複数のアクティブ双輪キャストアセンブリを用いた 全方向移動ロボット車*

韓 福 華^{*1}, 山 田 隆 明^{*1}
渡 辺 桂 吾^{*2}, 泉 清 高^{*3}

An Omnidirectional Mobile Robot Using Multiple Active Dual-Wheel Caster Assemblies

Fuhua HAN, Takaaki YAMADA,
Keigo WATANABE^{*4} and Kiyotaka IZUMI

^{*4} Graduate School of Science and Engineering, Saga University, 1-Honjomachi, Saga, Saga, 840-8502 Japan

Recently, high mobilities of vehicles in industries are required for the automation of inspections and special works in narrow space. In this paper, we present a new type of holonomic and omnidirectional mobile robot platform using some driving assemblies, one of which consists of two independent driving wheel mechanisms just like active dual-wheel caster with an offset steered axis. The kinematic models of the wheel mechanism and mobile robot using two and three driving assemblies are derived, and their models are used to construct a feedback control system based on a resolved velocity control for the robot. The effectiveness of the present method is illustrated by some computer simulations. Finally, the prototype of a mobile robot platform using two driving assemblies is given to prove the performance experimentally.

Key Words: Holonomic Platform, Omnidirectional Mobile Robot, Active Dual-Wheel Caster, Kinematic Model, Resolved Velocity Control

1. 結 言

通常の2輪独立駆動型あるいは前輪操舵後輪駆動型移動ロボット車は、生産工場や病院内において現在では必須の移動ロボット車として色々と利用されている。しかし、この種の移動ロボット車は非ホロノミック拘束により平面内においてX-Yの2自由度運動しか実現できず、いわゆる横運動が行えない。したがって、機構的制約により高度な移動性が妨げられ、通路の幅を広くしなければならない。これに対して、平面2自由度に加えてZ軸まわりの旋回も独立に行える全方向移動ロボット車が近年注目されている⁽¹⁾。このうち、3自由度運動が瞬時に行えるホロノミック全方向移動ロボット車は、特に実用性の点のみならず、運動学的視点からも興味を持たれ今までに種々の移動機構が提案されている^{(1)~(3)}。2個の直交車輪機構からなるア

センブリを3個用いた全方向移動ロボット車はその一つの例である^{(4)~(6)}。この場合、動作に拘束条件がなく、高度な移動性を有しているが、その反面、段差乗り越え能力、耐荷重性の低さまたは機構の複雑さなどの問題点が残っている。特に、これらの問題点は、球状車輪や直交車輪あるいはユニバーサル車輪等の特殊車輪を用いる全方向移動ロボット車に共通の問題である。

上記の問題点を克服するために、全方向移動ロボット車の車輪機構として、特殊車輪を使わずに普通のタイヤを装着できる全方向移動ロボット車が注目されている。今まで、この種の全方向移動ロボット車の研究は非常に少ない。中野らは操舵付き車輪機構を利用する全方向移動ロボット車を既に開発している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その操舵付き車輪機構には操舵軸が車輪の横に配置されており、横方向の並進運動あるいは回転運動を行うときには車輪の方向をあらかじめ調整しなければならない。この点からすると、彼らの移動ロボット車は非ホロノミックタイプの全方向移動ロボット車の一種である。

* 原稿受付 1999年6月30日。

^{*1} 佐賀大学大学院(〒840-8502 佐賀市本庄町1)。

^{*2} 正員, 佐賀大学大学院工学系研究科。

^{*3} 正員, 佐賀大学理工学部。

E-mail: watanabe@me.saga-u.ac.jp

Fig. 1 Model for two independent driving wheels mechanism

Fig. 2 Model for active dual-wheel caster with offset

一方、和田らはオフセットを有する操舵付き車輪機構を利用するホロノミックな全方向移動ロボット車を提案している⁽⁹⁾。中野らの操舵付き車輪機構とは異なり、和田らの車輪機構では操舵軸が車輪の前方に配置されており、瞬間的には平面上2自由度の速度を発生できる。

本稿では、2輪独立駆動型車輪機構の前方に受動的オフセット操舵軸を設けた「アクティブ双輪キャストアセンブリ機構」を有する全方向移動ロボットプラットフォームを提案する。本アクティブ双輪キャストアセンブリ機構では、左右輪の回転速度差により受動的オフセット操舵軸まわりに、和田らの機構と同様な2自由度の速度を発生することができる。もちろん、普通のタイヤを利用することが可能であり、機構も単純である。さらに、このようなアセンブリ機構を2個以上組み合わせることにより、ホロノミックな全方向移動ロボットプラットフォームが実現可能となる。

以下、2節ではアクティブ双輪キャストのモデル化について述べる。3節では2個のアクティブ双輪キャストを用いた全方向移動ロボット車の構成と制御について説明する。さらに、4節では3個のアクティブ双輪キャストを用いた場合の議論を行う。5節では2個のアクティブ双輪キャストを用いた全方向移動ロボット車の実機構成と実験結果について説明する。最後に、6節で結言を述べる。

2. アクティブ双輪キャストのモデル化

2.1 オフセットを有するアクティブ双輪キャスト車輪機構 ホロノミック特性を有する全方向移動ロボット車は、そのロボット自体が平面(X, Y)上の2

Fig. 3 One-wheel caster and dual-wheel caster

自由度の速度とその姿勢角速度を瞬間的に発生し、かつ独立に制御できる。しかし、そのロボットに使用される車輪機構は必ずしもホロノミック特性を持つ必要はない。

まず、従来の2輪独立駆動型移動機構について考察する。図1に示すように、従来のものは操舵軸が車輪の回転軸の中心に配置されており、瞬間的に前進速度 V_x しか発生できず、横方向の速度を発生できない。この車輪機構が平面上1自由度の運動能力しか持たないことは明らかである。

図2に本研究で利用したオフセットを有するアクティブ双輪キャスト車輪機構を示す。この機構では操舵軸を車輪回転軸の前方に配置しており、2つの独立駆動の車輪の回転差により操舵軸中心に前進速度 V_x だけではなく、横方向の速度 V_y を発生できる。この種の車輪機構は平面上2自由度の運動能力を備えていることがわかる。

つぎに、和田ら⁽⁹⁾が提案した単輪キャスト車輪機構とアクティブ双輪キャスト車輪機構の違いについて考察する。

図3の左側は単輪キャスト車輪機構で、右側はアクティブ双輪キャスト車輪機構である。単輪キャストの場合、前進速度 V_x は車輪の直接駆動回転から発生され、また操舵軸に配置されたモータの直接駆動により旋回トルクが発生され、この結果として横方向の速度 V_y が得られる。一方、双輪キャストの場合、前進速度 V_x は左右輪の平均並進速度として発生され、同時に左右輪の回転速度差から旋回トルクが発生され、その結果として横方向の速度 V_y が得られることになる。

2.2 双輪キャストのモデル化

ここではアクティブ双輪キャストのモデルについて考える。図4に示すように、双輪キャストの運動空間として地面に固定された絶対座標系 $O_0-X_0Y_0$ を考え、双輪キャスト

Fig. 5 Simulation results for active dual-wheel caster

Fig. 4 Model for active dual-wheel caster

の操舵軸の中心を原点とする移動座標系 $O_n-X_nY_n$ を定義する。ただし、 X_n 軸が車輪回転軸の前方と一致するように設定する。また、 X_o 軸と X_n 軸のなす角を ϕ_o とする。さらに、絶対座標系での操舵軸の位置ベクトルを $s_o = [x_o \ y_o]^T$ とする。

このとき、双輪キャストの状態変数を $x_o = [x_o \ y_o]^T$ 、駆動入力を $u_o = [\omega_l \ \omega_r]^T$ とすると、双輪キャスト機構の運動学モデルは

$$\dot{x}_o = B_o u_o \quad (1)$$

$$\dot{\phi}_o = \frac{r}{b}(\omega_r - \omega_l) \quad (2)$$

となる。ここに、 ω_l と ω_r はそれぞれベクトル $\dot{x}_o$ の向きにむかって左側と右側の車輪の角速度である。

ただし

$$B_o = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \phi_o + \frac{rs}{b} \sin \phi_o & \frac{r}{2} \cos \phi_o - \frac{rs}{b} \sin \phi_o \\ \frac{r}{2} \sin \phi_o - \frac{rs}{b} \cos \phi_o & \frac{r}{2} \sin \phi_o + \frac{rs}{b} \cos \phi_o \end{bmatrix}$$

であり、 r は車輪の半径、 s は車輪軸と操舵軸のオフセット量、 b は双輪間の距離である。

2.3 逆運動学モデル 上で導出した運動学モデルに基づき双輪キャストの運動をフィードフォワード

Fig. 6 Trajectory control result for active dual-wheel caster

制御するためには、つぎの逆運動学モデルを求める必要がある。

$$u_o = B_o^{-1} \dot{x}_o \quad (3)$$

ここで、行列 B_o は正方行列であるので、逆行列 B_o^{-1} は

$$B_o^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \cos \phi_o + \frac{b}{2rs} \sin \phi_o & \frac{1}{r} \sin \phi_o - \frac{b}{2rs} \cos \phi_o \\ \frac{1}{r} \cos \phi_o - \frac{b}{2rs} \sin \phi_o & \frac{1}{r} \sin \phi_o + \frac{b}{2rs} \cos \phi_o \end{bmatrix}$$

と容易に得られる。ただし、 ϕ_o は

$$\dot{\phi}_o = \frac{1}{s} \cos \phi_o \dot{y}_o - \frac{1}{s} \sin \phi_o \dot{x}_o \quad (4)$$

から計算できる。

2.4 シミュレーション結果 上記の制御法の有効性を検証するためにシミュレーションを行った。シミュレーション時間を 10 [s] とし、サンプリング間隔を 20 [ms]、状態変数の初期値を $x = [0 \ 0]^T$ とし、双輪キャストの初期姿勢を π [rad] と設定した。双輪キャストの物理パラメータは

$$r = 0.05 \text{ [m]}, \quad s = 0.075 \text{ [m]}, \quad b = 0.26 \text{ [m]}$$

とし、目標軌道は $\phi_0 = \pi/4$ [rad] の直線とした。この目標軌道に双輪キャスタ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。シミュレーション結果を図5と図6に示す。制御結果から、双輪キャスタが右旋回しながら、目標姿勢である $\pi/4$ [rad] 方向に並進運動していることがわかる。

3. 2個の双輪キャスタを用いた全方向移動ロボット車の構成と制御

3.1 全方向移動ロボット車のモデル化 ホロノミックな全方向移動ロボット車を実現するためには、前節のアクティブ双輪キャスタ機構を2個以上組み合わせる必要がある。図7に2つの双輪キャスタ機構を用いた全方向移動ロボット車を示す。移動ロボット車の運動空間として地面に固定された絶対座標系 $O-XY$ を考え、移動ロボット車の幾何学中心を原点とする移動座標系 $O_m-X_mY_m$ を定義する。ただし、 X_m 軸がロボット車の前方と一致するように設定する。各双輪キャスタ a, b の移動座標系 $O_i-X_iY_i, i=a, b$ を設定する。また、 X 軸と X_m 軸のなす角を ϕ とする。さらに、絶対座標系でのロボット幾何学中心位置ベクトルを $s = [x \ y]^T$ とする。

このとき、状態変数を $x = [x \ y \ \phi]^T$ 、絶対座標系での制御入力を $u = [\dot{x}_a \ \dot{y}_a \ \dot{x}_b \ \dot{y}_b]^T$ とすると、移動ロボット車の運動学モデルは

$$\dot{x} = Bu \quad (5)$$

となる。ただし、 u は各双輪キャスタの絶対座標系での操舵軸の位置 O_a, O_b を (x_a, y_a) と (x_b, y_b) とするときの速度成分からなっており、また

$$B = \begin{bmatrix} \frac{L_b}{L_a+L_b} & 0 & \frac{L_a}{L_a+L_b} & 0 \\ 0 & \frac{L_b}{L_a+L_b} & 0 & \frac{L_a}{L_a+L_b} \\ -\frac{\sin \phi}{L_a+L_b} & \frac{\cos \phi}{L_a+L_b} & \frac{\sin \phi}{L_a+L_b} & -\frac{\cos \phi}{L_a+L_b} \end{bmatrix}$$

である。ここに、 L_a, L_b はそれぞれ各双輪キャスタの操舵軸とロボット重心間の距離である。

3.2 全方向移動ロボット車の制御 移動ロボット車のための運動学を用いたフィードフォワード制御を実現するために、逆運動学モデルを求めると

$$u = B^* \dot{x} \quad (6)$$

Fig. 7 Robot model with two driving assemblies

Fig. 8 Block diagram of resolved velocity control

となる。ただし、

$$B^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_a \sin \phi \\ 0 & 1 & L_a \cos \phi \\ 1 & 0 & L_b \sin \phi \\ 0 & 1 & -L_b \cos \phi \end{bmatrix}$$

である。

図8に示す運動学に基づく分解速度制御法を適用し、移動ロボット車の軌道追従制御を行う。ただし、この図は双輪キャスタを3個使用する場合のものであることを注意しておく。

この手法は、目標値 x_r を用いて出力誤差

$$e(t) = x_r(t) - x(t) \quad (7)$$

を定義し、修正速度

$$\dot{x}_r^* = \dot{x}_r + K e \quad (8)$$

を逆運動学に代入することで、制御入力

$$u = B^* \dot{x}_r^* \quad (9)$$

を得る。ただし、 K は比例ゲイン行列である。

3.3 シミュレーション結果 シミュレーション時間を 20 [s] とし、サンプリング間隔 20 [ms]、状態変数の初期値を $x = [0 \ 0 \ 0]^T$ とし、双輪キャスタの初期姿勢を 0 [rad] と設定した。各キャスタおよびプラットフォーム

Fig. 9 Simulation results for a mobile robot with two driving assemblies

Fig. 10 Trajectory control result for a mobile robot with two driving assemblies

ホームの物理パラメータは

$$r_a = r_b = 0.05 \text{ [m]}, \quad s_a = s_b = 0.075 \text{ [m]}$$

$$b_a = b_b = 0.26 \text{ [m]}, \quad L_a = L_b = 0.4 \text{ [m]}$$

とし、比例ゲイン行列は $K = \text{diag}(1.0, 1.0, 1.0)$ と設定した。

目標軌道は前方 $\pi/4$ [rad] の方向に並進運動を行うものとした。シミュレーション結果を図 9 と図 10 に示す。

この制御結果から、設定したロボット車の初期姿勢に対し、過渡的には左旋回しながら並進運動を行い、目標軌道である直線の向きとプラットフォームの姿勢が一致した後、ロボット車はその姿勢を保持したまま並進運動を行ったことを確認した。

4. 3 個の双輪キャスタを用いた全方向移動ロボット車の構成と制御

4.1 全方向移動ロボット車のモデル化 前節の方法では、アクティブ双輪キャスタの姿勢によっては

Fig. 11 Robot model with three driving assemblies

プラットフォームのバランス等の構造的不安定さを招く場合があることから、後の試作機でも述べるように補助輪として受動キャスタ輪をアセンブリ自体あるいはプラットフォーム本体に取り付ける必要がある。これに対して、双輪キャスタ機構をプラットフォームの重心軸から等距離にバランスを保つように3つ以上配置すれば、このような問題は解決でき、補助輪を取り付ける必要はなくなる。図 11 に3つの双輪キャスタ機構を用いた全方向移動ロボット車を示す。絶対座標系と移動座標系の設定条件は 3.1 節と同じである。ここでは、各双輪キャスタ a, b, c の座標系を $O_i - X_i Y_i, i = a, b, c$ と設定する。

状態変数を $\mathbf{x} = [x \ y \ \phi]^T$ 、絶対座標系での制御入力を $\mathbf{u} = [\dot{x}_a \ \dot{y}_a \ \dot{x}_b \ \dot{y}_b \ \dot{x}_c \ \dot{y}_c]^T$ とすると、移動ロボットの運動学モデルは

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (10)$$

となる。ただし、 $\mathbf{u}$ の各成分は2個の双輪キャスタを

Fig. 12 Simulation results for a mobile robot with three driving assemblies

Fig. 13 Trajectory control result for a mobile robot with three driving assemblies

用いた場合と同様に定義しており、また

$$B = \begin{bmatrix} \frac{L_b L_c}{L} & 0 & \frac{L_a L_c}{L} & 0 & \frac{L_a L_b}{L} & 0 \\ 0 & \frac{L_b L_c}{L} & 0 & \frac{L_a L_c}{L} & 0 & \frac{L_a L_b}{L} \\ A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \end{bmatrix}$$

である。ここに、 L_a, L_b, L_c は各双輪キャストの操舵軸とロボット重心間の距離である。ただし

$$A_1 = -\frac{L_b + L_c}{L} \sin \phi, \quad A_2 = \frac{L_b + L_c}{L} \cos \phi$$

$$A_3 = \frac{L_c}{L} \sin \phi, \quad A_4 = -\frac{L_c}{L} \cos \phi$$

$$A_5 = \frac{L_b}{L} \sin \phi, \quad A_6 = -\frac{L_b}{L} \cos \phi$$

であり、

$$L = L_a L_b + L_b L_c + L_a L_c$$

である。

4.2 全方向移動ロボット車の制御 移動ロボッ

ト車を制御するため、逆運動学モデルを求めると

$$u = B^* \dot{x}^* \quad (11)$$

となる。ここで、

$$B^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_a \sin \phi \\ 0 & 1 & L_a \cos \phi \\ 1 & 0 & -L_b \cos(\frac{\pi}{6} + \phi) \\ 0 & 1 & -L_b \sin(\frac{\pi}{6} + \phi) \\ 1 & 0 & L_c \cos(\frac{\pi}{6} - \phi) \\ 0 & 1 & -L_c \sin(\frac{\pi}{6} - \phi) \end{bmatrix}$$

である。また、制御法については、3節と同様に分解速度制御法を用いる。

4.3 シミュレーション結果 シミュレーション

条件とロボット車の初期および目標姿勢の設定は3.3節と同じとする。また、各キャストおよびプラットフォームの物理パラメータは

$$r_a = r_b = r_c = 0.05 \text{ [m]}, \quad s_a = s_b = s_c = 0.075 \text{ [m]}$$

$$b_a = b_b = b_c = 0.26 \text{ [m]}, \quad L_a = L_b = L_c = 0.4 \text{ [m]}$$

とし、比例ゲイン行列は $K = \text{diag}(1.0, 1.0, 1.0)$ と設定した。

シミュレーション結果を図12と図13に示す。制御結果から見ると、双輪キャストaに対して、その操舵軸とロボット重心間の距離 L_a とその初期姿勢は3節と全く同じであるので、同様な制御結果となっていることがわかる。このように、2個、3個の双輪キャスト機構を利用する場合、いずれもホロノミックな全方向運動を実現できることが確認できた。

5. 試作機の製作と走行実験

5.1 試作機の仕様 アクティブ双輪キャスト車

輪機構を2個用いた全方向移動ロボット車の試作機を製作した。試作機の双輪キャスト車輪機構の外観を図

Fig. 14 View of active dual-wheel caster assembly

Fig. 15 View of omnidirectional mobile robot platform

14 に示し、その仕様を以下に示す:

$$r = 0.05 \text{ [m]}, \quad s = 0.075 \text{ [m]}, \quad b = 0.26 \text{ [m]}$$

なお、車輪の幅は 0.04 [m] であり、駆動装置はDC モータを使用する。モータと車輪の間のギアによりトルクを伝達する。また、アセンブリあるいはロボット車の全体のバランスをとるために、補助輪として各アセンブリの操舵軸の前方に受動キャスタ輪を配置している。

図 15 に示すように、全方向移動ロボット車では同様な双輪キャスタ機構を 2 個前後に配置し、各双輪キャスタ機構の操舵軸とロボット重心間の距離は 0.4 [m] である。また、プラットフォームの寸法は全長 1.1 [m] 、幅 0.6 [m] 、高さ 0.34 [m] である。

各駆動輪にはエンコーダを取り付け、デッドレコニングにより、全方向移動ロボット車の位置および姿勢を計測することができる。さらに、双輪キャスタの姿勢を計測するためのエンコーダを操舵軸に取り付けている。

5.2 試作機の制御と走行実験 今回製作した試作機の有効性を検証するために走行実験を行った。図 16 に示すように、3 節で述べた分解速度制御法を利用

Fig. 16 Prototype mobile robot control system

Table 1 Desired values

$\dot{x}_d$	0.02 [m/s]	for $0 \leq t < 15 \text{ [s]}$
	$0.01\pi \cos(\pi t/30) \text{ [m/s]}$	for $15 \leq t < 45 \text{ [s]}$
	0.02 [m/s]	for $45 \leq t \leq 60 \text{ [s]}$
$\dot{y}_d$	0.02 [m/s]	for $0 \leq t < 15 \text{ [s]}$
	$0.01\pi \sin(\pi t/30) \text{ [m/s]}$	for $15 \leq t < 45 \text{ [s]}$
	-0.02 [m/s]	for $45 \leq t \leq 60 \text{ [s]}$
$\dot{\phi}_d$	$\pi/60 \text{ [rad/s]}$	for $0 \leq t < 15 \text{ [s]}$
	0.0 [rad/s]	for $15 \leq t < 30 \text{ [s]}$
	$-\pi/60 \text{ [rad/s]}$	for $30 \leq t < 45 \text{ [s]}$
	0.0 [rad/s]	for $45 \leq t \leq 60 \text{ [s]}$

した。ただし、双輪キャスタの車輪の回転角度から式 (2) を用いて $\phi_i (i = a, b)$ を算出できるが、試作機では操舵軸に取り付けられたエンコーダにより、相対的な操舵軸の回転角度 $\phi'_i (i = a, b)$ が得られる。したがって、実験開始時におけるプラットホームの X_m 軸と双輪キャスタの X_n 軸のなす角を $\bar{\phi}_i (i = a, b)$ とすれば、双輪キャスタの姿勢は $\phi_i = \phi + \phi'_i + \bar{\phi}_i$ により算出できる。ここで、サンプリング間隔は 20 [ms] とする。実験時間は 60 [s] で、目標軌道は直線と半円の並進運動と回転運動を組み合わせた軌道とした。目標値を表 1 に示す。ただし、状態変数の初期値を $\mathbf{x} = [0 \ 0 \ 0]^T$ とし、各双輪キャスタの初期姿勢を 0 [rad] とした。また、比例ゲイン行列を $K = \text{diag}(5.0, 5.0, 5.0)$ と設定した。

試作機の幾何学中心位置 O_m の絶対座標系での軌道とその姿勢の実験結果を図 17 に示す。実験結果より、所望の軌道に追従し、姿勢も目標値とよく一致していることがわかる。よって、ロボット車が 3 自由度の運動能力を備え、ホロノミック特性を実現できることが確認できた。

Fig. 17 Experimental results for a prototype robot

6. 結 言

本稿では、アクティブ双輪キャスタ車輪機構のモデル化とそのフィードフォワード制御、またその車輪機構を2個用いたホロミック全方向移動ロボットプラットフォームのモデル化とそのフィードバック制御法を示した。

しがしながら、実機を製作する場合、2個のアクティブ双輪キャスタ機構を用いたロボットプラットフォームには必ず補助輪が必要となる。また、路面の状況が少し悪くなると、ロボットプラットフォームの全体的なバランスが悪くなるという問題点が存在する。そこで、ロボットプラットフォームの姿勢に依存する不安定な状況に対処するために、アクティブ双輪キャスタ機構を3個用いた全方向移動ロボットプラットフォームも構成し、その数学モデル化と制御を行い、それらの有効性をシミュレーションで検証した。さらに、アクティブ双輪キャスタ機構を2個用いた全方向移動ロボットプラットフォームを製作し、実験によりその有効性を確認した。

文 献

- (1) Watanabe, K., Control of an Omnidirectional Mobile Robot, *Procs. of the 2nd Int. Conf. on Knowledge-based Intelligent Electronic Systems (KES '98)*, Adelaide, Australia, Vol. 1, pp. 51-60, 1998

- (2) 西川・ウエスト・浅田, ホロミック特性を有する全方向移動ロボットとロボットの高精度誘導方式の開発, *日本ロボット学会誌*, Vol. 13, No. 2, pp. 249-256, 1995
- (3) 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, *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 2, pp. 249-254, 1996
- (4) Pin, F.G. and Killough, S.M., A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, No. 4, pp. 480-489, 1994
- (5) Tang, J., Watanabe, K. and Shiraishi, Y., Design of Traveling Experiment of an Omnidirectional Holonomic Mobile Robot, *Procs. of 1996 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS96)*, Vol. 1, pp. 66-73, 1996
- (6) 湯・渡辺・栗林・白石, 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
- (7) Nakano, E. and Koyachi, N., An Advanced Mechanism of the Omni-Directional Vehicle (ODV) and Its Application to the Working Wheelchair for the Disabled, *Proc. of '83 Int. Conf. Advanced Robotics*, pp. 277-284, 1983
- (8) 中野・森・高橋, 全方向移動ロボットの機構と制御に関する研究, *第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集*, Vol. 1, pp. 369-370, 1994
- (9) 和田・森, ホロ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