球形動力伝達機構を用いたアクティブキャスタ ACROBAT による
全方向移動ロボットに関する研究

—冗長駆動性のないアクティブキャスタの動力伝達機構とその制御方法の開発—

和田 正義*・平 間 貴 大**

Research for an Omnidirectional Mobile Robot Using ACROBAT,
the Active-caster with a Dual-ball Transmission

— Development of a Transmission Mechanism and a Control Method for a Non-redundant Actuation System —

Masayoshi WADA* and Takahiro HIRAMA**

In this paper, we propose a new type of omnidirectional mechanism which includes two balls as a transmitter of the power. The ACROBAT, we call the proposed system like this, is a caster type omnidirectional mechanism. The ACROBAT uses normal rubber tire, which is the different point from conventional omnidirectional robot. In order to determine the best construction of omnidirectional robot with ACROBATs, the efficiency of actuator usage is calculated in this paper. At last, computer simulation and experiments using a prototype are performed on the kinematics of the 3-wheeled robot. We confirm the possibility of ACROBAT system as a driving mechanism without special wheel, complicated control system, and sensing wheel orientation.

Key Words: omnidirectional robot, power train, active-caster, ball transmission

1. 緒 言

車輪型機構は現在広く普及している移動システムであり、自動車型や車いす型などが代表的である。これらは非ホロノミック拘束を有することにより2次元平面上での並進・回転における運動方向に制限を受ける。横移動などの際に複雑な切り返しを必要とする場合があり、煩雑は動作計画を必要とする。それに対してホロノミック全方向移動機構は移動方向の制限を受けず、平面3自由度を独立に計画・制御できるため、最短経路での移動や狭路での方向転換、複数の移動体での協調動作を実現できる利点がある。また、操作や動作計画において機構の移動条件を考慮する必要がないため操作者や制御システムへの負担が少なく、人間操作者にとっては技術的な熟練がなくとも直感的に扱えるといったインタフェースとしての利点もある。

これまでにさまざまな全方向移動機構が考案されてきた。その代表例としてオムニホイール¹⁾、メカナムホイール²⁾、

Vuton クローラ³⁾や球状車輪^{4),5)}などが挙げられる。これらの機構は車輪の円周部に小径のフリーローラを組み込むことで、ある特定の方向には駆動力を発生し、これと直交する方向には受動的に移動できる特性をもつものである。**Fig. 1**に一般的な3輪の全方向車輪を用いたロボットを示す。このような全方向車輪を用いて移動ロボットを構成した場合には、ロボットの運動は(1)式に示されるような単純な運動学によって制御され、移動ロボットを構成する制御システムは、その一例が**Fig. 2**に示されるようにシンプルなものになる。これらの制御はステッピングモータによる駆動や、DCモータの速度フィードバックのみのシステムで実現できる。その簡便さから、これらの全方向移動機構はサッカーロボットや屋内サービスロボット、車椅子など多くの移動ロボットに用いられている。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & d \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\phi}_v \end{bmatrix} \quad (1)$$

しかしながらこれらの機構は、フリーローラを組み込んだ車輪や球状の車輪などの車輪の構造により全方向移動を実現していることから、床面の凹凸に弱く振動を吸収できない、床面のゴミなどにより動作不良が起こる、段差の走破性が低いなど一般的な実環境における利用では課題が多く残されて

* 東京農工大学大学院工学研究院 小金井市中町 2-24-16

** (株)小松製作所大阪工場 枚方市上野 3-1-1

* Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei

** Osaka factory, Komatsu Ltd., 3-1-1 Ueno, Hirakata

(Received June 25, 2014)

(Revised April 16, 2015)

いる。

これら従来の全方向移動車輪の課題を解決するために、キャスト型の全方向移動機構が開発されてきた^{6)~11)}。本論文ではこれを Active Caster RObotic drive (以下 ACRO) と呼ぶ。この ACRO は従来の全方向移動機構のようにフリーに回転する要素をもたず、また一般的なゴムタイヤを用いた構成で平面 3 自由度の全方向移動を可能とする点で従来の全方向車輪と異なる機構である。ACRO⁶⁾は 2 つのアクチュエータによりキャストの操舵軸と車輪回転軸をそれぞれ駆動することで平面 2 自由度の動作を実現する。ACRO は、受動キャストと同様に移動方向に車輪が向きを揃えるという動作特性を有するため、従来の全方向車輪のように小径ローラに段差踏破能力が制限されることがなく、備える車輪径に対応した踏破性を期待することが可能であり、ゴム・空気圧車輪を搭載できるなど、実環境に適した車輪機構ということができる。

この ACRO を複数使用して平面 3 自由度の移動ロボットを構成する場合、少なくとも 4 つのアクチュエータを必要とする冗長システムになり、これらのアクチュエータは互いに干渉しないように正確な協調動作が求められる。本論文では ACRO の課題であった冗長性と車輪 2 軸の複雑な制御の問題を解決する目的でこれまでに開発した ACROBAT と呼ぶ球形動力伝達機構を用いたキャスト型車輪を利用した、3 つのモータで駆動する 3 輪全方向移動ロボットを提案するとともに ACROBAT の運動学と全方向移動ロボットの構成に関する考察を行ない、結果に関してのシミュレーションと実験による検討を行なう。

Fig. 1 Omnidirectional robot with three omni-wheels

Fig. 2 Control system of a three-wheeled omnidirectional robot

2. 従来型アクティブキャスト (ACRO) の原理

2.1 運動学

Fig. 3 は ACRO の上面図である。ACRO は車輪の旋回軸からオフセットされた車輪駆動軸をもち、2 つの回転軸はそれぞれアクチュエータによって駆動される。車輪駆動軸により発生する速度を $\dot{x}_w$ 、車輪旋回軸により発生する速度を $\dot{y}_w$ とする。

目的の動作を行なうためには各ベクトルは正確に制御され、互いに干渉しないことが必要になる。各軸の制御には車輪の姿勢角 ϕ を変数とした以下の運動学の (2) 式を用いる

$$\begin{bmatrix} \omega_w \\ \omega_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \phi}{r} & \frac{\sin \phi}{r} \\ -\frac{\sin \phi}{s} & \frac{\cos \phi}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで V_x , V_y はロボットの速度ベクトル V の x 軸と y 軸方向の成分である。

2.2 二輪全方向移動ロボット

Fig. 4 は ACRO による 3 輪ロボットの外観図である。このロボットは 3 つの ACRO と 6 つのモータにより構成され平面 3 自由度に対して 3 つの冗長性をもっている。ロボットを構成する車輪が増えるに従い冗長なモータの数は増加する。複数の ACRO を協調動作させるために、各モータは (3) 式に示される速度に関する運動学の式によって協調制御される⁶⁾。(3) 式において W は、3 つの車輪から形成される正三角形の辺の長さである。

(2) 式と (3) 式によるモータの協調制御により、各 ACRO は、移動式の椅子や買い物カートなどに見られるキャスト動作を行なうことができるようになる。ACRO で構成されるロボットの制御システムは Fig. 5 に示されるとおりである。これにより従来の全方向移動機構と異なりフリーに回転する要素をもたずに全方向移動を実現可能であるが、同時にいくつかの課題が生じた。①：平面 3 次元移動ロボットを構成する際には少なくとも 1 つの冗長性をもつことになる。②：各アクチュエータが干渉しないよう、高精度のサーボモータと、それらの複雑な制御を必要とする。

Fig. 3 Velocity control of an active-caster

Fig. 4 Overview of the omnidirectional robot with 3-ACROs

Fig. 5 Control architecture of omnidirectional robot with ACROs

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{W}{2} \\ 0 & 1 & \frac{-W}{2\sqrt{3}} \\ 1 & 0 & \frac{-W}{2} \\ 0 & 1 & \frac{-W}{2\sqrt{3}} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{W}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{y}_v \\ \dot{\phi}_v \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. 球形動力伝達機構

3.1 ACROBAT システム

前章で挙げた ACRO の課題を解決するために球形動力伝達機構を有するアクティブキャスタを開発してきた。われわれはこれを ACROBAT (Active-Caster Robotic drive with Ball Transmission)^{11), 12)}と呼ぶ。導入する球形動力伝達機構は (2) 式に示される速度ベクトルの分配を機械的に行ない、複雑なモータの協調制御なしに ACRO と同等の機能を実現するために考案されたものである。Fig. 6 は ACROBAT の概念図である。アクチュエータから車輪の駆動・旋回 2 軸への動力伝達要素として 2 つの球が用いられる。

Fig. 6 The configuration of ACROBAT

Fig. 7 A dual-ball transmission

提案する機構は 2 つの球を動力の伝達体として組み込む。その機構の一部は球状車輪を用いた全方向移動ロボットに似ているが、ACROBAT は球が直接地面に接地していない点で全く異なる機構である。

ACROBAT は上下 2 つのユニットから構成されている。図中の Part A, B がそれらを表わしている。上部機構は球 A と球 A に接する 2 つのローラ、ローラを介して球 A を駆動するモータから構成されている。ローラとの接触により、球 A は水平軸周りに回転をし、垂直軸周りの回転は発生しない。

下部機構では球 B に 2 つのローラが接触しており、上部機構から伝達される動力がそれぞれのローラに分配される。ローラの 1 つは車輪軸に接続されており車輪を駆動する。もう一方のローラは車輪の旋回軸に接続され、下部機構全体を垂直軸まわりに旋回させる。Fig. 7 に示されるように、球 A と球 B は球の中心軸を共有して接触しておりこの接触点を介して上部機構から下部機構に動力を伝達する。

通常上部機構は移動ロボットの本体に固定される。そして下部機構はベアリングを用いて上部機構に接続されることにより垂直軸周りに回転する。上下の球はばね機構により押し付けられることで滑らずに動力伝達を行ない、下部機構の姿勢角によって動力の分配比率が変化する。これを利用して車

Fig. 8 Contacting between ball and two rollers

輪駆動軸・回転軸への動力分配を機械的に行なう。

3.2 球形動力伝達機構の運動学

本節では球形動力伝達機構の運動学に関して考察を行なう。

Fig. 8 は上部機構の球とローラの位置関係を示す上面図である。球の中心を原点とする X-Y 座標系を水平面上に設置し、X 軸とローラのなす角をそれぞれ α , β とする。ローラと球の接点での接線速度 v_a , v_b は以下で表わされる。

$$\begin{aligned} v_a &= V_x \cos \alpha + V_y \sin \alpha \\ v_b &= V_x \cos \beta + V_y \sin \beta \end{aligned} \quad (4)$$

V_x と V_y はそれぞれ球の底面円周上における接線速度 V_i の X 軸, Y 軸方向の速度成分である。

ローラがそれぞれ角速度 ω_a , ω_b で回転するとき、ローラの角速度と球の底面円周上の接線速度関係式 (4) から以下のように逆運動学を得る。

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sin(\alpha - \beta)} \begin{bmatrix} -r_a \sin \beta & r_b \sin \alpha \\ r_a \cos \beta & -r_b \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_a \\ \omega_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) 式により底面円周上の接線速度 V_i が求められる。

Fig. 9(a), (b) はそれぞれ 2 つのローラがなす角が鈍角の場合と鋭角の場合の V_i と v_a , v_b の図式的な関係を示している。ローラ接点での接線速度は球の回転により伝達され、球底面円周上で合成される。そのような Fig. 9 の矢印で示されている。この矢印の合成では 2 つの要素ベクトルの端点からの垂線により V_i が定義される。また、 v_b ベクトルが変化しても v_a ベクトルは変化せず、各ローラの発生する速度成分は独立していることがわかる。

下側機構における設計条件を満たすことで伝達式内から θ を消去することができ、変数をもたない伝達式を実現できるという特徴を ACROBAT はもつ。この詳細は参考文献 12) に示されている。(6) 式は車輪の姿勢 θ を変数にもたない運動学の式である。これにより ACRO の制御では必要であった車輪姿勢の計測が不要になることがわかる。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-\sin \beta}{\sin(\alpha - \beta)} & \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} \\ \frac{\cos \beta}{\sin(\alpha - \beta)} & \frac{-\cos \alpha}{\sin(\alpha - \beta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_a & 0 \\ 0 & r_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_a \\ \omega_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

(a) Case $(\beta - \alpha) > 90 \text{ degs}$ (b) Case $(\beta - \alpha) < 90 \text{ degs}$

Fig. 9 Vector sum on spherical surface

Fig. 10 Three-wheeled omnidirectional robot with ACROBATs

3.3 ACROBAT 全方向移動ロボット

3.2 節で ACROBAT の運動学式を導出した。ACROBAT 上部機構において、ローラ・球の接点と球の中心を結ぶ線上に各ローラが配置され、球の表面に生成する速度ベクトルはほかのローラの運動の影響を受けず、独立であることを確認した。ここでは ACROBAT を複数輪使用した全方向移動ロボットの構成に関して議論する。Fig. 9 において V_i の大きさや方向はローラ b の位置 ($\beta - \alpha$ の角度) によって変化する。その一方で Fig. 9(a), (b) どちらもローラ a によるベクトル要素 v_a は同一であり、ACROBAT を複数輪組み合わせ移動ロボットを構成する際にはロボットに対して同一方向の速度成分を発生させることができるということを表わしている。同一直線上に速度ベクトルを発生させる 2 つのローラ a はローラ b の位置にかかわらず共通のモータで駆動することができる。

ローラが同一直線上にあれば共通のモータで駆動できるとこの考えを拡張すると、Fig. 10 に示される、三組のローラをそれぞれ共通のモータで駆動する 3 輪全方向移動ロボットを構成することが可能になる。

共通に駆動されるローラが同一直線上にあることが条件であるので、車輪の配置は正三角形である必要はなく、ロボットの形状や使用目的に合わせて変更できる。

Fig. 11 のようにロボットを構成する際に ACROBAT は同一円周上に配置されるとする。X 軸から角度 ψ_i に配置さ

Fig. 11 Concept of 3-wheeled robot with ACROBATs

れた ACROBAT の接線方向の単位ベクトルを $\mathbf{e}_i$ とすると

$$\mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} \sin \psi_i \\ \cos \psi_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

である。ロボットの並進と回転の速度 V_{Rx} , V_{Ry} , ω_R と各 ACROBAT の速度ベクトル $\mathbf{V}_i$ の関係はつぎのように表わされる。

$$\mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \end{bmatrix} + d\omega_R \mathbf{e}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} d\mathbf{e}_i \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (8)$$

今考えている 3 輪ロボットの場合はつぎようになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_{6 \times 3} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d \sin \psi_0 \\ 0 & 1 & d \cos \psi_0 \\ 1 & 0 & d \sin \psi_1 \\ 0 & 1 & d \cos \psi_1 \\ 1 & 0 & d \sin \psi_2 \\ 0 & 1 & d \cos \psi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} \quad (9)$$

また、各 ACROBAT とアクチュエータの関係は (9) 式からつぎのように表わされる。ここで、 ω_i はモータ i の角速度である。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{6 \times 3} \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{H}_{6 \times 3} = r_m K \begin{bmatrix} \frac{\sin \alpha_0}{\sin(\alpha_0 - \beta_0)} & 0 & \frac{-\sin \beta_0}{\sin(\alpha_0 - \beta_0)} \\ \frac{-\cos \alpha_0}{\sin(\alpha_0 - \beta_0)} & 0 & \frac{\cos \beta_0}{\sin(\alpha_0 - \beta_0)} \\ \frac{\sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 - \beta_1)} & \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \beta_1)} & 0 \\ \frac{-\cos \beta_1}{\sin(\alpha_1 - \beta_1)} & \frac{-\cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \beta_1)} & 0 \\ 0 & \frac{\sin \beta_2}{\sin(\alpha_2 - \beta_2)} & \frac{-\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_2 - \beta_2)} \\ 0 & \frac{-\cos \beta_2}{\sin(\alpha_2 - \beta_2)} & \frac{\cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 - \beta_2)} \end{bmatrix}$$

(9) 式と (10) 式から、モータの角速度とロボットの並進、回転速度の関係式は各式の伝達項を用いて

$$\mathbf{Q}_{6 \times 3} \begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{6 \times 3} \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

と表わされる。非正則行列であるため擬似逆行列を用いた計算を必要とするが、変数をもたない定数行列なのでロボットの制御に用いる際は一度計算するだけで良い。Fig. 10 の正三角形のロボットの場合、(11) 式は (12) 式のように簡単なものとなり、(1) 式で示したオムニホイールロボット同様シンプルな制御を実現できることが確認できる。

$$\begin{bmatrix} V_{Rx} \\ V_{Ry} \\ \omega_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3d} & \frac{1}{3d} & \frac{1}{3d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4. 動作効率

4.1 Actuator Index

ロボットの動作効率を表わす指標の 1 つとして *Actuator Index*¹³⁾がある。この指標によりアクチュエータの使用効率を表わす。参考文献 13) で、*Actuator Index* η_p はつぎのように示される。

$$\eta_p \equiv \frac{\text{Possible Output Power}}{\text{Sum of Installed Actuators Power}} \quad (13)$$

Actuator Index が意味する動作効率とは、注入したエネルギーに対する出力したエネルギーをいう意味の効率ではなく、搭載したアクチュエータの発揮する総パワーに対する、特定のロボット動作時のパワーの利用効率を示す。たとえば、Fig. 4 に示した ACRO により構成される全方向ロボットでは、各車輪の操舵軸と車輪軸にそれぞれ独立した駆動用モータが搭載されている。この構成によれば、直進走行時には操舵用モータは停止しており、車輪用モータの動力のみによりロボットが走行を行なうことになるので、車輪、操舵に同じ容量のモータを用いていると仮定した場合、上記の *Actuator Index* は 0.5 となる。よって、この *Actuator Index* を最大化することは、ロボットに搭載されたアクチュエータの能力を最大限利用することに相当し、ロボットの重量を小さくできるなどの利点がある。

4.2 3 輪全方向移動ロボット

本節では ACROBAT 全方向移動ロボットにおける *Actuator Index* に関して検討する。ACROBAT 全方向移動ロボットは冗長性の問題を解決するだけでなく、すべてのアクチュエータが同時に動作するケースが多いと考えられるので、アクチュエータの使用効率に関して従来型より高くなると期待できる。

Fig. 11 に示される正三角形型の 3 輪全方向移動ロボットの動作効率を検討する。(13) 式の定義を用い、原点から XY

Fig. 12 Actuation Index of equilateral triangle

Fig. 13 Actuation Index of equilateral triangle

平面での全方位への並進動作時の動作効率を計算した結果を Fig. 12 に示す。半径 1 の円は動作効率最大すなわち 100% を表す。3 つの ACROBAT を正三角形型に配置した場合、すべての方向への並進動作時に動作効率は等しくなり、66.7% となることから、これを図示すると円になり、Fig. 12 に示す小さい円がこれに相当する。ACRO を用いた 3 輪全方向移動ロボットの動作効率は 50% であり、アクチュエータ能力を有効に利用できることがわかる。

比較のために 3 輪の配置を Fig. 13(a) のような二等辺三角形に変更した条件での Actuator index のプロットを Fig. 13(b) に示す。この平均値は 67.3% となり正三角形型の配置よりも効率は良くなるが、出力の分布に偏りが見られるため、一般的な全方向移動ロボットを構成する場合には正三角形型がふさわしいと考えられる。

5. シミュレーション

前章での検討の結果から、3 輪ロボットで正三角形型に ACROBAT を配置したものが出力のバランスの観点から適当であると判断した。

そこで本章では ACROBAT 3 輪を用いて構成した全方向移動ロボットが実現可能であることをシミュレーションにより確認する。本シミュレーションでは各辺の長さが 370 mm の正三角形の頂点に ACROBAT を配置する。ロボット全体の挙動と各 ACROBAT の挙動はそれぞれ運動学式を用いて計算される。シミュレーション内で各 ACROBAT は仮想的

Fig. 14 Simulation condition

Fig. 15 Orientation of ACROBATs

Fig. 16 Interval of ACROBATs in the simulation

に連結されているが、相互間の距離、つまり正三角形の辺の長さは拘束されないとして計算を行なう。シミュレーションの中でその辺の長さが保持されれば ACROBAT を用いた全方向移動ロボットが実現可能であることを確認できる。

シミュレーション動作は Fig. 14 に示されている。初期姿勢において各車輪はロボットの中心へ向いている。まず Y 軸方向に 0.8m 移動し、つぎに X 軸方向に 0.8m 移動する。その後は斜め方向の移動を含んだ並進運動を行ない原点に戻るといったものである。シミュレーション結果を Fig. 15, Fig. 16 に示す。Fig. 15 は各 ACROBAT の車輪の姿勢角 ϕ を、Fig. 16

は各 ACROBAT 間の距離を示している．動作の開始直後にはキャストの反転動作などを含んでいるが，初期姿勢において 370 mm であった各 ACROBAT 間の距離はシミュレーション誤差を含むがほぼ一定に保たれており，正三角形型の配置をもつ ACROBAT 全方向移動ロボットは実現可能であると考えられる．

6. 3 輪全方向移動ロボットの設計と試作

6.1 ACROBAT 車輪機構

前節で検討した運動学の妥当性を確認するためにモータ a, b の相対角度を 90° とした試作機が製作されその妥当性と動作性能に関して検討が行なわれた¹²⁾．Fig. 17 に ACROBAT 単輪試作機の外観を示す．

6.2 3 輪の ACROBAT による全方向移動ロボット

提案する ACROBAT を 3 輪搭載する全方向移動ロボットの試作機を設計・製作した．4 章で検討したように，全方向へのアクチュエータ効率が均等になる正三角形配置にて，ACROBAT を搭載する．各車輪の操舵軸間の距離は 370 mm とし，その中央に電動モータを配置，モータの動力は平歯車とプーリを介して，2 つの ACROBAT へのそれぞれのローラに伝達する構造とした．Fig. 18 に 3D 設計図，Fig. 19 に

Fig. 17 ACROBAT single wheel prototype

Fig. 18 Overview of the 3D design of 3-wheeled Omnidirectional Vehicle with ACROBATs

試作機の外観を示す．

それぞれの ACROBAT において，車輪軸と操舵軸の協調動作は球形動力伝達機構にて機械的に実現されることから，制御装置はロボット本体の簡潔な運動学を計算した結果得られる 3 つのモータの速度指令をモータドライバに出力するのみで，ロボットのホロノミックな全方向移動が実現できると考える．このときの制御システムの構成図を Fig. 20 に示す．この構成は従来のアクティブキャストを用いた全方向移動ロボットに必要であった，Fig. 5 に示すシステム構成に比較して非常に簡単になり，全方向車輪を用いた全方向移動ロボットと同程度となることがわかる．

7. 試作機による動作実験

提案した ACROBAT を用いた全方向移動ロボットの動作を確認するために，試作機による動作実験を行なった．試作機のロボットには，車輪の回転や操舵軸の向きなどを測定するセンサを搭載していないことから，デッドレコニングなどの移動計算などの方法を用いることができない．そこで，ロボットの 3 点 (3 輪の操舵軸上) にマークを取り付け，ステレオカメラを用いた 3 次元位置計測システムである QuickMAG により，ロボットの位置と姿勢を別途測定し，ロボットの移動精度などを計測した．実験室に設置した環境においては，計測可能領域は，約 150 mm [W] × 100 mm [D] × 100 mm [H] であり，この計測領域内での測定精度は約 ± 3 mm である．

ロボットの制御装置 (PC)，およびモータドライバなどは地

Fig. 19 Omnidirectional Robot Prototype

Fig. 20 Control block diagram for the omnidirectional robot prototype

上に設置してあり、動作に影響しないよう、上部からモータ動力線をロボットにつなげ動作を行なわせた。ロボット運動学を計算し、3つのモータの速度指令をモータドライバに送信し、ドライバの速度制御機能により、それぞれのモータ個別の速度制御により、ロボットの動作を行なわせている。

Fig. 21(a)(b) にステレオカメラシステムにより計測された軌跡を示す。同図 (a)(b) はそれぞれ、横移動およびその場旋回の動作を行なわせたときの結果である。横移動の途中で、それぞれの車輪は旋回動作 (いわゆるキャスタの裏返り動作) が発生しているが、良好な直線移動が実現できていることが確認できる。その場旋回の動作に関しては、同図 (b) に見られるように、ロボットの中心が初期位置から 50 mm 程度動き、その後は移動後の位置を中心に安定した旋回を行なう動作が確認された。この原因については、詳細な解析がなされていないものの、車輪間の負荷や床面の摩擦力の条件による旋回運動に及ぼす影響が、直進動作の場合と比較して大きいのではないかと考えられる。

実験における動作の連続写真を **Fig. 22** に示す。同図 (a) は横方向への移動のようすである。最上部の時間 0 秒の状態から紙面右方向への移動を行なっている。初期状態として各 ACROBAT の方向が、ロボットの進行方向に対して逆に向くよう設定されていることから、時間 4 秒の近傍で ACROBAT の裏返り動作が発生しているようすが確認できる。その後、進行方向に車輪の向きを揃え、並進動作を継続している。車輪の裏返り動作は、基本的に各車輪独立に発生するが、並進運動の場合には全車輪に同様な運動指令が与えられることから、ほぼ同時刻に裏返ることが多い。今回の実験においては、

(a) Lateral direction

(b) Pivot turn

Fig. 21 Measured positions of robot and ACROBATs

Fig. 22(a) の時間 2 秒から 4 秒にかけてこの動作が観察でき、全車輪がほぼ同時に向きを変更しているようすが確認できる。**Fig. 21(a)** において、この裏返りは、ロボットが 200 mm 移動した時点になるものの、顕著な軌道の変動は観察されていない。なお、この裏返り動作により発生する軌道誤差に関しては、文献 12) で報告されているように、単輪の動作で ± 4 mm 以内である。

また、同図 (b) は旋回動作のようすである。旋回動作においても同様に ACROBAT が裏返り動作を行なっているものの、旋回動作が実行されていることが確認できる。しかしながら、初期位置に対して定常旋回に至る過程で旋回中心が約 50 mm ずれる現象が確認された。このずれに関しては、車輪の裏返りによる軌道誤差 ± 4 mm に比較して、大きい結果である。今回の実験ではその原因については特定できておらず、今後の課題としたい。

なお、前述したように提案する ACROBAT は車輪の回転や操舵軸の向きなどを測定するセンサを搭載していないことから車輪の正確な挙動を用いたデッドレコニングなどの移動計算などの方法を用いることができず、提案するロボットの運動学である (12) 式によるモータの回転情報を用いた移動量推定が限界となる。このため、球同士の間でのすべりを直接検出できないという欠点が発生する。しかしながら一般的な移動ロボットにて問題となる床と車輪の間でのすべりと同様、

(a) Lateral motion

(b) Pivot turn

Fig. 22 Experimental results

モータの動作とロボットの動作が完全に一致しないという点から同一な問題の範疇と考えられる。

この解決のためには、慣性センサや外界センサの使用など多様なアプローチがあると考えられるが、自己位置認識とナビゲーションに絡む研究課題として本論文にて扱う、移動機構の設計と駆動制御の問題とは分離して考えることとする。

8. 結 論

一般的なゴム車輪を用いて全方向移動を実現可能にするキャスタ型全方向移動機構 ACROBAT を提案した。ACROBAT は動力の伝達要素として 2 つの球を使用し、球による動力の合成と分配を行なう。これにより従来のキャスタ型全方向移動機構 ACRO ではソフトウェアにより行なっていたキャスタの車輪駆動軸と旋回軸の制御を機械的に行なうことができ、制御の簡素化、複数輪を組み合わせた際の冗長性の解消などを実現した。

本論文ではこの ACROBAT を複数輪使用して平面 3 自由度の全方向移動ロボットを構成する際の検討指標としてアクチュエータの使用効率を用い 3 輪ロボットの構成において検討を行なった。一般的に全方向移動ロボットにとって使用効率、出力の偏りの少ないことが操作者や経路計画において柔軟性が高い。つぎに、使用効率のバランスの良い ACROBAT を 3 輪正三角形に配置するタイプの全方向移動ロボットに関して動作シミュレーションを行ない、ACROBAT 間の距離が一定に保たれることを示し、実現可能であることを確認した。

以上より、駆動の冗長性を回避できる構成が提案する機構により可能であり、これに伴う制御系も簡素なもので全方向移動システムを構築することができた。

ACROBAT を 3 輪用いた全方向移動ロボットによる動作実験では、若干の誤差が認められるものの、並進動作と旋回動作の基本動作において要求する動きが実現できることを確認した。しかしながら、旋回動作においてロボットに旋回中心が初期位置から 50 mm 程度ずれて定常旋回運動になるという新たな問題も明らかになり、これは今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) J. Grabowiecki: Vehicle-wheel, US Patent No.1,305,535 (1919)
- 2) B.E. Ilon: Directionally Stable Self Propelled Vehicle, US Patent No.3,746,112 (1973)
- 3) S. Hirose and S. Amano: The VUTON: High Payload High Efficiency Holonomic Omni-Directional Vehicle, *6th Int. Symp. on Robotics Research*, 253/260 (1993)
- 4) M. Wada and H.H. Asada: Design and Control of a Variable Footprint Mechanism for Holonomic and Omnidirectional Vehicles and its Application to Wheelchairs, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **15**-6, 978/989 (1999)
- 5) M. West and H. Asada: Design of a Holonomic Omnidirectional Vehicle, *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 97/103 (1992)
- 6) M. Wada and S. Mori: Holonomic and Omnidirectional Vehicle with Conventional Tires, *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3671/3676 (1996)

- 7) M. Wada, A. Takagi and S. Mori: Caster Drive Mechanisms for Holonomic and Omnidirectional Mobile Platforms with no Over Constraint, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1531/1538 (2000)
- 8) R. Holmberg and O. Khatib: Development and control of a holonomic mobile robot for mobile manipulation tasks, *Intl. J. Robotics Research*, **19**-11, 1066/1074 (2000)
- 9) Y. Li, T. Zielinskay, M.H. Ang, Jr. and W. Lin: Vehicle Dynamics of Redundant Mobile Robots with Powered Caster Wheels, *Proceedings of the 16th CISM-IFToMM Symposium*, 221/228 (2006)
- 10) W. Chung, C.-B. Moon, C. Jung and J. Jin: Design of the Dual Offset Active Caster Wheel for Holonomic Omnidirectional Mobile Robots, *INTECH International Journal of Advanced Robotic Systems*, **7**-4, 101/106 (2010)
- 11) M. Wada, Y. Inoue and T. Hiramatsu: A New Active-caster Drive System with a Dual-ball Transmission for Omnidirectional Mobile Robots, *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2525/2532 (2012)
- 12) 和田, 井上, 平間: 球による動力伝達機構を用いたアクティブキャスタの運動解析と機構設計, *日本ロボット学会誌*, **31**-6, 591/598 (2013)
- 13) S. Hirose and K. Arikawa: Coupled and Decoupled Actuation of Robotic Mechanisms, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 33/39 (2000)

[著 者 紹 介]

和 田 正 義 (正会員)

1990 年東京理科大学工学部機械工学科卒業。同年 (株) 富士電機総合研究所入社。96~98 年マサチューセッツ工科大学客員研究員。2002 年名古屋大学にて博士 (工学)。2005 年埼玉工業大学工学部機械工学科助教授, 2007 年埼玉工業大学工学部ヒューマン・ロボット学科准教授, 2010 年東京農工大学工学部先端機械システム部門准教授。現在に至る。全方向移動ロボット, 知的車椅子, ジョイスティック式自動車運転支援装置, 電気自動車などの研究, 開発に従事。IEEE Robotics and Automation Society, 日本機械学会, 電気学会, IFToMM 会議, 福祉工学会, 自動車技術会などの会員。

平 間 貴 大

2012 年東京農工大学工学部機械システム工学科卒業。同年同大学大学院工学府機械システム工学専攻入学。2014 年同大学大学院同専攻修了。現在, 小松製作所勤務。