全方向移動ロボットのための2輪キャスト型オドメータの開発

牛 見 宣 博* 山 本 元 司* 毛 利 彰*

Development of Two Wheels Caster Type Odometer for Omni-Directional Vehicles

Nobuhiro Ushimi*, Motoji Yamamoto* and Akira Mohri*

This paper proposes a two wheels caster type odometer to estimate the current position and orientation of omni-directional vehicles. The proposed odometer is composed of two passive wheels and one passive rotational axis. The two passive wheels rotate independently, and the passive rotational axis changes the odometer's orientation. Angular velocities of the two wheels and rotational axis are measured by three rotary encoders. In order to solve an encoder's wiring problem by increasing rotation of the rotational axis, a mechanism of a gear train is proposed. Using measured values of the three encoders, the current velocity vector of an omni-directional vehicle is calculated by kinematics of the proposed odometer. Using the velocity vector, the position and orientation of the omni-directional vehicle are estimated by dead-reckoning. An experimental two wheels caster type odometer is developed. Experimental results of localization by the developed odometer are shown in this paper.

Key Words: Omni-Directional Vehicle, Two Wheels Caster Type Odometer, Dead-Reckoning, Localization, Gear Train

1. は じ め に

近年、全方向に移動可能な機構を持つ全方向移動ロボットの研究・開発が盛んに行われている。全方向移動ロボットは、あらゆる方向に移動・旋回ができる移動特性によって、例えば、オフィスフロアのように複数の障害物（机、椅子など）が存在する複雑な作業環境での利用が期待されている。特に、4輪自動車のように非ホロノミックな制約を受けない[1]ことから、狭い作業空間で移動経路を簡単に計画できる利点がある。さらに、駆動輪にユニバーサルホイールを利用した全方向移動型パワーアシストカートが、病院内での配膳車として利用され始めており[2]、今後、全方向移動ロボットの利用は、ますます期待される。なお、全方向移動ロボットにおいては、一般的に運動特性の違いによって、いつでも任意の3自由度の速度を発生できるホロノミック全方向移動ロボットと、準備動作を必要とする非ホロノミック全方向移動ロボットに区別される[3]。本論文では、特別な記述がない場合以外、ホロノミック全方向移動ロボットと非ホロノミック全方向移動ロボットを合わせて、全方向移動ロボットと記述する。

全方向移動ロボットには、例えば、特殊車輪を利用するホロノミック全方向移動ロボットとして、タル型フリーローラを駆動

輪に利用した機構[4][5]や、球面タイヤを利用した機構[6]、あるいは直交車輪機構[7]がある。また、ゴムタイヤや空気タイヤなどの通常の車輪を利用した全方向移動ロボットとしては、進行方向に駆動輪を操舵させる非ホロノミック全方向移動ロボット[8]や、キャスト型駆動輪を用いたホロノミック全方向移動ロボット[9]がある。これまでに開発された全方向移動ロボットの多くは、主に機構の開発に重点が置かれている。今後、開発された全方向移動ロボットが実環境で自律して作業を行うためには、作業環境内でのナビゲーション問題が重要と考えられる。特に、その作業環境内で自己位置・姿勢を知ることは、目標位置に移動する場合に重要な機能になる。

全方向移動ロボットは、その移動特性から、狭くて複雑な室内環境での利用が期待される。室内環境で自己位置・姿勢を測定・推定する方法としては、ランドマークを利用する方法[10]がある。例えば、ランドマークとして、レーザ光を反射するコーナキューブを利用する方法[11]や、超音波ビーコンを利用する方法[12]が提案されている。一方、特別なランドマークを使用しない、例えば CCD カメラで得られる画像をランドマークとして利用する方法[13]も提案されている。これら、ランドマークを利用する自己位置・姿勢の測定・推定方法は、作業環境内での絶対位置を測定・推定する場合に有効な方法である。しかし、これらの方法では、利用するランドマークが必ず観測が必要がある。そのため、ランドマークを誤認識する場合や障害物によってランドマークの認識が困難な場合には、デッドレ

原稿受付 2002年5月24日

*九州大学大学院工学研究院

*Faculty of Engineering, Kyushu University

Fig. 1 Mechanism of two wheels caster type odometer

コニングと組み合わせて使用することが有効である [14].

2輪独立駆動による移動機構の場合には、駆動輪と同軸上に設置された二つのエンコーダを使用することで、簡単にデッドレコニングによって自己位置・姿勢を測定することが可能である [15]. これに対して、全方向移動ロボットで特殊車輪を使用する場合は、多くの場合、駆動輪が基本的には点接触であることや接地点の切替えを伴うことから、移動面との滑りが大きい。そのため、駆動用モータの回転速度をエンコーダによって直接測定する場合は、滑りによる測定誤差が問題になる。また、一般的なタイヤを利用する全方向移動ロボットでも、加速・減速による駆動輪の滑りの問題は無視できない。そこで、駆動機構から独立し、全方向の移動特性を持ったデッドレコニング用センサの開発は、全方向移動ロボットにおける自己位置・姿勢の測定・推定に有効と考えられる。

本研究では、全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定に利用できる2輪キャスト型オドメータを開発する。開発するオドメータは、独立して回転する二つの車輪と、その回転軸の中心からある距離をおいて設置された旋回軸によって構成される。二つの車輪の回転角速度と旋回軸での旋回角速度は、エンコーダによって測定される。特に、旋回軸での多回転機構によるエンコーダの配線問題は、車輪の回転角速度を計測する二つのエンコーダをロボット本体に搭載し、車輪の回転を歯車による機械的な機構によって伝達することで解決する [16]. そして、このオドメータからの測定値を使用することで、全方向移動ロボットの自己位置・姿勢を推定する手法を示す。さらに、開発するオドメータを利用した自己位置・姿勢の推定実験を行い、測定精度の実験結果を示す。

本論文は以下のように構成される。第2章では、全方向移動ロボットの自己位置・姿勢を推定するための2輪キャスト型オドメータの機構を提案し、第3章では、提案するオドメータを利用した全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定方法を示す。第4章では、提案に基づいて2輪キャスト型オドメータを開発し、第5章では、開発するオドメータを利用した全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定実験を行い、オドメータの有効性を示す。

2. 2輪キャスト型オドメータの提案

全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定に利用できる2輪キャスト型オドメータを提案する。まず、オドメータが使用

Fig. 2 Omni-directional vehicle with two wheels caster type odometer

される動作環境の定義を行う。そして、提案するオドメータの機構について説明する。

2.1 動作環境

移動ロボットに搭載されるセンサは、作業を行う環境によって影響を受ける。本研究で対象にする全方向移動ロボットは、その移動性能によってオフィスフロアなどの障害物が多い室内環境や、病院の廊下などで利用することが考えられる。ここでは、全方向移動ロボットが、このような室内環境で作業を行うことを考慮して、屋内の平坦な作業領域で有効なオドメータを提案する。

2.2 2輪キャスト型オドメータの機構

2輪キャスト型オドメータの機構を Fig. 1 に示す。提案するオドメータは、独立して回転する二つの車輪と、その回転軸の中心からある距離をおいて設置された旋回軸によって構成される。このオドメータでは、二つの車輪の回転角速度 ω_R, ω_L と、旋回軸での旋回角速度 ω_D を測定することができる。

この2輪キャスト型オドメータの機構は、例えば、Fig. 1 で旋回軸が車輪の回転方向に速度 v_f を発生する場合、二つの車輪が同じ角速度 ($\omega_R = \omega_L$) で回転する。また、車輪の回転に垂直方向の速度 v_s を発生する場合、二つの車輪は同じ大きさで逆方向 ($\omega_R = -\omega_L$) に回転する。したがって、旋回軸が平面上でどのような方向に速度を発生した場合でも、独立して回転する左右車輪の速度差によって、二つの車輪を旋回軸の動きに追従させることが可能である。そして、旋回軸は全方向の移動特性を持つことが分かる。

提案するオドメータは、旋回軸を全方向移動ロボットの移動中心になるように設置し、二つの車輪の回転角速度 ω_R, ω_L と旋回軸の旋回角速度 ω_D からロボット本体の自己位置・姿勢を推定する。

3. 自己位置・姿勢の推定

本章では、提案する2輪キャスト型オドメータを使用する全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定方法について記述す

る。Fig. 2は、タル型フリーローラを駆動輪に使用したホロノミック全方向移動ロボットに、提案する2輪キャスタ型オドメータを搭載した場合の上面図である。オドメータは、旋回軸がロボット本体の移動中心になるように搭載される。まず、Fig. 2の記号を以下のように定義する。ただし、ロボット本体の車輪とオドメータの車輪を区別するために、ここでは、ロボット本体の車輪を駆動輪、オドメータの車輪を従動輪と記述する。

- $O_w - X_w Y_w$: 二次元平面に固定された絶対座標系
- $O_c - X_c Y_c$: 従動輪回転軸の中心に固定された座標系
- $O_s - X_s Y_s$: オドメータの旋回軸に固定された座標系
- $O_r - X_r Y_r$: ロボット本体に固定された座標系
- ω_R, ω_L : 二つの従動輪の回転角速度
- ω_D : 旋回軸での相対旋回角速度
- r : 従動輪の半径
- s : 旋回軸のオフセット距離
- W : 二つの従動輪間の距離
- θ_s : 絶対座標系に対するオドメータの姿勢角
- θ_{robot} : 絶対座標系に対するロボット本体の姿勢角

ここでは、2輪キャスタ型オドメータの運動について考え、オドメータによって測定される二つの従動輪の回転角速度 ω_R, ω_L と、旋回軸でのロボット本体とオドメータの相対的な旋回角速度 ω_D より、絶対座標系 ($O_w - X_w Y_w$) でのロボット本体の自己位置・姿勢を推定する方法を示す。

初めに、二つの従動輪の回転と、その従動輪回転軸の中心に固定された座標系 ($O_c - X_c Y_c$) の原点 O_c の運動について考える (Fig. 2 参照)。座標軸 X_c は、従動輪の進行方向に固定される。このとき、二つの従動輪の回転と原点 O_c の運動は、2輪独立駆動による移動ロボットと同様に次式で示される。

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

ただし、 $\dot{x}_c, \dot{y}_c$ は、絶対座標系における原点 O_c の X_c, Y_c 軸方向に沿った並進速度、 $\dot{\theta}_c$ は絶対座標系における従動輪回転軸の旋回角速度である。オドメータの旋回軸がロボット本体の移動中心になるため、旋回軸の運動を考える必要がある。二つの従動輪の回転と原点 O_c の運動の関係を、オドメータの旋回軸に固定された座標系 ($O_s - X_s Y_s$) の原点 O_s の運動に変換する。座標軸 X_s は、従動輪の進行方向に固定される。このとき、二つの従動輪の回転と原点 O_s の運動は、次式によって変換される。

$$\begin{cases} \dot{x}_s = \dot{x}_c \\ \dot{y}_s = \dot{y}_c + s\dot{\theta}_c \\ \dot{\theta}_s = \dot{\theta}_c \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $\dot{x}_s, \dot{y}_s$ は、絶対座標系における原点 O_s の X_s, Y_s 軸方向に沿った並進速度、 $\dot{\theta}_s$ は絶対座標系におけるオドメータの旋回角速度である。ここで、式 (2) に式 (1) を代入して整理すると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \\ \dot{\theta}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{sr}{W} & -\frac{sr}{W} \\ \frac{r}{W} & -\frac{r}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。式 (3) より、オドメータの並進速度と旋回角速度を求めることができる。オドメータの旋回軸がロボット本体に固定されるため、並進速度 $\dot{x}_s, \dot{y}_s$ は、ロボット本体の並進速度と一致する。

次に、絶対座標系におけるロボット本体の旋回角速度 $\dot{\theta}_{robot}$ を求めるため、ロボット本体に対するオドメータの相対旋回角速度 ω_D を利用する。オドメータとロボット本体は機構的に同軸上で旋回するため、相対旋回角速度 ω_D は、オドメータの旋回角速度 $\dot{\theta}_s$ とロボット本体の旋回角速度 $\dot{\theta}_{robot}$ の差であり、これらの関係は次式で示される。

$$\omega_D = \dot{\theta}_s - \dot{\theta}_{robot} \quad (4)$$

なお、オドメータの旋回角速度 $\dot{\theta}_s$ は、式 (3) より求めることができる。そのため、ロボット本体の旋回角速度 $\dot{\theta}_{robot}$ は、相対旋回角速度 ω_D とオドメータの旋回角速度 $\dot{\theta}_s$ の差によって計算することができる。

終わりに、絶対座標系でのロボット本体の運動について考える。ロボット本体に固定された座標系 ($O_r - X_r Y_r$) の原点 O_r は、座標系 ($O_s - X_s Y_s$) の原点 O_s と一致する (Fig. 2 参照)。また、座標軸 X_r をロボットの前方に固定し、絶対座標系から見た原点 O_r の位置を (x_{robot}, y_{robot}) とする。このとき、絶対座標系でのロボット本体の並進速度 $\dot{x}_{robot}, \dot{y}_{robot}$ と旋回角速度 $\dot{\theta}_{robot}$ は次式で示される。

$$\begin{cases} \dot{x}_{robot} = \dot{x}_s \cos \theta_s - \dot{y}_s \sin \theta_s \\ \dot{y}_{robot} = \dot{x}_s \sin \theta_s + \dot{y}_s \cos \theta_s \\ \dot{\theta}_{robot} = -\omega_D + \dot{\theta}_s \end{cases} \quad (5)$$

ただし、オドメータの姿勢角 θ_s は、式 (3) によって計算される $\dot{\theta}_s$ の積分値を用いる。ここで、式 (5) を整理すると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{robot} \\ \dot{y}_{robot} \\ \dot{\theta}_{robot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 0 \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{y}_s \\ \dot{\theta}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\omega_D \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。式 (6) に式 (3) を代入して整理すると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{robot} \\ \dot{y}_{robot} \\ \dot{\theta}_{robot} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \\ \omega_D \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし、

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

となる。式 (7) より、2輪キャスタ型オドメータの測定値によって、ロボット本体の並進速度と旋回角速度を求めることができ

Fig. 3 Developed two wheels caster type odometer with three rotary encoders

Fig. 4 Gear train of two wheels caster type odometer

る。そして、式 (7) を積分することで、デッドレコニングによる全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定ができる。また、式 (7) の R は、オドメータがどのような姿勢の場合でも計算できることから、ロボット本体の自己位置・姿勢は、常に推定することが可能である。

4. 2 輪キャスト型オドメータの開発

提案に基づいて開発した 2 輪キャスト型オドメータの外観を Fig. 3 に示す。開発したオドメータは、独立して回転する二つの車輪と、その回転軸の中心からある距離をおいて設置された回転軸によって構成される。車輪半径は $r = 23.7$ [mm]、両車輪間の距離は $W = 93.0$ [mm]、そして、回転軸のオフセット距離は $s = 40.0$ [mm] である。二つの車輪の回転角速度と回転軸での回転角速度は、エンコーダ (E6A2-CW3C : オムロン) によって測定される。エンコーダを使用する場合、キャスト型の機構では回転軸の多回転による配線の問題が生じる。スリッパリングによって配線の問題を回避する方法 [17] があるが、信号線へのノイズの影響や、滑り接触による潤滑・摩耗の問題が考えられる。そこで、開発したオドメータでは、多回転機構による配線の問題を解決するために、車輪の回転角速度を測定する

Fig. 5 Back view of omni-directional vehicle with two wheels caster type odometer

二つのエンコーダがロボット本体に搭載される。そして、車輪の回転は、歯車列による機械的な機構によってエンコーダに伝達される。Fig. 3 (a) に三つのエンコーダがロボット本体フレームに搭載される様子が示される。

Fig. 3 (b) は、平歯車と、かさ歯車で構成される歯車列によって、車輪の回転をロボット本体に搭載されたエンコーダに伝達する機構を示す。また、Fig. 4 には、Fig. 3 (b) に対応する歯車列を模式図で示す。Fig. 3 (b) と Fig. 4 で、車輪 (左) の回転は、平歯車 G1 から、かさ歯車によって回転軸を直交させ、平歯車 G2 に伝達される。さらに、平歯車 G2 から G5 までの歯車列によって回転が伝達され、エンコーダ (2) によって車輪 (左) の回転角速度が計測される。同様に、車輪 (右) の回転は、平歯車 G6 から、かさ歯車によって回転軸を直交させ、平歯車 G7 に伝達される。そして、平歯車 G8 に回転が伝達され、エンコーダ (1) によって車輪 (右) の回転角速度が計測される。

Fig. 3 (c) は、回転軸での回転角速度を計測するエンコーダの機構を示す。オドメータ回転軸での回転は、オドメータに固定

Fig. 6 Experimental result of straight line motion

Fig. 8 Experimental result of right-angled motion

Fig. 7 Experimental result of sine curve motion

された平歯車 G9 からエンコーダ (3) の平歯車 G10 に伝達される。なお、旋回に伴う車輪の回転への干渉は、ソフトウェアによって補正を行う。

Fig. 5は、タル型フリーローラを駆動輪に使用したホロノミック全方向移動ロボットに、開発した2輪キャスト型オドメータを搭載した状態を示す。Fig. 5には、ロボット本体の裏面からの様子が示され、中央に開発した2輪キャスト型オドメータが搭載された状態が示される。

5. 自己位置・姿勢の推定実験

開発した2輪キャスト型オドメータを使用し、デッドレコニングによる全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定実験を行う。ただし、ロボット本体は手動操作によって目標経路に一致するように移動させる。また、実験結果に示されるロボット本体の実際の移動経路は、ロボット本体から床面に設置された記録用紙に直接記録された絶対位置である。なお、実験では x 軸方向をロボット本体とオドメータの姿勢角度の基準方向 ($0 [deg]$) とする。

Fig. 6は、ロボット本体の姿勢を変化させずに距離 1 [m] だけ

直線移動させた場合の自己位置・姿勢の推定結果を示す。Fig. 6で、ロボット本体は初期位置 (0, 0) から目標位置 (1,000, 0) まで移動する。ロボット本体とオドメータの初期姿勢は $0 [deg]$ とする。実線はロボット本体の実際の移動経路を示し、黒丸●は、開発した2輪キャスト型オドメータを使用し、そのデッドレコニングによって得られた自己位置の推定結果を示す。Fig. 6で、ロボット本体とオドメータの姿勢の推定結果は、模式図によって示す。ただし、ロボット本体の姿勢の変化は、理解しやすいように長方形の図形によって示す。目標での自己位置・姿勢の推定結果は $x_{robot} = 999.3 [mm]$, $y_{robot} = 5.0 [mm]$, $\theta_{robot} = 1.4 [deg]$ であった。実験結果より、実際の移動経路にデッドレコニングによって得られた自己位置・姿勢の推定結果が、ほぼ一致しているのが分かる。

Fig. 7は、ロボット本体の移動経路が振幅 100 [mm]、周期 500 [mm] で正弦曲線を描くように初期位置 (0, 0) から目標位置 (1,000, 0) まで移動させた場合の自己位置・姿勢の推定結果を示す。ロボット本体とオドメータの初期姿勢は $0 [deg]$ とし、ロボット本体は、姿勢を変化させずに移動を行う。Fig. 7で、ロボット本体の姿勢が変化しない場合でも、オドメータの姿勢は移動経路に沿うように変化することが分かる。実験結果より、移動経路が曲線を描く場合でも、開発したオドメータは、ロボット本体の自己位置・姿勢を推定可能なことが分かる。また、目標での自己位置・姿勢の推定結果は $x_{robot} = 1,001.4 [mm]$, $y_{robot} = -6.5 [mm]$, $\theta_{robot} = -3.0 [deg]$ であった。

ロボット本体が姿勢を変化させながら移動を行う場合の自己位置・姿勢の推定結果を Fig. 8に示す。Fig. 8で、ロボット本体は初期位置 (0, 0) から目標位置 (800, 700) まで移動する。まず x 軸方向に 800 [mm] 直線移動を行い、その後、移動方向を $90 [deg]$ 変化して y 軸方向に 700 [mm] 直線移動を行う。ロボット本体は、途中で姿勢 θ_{robot} を $0 [deg]$ から $90 [deg]$ まで変化させる。目標での自己位置・姿勢の推定結果は $x_{robot} = 803.8 [mm]$, $y_{robot} = 706.4 [mm]$, $\theta_{robot} = 88.6 [deg]$ であった。実験結果より、ロボット本体の姿勢が変化した場合でも、開発したオドメータは自己位置・姿勢を推定することが可能なことが分かる。

誤差の広がり調べるために、Fig. 8と同じ条件で測定を 10

Fig. 9 Estimated errors at target position (800, 700)

Table 1 Deviation of estimated data for right-angled motion

route	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_θ [deg]
right-angle	6.3	6.0	1.3

回行い、実験結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 で、黒角■は目標での位置推定誤差の分布結果を示す。また、目標位置・姿勢に対する推定誤差について偏差 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\theta$) を計算し、Table 1 に示す。開発したオドメータは、ロボット本体の自己位置・姿勢の推定に利用可能な測定精度を持つことが実験結果より分かる。

以上の結果から、開発した2輪キャスタ型オドメータは、デッドレコニングによる全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定に利用可能であることを確認した。

6. お わ り に

本研究では、全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定に利用できる2輪キャスタ型オドメータを開発した。開発したオドメータを利用することで、全方向移動ロボットの自己位置・姿勢をデッドレコニングによって推定することが可能である。

本論文の結果を以下にまとめる。

- (1) 全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定に利用できる2輪キャスタ型オドメータを提案した。提案したオドメータは、独立して回転する二つの車輪と、その回転軸の中心からある距離をおいて設置された旋回軸によって構成される。
- (2) オドメータからの測定値を利用し、全方向移動ロボットの自己位置・姿勢を推定する手法を示した。
- (3) 提案に基づき、2輪キャスタ型オドメータを開発した。旋回軸での多回転機構によるエンコーダの配線問題は、歯車による機械的な機構によって回転を伝達し、車輪の回転角速度を計測する二つのエンコーダをロボット本体に搭載することで解決した。
- (4) 開発したオドメータを利用する全方向移動ロボットの自己位置・姿勢の推定実験を行い、オドメータの有効性を示した。今後の課題としては、開発した2輪キャスタ型オドメータの

誤差解析を行い、例えば、測定精度を向上させることが考えられる。また、開発したオドメータは全方向移動ロボットの速度制御やナビゲーションへの利用が期待できる。

参 考 文 献

- [1] 山本, 大庭, 毛利: “ニューラルネットワークと補助ルールによる四輪自動車の自律車庫入れ動作計画と制御”, 日本機械学会論文集 (C編), vol.62, no.598, pp.2172-2177, 1996.
- [2] 藤原, 北野, 山下, 前田, 福永: “全方向移動型パワーアシストカート”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.53-54, 2002.
- [3] 中村: “非ホロノミックロボットシステム第2回幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動計画”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.5, pp.655-662, 1993.
- [4] P.F. Muir and C.P. Neuman: “Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1772-1778, 1987.
- [5] H. Asama, M. Sato, L. Bogoni, H. Kaetsu, A. Matsumoto and I. Endo: “Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Drive Mechanism,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1925-1930, 1995.
- [6] M. West and H. Asada: “Design and Control of Ball Wheel Omnidirectional Vehicles,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1931-1938, 1995.
- [7] F.G. Pin and S.M. Killough: “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.
- [8] 森, 中野, 高橋: “全方向移動ロボット ODV9 の基本原理と小段差乗越えについて”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.150-157, 2000.
- [9] 和田: “同期キャスタ駆動機構によるホロノミック全方向移動車の設計と運動解析”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.6, pp.784-792, 2001.
- [10] M. Betke and L. Gurvits: “Mobile Robot Localization Using Landmarks,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.13, no.2, pp.251-263, 1997.
- [11] 津村, 藤原, 橋本, 唐: “追尾式レーザ灯台を用いた二次元移動体の位置測定法”, 日本ロボット学会誌, vol.3, no.6, pp.521-530, 1985.
- [12] L. Kleeman: “Optimal Estimation of Position and Heading for Mobile Robots Using Ultrasonic Beacons and Dead-reckoning,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2582-2587, 1992.
- [13] Y. Yagi, S. Kawato and S. Tsuji: “Real-Time Omnidirectional Image Sensor (COPIS) for Vision-Guided Navigation,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.10, no.1, pp.11-22, 1994.
- [14] 山口, 井上, 桐木, 長谷川, 松岡, 杉本: “自律型サッカーロボットの開発第二報 全方位ビジョンとデッドレコニングの組み合わせによる自己位置同定”, 第20回 SICE九州支部学術講演会, pp.13-14, 2001.
- [15] J. Borenstein and L. Feng: “Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.12, no.6, pp.869-880, 1996.
- [16] X. Yang, K. Watanabe, K. Izumi and K. Kiguchi: “An Upper Drive-Active Dual-Wheel Caster Assembly and Its Application to Constructing Holonomic and Omnidirectional Platform,” Preprints of The 4th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV2001), pp.442-447, 2001.
- [17] M.J. Jung, H.S. Shim, H.S. Kim and J.H. Kim: “The Miniature Omni-directional Mobile Robot OmniKity-I (OK-I),” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2686-2691, 1999.

牛見 宣博 (Nobuhiro Ushimi)

1970年7月16日生。1996年九州大学大学院工学研究科修士課程修了(生産機械工学専攻)。同年九州大学工学部助手。現在に至る。自律移動ロボットのセンサシステムに関する研究に興味を持つ。日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

山本 元司 (Motoji Yamamoto)

1962年7月10日生。1990年九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了(生産機械工学専攻)。同年九州大学工学部講師。1992年同助教授。現在に至る。ロボット工学の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)

毛利 彰 (Akira Mohri)

1941年6月23日生。1969年九州大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学(生産機械工学専攻)。同年九州大学工学部講師。同助教授を経て、1982年同教授。現在に至る。ロボット工学、制御工学の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)