全方向型移動ロボットの制御に関する研究*

(第4報, 完全球形ロボットの機構, 動作原理, 制御法および実験結果)

越山 篤^{*1}, 藤井 邦英^{*1}, 有田 恒一郎^{*2}

Development and Motion Control of an All-Direction Steering-type Mobile Robot (4th Report, Mechanisms, Motion Principle, Control Methods and Experimental Results of a Stand-alone Spherical-wheeled Robot)

Atsushi KOSHIYAMA, Kunihide FUJII and Kohichiro ARITA

This paper describes new mechanisms, principle, control methods, computer simulation and experimental results of the second version of an all-direction steering-type mobile robot which has a spherical monowheel. Basic simulation results of straight running and rotation coincide with experimental results of the robot, and these results clarified, firstly, relationships between center of gravity and running ability of the robot, and secondly, the relationships between the robot's rotational angle and friction torque of the spherical wheel with the ground. Furthermore, it was confirmed experimentally that the new robot has high maneuverability, such as omnidirectional travel with zero-turning-radius rotation on any kind of surface. Therefore, it is expected that the spherical-wheeled robot developed here can be applicable as a safe personal service robot that can work with human beings in a limited space.

Key Words: Moving Robot, Mobile Robot, Spherical Monowheel, Personal Robot, Mechatronics and Robotics, Zero Turning Radius, Safety

1. 緒 言

現在, ロボットの大部分は産業用ロボットとして生産自動化を中心とした用途に用いられているが, ロボットをより広い分野で人間と共存しつつ使用するためには移動ロボットの安全で優れた移動機構とこれの知的制御法の開発が必要不可欠である。

本研究は球形車輪をもつ全方向型移動ロボットを開発し, これにより実現される新しい駆動方式, 動作および知的制御法について研究することを目的とする。

前報^{(1)~(3)}に報告した全方向型移動ロボット第1号機は, 平行車輪が上部構造体を支える倒立振り子型の平行二輪車^{(4)~(7)}が機構, 機動性および安全性の面で進化することにより完成したものであるため, 球殻車輪と車軸との幾何学的関係が一定の駆動方式をとるとともに, ロボットの本体が球殻車輪の外部に配置される構造となっており, エネルギー源やコントローラはロボットの外部に配置していた。これに対し, 第2号機は球形車輪に対する車軸の相対位置を自由に変化させることができる駆動機構と自立システムの開発によ

り, 第1号機の機動性と安全性をさらに高めた完全自立型の全方向型移動ロボットである。本報では第2号機の機構, 動作原理, 計算機シミュレーションおよび動作実験結果について報告する。

2. 機 構

2.1 機構 図1に新しく開発した全方向形移動ロボットの機構を示す。第2号機では車輪が球殻車輪に対し任意に相対位置変化できる球形車輪駆動機構の

Fig. 1 Mechanisms of spherical-shape all-direction steering-type mobile robot

* 原稿受付 1995年6月20日.

^{*1} 正員, ソニー(株) (〒141 東京都品川区北品川6-7-35).

^{*2} ソニー(株).

開発により、球殻外部への突起物は全くなり、旋回半径0で全方向へ移動できることが最大の特徴である。

本ロボットは大きく分けて球殻車輪と球殻車輪内蔵型駆動機構(WBDM: Wheel Built-in Driving Mechanisms)から構成される。球殻車輪の直径は400 mm、全体の質量は14.4 kgであり、制御用マイクロコンピュータや駆動用バッテリーを球殻車輪に内蔵した完全自立型である。

(a) 球殻車輪: 球殻車輪は厚さ6 mmの半球殻を二つ組合せることにより内外面ともに滑らかに構成され、外部への突起物がないためロボットが環境に対して危害を与えることは極めて少ない。これらの半球殻はソニー(株)生産システムビジネスセンターにおいて開発された光造形装置(Solid Creator®)を使用し、Ar レーザを平面走査させてUV 樹脂を積層状に硬化させる製法により製作されている。積層厚さは0.2 mmであり球形車輪直径の0.05%と十分小さいため表面処理などによる平滑化は行っていない。

(b) WBDM: WBDMは球殻車輪駆動機構ならびに姿勢安定化機構から構成される。以下にそれぞれの機構について説明する。

(b-1) 球殻車輪駆動機構: 球殻車輪駆動機構はWBDM下部に配置された二つの独立に制御される駆動車輪、減速機構ならびにDCサーボモータによりなる駆動機構から構成されている。WBDMの駆動車輪は球殻車輪に内接しているため2個の駆動車輪をそれぞれ制御することにより球殻車輪は制御される。また、駆動機構の最下部には鉛蓄電池(12 V, 7 Ah)が組込まれており、ロボットへの全エネルギーを供給するとともに、系の低重心化のための釣合いおもりとなっている。このようにロボットの重心位置は球殻車輪の中心よりも低く、系はだるまのように安定な構造となっている。

(b-2) 姿勢安定化機構: ロボットの走行や旋回動作により、WBDMは球殻車輪内部でさまざまな姿勢をとるが、ロボットに搬送などの作業を行わせる場合、この姿勢変化を吸収し常に地面に対して任意の位置を保持する機構が必要となる。姿勢安定化機構はWBDM上部に配置されたレールと移動台車およびそれぞれを駆動する2個のDCサーボモータと減速機構により構成される。レールがロボット進行方向に対して左右(ロール)方向、台車が、前後(ピッチ)方向に動作することによりロボットの2自由度の姿勢安定化が可能となる。また、レール台車には、姿勢安定化制御および旋回制御のため、ピッチ、ヨー(ロボットの鉛直軸まわり)およびロール方向の計3個のレートジャイロ

を搭載し、これから得られる角速度データをもとに、それぞれ方向への傾き角、角加速度を算出する。また、台車に釣合いおもりを取付け、系の重心位置をアクティブに変化させることによりロボットの姿勢をアクティブに制御することも可能である。同機構によるロボットの姿勢安定化については続報にて報告の予定である。

2.2 制御システムの構成 ロボットコントローラとして16ビットマイクロコンピュータを採用し、駆動車輪に2個、姿勢安定化機構に2個、計4個のモータ軸直結のエンコーダと容量型加速時計およびレートジャイロからのデータをもとにロボットの各出力軸をトルク制御する。

3. 動作原理

本ロボットは、WBDM下部に配置した2個の駆動車輪を独立に制御することによりさまざまな運動が可能である。ここでは、これらの基本動作である直進走行と旋回半径0の旋回の動作原理について説明する。

3.1 直進走行原理 図2にロボットをWBDM進行方向に対し真横から見たモデル図を示す。以下、同モデルを用いてロボットの直進走行原理を説明する。

WBDMはキャストにより保持され球殻車輪内を進行方向に移動するため、球殻車輪回転中心とWBDM重心位置との距離は常に一定となる。WBDMの重心位置が球殻車輪の中で変化すれば、式(1)で導かれる球殻車輪の接地点に関するピッチ方向への回転トルクが発生し、ロボットの直進走行が実現される。

$$T = Mgl\cos\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

T : 球殻車輪のピッチ方向への回転トルク

M : WBDMの質量

l : 球殻車輪中心からWBDM重心までの距離

Fig. 2 Principles of straight-running

Fig. 3 Principles of rotation

θ : 球殻車輪中心からの WBDM 重心位置の角度

3・2 旋回半径 0 の旋回動作原理 図3にロボット旋回時のモデル化図を示す。ここでは、同モデルにより、ロボットの旋回半径 0 の旋回原理について説明する。ロボットは WBDM の駆動車輪を逆方向に同一角度駆動することにより旋回半径 0 の旋回を行うが、この旋回原理をロボットの鉛直軸 (z 軸) 回りのトルクの釣合いに注目して考えれば、次式が成り立つ。

$$J_{Gx1} \ddot{\theta}_{x1} + J_{Gx2} (\ddot{\theta}_{x1} + \ddot{\theta}_{x2}) + D_{\theta x1} = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、

J_{Gx1} : 球殻車輪の慣性モーメント

θ_{x1} : 球殻車輪の地面に対する z 軸回りの回転角

J_{Gx2} : WBDM の慣性モーメント

θ_{x2} : WBDM の球殻車輪に対する z 軸回りの回転角

$D_{\theta x1}$: 地面と球殻車輪間の摩擦トルク

ここで、もし摩擦トルクを無視できれば上式は

$$J_{x1} \ddot{\theta}_{x1} + J_{x2} (\ddot{\theta}_{x1} + \ddot{\theta}_{x2}) = 0 \quad \cdots \cdots (3)$$

となり、WBDM と球殻車輪の地面に対する回転角 θ_{x1} , $\theta_{x1} + \theta_{x2}$ は、それぞれの回転角加速度を二重積分することにより算出され、これらは慣性モーメントの逆比の関係にあることがわかる。

4. モデル化の運動方程式

4・1 直進走行 ロボットの直進走行のようすを図4のように側面からモデル化し運動方程式を求める。と式(4)となる(ラグランジュの運動方程式より導出)。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{x1} \\ \ddot{\theta}_{x2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{x1} \\ \dot{\theta}_{x2} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{x1}^2 \\ \dot{\theta}_{x2}^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} [\dot{\theta}_{x1} \dot{\theta}_{x2}] \\ & + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{x1} \\ T_{x2} \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

Fig. 4 Modeling of straight-running

ここに、

$$A_{11} = M_1 r_1^2 + J_{Gx1} + M_2 r_1^2 + 2M_2 r_1 e_2 \sin(\theta_{x1} + \theta_{x2}) + M_2 e_2^2 + J_{Gx2}$$

$$A_{12} = M_2 r_1 e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2})$$

$$A_{21} = M_2 r_1 e_2 \sin(\theta_{x1} + \theta_{x2}) + M_2 e_2^2 + J_{Gx2}$$

$$A_{22} = M_2 e_2^2 + J_{Gx2}$$

$$B_{11} = M_2 r_1 e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2})$$

$$B_{12} = M_2 r_1 e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2})$$

$$B_{21} = B_{22} = C_2 = D_{12} = D_{21} = 0$$

$$C_1 = 2M_2 r_1 e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2})$$

$$D_{11} = D_{\theta x1}, \quad D_{22} = D_{\theta x2}$$

$$G_1 = M_2 g e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2}) + T_{fx1}$$

$$G_2 = M_2 g e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2}) + T_{fx2}$$

ただし、

$$T_{fx1} = \begin{cases} -T_{fx1-c}(\dot{\theta}_{x1} < -\varepsilon) \\ T_{fx1-s}(-\varepsilon \leq \dot{\theta}_{x1} < \varepsilon) \\ T_{fx1-c}(\varepsilon \leq \dot{\theta}_{x1}) \end{cases}$$

$$T_{fx2} = \begin{cases} -T_{fx2-c}(\dot{\theta}_{x2} < -\varepsilon) \\ T_{fx2-s}(-\varepsilon \leq \dot{\theta}_{x2} < \varepsilon) \\ T_{fx2-c}(\varepsilon \leq \dot{\theta}_{x2}) \end{cases}$$

なお、 $-\varepsilon \leq \dot{\theta}_{x2} < \varepsilon$ は回転角速度が十分に小さく回転していないとみなせる場合を意味しており、 ε の大きさはシミュレーションにおいて無視できるとした。

ここに、

r_1 : 球殻車輪半径

e_2 : WBDM 重心と球殻車輪中心間の距離

θ_{x1} : 球殻車輪の回転角

θ_{x2} : WBDM の球殻車輪に対する回転角

J_{Gx1} : 球殻車輪の重心回りの慣性モーメント

J_{Gx2} : WBDM の重心回りの慣性モーメント

M_1 : 球殻車輪質量

M_2 : WBDM 質量

$D_{\theta x1}$: 球殻車輪-地面間の粘性摩擦トルク係数

$D_{\theta x2}$: WBDM-球殻車輪間の粘性摩擦トルク係数

T_{fx1} : 球殻車輪-地面間のクーロン摩擦トルクおよび静止摩擦トルク

T_{fx2} : WBDM-球殻車輪間のクーロン摩擦トルクおよび静止摩擦トルク

T_{fx1-c} : 球殻車輪-地面間のクーロン摩擦トルク

T_{fx2-c} : WBDM-球殻車輪間のクーロン摩擦トルク

T_{fx1-s} : 球殻車輪-地面間の静止摩擦トルク

T_{fx2-s} : WBDM-球殻車輪間の静止摩擦トルク

ε : 静止摩擦が作用する微小回転角速度

T_{x1} : 球殻車輪への制御入力トルク

T_{x2} : WBDM への制御入力トルク

4・2 旋回動作 ロボットの旋回動作のようすを図5に示す上面モデルで表し、運動方程式を求めると式(5)となる。

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{z1} \\ \ddot{\theta}_{z2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{z1} \\ \dot{\theta}_{z2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{z1} \\ T_{z2} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$$A_{11} = J_{Gx1} + J_{Gx2}, \quad A_{12} = A_{21} = A_{22} = J_{Gx2}$$

$$D_{11} = D_{\theta z1}, \quad D_{22} = D_{\theta z2}, \quad D_{12} = D_{21} = 0$$

$$G_1 = T_{fx1}, \quad G_2 = T_{fx2}$$

ただし、

$$T_{fx1} = \begin{cases} -T_{fx1-c} (\dot{\theta}_{z1} < -\varepsilon) \\ T_{fx1-s} (-\varepsilon \leq \dot{\theta}_{z1} < \varepsilon) \\ T_{fx1-c} (\varepsilon \leq \dot{\theta}_{z1}) \end{cases}$$

$$T_{fx2} = \begin{cases} -T_{fx2-c} (\dot{\theta}_{z2} < -\varepsilon) \\ T_{fx2-s} (-\varepsilon \leq \dot{\theta}_{z2} < \varepsilon) \\ T_{fx2-c} (\varepsilon \leq \dot{\theta}_{z2}) \end{cases}$$

ここに、

θ_{z1} : 球殻車輪の回転角

Fig. 5 Modeling of rotation

θ_{z2} : WBDM の回転角

J_{Gx1} : 球殻車輪の重心回りの慣性モーメント

J_{Gx2} : WBDM の重心回りの慣性モーメント

$D_{\theta z1}$: 球殻車輪-地面間の粘性摩擦トルク係数

$D_{\theta z2}$: WBDM-球殻車輪間の粘性摩擦トルク係数

T_{fx1} : 球殻車輪-地面間のクーロン摩擦トルクおよび静止摩擦トルク

T_{fx2} : WBDM-球殻車輪間のクーロン摩擦トルクおよび静止摩擦トルク

T_{fx1-c} : 球殻車輪-地面間のクーロン摩擦トルク

T_{fx2-c} : WBDM-球殻車輪間のクーロン摩擦トルク

T_{fx1-s} : 球殻車輪-地面間の静止摩擦トルク

T_{fx2-s} : WBDM-球殻車輪間の静止摩擦トルク

ε : 静止摩擦が作用する微小回転角速度

T_{x1} : 球殻車輪への制御入力トルク

T_{x2} : WBDM への制御入力トルク

Table 1 System parameters on straight-running simulation

$r_1 = 0.20 \text{ m}$	$J_{Gx1} = 0.103 \text{ kgm}^2$	$T_{fx1-c} = 0.28 \text{ Nm}$
$e_2 = 0.066 \text{ m}$	$J_{Gx2} = 0.115 \text{ kgm}^2$	$T_{fx2-c} = 0 \text{ Nm}$
$M_1 = 3.02 \text{ kg}$	$D_{\theta x1} = 0.14 \text{ Nms}$	
$M_2 = 11.2 \text{ kg}$	$D_{\theta x2} = 0 \text{ Nms}$

(a) Time changes in θ_{z1} , θ_{z2} , $\dot{\theta}_{z1}$, and $\dot{\theta}_{z2}$

(b) Stick diagram

Fig. 6 Simulation results on straight-running

5. 計算機シミュレーション

5・1 直進走行 式(4)で示した運動方程式を用い、ロボットの直進走行シミュレーションを行った。駆動車輪への指令値は、式(6)に示す指令値により停止状態から等加速度走行を行った後、等速度走行を行い、最後に等加速度減速走行をするように与えた。システムパラメータを表1、車輪の制御則を式(7)、計算機シミュレーション結果を図6に示す。

図6よりWBDMの回転角曲線が指令値によく追従していることが確認できる。同図から直進走行開始時にWBDMが球殻車輪内を回転するとその動きに影響されて球殻車輪が進行方向へ回転し始めているようすが確認できる。走行開始後は球殻車輪の回転角は常にWBDMの回転の反対方向に変化しており、WBDMの回転角によって球殻車輪の回転角が制御できることがわかる。また、球殻車輪の回転角速度には約2.3s周期の振動現象が見られる。これは、球形ロボットが、倒れても起きあがるだるまの動作に似た接地点回りの回転振動を伴いながら進行方向へ走行していることを示している。図6(b)の棒線図においてもWBDMがピッチ方向の回転振動を伴いながら球殻車輪の下部に位置し球殻車輪を駆動するようすがわかる。

なお、システムパラメータは後述の直進走行実験と同じ値を用いている。また、直進走行時の球殻車輪に対するWBDMの回転角は、幾何学的にWBDMの駆動車輪の回転角に比例しているため、実機においても直接的に位置制御を加えることができる。

[指令値]

$$\theta_{x2r} = \begin{cases} 0 & (0 \leq t < t_s) \\ \frac{1}{2} a(t - t_s)^2 & (t_s \leq t < t_s + t_a) \\ \frac{1}{2} a t_a^2 + a t_a(t - t_s - t_a) & \left(\begin{matrix} t_s + t_a \leq t \\ < t_s + t_a + t_{cv} \end{matrix} \right) \\ a t_a^2 + a t_a t_{cv} & \left(\begin{matrix} t_s + t_a + t_{cv} \leq t \\ < t_s + 2t_a + t_{cv} \end{matrix} \right) \\ -\frac{1}{2} a(t - t_s - 2t_a - t_{cv})^2 & \left(\begin{matrix} t_s + t_a + t_{cv} \leq t \\ < t_s + 2t_a + t_{cv} \end{matrix} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

a : 回転加速度

t_s : 停止時間

t_a : 加速時間

t_{cv} : 一定速度回転時間

[制御則]

$$T_{x2} = K_{2-p}(\theta_{x2r} - \theta_{x2}) + K_{2-i} \sum (\theta_{x2r} - \theta_{x2})$$

$$+ K_{2-d}(\dot{\theta}_{x2r} - \dot{\theta}_{x2}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

T_{x1} : 球殻車輪からWBDMへの制御入力トルク

K_{2-p} : WBDM回転角比例ゲイン

K_{2-i} : WBDM回転角積分ゲイン

K_{2-d} : WBDM回転角微分ゲイン

θ_{x2r} : WBDM回転角指令値

θ_{x2} : WBDM回転角

5・2 旋回動作 図5に示す上面モデルにより旋回動作の計算機シミュレーションを行った。制御はWBDMの球殻車輪に対する旋回角に位置サーボ入力を加えることにより行い、指令値は停止状態から等角加速度旋回を行った後、等角加速度減速旋回を行い停止するよう設定した。最終的な旋回角度の目標値は $\pi/2\text{rad}$ とした。

WBDM旋回の指令値を式(8)に、入力トルク制御則を式(9)に示す。

[指令値]

$$\theta_{x2r} = \begin{cases} \frac{1}{2} a t^2 & (0 \leq t < \sqrt{\frac{\pi}{a}}) \\ \pi - \frac{1}{2} a \left(t - 2\sqrt{\frac{\pi}{a}} \right)^2 & \left(\sqrt{\frac{\pi}{a}} \leq t < 2\sqrt{\frac{\pi}{a}} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

a : 回転加速度

[制御則]

$$T_{x2} = K_{2-p}(\theta_{x2r} - \theta_{x2}) + K_{2-i} \sum (\theta_{x2r} - \theta_{x2}) + K_{2-d}(\dot{\theta}_{x2r} - \dot{\theta}_{x2}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

T_{x1} : 球殻車輪からWBDMへの制御入力トルク

K_{2-p} : WBDM回転角比例ゲイン

K_{2-i} : WBDM回転角積分ゲイン

K_{2-d} : WBDM回転角微分ゲイン

θ_{x2r} : WBDM回転角指令値

θ_{x2} : WBDM回転角

(a) 表2に示す地面との摩擦トルクが異なる2種類のシステムパラメータで動作の計算機シミュレーションを行った。このシステムパラメータは、後述の旋回実験で実機を用いて測定した値を使用している。

実験結果を図7で示す。WBDMは球殻車輪に対し

Table 2 System parameters on rotating simulation

$J_{G1} = 0.105 \text{ kgm}^2$	$T_{f1-c} = \begin{cases} 0.0597 \text{ Nm} & (\text{Case A}) \\ 0.143 \text{ Nm} & (\text{Case B}) \end{cases}$
$J_{G2} = 0.116 \text{ kgm}^2$	
$D_{\theta1} = D_{\theta2} = 0 \text{ Nms}$	$T_{f2-c} = 0 \text{ Nm}$

(a) With low friction torque A

(b) With high friction torque B

Fig. 7 Simulation results of Rotation

Fig. 8 Relationships between rotational angle and friction torque of WBDM and Spherical wheel (Computer simulation)

て旋回トルク T_{z2} を与え、その結果地面に対して旋回することがわかる。一方、球殻車輪は、WBDM の旋回により受けるトルク T_{z2} により、WBDM の反対方向に回転することがわかる。すなわち、球形ロボットが旋回するようすを外から見れば、進路の変更方向とは反対方向に球殻車輪が回転することとなる。

最終的な WBDM の旋回角度は球殻車輪と地面の摩擦トルクが大きい場合のほうが大きくなっている。これは第1に地面と球殻車輪との摩擦トルクが大きいため、旋回開始直後から球殻車輪回転角速度 $\dot{\theta}_{z1}$ の時間変化が小さくなり、WBDM が大きく旋回していると考えられる。第2に旋回加速時に球殻車輪に与えられた負の回転角速度が摩擦トルクの大きい場合では減

Table 3 Inertia ratio between spherical wheel and WBDM

	Inertia kgm^2		Inertia ratio
	WBDM	Spherical wheel	
Case C	0.05	0.15	1/3
Case D	0.105	0.116	$\approx 1/1$
Case E	0.15	0.05	3/1

Fig. 9 Influences of friction torque T_{fz1-c} and inertia ratio on rotational angle

少し 0 rad/s となり、続く旋回減速時に球殻車輪に正の回転角速度が与えられ、最終的に旋回開始時の角度に球殻車輪が戻ることに原因があると考えられる。すなわち、旋回加速動作から減速動作に移った直後である実験開始後 1.7 s の時点で、摩擦トルクの大きい場合では旋回速度が 0 rad/s となっているのに対して、摩擦トルクの小さい場合では約 -0.6 rad/s の回転角速度を維持していることが、最終的な旋回角度差を生じさせる原因となっている。

(b) 図 8 に、球殻車輪と地面間のクーロン摩擦トルク T_{fz1-c} を変化させたときの、地面に対する WBDM の旋回角 $\theta_{z1} + \theta_{z2}$ の時間的変化の計算機シミュレーション結果を示す。パラメータは表 2 の値を使用した。摩擦トルクが大きい場合の地面に対するロボットの旋回角は、球殻車輪に対する WBDM の最終的な旋回角である $\pi/2$ rad に極めて近い値を示している。一方、摩擦が小さい場合は球殻車輪と WBDM がそれぞれの慣性モーメントの逆比の割合で旋回しており、これを数式化すれば式(10)となる。

$$\begin{aligned} \theta_{z1} + \theta_{z2} &= \frac{J_{Gz1}}{J_{Gz1} + J_{Gz2}} \cdot \frac{\pi}{2} \\ \theta_{z2} &= -\frac{J_{Gz2}}{J_{Gz1} + J_{Gz2}} \cdot \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad \text{.....(10)}$$

これは WBDM が地面との摩擦トルクが大きいほ

ど効率的に旋回できることを示している。また、例えばガラス上のように摩擦トルクが小さい場合においても、WBDMは球殻車輪とWBDMの慣性モーメントの逆比の割合で旋回することが確認でき、いかなる地面の上でもロボットは旋回できることがわかる。

図9は、球殻車輪と地面間の摩擦トルクやWBDMと球殻車輪の慣性モーメント比が、施回を終了した時点(旋回開始5s後)のWBDMと球殻車輪の旋回角度に及ぼす影響を示している。慣性モーメント比は表3に示した3種類について計算した。摩擦トルクが作用しないときには慣性モーメントの逆比に比例した旋回をするが、摩擦トルクの増大とともに球殻車輪の旋回角は0 radに収束し、WBDMの旋回角は指令値に漸近するようすがわかる。ここで用いた摩擦トルクは速

Fig. 10 Robot with two support rings and an arm on a rotary encoder

(a) Time changes in θ_{x1} , θ_{x2} , $\dot{\theta}_{x1}$ and $\dot{\theta}_{x2}$

(b) Stick diagram

Fig. 11 Experimental result of straight-running

度の符号のみに依存し、絶対値が一定のクーロン摩擦を仮定し、静止摩擦トルクは0 Nmとした。

6. 直進走行実験

直進走行原理の検証と動作の特性を明らかにするため、平面上での直進走行実験を行った。

6.1 実験装置 図10に示すように球殻車輪に二つの補助リングを取付け、ロールおよびヨー方向に動かないよう拘束し、WBDMの二つの駆動車輪を同一角度同方向へ回転させ直進走行実験を行った。このとき図4に示したように各角度を表記し、WBDMの駆動車輪駆動用モータ軸直結のエンコーダ情報から求められるWBDMの球殻車輪に対する回転角 θ_{x2} と、補助アームと球殻車輪間に装着されたロータリエンコーダ情報より求められる球殻車輪の回転角 θ_{x1} を5ms間隔サンプリングの時系列データとして取得した。

6.2 制御方法 制御は計算機シミュレーションの式(7)と同様に、球殻車輪に対するWBDMの回転角に位置サーボを加えることにより行った。制御目標についても計算機シミュレーションと同様に設定した。

6.3 実験結果 図11に実験結果を示す。WBDMが球殻車輪内を進行方向へ移動すると、球殻車輪は進行方向へ走行することが確認された。球殻車輪の回転角は、球形ロボットの固有振動の影響と思われる周期約2.1sの振動を伴いつつ、全体としてWBDMの回転角と反対方向に回転することがわかる。4.1節の計算機シミュレーション結果と実機の動作はほぼ一致しており、3.1節の直進動作原理が正しいことが確認できる。球殻車輪回転角度の振動周期や振幅が若干異なっているが、これはパラメータの測定誤差やWBDMと球殻車輪内壁間の摩擦の影響であ

Fig. 12 Experimental system of rotation

Table 4 Value of coulomb friction torque

	Friction Torque
Case A	0.0597 Nm
Case B	0.143 Nm

(a) With low friction A

(b) With high friction B

Fig. 13 Result of rotational experiment

と考えられる。なお、硬い床の上で実験を行ったため、補助リング使用による接地条件の変化は無視できるとした。また、直進基礎実験からロボットの直進に対する真直度は1~4 m以内において指令値の $\pm 2\%$ 以内に収まっていることを確認している。

7. 旋回動作実験

ロボットの旋回動作原理の検証と動作の確認を行うため、製作した測定装置上で旋回動作実験を行った。

7.1 実験装置 図12に旋回特性測定装置を示す。旋回実験はロボットを摩擦少なく回転するターンテーブル上に設置し、ロボットに z 軸回り旋回半径0の旋回をさせることによって行った。旋回動作は駆動車輪およびターンテーブルに取付けたロータリエンコーダ情報より確認することができる。また、同装置にはフェルトを巻付けたアームが取付けてあり、ターンテーブルに任意のクーロン摩擦トルクを付加することができる。フェルト棒のターンテーブルに対する摩擦トルクを変化させることは、地面と球殻車輪との摩擦トルクを変化させることと等価と考えられる。

7.2 制御方法 WBDMの二つの駆動車輪を同一角度反対方向へ回転させ旋回半径0の旋回を行う。このとき駆動車輪の回転角はWBDMと球殻車輪の回転角度に比例する。制御は前述のシミュレーションと同様にWBDMの球殻車輪に対する旋回角に位置サーボ入力を加えることにより行い、最終制御目標についても計算機シミュレーションと同様にした(最終旋回角度は $\pi/2\text{rad}$)。

7.3 実験結果 表4に示す摩擦トルクをターンテーブルに付加した場合のWBDMと球殻車輪の回転角度、回転角速度の時間変化を図13に示す。

球殻車輪ならびにWBDMの回転角速度や回転角度の時間変化は、図7のシミュレーション結果とほぼ一致しており、次の2点を確認することができる。

(1) 実機における実験において球殻車輪内でWBDMを回転させたとき、WBDMが地面に対して旋回できることが示されており、球形ロボットは半径0の旋回を行うことができる。

(2) 地面-球殻車輪間の摩擦トルクが大きい場合は地面に対するWBDMの旋回角度は大きくなり、その旋回角度は球殻車輪に対するWBDMの回転角度に近い値となる。また、球殻車輪-地面間の摩擦トルクが小さい場合は、地面に対するWBDMの旋回角度は小さくなり、地面に対する球殻車輪とWBDMの旋回角度はそれらの慣性モーメントの逆比の割合に近い値を示す。したがって、球形ロボットは地面の摩擦トルクが小さい場合においても旋回可能である。

実機の動作と計算機シミュレーションで若干旋回角度が異なっているが、これは実際の動作時には球殻車輪と地面間の摩擦トルクとしてクーロン摩擦トルクのみでなく静止摩擦トルクが作用することおよびWBDMと球殻車輪内壁間の摩擦トルクが実機においては無視できないことが原因と考えられる。

8. 結 言

(1) 車軸が球殻車輪に対し任意に相対位置変化する駆動機構をもった突起物が全くない安全性の高い球形自立形の全方向形移動ロボットを開発した。

(2) 球形ロボットの直進走行および旋回半径0の旋回動作が、提案した側面および上面からの二次元モデルにより、計算機上で確認できることを示した。

(3) 直進走行の原理を示し、それに基づく計算機シミュレーションと実験を行い、WBDMと完全球殻車輪とを組合せた新駆動方式により直進走行が可能であることを確認した。

(4) 球形ロボットの旋回半径0の旋回動作の原理

を示すとともに、計算機シミュレーションと実験を行い、平面上において、地面と球殻車輪間の回転摩擦トルクのロボット旋回角に対する影響を明らかにした。さらに、実機による実験によりいかなる摩擦の地面上においてもロボットの旋回半径 0 の旋回が可能であることを示した。

実機の製作におきましてソニー(株)生産システムビジネスセンター精密プロセスシステム部システム制御課統括課長 播磨屋 博氏, RME エナジー部門研究員 野田幸夫氏ならびに SONY PRECISION ENGINEERING CENTER(SINGAPORE)研究員 宮沢達夫氏に、また、論文執筆に際し電気通信大学機械制御工学科教授 山藤和男先生に多大なご支援ならびに親身なる指導をいただいたことを付記し謝意を述べる。

文 献

- (1) 越山 篤・山藤和男, 全方向型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および走行制御), 機論, 58-548, C (1992), 1128-1136.
- (2) 越山 篤・山藤和男, 全方向型移動ロボットの制御に関する研究(第2報, 姿勢安定化および坂道走行に関する解析と実験), 機論, 58-548, C (1992), 1137-1145.
- (3) 越山 篤・山藤和男, 全方向型移動ロボットの制御に関する研究(第3報, 旋回走行の動作原理, 制御法および実験), 機論, 58-548, C (1992), 1146-1153.
- (4) 山藤和男・馮 青, 平行二輪車の姿勢制御に関する研究(第2報, 実験結果), 精密工学会誌, 54-9 (1988), 1756-1763.
- (5) 山藤和男・宮川 靖・河村 隆, 平行二輪車の同調および操舵制御, 機論, 55-513, C (1989), 1229-1234.
- (6) 平林友一・山藤和男, 可変構造型移動ロボットの制御に関する研究(第1報, 制御アーム-車輪型モデルの姿勢安定化および走行制御), 機論, 56-523, C (1990), 721-730.
- (7) 山藤和男・越山 篤, 可変構造型平行二輪車の姿勢および走行制御, 機論, 56-527, C (1990), 1818-1825.