状態からの運動を計算した。紙面右側が初期位置であり、太線にて描画されている。駆動機構は旋回軸中心を直線に追従させるためにキャストの動作に似た旋回運動を行っているにもかかわらず、車両本体の姿勢は一定で、常に直線の方角と一致していることが確認できる。

5. 試作機

提案する車両構成、および制御則の有効性を確認するため、試作機を設計、製作した。Fig. 6にその概観を、Fig. 7に下面の様子を示す。車両本体は $600^W \times 1,100^L \times 250^H$ [mm] であり、バッテリーを含む総質量は約 150 [kg] であり、その可搬質量は 250 [kg] である。駆動輪は直径 150 [mm]、幅 35 [mm] で鉄製のホイールにウレタンのライニングを施してある。駆動輪はそれぞれ独立なサスペンションにより、駆動機構に弾性支持され、約 25 [mm] の上下動を行うことができる。車両本体を支えるキャストは、旋回トルクの小さいものを選定しており、車輪径 75 [mm]、車輪幅 38 [mm]、オフセットは 22 [mm]、車輪の材質はエンジニアリングプラスチックである。駆動用モータはすべて 200 [W] の DC モータで同様の仕様のものを使用している。

駆動輪、旋回軸を駆動する三つの DC サーボモータ、モータドライバ、および車両の動作を制御する制御装置はすべて駆動機構に備えられている。電源であるバッテリー (35 [Ah] $\times$ 2)、および SS 無線装置は車両本体に搭載され、旋回軸内に備えられたスリップリングを通して駆動機構に電力供給、および通信信号の受送信を行う。Fig. 8には車両の制御系の構成を示す。

Fig. 6 Omnidirectional vehicle prototype

Fig. 7 Omnidirectional vehicle bottom view

Fig. 8 Vehicle control system

6. 実験

設計、製作した試作機を用いて、動作実験を行った。実験における走行軌跡は、写真にその軌跡を露光することで記録した。実験した軌跡は以下の3種類である。いずれの場合にも、駆動機構と車両本体の姿勢は初期状態において一致させた状態から試験を開始した。並進方向の速度は、0.15 [m/s]、で車両旋回の角速度は 0.2π [rad/s] として、実験を行った。

- 1) クランク動作: 1.5 [m] 直進動作, 1 [m] 横行後, 再び 1.5 [m] 直進する。ここで、直進動作と、横行動作の間には停止時間を設定せず、前動作の減速後ただちに次の方向への加速を始める。

- 2) 定置旋回：車両中心まわりに 720 度旋回。
- 3) 旋回を伴う直進：車両中心まわりに一定角速度にて旋回しながら、一定速度にて並進動作（3[m] 直進しながら 720 度旋回）。

Fig. 9 Crank motion

Fig. 10 Spin turn

Fig. 11 Frisbee motion

Fig. 9 から Fig. 11 に実験結果を示す。いずれも振動がなく滑らかな運動を行うことが確認された。

7. 結 論

通常の形態のタイヤを装着できるホロノミック全方向移動ロボットの新しい車輪機構として、双輪キャスト型の駆動機構を提案した。これは、2 輪の駆動輪、および旋回軸をそれぞれ独立に駆動する三つのモータにより、車両を制御するものである。この機構は車両の 3 自由度を三つのモータにより駆動、制御するので、根本的に過拘束の問題を含まない。この駆動機構の運動学モデルを解析し、特異点、および冗長性が存在しないことを示した。また、運動学モデルに基づいた車輪機構の非ホロノミック拘束を回避する制御方法を提案し、車両本体のホロノミックな全方向動作が実現可能であることを示した。これらの機構、および制御方式を実現する試作機を設計、製作し、試作機を用いた実験では、ホロノミックな移動特性を有し、かつ滑らかな全方向動作ができることを確認した。

双輪キャスト型駆動機構は、機構が簡易であること、サスペンション機構の適用が容易であること、車輪径が比較的大きくとれること、あるいはアクチュエータの数が理論的に最小の 3 であること、などが利点として挙げられる。一方、キャストなどの受動輪の設置が必要になること、駆動輪の数は常に 2 で、その配置がほぼ固定的なことから設計の自由度が少ないこと、などが短所となる場合がある。しかし、その車輪構成、機構が類似していることから、従来速度差駆動方式の車両によって構成されてきた低床型搬送台車や、小型移動ロボット、車椅子などの移動ベースとしての適用などに特に有効であると考えられる。

参 考 文 献

- [1] H.P. Moravec Ed: "Autonomous Mobile Robots Annual Report - 1985," Robotics Institute Technical Report, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA., 1986.
- [2] S. Hirose and S. Amano: "The VUTON: High Payload High Efficiency Holonomic Omni-Directional Vehicle," 6th Int. Symp. on Robotics Research, Oct. 1993.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] H. Asama 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.
- [6] L. Ferriere, B. Raucent and G. Campion: "Design of Omnidirectional Robot Wheels," 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3664-3670, Apr. 1996.
- [7] 和田正義, 森俊二: "ホロノミック全方向移動ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.8, pp.1139-1146, 1997.
- [8] M. Wada and S. Mori: "Holonomic and Omnidirectional Vehicle with Conventional Tires," 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3671-3676, Apr. 1996.
- [9] M. Wada: Omnidirectional Vehicle and Method of Controlling the Same, US Patent 5,924,512. 1999.
- [10] 高木昭, 森俊二, 川田辰実, 奥澤好之, 和田正義: "二輪速度差ユニットと旋回軸による全方向移動車両の開発", 第 15 回日本ロボット学会

学術講演会予稿集, pp.839-840, 1997.

[11] 和田正義, 高木昭, 川田辰実, 森俊二: “ホロノミック全方向車両の

実用化に関する検討”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 講演論文集 1P2-40-056(1)-(2), Jun. 1999.

和田正義 (Masayoshi Wada)

1965年8月2日生。1990年東京理科大学工学部一部機械工学科卒業。同年富士電機(株)入社。1996～1998年マサチューセッツ工科大学機械工学科にて客員研究員。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)

高木 昭 (Akira Takagi)

1962年9月15日生。1989年電気通信大学電気通信学部情報数理工学科卒業。同年富士電機(株)入社。ロボット等の制御システムの研究開発に従事。

(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。(株)富士電機総合研究環境技術研究所主任研究員, 計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)