倒立振子型全方向移動体および基本走行制御

鄭 聖 熹* 松 川 文 厚* 西 山 達 也* 井 代 直 也*

Wheeled Inverted Pendulum Type Omni-directional Mobility and Basic Driving Control

Seonghee Jeong*, Fumiatsu Matsukawa*, Tatuya Nishiyama* and Naoya Ishiro*

In this paper, we propose an omni-directional mechanism for a wheeled inverted pendulum type mobile platform. The omni-directional mechanism consists of three omni-directional wheels located at the bottom of the mobile platform. The two wheels are located at the left and right side of the platform as a conventional two-wheeled mobile platform, and other one is located between the two wheels, which has an axis perpendicular to those of two wheels. The grounding points of all wheels are on the same line in order to realize balancing control. A simple driving experiment was conducted to examine the driving performance, and it was confirmed that the proposed mobile platform could realize an omni-directional motion while maintaining its balance.

Key Words: Omni-directional Mobility, Wheeled Inverted Pendulum, Pivot Turn

1. は じ め に

1.1 研究背景

人案内や見守り, 介護, 物体搬送等人支援を目的とする人共存ロボットは, 人が日常的に活動する環境下での運用が前提となる。人が活動する空間は, 人間の高度な認識能力および判断能力, 運動能力に依存して作られており, ロボットが自由に活動するのに適切な空間であるとは言えない。しかし, ロボットのために人の活動空間を大幅に改造することは, 高い導入費用はさておき, 必ずしも人間が満足する空間になるとは限らない。したがって, 可能な限り人間の活動空間を改造することなく, 人と共存できるようにロボットの機能や安全性を高めることも重要である。

人の活動空間内で動作するロボットは, 障害物が散在する複雑な空間内で, 予測的に変化する環境に対応しながら目的地まで確実に移動しなければならない。これを実現するためには, 高い環境認識, 軌道追従, 自己位置推定能力のほかに, 複雑な空間内を自由かつ機敏に移動できる構造を有する移動体が必要である。本体の姿勢を変えることなく, 平面上のあらゆる方向に瞬時に移動することが可能な「全方向移動体」は一つの有効な手段であり, 近年多方面において実用化が進められている [1] [2]。全方向移動体としては, オムニホイールを 3 個以上複数設け, 車体を

静的に安定化した状態で移動するものが最も一般的である [1]~[3]。これらは, 移動体の重心が高くなるほど, 安定性を保つための車体幅を大きくとる必要があり, 狭い空間内を自由に移動できるようにコンパクト化することが困難である。これに対して, 二つの車輪を対抗配置し, 倒立振子の原理を用いて車体を動的に安定させる移動体が提案されている [4]。これは, 静的安定に必要な接地安定領域を無くすことで, 車体のフットプリントを狭くできるため, コンパクトな車体設計が可能である。しかし, 方向転換を行う際に切り替え動作が必要となり, 全方向移動体のように瞬時に横または斜め走行が行えないほか, 旋回時の占有領域が広くなることから狭い空間での機敏な走行が困難である。

1.2 関連研究

倒立振子の原理を利用して車体を動的に安定化し, さらに全方向移動が可能な「動的安定型全方向移動体」として, 球状のボール [5]~[10] または 1 輪 [11] を用いた機構が提案されている。山藤らが提案した IWBS [5] は, ボール内部に位置する車輪をボール内面と接触させることで駆動力をボールに伝達し, ボール内部のロール制御用カウンターおよび外部のピッチ制御用アーチにより倒立・旋回制御を行うことで全方向に走行する球状移動体である。IWBS は, ロール制御用カウンター角を調整することで yaw 軸の旋回動作も可能であるがその変動角は小さく, スパイラル旋回方法により旋回角を大きくすることも可能であるが, その場旋回等の動作は実現できない。Hollis らの Bollbot [8] [9] は, 2 個のアイドラローラでボールを押し付け, 2 個の能動ローラによりボールを駆動することでバランスを取

原稿受付 2010 年 12 月 21 日

*大阪電気通信大学

*Osaka Electro-communication University

■ 本論文は有用性で評価されました。

りながら全方向走行を可能にした。しかし、旋回動作においては、ボールが旋回するのではなく、ボール上に搭載されたロボット本体が yaw 軸回転用のモータにより回転される。中村らが提案した BBrider [6] [7]、熊谷らの球状移動体 [10] は 4 個または 3 個のオムニホイールを用いて 1 個の弾性ボールを回すことで全方向移動を実現している。特に中村らは球状移動体の旋回運動も実現しているが、旋回運動能力はボールと地面との摩擦に強く依存することを言及している [7]。駆動車輪として球状の物体を用いない移動体としては、Honda が開発した U3x [11] が提案されており、1 輪の外周に横方向駆動用の車輪が配置され、全方向移動が可能である。U3x の場合は、自力では旋回動作が不可能であり、搭乗者が足先を地面につけ、回転軸を作ることににより旋回する。

以上の先行研究から分かるように、これまで提案された倒立振り子原理を利用したコンパクトな車体を有する全方向移動体においては、移動体が地面と 1 点で接地することから旋回能力に乏しい。これは、狭い空間内で瞬時に姿勢を変えながら移動することが要求される走行形態においては大きなデメリットとなる。

1.3 研究目的および目標

本研究では、障害物が散在する狭い空間内に存在する経路を自由に移動できる、高い旋回能力を有するコンパクトな全方向移動体を開発することを目的とする。そのために、従来の対抗 2 輪式倒立振り子型移動体に全方向移動機能を設けた新しい移動機構を提案する。提案する移動体は、対抗 2 輪のほか横駆動用車輪を設けた倒立振り子型移動体であるため、車体のフットプリントが小さく、三つの車輪の回転を組み合わせることで全方向移動が実現できる。さらに、2 輪対抗構造本来の高い旋回能力を有する特徴を持つ。同移動機構に、倒立制御、旋回および全方向移動を行うための走行制御手法を適用することで、経路上の狭い空間に合わせ機敏に姿勢を変えながら移動できる移動能力の高いコンパクトな全方向移動体を実現できる。

本稿では、提案する倒立振り子型全方向移動機構の基本コンセプトおよびメカニズムについて述べ、その後、全方向および旋回動作を行うための同移動体の運動学および基本走行制御手法について述べる。最後に、同走行制御手法を適用した移動体の走行シミュレーションおよび走行実験を行い、提案する移動体の有効性を確認する。

2. 車輪倒立振り子型全方向移動体の基本構造

車輪式倒立振り子型移動体の機構としては、対抗 2 輪式倒立振り子機構が広く用いられる。同機構は、移動体の重心が常に両車輪の接地点の間に存在するため、横転倒可能性が低く、車輪と地面が 2 点のみで接地するため、車体をコンパクトに設計できる利点を持つ。さらに、両車輪の回転速度を制御することで、その場旋回が可能である等の高い旋回能力を有する。以上の理由から、本研究では、対抗 2 輪式倒立振り子機構をベースとし、全方向移動体を構成する。

Fig. 1 に提案する全方向移動体の基本構造の概略図を示す。同移動体は、全方向移動を実現するために、対抗 2 輪式倒立振り子の両車輪として全方向車輪（オムニホイール）を採用し、さらに、左右車輪の間に両車輪の回転軸と直交する回転軸を持つオ

Fig. 1 Basic mechanism of a proposed omni-directional wheeled inverted pendulum type mobile platform

ムニホイールを配置している。対抗する二つの左右オムニホイールは倒立、旋回制御および前方方向移動制御用として、両車輪間のオムニホイールは横移動制御用として用いられる。同移動体は、倒立制御により動的に安定化された状態で移動することを前提としているため、横移動用のオムニホイールは倒立制御に悪影響を及ぼさないように配置されなければならない。この問題は、同図から分かるように、横移動用のオムニホイールを左右の両オムニホイールの接地点同士を結ぶ直線上に、地面と 1 点接地するように配置することでクリアできる。これにより、両対抗車輪による倒立安定制御時、横移動用車輪のフリーローラは地面と 1 点接地しながらフリー回転することになり、倒立制御への影響を最小限にすることが可能である。横移動用オムニホイールによる横移動時においても、両対抗オムニホイールは接地するフリーローラが回転するため、無理なく横移動が可能となる。したがって、三つのオムニホイールを組み合わせることで、提案する移動体は倒立しながら旋回および全方向走行が実現できる。

なお、上記の横移動用オムニホイールの接地条件さえ満足すれば、左右の対抗車輪間に配置するオムニホイールは複数個でもよい。したがって、Fig. 1 に図示されている形状のオムニホイールの場合は、複数個のオムニホイールを取り付け位相角をずらして回転軸を並行に配置することで、より滑らかな横移動が実現できる。また、1 輪で構成されるオムニホイール [12] を用いればより簡単な構造で滑らかな横移動を実現することができる。

3. 運動学

提案する全方向移動体の運動学について述べる。**Fig. 2** に移動体のモデル図を、**Table 1** に各パラメータの定義を示す。同移動体は、車体の左右に対抗して配置された 2 個の車輪と、両車輪の間にその回転軸に直交な回転軸を持つ車輪 1 個を有する 3 輪タイプの車輪型移動体としてモデル化される。前述のとおり、各車輪は地面と 1 点接地し、すべての接地点は同一線上に存在する。左右の 2 個の対抗車輪は、倒立、前後、操舵動作用

駆動輪として、中央車輪は車体の進行方向に直交な横方向動作の駆動輪として用いられ、各車輪は回転軸方向への横滑りが可能である。したがって、同移動体は、ホロノミック拘束のみを受ける全方向移動体としてモデル化される。

同モデルにおいて、移動体の前方向速度 v_f 、横方向速度 v_s 、操舵角速度 $\dot{\phi}$ と各車輪の角速度との関係は次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} v_f \\ \dot{\phi} \\ v_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_w}{2} & \frac{r_w}{2} & 0 \\ \frac{r_w}{2b} & -\frac{r_w}{2b} & 0 \\ 0 & 0 & r_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、移動体の各速度の絶対座標系への変換は

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ \dot{\phi} \\ v_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

であるので、Eq. (1)、Eq. (2) から各車輪の回転角速度と車体の絶対座標系における並進速度および操舵角速度間の関係は次式で表される。

Fig. 2 Translational and rotational velocity of an omnidirectional wheeled mobile robot

Table 1 Parameters

θ_r, θ_l	[rad]	Right/left wheel rotational angle
θ_m	[rad]	Center wheel rotational angle
x_c, y_c	[m]	Position of a robot in world coord.
v_f	[m/s]	Forward velocity of a vehicle
v_s	[m/s]	Side velocity of a vehicle
v_r, v_l	[m/s]	Velocity of left and right wheel
ψ	[rad]	Inclination angle of CoM
ϕ	[rad]	Steering angle of vehicle
b	[m]	Distance from origin to a wheel
r_w	[m]	Radius of wheel
M_g	[kg]	Mass of CoM
m_w	[kg]	Mass of wheel
l_g	[m]	Length from wheel axis to CoM
I_{yy}	[kgm ²]	Moment of Inertia of body
I_{wa}	[kgm ²]	Moment of Inertia of a wheel
I_{ra}	[kgm ²]	Moment of Inertia of a motor
γ		Reduction ratio
τ_w	[Nm]	Motor torque of a wheel
c_w	[Nm/s]	Viscosity coefficient of a wheel

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_w \cos \phi}{2} & \frac{r_w \cos \phi}{2} & -r_w \sin \phi \\ \frac{r_w \sin \phi}{2} & \frac{r_w \sin \phi}{2} & r_w \cos \phi \\ \frac{r_w}{2b} & -\frac{r_w}{2b} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix}$$

4. 全方向移動制御

4.1 倒立および前方移動制御

本稿では、提案する移動体の全方向移動特性を検証するため、倒立制御においては Fig. 3 に示す車輪式倒立振り型ロボットの 2 自由度モデルを用いる。同図に示しているように、提案する移動体においては胴体が傾いた場合、胴体に固定された横移動用車輪が地面から浮いてしまう問題が生じる。この問題に対しては、横移動用車輪をばね・ダンパー機構により地面に押しつけることで解決可能であるが、この場合は新たな問題として、横移動用車輪の接地点が 2 個の対抗車輪の接地点からずれることが予想される。この問題に対して、一般的に倒立振り型移動体の倒立動作および定速走行時の胴体の傾き角は非常に小さいと考えられるため、本稿では、横移動用車輪の接地点と対抗車輪の接地点とのずれが小さく、接地点ずれによる倒立制御への影響が無視できるものと仮定する。

以上の検討から、本稿では、提案する移動体の倒立モデルとして、一般的な対抗 2 輪式倒立振子の 2 自由度モデルを採用し、運動方程式を導く。同モデルの運動方程式は次式で与えられる。

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + V\dot{q} + G = E\tau_w \quad (3)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$

$$H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_g r_w l_g S_\psi \dot{\psi}^2 \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} c_w & -c_w \\ -c_w & c_w \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -M_g g l_g S_\psi \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} \psi \\ \theta_w \end{bmatrix}$$

ここで、 M は慣性項、 H はコリオリおよび遠心力項、 V は粘性摩擦係数、 G は重力項である。また、 $M_{11} = M_g l_g^2 + I_{yy} + \gamma^2 I_{ra}$,

Fig. 3 Model of a wheeled inverted pendulum type robot with a wheel for side moving

$M_{12} = M_{21} = M_g r_w l_g C_\psi - \gamma^2 I_{ra}$, $M_{22} = (M_g + m_w) r_w^2 + I_{wa} + I_{ra} \gamma^2$ であり, θ_w は, 左右対抗車輪の代表車輪角を表す.

本稿では, 提案する移動体の倒立状態での全方向移動能力の検証が主な目的であるため, 簡単な線形フィードバックおよび PD 制御を用いて倒立および走行制御系を構築, 検証を行う. まず, 倒立走行のために線形フィードバック制御系を構築する. 運動方程式 Eq. (3) において, $\sin \psi = \psi$, $\cos \psi = 1$, $\ddot{\psi}^2 = 0$ として線形化を行い, 状態変数を $\mathbf{x} = [\psi, \theta_w, \dot{\psi}, \dot{\theta}_w]^T$ とすると, 状態方程式は

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (4)$$

と表すことができる. ここで, $\mathbf{A} \in R^{4 \times 4}$, $\mathbf{B} \in R^{4 \times 1}$ の行列であり, 詳細の内容は割愛する. 同方程式に線形状態フィードバック制御法を適用すると, 倒立および前方向移動制御における車輪への制御入力は次式となる.

$$\mathbf{u}_1 = -\mathbf{K}_1 \begin{bmatrix} \psi \\ \theta_w - \theta_{w,d} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta}_w \end{bmatrix}$$

ここで, $\mathbf{u}_1$ は倒立直進走行制御入力, $\theta_{w,d}$ は代表車輪の目標回転角, $\dot{\theta}_w = v_f / r_w$ であり, $\mathbf{K}_1 \in R^{1 \times 4}$ は倒立前進走行制御ゲインである. したがって, 倒立直進走行を実現するための対抗 2 輪モータへの制御入力は次式となる.

$$u_{r,1} = u_{l,1} = \frac{u_1}{2} \quad (5)$$

ここで, u_l , u_r はおのおの左, 右車輪モータへの制御入力である.

4.2 旋回および横方向移動制御

旋回および横方向移動は, 倒立制御に大きな影響を及ぼさないことから, 倒立制御と独立に構成される PD 制御法により行う.

まず, 旋回制御における制御入力は次式で与えられる.

$$u_2 = -K_{p,2}(\phi - \phi_d) - K_{v,2}\dot{\phi} \quad (6)$$

ここで, u_2 は旋回制御入力, ϕ_d は旋回目標角, $K_{p,2}$ は旋回角制御ゲイン, $K_{v,2}$ は旋回角速度制御ゲインである. したがって, 左右対抗車輪モータへの制御入力は,

$$u_{r,2} = u_2, \quad u_{l,2} = -u_2 \quad (7)$$

となる.

また, 横移動制御における制御入力は次式で与えられる.

$$u_3 = -K_{p,3}(\theta_m - \theta_{m,d}) - K_{v,3}\dot{\theta}_m \quad (8)$$

ここで, u_3 は横移動制御入力, $\theta_{m,d}$ は横移動車輪目標角, $K_{p,3}$ は横移動車輪角制御ゲイン, $K_{v,3}$ は横移動車輪角速度制御ゲインである. 最終的に, 移動体の各モータへの制御入力は次式となる.

$$\begin{bmatrix} u_r \\ u_l \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{r,1} + u_{r,2} \\ u_{l,1} + u_{l,2} \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_1}{2} + u_2 \\ \frac{u_1}{2} - u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Fig. 4 Simulation model of an omni-directional inverted pendulum type mobility for ODE

Table 2 Model parameters

M_g	[kg]	20	m_w	[kg]	0.1
l_g	[m]	0.5	b	[m]	0.16
r_w	[m]	0.1			

Eq. (9) により, 同移動体は倒立, 直進, 旋回, 横移動が可能となり, これらを組み合わせることで任意の姿勢で全方向へ瞬時に移動できる.

5. 動作シミュレーションおよび実験

5.1 シミュレーション

提案する全方向移動体の倒立全方向移動動作をシミュレーションにより確認する. シミュレーションツールとしては動力学シミュレータ ODE (Open Dynamics Engine) を用いた. 動作シミュレーションにおける移動体モデルを Fig. 4 に示す. 同モデルは, 左右対抗 2 輪と中央の胴体に固定された横移動用車輪で構成される. 横移動用車輪としては, 同車輪を地面に押しつけるばね機構を採用する代わりに, 左右 2 輪の直径と同じ大きさを持つ球状の車輪を設けることで, 胴体が傾いた場合でも地面と接触が維持できるようにした. 横移動用球状車輪の回転方向は左右車輪と直交する 1 方向に限定した. また, 各車輪と地面の接地点における車軸方向の摩擦係数を 0 にすることで, すべての車輪をオムニホイールとしてモデル化した. シミュレーションで用いたモデルの主なパラメータを Table 2 に示す.

シミュレーションでは, 倒立状態での旋回, 横移動, 対角移動を行った. シミュレーションにおける移動体の姿勢角, 旋回角を Fig. 5 に, 移動体の実際の姿勢および移動経路を Fig. 6 に示す. Fig. 5 から分かるように, 移動体は初期状態から最初 -90 [deg] 旋回し, その後 X 方向へ横移動を行う. このとき, 移動体の傾斜角はほとんど変化がなく, 旋回および横移動動作が移動体の倒立制御には影響を及ぼさないことが確認できる. その後, 移動体は直進方向移動制御と横移動制御の組み合わせで対角方向へ移動しており, Fig. 6 から移動体の様子が確認できる. 以上のシミュレーション結果から, 提案する全方向移動機構および基本走行制御の有効性が確認できた.

5.2 実験機による動作実験

Fig. 7 に倒立全方向移動体のプロトタイプ実験機の概観を, Table 3 に主な仕様を示す. 同実験機には, 左右対抗車輪とし

Fig. 5 The profile of inclination angle and steering angle

Fig. 6 The profile of the position and pose of the mobility

Fig. 7 Prototype of an omni-directional mobile platform with one side wheel

て、円周状に3個のフリーローラを有するオムニホイール2個を位相をずらして結合し、地面との連続的な接地を可能にした入手性のよいオムニホイールを採用している。横移動用オムニホイールは、両対抗車輪の接地点を結ぶ直線上に1点接地する必要があるため、

Table 3 Specification of a prototype mobile platform

Size	[mm]	540 × 180 × 440
Weight	[kg]	6
CPU		SH2-7125
Gyro		CRS-03 (Silicon Sensing System Japan)
Motor		Maxon A-max26 4.5 [w] (4)
Gear Reducer		GP26B $\gamma=4.4$
Omni-wheel		TOSADENSHI Co., Ltd.
	[mm]	TYPE2581 $\phi 80$ (right, left)
	[mm]	SB001 $\phi 70$ (middle)

Fig. 8 The profile of inclination angle, steering angle, and side displacement

あるため、両対抗車輪間の中央に円周上に球状のフリーローラが複数配置された1個の小型オムニホイールを採用した。対抗2輪は減速機のバックラッシュをなくすために、ダブルモータ駆動方式[13]を採用している。横移動用オムニホイールは中央に配置されたモータからタイミングベルトプーリを介して駆動される。また、前述したとおり、移動体が加速する場合や、外力を受けながら移動する場合、車体の傾きにより横移動用オムニホイールが接地できなくなる可能性がある。この問題に対処するために、車体と横移動車輪部の間にスプリング機構を導入し、横移動車輪を地面に一定力で押しつけるようにした。これにより、車体が傾いた状態でも横移動用オムニホイールは地面との接触を常に維持することができる。

実験機を用いて、移動体の倒立状態での旋回および横移動動作について検証を行う。実験では、移動体を倒立状態から-Y方向へ横移動、前進移動と横移動を組み合わせた斜め移動、90 [deg] その場旋回動作の順に動作させた。移動体の経路移動時の本体傾斜角、操舵角、前方移動距離、横移動距離を Fig. 8 に示す。Fig. 8 から確認できるように、移動体は倒立状態を維持しながら22 [s] 付近まで横移動後、43 [s] まで前進方向と横方向移動を同時に行い、最後に、90 [deg] まで操舵動作を実行している。この際、移動体の傾斜角は倒立点を常に維持しており、横移動車輪による倒立制御への影響は少ないことが確認できる。実験における移動体の移動経路および車体姿勢を Fig. 9 に示す。同図から、移動体の前後方向へ揺れが観測されるものの、横移動、斜め移動、旋回動作が良好に実現できていることが確認できる。

以上の実験結果から、横移動用の車輪が存在する場合でも倒立および旋回動作には大きな影響がなく、提案する移動体によ

Fig.9 The trajectory and pose of a robot in the omni-directional moving and the pivot turning experiment

る旋回および全方向倒立走行が可能であることが確認できた。

6. ま と め

本稿では、コンパクトで高い旋回能力を有する全方向移動体として、従来の対抗2輪式倒立振り子型移動体に全方向移動機能を設けた新しい移動機構を提案した。提案する移動機構は、三つのオムニホイールを倒立制御に支障を与えず全方向移動ができるように配置したものである。同移動体に一般的な倒立制御および全方向走行制御を適用し、シミュレーションおよび試作機により同移動体が倒立しながら旋回および全方向移動が実現できることを確認した。今後、走行安定性向上のための走行制御手法および機構の改良を行い、さらに同移動体による自律的障害物回避手法の開発を進める予定である。

参 考 文 献

- [1] 藤原茂喜, 北野斉, 山下秀樹, 前田裕史, 福永秀雄: “全方向移動型パワーアシストカーの操作性向上”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.2, pp.223-229, 2004.
- [2] 北川秀夫, 西坂晋, 三好孝典, 寺嶋一彦: “介助式全方向移動車椅子のためのパワーアシストシステムの構築”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.3, pp.321-329, 2005.
- [3] 浅間一, 佐藤雅俊 他: “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] H.G. Nguyen, J. Morrell, K. Mullens, A. Burmeister, S. Miles, N. Farrington, K. Thomas and D.W. Gage: “Segway Robotic Mobility Platform,” SPIE Proc.5609:Mobile Robots XVII, pp.207-220, 2004.
- [5] 越山篤, 山藤和男: “全方向形移動ロボットの制御に関する研究 (第1報, 球状ロボットのコンセプトとロール及び走行制御)”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.58, no.548, pp.134-142, 1996.
- [6] 円戸辰郎, 中村仁彦: “球面タイヤを用いた2次元倒立振り子ロボットの開発”, 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2I15, 2008.
- [7] 東京大学: 全方向移動ロボット及び該ロボットの全方向移動駆動機構, 特開 2006-282160.
- [8] T.B. Lauwers, G.A. Kantor and R.L. Hollis: “A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive,” Proc. IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation, pp.2884-2889, 2006.
- [9] U. Nagaraja, M. Anish Mampetta, G. Kantor and R. Hollis: “State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot,” Proc. IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation, pp.998-1003, 2009.
- [10] M. Kumagai and T. Takaya: “Development of a Robot Balanced on a Ball —First Report, Implementation of the Robot and Basic Control—,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.22, no.3, pp.348-355, 2010.
- [11] 本田技研 (Honda Motor Co., Ltd.), <http://www.honda.co.jp/ASIMO/new-tech/u3x/>
- [12] H. Asama, H. Kaetsu, I. Endo and M. Sato: Wheel for Omni-directional Mobile Robot, JP-patent no.3421209, 2003.
- [13] 綿井江梨, 鄭聖熹: “ダブルモータ駆動式アクチュエータモジュールの開発—アクチュエータの特性評価及び安全関連部アーキテクチャの基本構成”, ロボティクスメカトロニクス 2010 講演会予稿集 (CD-ROM), 1P1-C10, pp.1-3, 2010.

鄭 聖熹 (Seonghee Jeong)

2000 年韓国全南大学機械工学科卒業, 2002 年東北大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了, 2005 年同大学院博士後期課程修了, 同年福島大学研究員 (プロジェクト), 2008 年産業技術総合研究所特別研究員, 2009 年大阪電気通信大学講師, 現在に至る。博士 (情報科学)。人間共存型ロボットの安全技術, 人支援システム, 倒立振り子型ロボット・パーソナルモビリティ等の研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

西山達也 (Tatuya Nishiyama)

2011 年大阪電気通信大学電子機械工学科卒業。倒立振り子型全方向移動ロボットの研究に従事。

松川文厚 (Fumiatsu Matsukawa)

2011 年大阪電気通信大学電子機械工学科卒業, 同年同大学大学院制御機械専攻に入学, 現在に至る。人誘導ロボット, 倒立振り子型全方向移動ロボットの研究に従事。日本機械学会学生会員。

井代直也 (Naoya Ishiro)

2011 年大阪電気通信大学電子機械工学科卒業。倒立振り子型全方向移動ロボットの研究に従事。