全方向形回転跳躍球形ロボットの開発と制御

藤岡 潤^{*1}, 中村 成吾^{*2}, 関 啓明^{*2}

Development and control of all direction jumping and rolling spherical robot

Jun FUJIOKA^{*1}, Seigo NAKAMURA^{*2} and Hiroaki SEKI^{*2}^{*1} Department of Mechanical Engineering, Ishikawa National College of Technology
ta-1 Kitacyujo, Tsubata-machi, Kahoku-gun, Ishikawa 929-0392, Japan^{*2} School of Mechanical Engineering, College of Science and Engineering Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan

Received 18 March 2015

Abstract

This paper describes new mechanisms, principle, control methods and experimental results of the jumping and rolling spherical robot which has not any projection. The robot consists of spherical mono wheel, internal drive unit and internal jumping mechanism using a compression coil spring. Straight running is performed by movement of the centroid when the drive unit moves along the inner surface of the spherical wheel, and turning is performed by rotating of the drive unit and friction torque of the spherical wheel with the ground. Theoretical result of straight running and turning movement coincide with experimental results of the robot. Jumping movement is caused by impact force between whole internal mechanisms and the inner surface of the spherical wheel by releasing stored energy in the spring. It was confirmed experimentally that the new robot has high jumping faculty in addition to the basic movement of spherical robot. Furthermore, jumping in any oblique direction is performed by control the posture of internal mechanism, and it becomes possible for the robot to go up the steps of stairs in this way. Therefore, we conclude that the all direction jumping and rolling spherical robot which has not any projection is achieved, and expect that the robot is useful as a rescue robot which can correspond to a variety of use environments.

Key words : Spherical monowheel robot, Moving robot, Jumping robot, Stair-climbing, Rescue robot

1. 緒 言

災害時において、崩壊した建造物など人が直接侵入困難な環境下を効率よく移動し、被災情報の収集を行うことが可能な移動ロボットが求められている。このようなロボットの特徴として、急斜面や段差、瓦礫等の存在する悪路、あるいは狭隘空間等における安定した踏破性を有すること、多様な状況に対する耐環境性を備えていること、可搬性や配備の容易さを考えて十分に小型、軽量であることなどが必要であると考えられている。それら条件を満たす移動形体として車輪やクローラといった代表的な機構や、蛇型や魚型等の生体を模倣した機構など様々な機構が提案されてきたが、近年その一つとして球体形状をした球形ロボットが着目されている。球形ロボットは、従来のロボットの移動機構が持つ方向性を有さないため、落下や転倒等による移動・作業能力の喪失といった危険性がないという利点があり、また球形外殻でロボット自体が覆われるため、水密性や防塵性などの耐環境性に優れている。当初球形ロボットは人間共存に適した移動機構として提唱され、その移動、旋回に関する高い安定性と、障害物や坂道の登攀が可能であることが示された(越山他, 1996), (Hlme et al., 1996)。しかしな

No.15-00146 [DOI:10.1299/transjsme.15-00146], J-STAGE Advance Publication date : 22 December, 2015

^{*1} 正員, 石川工業高等専門学校 (〒929-0392 石川県河北郡津幡町北中条タ1)

^{*2} 正員, 金沢大学理工学域 機械工学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail of corresponding author: fuji@ishikawa-nct.ac.jp

がら移動原理上、坂道の傾斜角や踏破できる障害物の高さはロボット本体のサイズに比べて小さく、前述のような悪路に十分に対応できるものでは無かった。一方、塚越らはこうした球形ロボットが自らの高さより高い障害物を踏破する手段として、1)連結型、2)投擲牽引型、3)吸着型、4)空中浮遊型（飛行型）、5)跳躍型の5つの形体を挙げ、このうち俊敏性と狭隘空間での移動性から跳躍型を採用し、高い瓦礫踏破性を実現している（塚越他、2004a）。しかしながら、自律型ではない投擲牽引型を除き、こうした従来の機構、方法では、球形ロボットに脚やばね、羽根などの機構が付与されるため、外形に突起物やすきまができ、完全な球形といえなくなる。その結果、球形ロボットが持つ無方向性、球形外殻による密封性、耐環境性といった利点が損なわれるものと考えられる（佐藤、2012 など）。

以上を背景として、本研究では、完全な球形を保った状態で全方向に自律移動と跳躍が可能な球形ロボットの実現を目的とした、ロボット内部の機械的衝突を利用した跳躍機構を持つ全方向形回転跳躍球形ロボットを提案する。なお本研究では全方向形回転の定義について、ロボットの内部機構動作の組み合わせにより、ロボット球形外殻が外界に対して前後・旋回および左右方向へ移動が可能であること、とする。各方向への動作原理については3章で述べる。図1に本研究における球形ロボットの動作イメージを示す。本報では実際に同機構を備えたロボットの設計と開発を行い、その移動・跳躍動作について確認と検証を行った結果について報告する。

Fig.1 Image of the jumping and rolling of all direction jumping robot

2. 回転跳躍機構

2・1 球形ロボットの跳躍手法

球形ロボットが障害物の踏破を行う際、単体で障害物踏破能力を有すること、悪路や狭隘空間における移動の敏捷性と安定性に優れること、常に外殻が球形を保持できることを要件とし、前述の5つの形体のうち跳躍型の機構について検討した。球形ロボットが跳躍を行う手段として、機械的なバネを外部に開放して跳躍する機構

（Ribski et al.,2001）、空気圧シリンダでピストンロッドを外部に打ち出し、その押出し力で跳躍する機構（塚越他、2004b）、球形外殻の弾性変形による方法（杉山、平井、2006）、などが挙げられるが、いずれも球殻の外に跳躍機構を持つため、球形を保持することは困難であると考えた。ロボット内部の跳躍機能により跳躍を行う方法として、ロボットの内部質量の衝突や振動による慣性力を利用した例がある。球形ロボットではないが、菊池らは移動ロボットの内部質量をばねにより振動させ、その慣性により上下方向の跳躍を行う車輪型ロボットを開発し、段差の跳躍と着地衝撃の緩和を実現している（菊池他、2013）。またこれと似た跳躍原理を持つ球形ロボットとして、中村らが開発した微小重力ローバが挙げられる（中村他、2001）。これはロボットの内部の鉄球を磁気により吸引、内壁に衝突させて移動・跳躍を行うものであるが、微小重力下での運用を前提としており、その跳躍量は垂直方向に0.013 m程の極めて小さいものであった。以上を踏まえて、本研究では、球形ロボットの内部機構を慣性質量としてばねの弾性により球殻上壁に衝突させ、その慣性力によりロボットを跳躍させる跳躍手法とその機構を新たに提案する。

2・2 回転跳躍機構

回転跳躍移動体は、(1) 球殻車輪、(3) 球殻車輪内駆動機構、(4) 跳躍機構とそれらをつなぐ(2) 支柱により構成される。図2にロボットの全体図を、表1に主要寸法と外観を、図3に本ロボットの跳躍に関連する部分を示す。本ロボットは球殻車輪内部を支柱により保持された駆動機構が車輪走行することで球の重心位置が変動し、球殻車輪の回転トルクとなることで移動を行う。跳躍は圧縮ばねにより駆動機構全体を慣性質量として支柱に沿って球殻上壁の衝突部へ打ち当て、その衝突慣性によりロボット全体を浮き上がらせる。詳しい運動原理とそのモデルは次章に示す。以下、主要な構造と機構について述べる。

Fig. 2 Constitution of the rolling and jumping movement robot

Table 1 Outward form of rolling and jumping movement robot and main dimension

Specification items	Symbols	Values
	Diameter of spherical shell	D	0.2 m
	Total weight	M	1.5146 kg
	Weight of spherical shell	M_1	0.4 kg
	Weight of internal mechanism	M_2	1.1146 kg
	Maximum height of jumping	z_{max}	0.43 m
	Spring constant	k	9810 N/m
	Compression displacement amount	x_0	0.056 m

Fig. 3 Mechanism for jumping of the rolling and jumping movement robot

(i) 球殻車輪：球殻車輪は外径 0.2 m, 内径 0.195 m のアクリル半球により構成される。球殻車輪はロボット本体の車輪としての役割をもち、また球形の維持、密閉性や防塵性を保持する要素として機能する。

(ii) 支柱：支柱は球殻車輪内で駆動機構を保持し、さらに跳躍時には駆動機構全体を打ち上げる案内軸として作用する。その上下端は球殻内壁にボールローラ（MISUMI：BCHL5）を介して接触しており、回転移動時に内部駆動機構が球殻内壁から乖離することを防ぐ。ボールローラは図 2 に示すように、支柱上下端部から内壁に沿って四方に這わせた丸管の先端に内壁と接するように上下それぞれ 4 つずつ取り付けられ、駆動機構の球殻内での回転を補助する。また駆動機構の巻き下げと保持のため、支柱には丸ラック（KHK：SRO1-500）を使用する。

(iii) 駆動機構：球殻車輪内壁に接する樹脂製の駆動車輪を駆動させることで、球殻車輪の回転方向、速度を制御する。駆動車輪のホイールは MC ナイロン製で、さらに滑り防止と緩衝のため接触面に厚さ 0.01m のウレタン樹脂が張り付けられている。移動時における内部構造の重心は球殻車輪の外壁側に近いほど移動が安定し、同時にばねの圧縮量も増えることから跳躍量も増加するため、移動状態での駆動機構は球殻中心より外殻よりに配置する。

(iv) 跳躍機構：跳躍のための巻き下げ機構と圧縮ばね（Sotec：IVO31-100）を、支柱を案内軸として駆動機構の内部に配置する。支柱の下端と駆動機構の底面との間に圧縮ばねを挟み、これを支柱に沿って下限まで巻き下げる。巻き下げた状態が本ロボットの回転移動形態となる（図 2）。この状態からばねを開放することで、駆動機構と巻き下げ機構自体が支柱に沿って打ち上げられ、球殻車輪内壁上部へ衝突し、その慣性によりロボットの跳躍を行う。巻き下げを行うピニオン（KHK：SSA1-20）の歯を 4 つ削り、欠け歯車とすることで、ピニオンの回転数により巻き下げ量と開放タイミングを制御する。開放時、内部機構は球殻車輪内壁との接触状態からさらに最大 2 ピッチ（ $2\pi \times 10^{-3}$ m）巻き下げられるが、その変形の大部分は駆動車輪のウレタン樹脂部で吸収される。実験でも開放機構の巻き下げによる球殻車輪の大きな変形や回転・跳躍動作への影響は見られなかった。なお、跳躍時には駆動車輪が球殻内壁から離れるため、跳躍の間は球殻車輪へ駆動動力は伝わらない。

3. 動作原理

3・1 直進走行の原理とモデル

完全球形ロボットにおける直進走行および旋回動作は、球殻内駆動機構に配置した 2 個の駆動車輪を制御することで行われる。図 4 に直進走行時の進行方向対して真横から見たモデルを、表 2 にモデルパラメータを示す。完全球形ロボットにおいて内部の駆動機構が支柱によりその位置を保持されているとき、球殻車輪の回転中心と駆動機構の重心の位置との距離は常に一定の値となる。駆動機構が図のように球殻車輪内を駆け上がることで、球殻車輪内での駆動機構の重心位置が変化し、球殻車輪の接地点に対するピッチ方向への回転トルクが発生して、ロボットの直進走行が実現される。またこのとき、直進走行の運動方程式は球殻車輪の回転運動と球殻車輪に対する駆動機構の回転運動についてそれぞれ式(1), (2)のように求まる。摩擦トルク T_{fx1} および T_{fx2} として、車輪の角速度 $\dot{\theta}_{x1}$ および $\dot{\theta}_{x2}$ の絶対値が十分に小さく回転していないとみなせる場合、静摩擦トルク T_{fx1-s} , T_{fx2-s} を用い、それより大きい場合はクーロン摩擦トルク T_{fx1-c} , T_{fx2-c} を用いた。またクーロン摩擦トルクの符号は角速度の正負により定まる。閾値は越山らに倣い、計算上無視できる値として 10^{-8} rad/s を用いた（越山他, 1996）。

$$\begin{aligned} & \left\{ J_{Gx1} + J_{Gx2} + M_1 r_1^2 + M_2 r_1^2 + M_2 e_2^2 + 2M_2 r_1 e_2 \sin(\theta_{x1} + \theta_{x2}) \right\} \ddot{\theta}_{x1} \\ & + \left\{ J_{Gx2} + M_2 e_2^2 + M_2 r_1 e_2 \sin(\theta_{x1} + \theta_{x2}) \right\} \ddot{\theta}_{x2} + M_2 r_1 e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2}) \dot{\theta}_{x1}^2 \\ & + M_2 r_1 e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2}) \dot{\theta}_{x2}^2 + 2M_2 r_1 e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2}) \dot{\theta}_{x1} \dot{\theta}_{x2} \\ & + D_{\theta x1} \dot{\theta}_{x1} + M_2 g e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2}) + T_{fx1} = T_{x1} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left\{ J_{Gx2} + M_2 e_2^2 + M_2 r_1 e_2 \sin(\theta_{x1} + \theta_{x2}) \right\} \ddot{\theta}_{x1} + \left\{ J_{Gx2} + M_2 e_2^2 \right\} \ddot{\theta}_{x2} \\ & + D_{\theta x2} \dot{\theta}_{x2} + M_2 g e_2 \cos(\theta_{x1} + \theta_{x2}) + T_{fx2} = T_{x2} \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 4 Modeling of straight running

Table 2 Model parameters for straight running

Symbol	Parameters	Values
r_1	Radius of spherical shell	0.1 m
e_2	Distance between the centroids of the internal mechanism and the spherical shell	0.02273 m
θ_{x1}	Rotation Angle of the spherical shell from the ground	—
θ_{x2}	Rotation Angle of the internal mechanism from the spherical shell (Initial value : $-5/2\pi$)	—
J_{Gx1}	Moment of inertia of the centroid of the spherical shell	0.002601 kgm^2
J_{Gx2}	Moment of inertia of the centroid of the internal mechanism	0.00262 kgm^2
M_1	Mass of the spherical shell	0.4 kg
M_2	Mass of the internal mechanism	1.1146 kg
$D_{\theta 1}$	Viscous friction torque coefficient between the spherical shell and the ground	0.001 Nms
$D_{\theta 2}$	Viscous friction torque coefficient between the spherical shell and the internal mechanism	0.245 Nms
T_{fx1}	Coulomb friction torque and static friction torque between the spherical shell and the ground. $T_{fx1}=T_{fx1-s} (\dot{\theta}_{x1} \leq 10^{-8} \text{ rad/s}), T_{fx1}=T_{fx1-c} (\dot{\theta}_{x1} > 10^{-8} \text{ rad/s}), T_{fx1}=-T_{fx1-c} (\dot{\theta}_{x1} < -10^{-8} \text{ rad/s})$	$T_{fx1-c}: 0.0001 \text{ Nm}$ $T_{fx1-s}: 0.1 \text{ Nm}$
T_{fx2}	Coulomb friction torque and static friction torque between the spherical shell and the internal mechanism $T_{fx2}=T_{fx2-s} (\dot{\theta}_{x2} \leq 10^{-8} \text{ rad/s}), T_{fx2}=T_{fx2-c} (\dot{\theta}_{x2} > 10^{-8} \text{ rad/s}), T_{fx2}=-T_{fx2-c} (\dot{\theta}_{x2} < -10^{-8} \text{ rad/s})$	$T_{fx2-c}: 0.06 \text{ Nm}$ $T_{fx2-s}: 0.1 \text{ Nm}$
T_{x1}	Driving torque of the spherical shell	—
T_{x2}	Input torque to driving wheel	—

3・2 旋回動作の原理とモデル

図5に旋回動作時のロボットを旋回軸方向から見たモデルを示す。また表3にそのモデルパラメータを示す。本ロボットは内部機構の駆動車輪を逆方向に同一角度駆動させることにより旋回半径0の旋回走行を行う。このときの反作用により球殻車輪が内部駆動機構とは逆向きに $-\theta_{x1}$ 回転するが、地面と球殻車輪との摩擦が0でないかぎり、 $\theta_{x1} < \theta_{x2}$ となる。旋回動作における運動方程式は、球殻車輪の回転運動と球殻車輪に対する駆動機構の回転運動についてそれぞれ式(3)、(4)のように求まる。また前節同様、摩擦トルク T_{fx1} および T_{fx2} は、角速度 $\dot{\theta}_{x1}$ および $\dot{\theta}_{x2}$ の絶対値が、 10^{-8} rad/s を閾値として、これより小さいときは静摩擦トルクを、大きい場合はクーロン摩擦を用いた。正負についても同様である。

$$(J_{Gz1} + J_{Gz2})\ddot{\theta}_{z1} + J_{Gz2}\ddot{\theta}_{z2} + D_{\theta 1}\dot{\theta}_{z1} + T_{fx1} = T_{z1} \quad (3)$$

$$J_{Gz2}\ddot{\theta}_{z1} + J_{Gz2}\ddot{\theta}_{z2} + D_{\theta 2}\dot{\theta}_{z2} + T_{fx2} = T_{z2} \quad (4)$$

Fig. 5 Modeling of pivot turn

Table 3 Model parameters for movement of pivot turn

Symbol	Parameters	Values
θ_{z1}	Rotation Angle of the spherical shell from the ground	—
θ_{z2}	Rotation Angle of the internal mechanism from the spherical shell	—
J_{Gz1}	Moment of inertia of the centroid of the spherical shell	0.002601 kgm^2
J_{Gz2}	Moment of inertia of the centroid of the internal mechanism	0.00184 kgm^2
$D_{\theta1}$	Viscous friction torque coefficient between the spherical shell and the ground	0.001 Nms
$D_{\theta2}$	Viscous friction torque coefficient between the spherical shell and the internal mechanism	0.265 Nms
T_{fc1}	Coulomb friction torque and static friction torque between the spherical shell and the ground $T_{fc1}=T_{fc1-s} \left(\left \dot{\theta}_{z1} \right \leq 10^{-8} \text{ rad/s} \right), T_{fc1}=T_{fc1-c} \left(\dot{\theta}_{z1} > 10^{-8} \text{ rad/s} \right), T_{fc1}=-T_{fc1-c} \left(\dot{\theta}_{z1} < -10^{-8} \text{ rad/s} \right)$	$T_{fc1-c}:0.1 \text{ Nm}$ $T_{fc1-s}:0.1 \text{ Nm}$
T_{fc2}	Coulomb friction torque and static friction torque between the spherical shell and the internal mechanism $T_{fc2}=T_{fc2-s} \left(\left \dot{\theta}_{z2} \right \leq 10^{-8} \text{ rad/s} \right), T_{fc2}=T_{fc2-c} \left(\dot{\theta}_{z2} > 10^{-8} \text{ rad/s} \right), T_{fc2}=-T_{fc2-c} \left(\dot{\theta}_{z2} < -10^{-8} \text{ rad/s} \right)$	$T_{fc2-c}:0.06 \text{ Nm}$ $T_{fc2-s}:0.1 \text{ Nm}$
T_{z1}	Driving torque of the spherical shell	—
T_{z2}	Input torque to driving wheel	—

3・3 跳躍動作の原理とモデル

跳躍動作のロボットを側面から見たモデルを図6に、モデル化変数を表4に示す。支柱部を除く内部機構が圧縮ばねを挟んで球殻車輪の内壁側（図下方）に押し付けられた状態からばねが開放されることで、ばねの弾性エネルギーが内部機構の位置・運動エネルギーに変化し、支柱上端衝突部に衝突する。衝突が非弾性である場合、内部機構を含めた球体全体がばねの解放方向に跳躍運動を行う。ばねが自由長のとき上端と衝突するため、衝突が完全非弾性でかつスライド時の摩擦が無いと仮定したとき跳躍初期速度と跳躍高さは式（5）、（6）となり、また最大跳躍量は式（7）となる。実際の衝突は反発係数があり、打ち上げ時に支柱丸ラックとスライドブシュ間の摩擦損失があるため跳躍量はこれより小さな値となると考えられる。

$$v_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \sqrt{\frac{k}{m_2} x_0^2} \quad (5)$$

$$z(t) = \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \sqrt{\frac{k}{m_2} x_0^2} \right) t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (6)$$

$$z_{\max} = \frac{m_2}{(m_1 + m_2)^2} \left(\frac{kx_0^2}{2g} \right) = 0.7668 \text{ m} \quad (7)$$

Fig. 6 Modeling of vertical jumping

Table 4 Model parameters for the movement of vertical jumping

Symbol	Parameters	Values
x_0	Initial deflection of the coil spring from the equilibrium position	0.056 m
m_1	Mass of the spherical shell and the supporting column	0.4 kg
m_2	Mass of the internal mechanism without the supporting column	1.1 kg
$z_{\max}$	Maximum height of jumping (theoretical value)	0.7668 m
g	Gravity acceleration	9.80665 m/s ²
k	Spring constant	9810 N/m
v_1	Velocity the internal mechanism (without the supporting column) in collision	—
v_2	Initial velocity of the jumping	—

3・4 斜方跳躍の跳躍過程とモデル

障害物の乗り越えや階段の上昇などを想定した本ロボットの斜方跳躍過程について図7に、斜方跳躍中のロボットの重心の位置および速度を式(8)、(9)に示す。また斜方跳躍に関するモデル化変数を表5に示す。このうち $D_{\theta 1j}$ は空気の粘度 ($1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) および球殻車輪寸法から計算した値を用いた。 $D_{\theta 2j}$ については、理想的な状態として跳躍中の内部機構と内壁との接触力はほぼないと仮定し、計算上影響のない程度に小さい値を用いた。 $T_{f \theta 1j}$, $T_{f \theta 2j}$ についても接触力が微小であると仮定して同様に計算上十分に小さな値を用いた。値の桁数については次元を考慮した。式(8)、(9)より本ロボットの跳躍量は打ち出される際の跳躍角度により定まる。跳躍角度の制御は直進走行動作において生じる内部機構の傾斜を利用して実現する。まず跳躍開始位置まで直進走行を行い移動する(図7(a))。次に正の回転慣性を保った状態で進行方向に対し内部機構を逆回転する(図7(b))。内部機構の傾斜が跳躍角度に合致したタイミングでピニオンを回し、圧縮ばねを開放することで目的の方向に衝突が起こり跳躍する(図7(c))。

次に跳躍角度と跳躍方向の調整方法について説明する。図8に直進走行モデルに基づく斜方跳躍打ち出しまでの回転角度とその際の内部機構姿勢を示す。0~0.4s間は停止状態、0.4~0.6s間は直進、0.6~1.0s間は内部機構の逆回転区間、1.0~1.5sは斜方跳躍区間である。入力トルク T_{x2} は、0.4~0.6s間で0.245Nm、0.6~0.7s間の停止区間をはさみ、0.7~1.0s間に-0.245Nmの定トルク入力を与えた。最初の直進走行により球殻車輪が正回転の慣性を有した状態で内部機構に負回転のトルクが加わることで、ロボットが後退することなく内部機構のみ前方へ傾き跳躍姿勢を得ることができる。またその跳躍角度(図では $\theta_{x1end} + \theta_{x2end} = 0.1945 \text{ rad}$)は、ばねの開放タイミングを前

後することで容易に調整することが可能である．なお跳躍による移動方向に関しては，内部機構の旋回動作によるロボットの進行方向が移動方向となる．

なお，跳躍中は球殻車輪と内部の駆動車輪は接触していないため，跳躍時の回転状態と内部機構の重心位置により球体ロボット重心を中心とした回転運動を行う．跳躍時の状態を側面から見たモデルを図9に，跳躍中の回転運動状態を式(10)，(11)に示す．

$$\begin{cases} y(t) = v_2 t \cos(\theta_{x1end} + \theta_{x2end}) + r_1 (\dot{\theta}_{x1end} + \dot{\theta}_{x2end}) + y_0 \\ z(t) = v_2 t \sin(\theta_{x1end} + \theta_{x2end}) - \frac{1}{2} g t^2 + z_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{y}(t) = v_2 \cos(\theta_{x1end} + \theta_{x2end}) + r_1 (\dot{\theta}_{x1end} + \dot{\theta}_{x2end}) \\ \dot{z}(t) = v_2 \sin(\theta_{x1end} + \theta_{x2end}) - g t \end{cases} \quad (9)$$

$$(J_{Gx2j} + M_1 a^2 + M_2 b^2) \ddot{\theta}_{x1j} + (J_{Gx2j} + M_1 a^2 + M_2 b^2) \ddot{\theta}_{x2j} + D_{\theta x2j} \dot{\theta}_{x2j} + T_{fx2} = T_{x1j} \quad (10)$$

$$(J_{Gx1} + J_{Gx2j} + M_1 a^2 + M_2 b^2) \ddot{\theta}_{x1j} + (J_{Gx2j} + M_1 a^2 + M_2 b^2) \ddot{\theta}_{x2j} + D_{\theta x1j} \dot{\theta}_{x1j} = T_{x1j} \quad (11)$$

Fig. 7 Procedure of jumping over obstacles

Fig. 8 Rotational angle of procedure of jumping over obstacles. Rotation Angle of the internal mechanism from the spherical shell is plotted with solid line (blue). Rotation Angle of the spherical shell from the ground is plotted with dotted line (red). Rotation Angle of the internal mechanism from the ground is plotted with dashed line (green). Orbits of their angle during the jump are plotted with double line respectively.

Fig. 9 Modeling of jumping over obstacles

Table 5 Model parameters for jumping over obstacles

Symbol	Parameters	Values
y_0	Initial position in y axis direction	—
z_0	Initial position in z axis direction	—
θ_{x1end}	Rotation Angle of θ_{x1} at the occurrence jumping	—
θ_{x2end}	Rotation Angle of θ_{x2} at the occurrence jumping	—
v_2	Initial velocity of the jumping	—
θ_{x1j}	Rotation Angle of the spherical shell from the ground in jumping	—
θ_{x2j}	Rotation Angle of the internal mechanism from the spherical shell in jumping	—
$D_{\theta1j}$	Viscous friction torque coefficient between the spherical shell and the air in jumping	2.2619×10^{-7} Nms
$D_{\theta2j}$	Viscous friction torque coefficient between the spherical shell and the internal mechanism in jumping	10^{-9} Nms
T_{fx1j}	Coulomb friction torque and static friction torque between the spherical shell and the air in jumping	$T_{fx1j-c}: 10^{-6}$ Nm $T_{fx1j-s}: 0$ Nm
T_{fx2j}	Coulomb friction torque and static friction torque between the spherical shell and the internal mechanism in jumping	$T_{fx2j-c}: 10^{-6}$ Nm $T_{fx2j-s}: 0$ Nm
T_{x1j}	Rotational torque of the spherical shell in jumping	0 Nm
T_{x2j}	Rotational torque of the internal mechanism in jumping	0 Nm
a	Distance between the centroids of the robot and the spherical shell in jumping	0.0227 m
b	Distance between the centroids of the robot and the internal mechanism in jumping	0.0082 m
θ_{end}	Posture angle of the robot at the occurrence jumping ($= \theta_{x1end} + \theta_{x2end}$)	—
ω_{end}	Angular velocity of the robot at the occurrence jumping	—

4. 実 験

4・1 移動および旋回動作

移動および旋回機能の検証のため、平面上での直進走行および旋回実験を行った。

直進走行は移動体を弾性ウレタン樹脂系の塗り床材の床に設置し、左右の駆動車輪を同方向に同一角度回転させ行った。駆動車輪への指令値は停止状態から等速走行を経て、駆動機構が球殻車輪に対して 4 rad 回転した後、に停止するよう式 (12) の制御則に従い指令トルクを与えた。システムパラメータを表 6 に示す（オーバーシュート量 20% の CHR 法により定めた）。駆動機構の傾斜角は内部制御基板上の 3 軸加速度センサから、球殻車輪の実回転角度は球殻車輪のマーカーの座標を撮影画像から 0.2 s 間隔で計測して求めた。図 10 に直進走行結果を示す。実線は式 (1), (2) による計算機シミュレーション結果を、プロットは実動作を示す。球殻車輪の回転角度はおおよそ周期 2 s の振動を伴いつつ、内部駆動機構の回転と反対方向に回転しながら前進した。計算結果と実機の動作はほぼ一致しており、跳躍機構を内蔵した本ロボットにおいて直進動作を実現することができた。

旋回動作は、直進走行と同様の床面で、左右の駆動車輪を逆方向に同一角度回転させ行なった。駆動車輪への指令値は停止状態から駆動機構が球殻車輪に対して 0.98 rad 旋回した後に停止するよう、同様の制御則で位置サーボ入力を加えることで行なった。パラメータを表 6 に付記する。内部機構の角度および球殻車輪の旋回量の計測方法も同様である。図 11 に旋回動作結果を示す。実線は式 (3), (4) による計算機シミュレーション結果を、プロットは実動作を示す。床面および駆動車輪の摩擦係数が高いため球殻車輪の反転がほとんど見られず、駆動車輪による回転がほぼそのままロボットの旋回角度となっている。これは摩擦トルクが支配的な場合の球形ロボットの旋回特性であり、計算結果ともよく一致している。以上の結果から本ロボットにおいて球殻車輪内部で駆動車輪を回転することで内部機構は地面に対して旋回できることが示され、これにより本ロボットが旋回原理に基づき半径 0 の旋回を行うことができた。

以上の動作は越山や Halme らの球形ロボットにおける直進走行や旋回動作結果とも合致しており、これより本ロボットが従来の球形ロボットの動作原理に基づいた平地での走行機能を実現していることが実験的に示された。

$$T_{x2} = K_{x2-p}(\theta_{x2r} - \theta_{x2}) + K_{x2-i} \sum (\theta_{x2r} - \theta_{x2}) + K_{x2-d}(\dot{\theta}_{x2r} - \dot{\theta}_{x2}) \quad (12)$$

Fig. 10 Result of straight running. Experimental rotational angle of θ_{x1} , θ_{x2} and their additional value are plotted with square dots, diamond dots and triangle dots respectively. Each theoretical values are plotted with the solid line (red blue green) respectively.

Fig. 11 Result of pivot turn. Experimental rotational angle of θ_{x1} , θ_{x2} are plotted with square dots and triangle dots respectively. Each theoretical values are plotted with the solid line (red blue green). Angular velocity of θ_{x2} is plotted with dotted line.

Table 6 System parameters for PID control for straight running

Parameters	Symbol	Values of straight running	Symbol	Values of pivot turn)
Proportional gain around x axis	K_{x2-p}	17.0880	K_{z2-p}	11.3218
Integration gain around x axis	K_{x2-i}	0.0324	K_{z2-i}	0.0427
Variable gain around x axis	K_{x2-d}	0.0001	K_{z2-d}	0.0001

4・2 跳躍動作

ロボットの跳躍機能の確認と検証を行うため、同床面上で内部の駆動機構を静止した状態から跳躍機構のみを作動させ、静止状態からの鉛直方向跳躍を行った。実機の跳躍量は鉛直跳躍時の挙動をカメラで撮影し、球殻車輪の中心座標を記録した。跳躍時の実際の様子を図 12 に、図 13 に式 (6) に基づく跳躍軌道の計算値とその実験値を示す。図では静止状態の球殻車輪中心をグラフ原点とした。式 (7) より、内部機構の衝突が完全非弾性衝突で、かつ打ち上げ時の摩擦損失が 0 と仮定した場合の最大跳躍量は $z_{\max}=0.7668\text{m}$ となるが、今回、実機による平均跳躍高さは 0.43m (標準偏差 $s_n=0.0095\text{m}$) となり、計算値の 56% 程度に留まった。本ロボットにおける跳躍高さが損なわれた要因として、前述の反発係数と摩擦損失に加え、球殻車輪がアクリル材であったため、衝突時の球殻車輪の弾性変形により衝撃が吸収されたことや球殻内面と支柱上端にできた微小隙間により衝突振動が発生したことなどが考えられる。跳躍高さ自体について言えば、ロボット本体直径 0.2m であるのに対して、その 2 倍以上の跳躍が可能となり、同原理の跳躍ロボットと比べて良好な結果であった。球殻車輪による球形ロボットの場合、車輪型などと異なり球殻内部の機構をほぼすべて衝突質量として利用できるため、このような結果が得られたと考えられる。

Fig. 12 Motion of vertical jumping of the spherical robot (0.35/s)

Fig. 13 Results of vertical jumping. Experimental orbits of the centroid of the robot are plotted with square dots, diamond dots and triangle dots. An approximate quadratic curve of their orbits is plotted with solid line, and theoretical orbit is plotted with the dotted line.

4・3 斜方跳躍動作による障害の飛び越え

斜方跳躍動作の確認のため、同床面上においた状態から跳躍角度を変えて跳躍させ軌道を確認した。跳躍角度 $\theta_{x1end} + \theta_{x2end}$ は 0.1651, 0.2449, 0.2914 rad の3通りで行った。跳躍時の様子を撮影し、球殻車輪の中心座標の z 軸方向および y 軸方向の座標を 0.025 s 間隔で記録した。各跳躍軌道の計算値と実験値を図 14 に示す。鉛直跳躍の結果と同様、跳躍量は計算値の 53～56 %に留まるものであったが、安定して跳躍高さ 0.4 m、飛距離 0.4～0.6 m を実現することできた。また実際の屋内での障害物乗り越えを想定した斜方跳躍動作の様子を図 15 に示す。障害物として、屋内の一般的な階段高さに基づき、1段の高さが 0.185 m、奥行き 0.280 m の全2段の階段を設定し、その乗り越え（階段上昇）を行った。各過程は単発の斜方跳躍と同様の条件とし、跳躍姿勢は 0.2449 rad を目標値とした。今回、跳躍中の姿勢についてモデル化し、式 (10), (11) より計算値を求めたが、一段目の着地時に球殻車輪がバウンドし（図 15(a)）、さらに転がることでその着地位置と姿勢が計算値から大きくずれる結果となった。よって本報では、二段目の跳躍に関する位置・姿勢の調整に関してのみ手動操作で行うこととした（図 15(b) 区間）。本実験結果より、完全な自律化には至らなかったものの、本機構が球体ロボットにおける階段上昇や障害物の乗り越えに有効であることが実証された。

5. 結 言

球形を保った状態で回転跳躍移動が可能な移動機構を開発し、その動作について確認と検証を行った。以下に結果を示す。

- (1) 球殻内部の移動機構自体を衝突慣性として利用することで、球形を保った状態で全方向に移動、跳躍が可能な回転跳躍移動体を開発した。
- (2) 本移動体の直進走行および旋回動作が、球形ロボットの側面および上面からの二次元モデルに則しており、各動作について制御可能であることを示した。
- (3) 球殻型の球体ロボットにおける垂直跳躍動作の原理を示し、それに基づく跳躍量の計算と実験を行い、跳躍動作の確認と検証を行った。実際の跳躍量は計算値の 56%に留まるものであったが、同原理による従来の跳躍ロボットと比べても高い跳躍高さを得ることができた。
- (4) 本移動体における斜方跳躍のプロセスを提案し、実際に実験を行い、斜め方向に跳躍高さ 0.4 m、飛距離 0.6m の跳躍が可能であることを確認した。また前進（後退）動作における内部機構の傾斜を意図的に実現させることで、跳躍角度を調整可能であることを示した。以上の手法により斜方跳躍を連続することで、一般的な階段の昇降等が可能であることが確認できた。

Fig. 14 Experimental results and simulation results of jumping in oblique direction. Experimental orbits of the centroid of the robot of each angle are plotted with square dots, diamond dots and triangle dots respectively. Their theoretical orbits are plotted with solid line, dotted line, and dashed line respectively.

Fig. 15 Experimental result of stepping the stares at intervals of 0.05s. Bounce on the landing is shown in fig(a). The robot was controlled by radio control during the section of (b) for 3 minutes.

文 献

- Halme, A., Schonberg, T. and Yan, W., Motion control of a spherical mobile robot, Proceedings of IEEE 4th International Workshop on Advanced Motion Control, Vol.1 (1996), pp.259-264.
- 市川広大, 村田将之, 佐藤雅紀, アミール A. F. ナシライ, 石井和男, 1A1-D27 跳躍機構を有する球型移動ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2006 (2006), pp.1A1-D27(1)-1A1-D27(4).
- 菊池 耕生, 神野 雅哉, 千島 尚也, 佐藤 健二, 2 自由度振動系を利用した低衝撃高速階段昇降に関する研究 : 運動方程式を利用したソフトランディングポイントの存在性に関する考察, 日本設計工学会誌, Vol.48, No.9 (2013), pp.43-48.
- 越山篤, 藤井邦英, 有田恒一郎, 全方向型移動ロボットの制御に関する研究:第 4 報, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.62, No.602 (1996), pp.55-63.
- 中村仁彦, 下田真吾, 庄司真史, 磁気浮上を利用した微小重カローバ, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.19, No.4 (2001), pp.485-491.
- Ribski, P. E., Burt, I., Dahlin, T., Gini, M., Hougen, D. F., Krantz, D. G., Nageotte, F., Papanikolopoulos, N. and Stoeter, S. A., System architecture for versatile autonomous and teleoperated control of multiple miniature robots, Proceedings 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3 (2001), pp.2917-2922.
- 佐藤文幸, 球形飛行体の概要, 自動車技術, Vol.66, No.3 (2012), pp.102-103.
- 杉山勇太, 平井慎一, 柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍, Journal of Robotics Society of Japan, Vol.24, No.3 (2006), pp.378-387.
- 塚越秀行, 森庸太郎, 佐々木正志, 北川能, 田中崇裕, 瓦礫踏破能力を向上させる跳躍・回転移動体の開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.692 (2004a), pp.180-188.
- 塚越秀行, 佐々木正志, 北川能, 田中崇裕, 瓦礫跳躍高度の向上を目指した空圧ジャンピングの特性解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.8 (2004b), pp.859-866.
- 塚越秀行, 田中崇裕, 木村大地, 北川能, 1P2-S-096 倒壊家屋内での広域探索を目指した投擲・回収型移動体の開発 :第 2 報, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2005 (2005), pp.1P2-S-096.

References

- Halme, A., Schonberg, T. and Yan, W., Motion control of a spherical mobile robot, Proceedings of IEEE 4th International Workshop on Advanced Motion Control, Vol.1 (1996), pp.259-264.
- Ishikawa, K., Murata, M., Sato, M., Nassiraei, A. A. F. and Ishii, K., 1A1-D27 Development of a ball type mobile robot equipped with a jump actuator, Proceedings JSME Conference on Robotics and Mechatronics 2006 (2006), pp.1A1-D27(1)-1A1-D27(4) (in Japanese).
- Kikuchi, K., Jinno, M., Chishima, N. and Sato, K., A study on fast stair-climbing and soft-landing by 2-DOF hopping mechanism : Analysis of soft-landing point existence using equation of motion, Journal of Japan Society for Design Engineering, Vol.48, No.9 (2013), pp.43-48 (in Japanese).
- Koshiyama, A., Fujii, K. and Arita, K., Development and motion control of an all-direction steering-type mobile robot : 4th report, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.62, No.602 (1996), pp.55-63 (in Japanese).
- Nakamura, Y., Shimoda, S. and Shoji, S., Microgravity rover using electro-magnetic actuation, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.19, No.4 (2001), pp.485-491 (in Japanese).
- Ribski, P. E., Burt, I., Dahlin, T., Gini, M., Hougen, D. F., Krantz, D. G., Nageotte, F., Papanikolopoulos, N. and Stoeter, S. A., System architecture for versatile autonomous and teleoperated control of multiple miniature robots, Proceedings 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3 (2001), pp.2917-2922.
- Sato, F., Overview of spherical air vehicle, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.66, No.3 (2012), pp.102-103 (in Japanese).
- Sugiyama, Y. and Hirai, S., Soft robots for crawling and jumping via deformation, Journal of Robotics Society of Japan, Vol.24, No.3 (2006), pp.378-387 (in Japanese).
- Tsukagoshi, H., Mori, Y., Sasaki, M., Tanaka, T. and Kitagawa, A., Development of a jumping & rolling inspector to improve the debris-traverse ability, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.70, No.692 (2004a), pp.180-188 (in Japanese).
- Tsukagoshi, H., Sasaki, M., Tanaka, T. and Kitagawa, A., Numerical analysis and design for higher jumping on debris using a

pneumatic cylinder, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.40, No.8 (2004b), pp.859-866 (in Japanese).

Tsukagoshi, H., Tanaka, T., Kimura, D. and Kitagawa, A., 1P2-S-096 Development of a throwing & drawing type inspector aimed to wide-range searching inside collapsed buildings : 2nd report, Proceedings JSME Conference on Robotics and Mechatronics 2005 (2005), pp.1P2-S-096 (in Japanese).