

## 玉乗りロボットによる搬送に関する研究

著者	熊谷 正朗, 落合 恭也
会議概要 (会議名, 開催地, 会期, 主催者等)	計測自動制御学会東北支部 第247回研究集会
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00000377/">http://id.nii.ac.jp/1204/00000377/</a>

# 玉乗りロボットによる搬送に関する研究

## A Study on Transpotation using Robots Balanced on Balls

熊谷正朗\* , 落合恭也\*\*

KUMAGAI Masaaki\* , OCHIAI Takaya\*

\*東北学院大学, \*\*東北学院大学 大学院

\*Tohoku Gakuin University

キーワード： 玉乗り(Balanced on a ball), 倒立振り子(Inverted pendulum), 全方向移動車輪(Omnidirectional wheel), 受動的動作(Passive motion), 協調動作(Cooperative motion)

連絡先： 〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目13-1 東北学院大学工学部 機械知能工学科

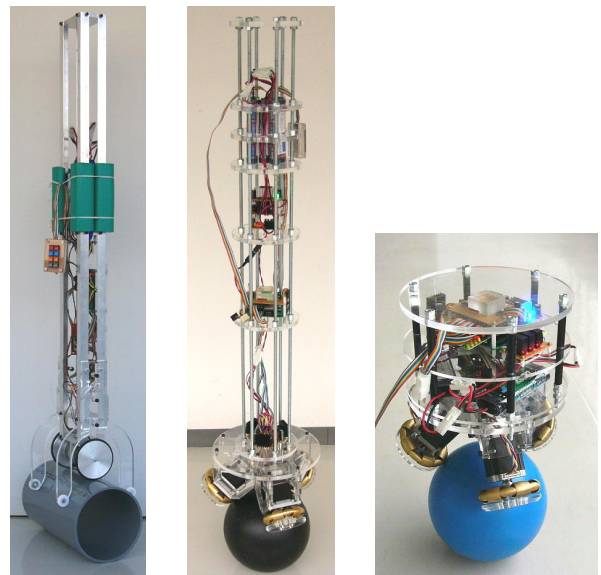
熊谷正朗, Tel.:022-368-7358, Fax: 022-368-7070, E-mail: kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

### 1. はじめに

本論文では、試作した玉乗りロボットの物品搬送への応用について報告する。

玉乗りは倒立振り子型のバランス制御の一種といえ、サーカスでの曲芸などで見られるが、ロボットとして制御されている例は極めて少ない。本研究では当初、“玉乗りするロボットを実現してみたい”という単純な動機で開発を行った<sup>1,2)</sup>。Fig.1(b)に示す完成した実機は、平面上で自由に移動できる倒立振り子として想定以上の機動性を有し、パラメータ変更によって容易に受動性を得られることが実機で確認された。そこで、物品搬送に主眼を置いた2号機(Fig.1(c))を開発し、研究を進めている。今回は、複数の玉乗りロボットによる、受動的な動作と協調搬送について述べる。

従来より、車輪移動型の倒立振り子を移動体とする試みは複数存在する。松本らの歩行ロボット<sup>3)</sup>や日立製作所のEMIEWが知られるほか、セグウェイHTやiSwing、Wingletといった乗り物への応用も始まっている。これらは姿勢制御を常時行う必要



(a) on pipe (b) on ball (1st) (c) on ball (2nd)

Fig. 1 Robots that balance on pipe and ball.

があるが、外力が加わった場合にある程度受け流すことができる。人間の住環境でサービスを行うロボットは、狭い接地領域で縦長の形状が要求されることがあるが、単に車輪移動ロボットを縦長にしたものに比べ、倒立振り子型は転倒の危険性が低減される。

このような車輪移動型の倒立振り子は、車輪を同

軸の2輪とし、それらを独立して制御することで、移動や旋回も行うことができる。これは独立2輪駆動型の車輪移動ロボットと原理は等しく、それゆえ車軸方向(一般にはロボット横方向)への移動は瞬時にはできず、まず旋回する必要がある。このことは移動の制約となるのみならず、移動することによる姿勢制御にも制約となる。車輪の進む方向への外力は受け流せても、横方向には対応できない。そのため、全方向性のある倒立振子が可能であれば、サービスロボットの移動手段として有用性が期待でき、玉乗りはその一つである。

玉乗りロボットのアイデア自体は新しいものではない。倒立振子制御の適用による実現の可能性は1970年代に既に指摘されており<sup>4)</sup>、球体を2次元方向に回転させる方法も知られている。特殊な車輪を用いた全方向移動ロボットも珍しくはない。しかし、玉乗りロボットの実現例は少ない。著者らが把握している範囲では、CMUのLauwersらの開発したBallbot<sup>5)</sup>が有名である。このロボットは、ボール式マウスを逆転したような、直交する水平2軸方向に設置したローラーにより球体を転がし、2軸の倒立振子制御を行う。駆動部の構造上、旋回方向の駆動はできないが、後継機では駆動部の上に鉛直軸周りのアクチュエータを設置することで旋回自由度を実現している。もう一つの開発例として、東大の圓戸らの開発したB.B.Rider<sup>6,7)</sup>がある。これは我々と同様に全方向移動車輪(方式は異なる)による球体駆動を採用しており、車いすとしての利用を想定して開発されている。原理、設計製作についての記述は複数見られるが、制御結果についてはまだ確認できていない。

本研究では、玉乗りの前段階として、パイプ乗りロボットを開発した<sup>8)</sup>。これはFig.1(a)に示すように、車輪型倒立振子をアタッチメントで拘束しつつ、パイプに載せたものである。これはモデル的には車輪型倒立振子と同等で、パイプが新たに車輪として機能し、もとの車輪との摩擦伝導によ

て駆動されている。一般的な倒立振子と異なる本機の特徴は、駆動にステッピングモータを採用し、指令値を加速度としたことである。一般には、DCサーボモータなどを採用し、トルクを指令値とする。ステッピングモータを採用することでダイレクトドライブとなり、制御に悪影響をもたらすバックラッシュが皆無となった。これによりハンチングの少ない制御が可能となった。また、脱調の危険性はあるものの、DCモータの電流制御などに比べて簡素な回路で確実な加速度を実現でき、自立機を製作するには手軽である。当然、低コストでもある。

指令値を加速度としたことは、ステッピングモータを採用することでトルク指令が困難となったことが当初の直接の理由である。しかし、結果的にはロバスト性につながった。物体搬送を行う場合は、搭載した荷物などで質量や慣性モーメントなどのパラメータが変動する。倒立振子は重力“加速度”との兼ね合いで制御されるものであるが、トルク指令の場合は慣性パラメータの増加が加速度の目減りにつながり、不安定化しやすい。一方、加速度指令の場合は、モータへの負担は増えるが加速度としては変わらない。そのため、今回のロボットも自重に匹敵する荷重を搭載しても、制御ゲインの変更は不要であったほどのロバスト性を持った。後述のように、玉乗りロボット実機での確認後、伝達関数の解析により、加速度指令の安定性の検証とパラメータ変化に対する感度の低さを確認している。

このパイプ乗りロボットの成果をもとに、玉乗りロボットの開発を行った(Fig.1(b))。課題は球体の駆動であり、理研の浅間らにより提案された全方向移動車輪<sup>9)</sup>を3個使用して駆動することとした。この車輪の利点は、他の全方向車輪と比較して、接点の軌跡が車輪に対して1直線となることである。樽状のローラを複列に組み合わせた、通称“オムニホイール”として市販されているものは、

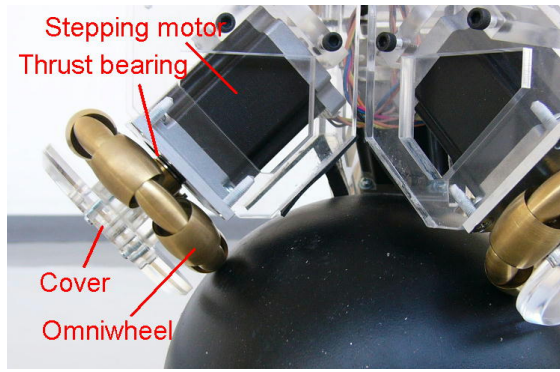


Fig. 2 Driving mechanism of the ball.

断続的な二つの軌跡をもつ．圓戸らも二つの球体を組み合わせた方式を採用しているが同様の性質をもつ．これらは平面上を移動する場合には問題がないが，球面を駆動する場合は接点の位置が変わり，結果的に球と車輪の回転速度比が変化することになる．この観点から，構造は複雑であるが，浅間らの車輪を採用した．なお，市販品は大きく，高価でもあったため，原理をもとに独自設計し，学内で製造した．

本研究では，新たにFig.1(c)に示す，小型化したロボットを使用する．物体を乗せやすいような構造とし，かつ，3台製作した．以下，本論文では，ロボットの制御原理と，実際の動作，受動化したロボットによる物体搬送への応用について述べる．

## 2. 原理と構造

### 2.1 概要

上述のように，本ロボットは平面上を移動する倒立振り子である．前段階のパイプ乗りロボットの開発を経て，(1)球体を2方向に摩擦駆動する機構(2)直交する水平2軸まわりの独立した倒立振り子制御の組合せによって実現した．

開発したロボットの外観はFig.1(b)(c)に示した．図(b)の1号機は高さ約1,300 [mm]，質量はボールを除いて12 [kg]である．ボールはゴムスプレーでコーティングしたボールリング玉であり，直径約200 [mm]，

質量3.6 [kg]である．図(c)の2号機は高さ500 [mm]，質量9.5 [kg]である．今回追加製作した2号機同等の2台では，重量の原因の一つであった全方向移動車輪のローラの材質を快削黄銅から超々ジュラルミンに変更し，7.5 [kg]まで軽量化した．

これらロボット本体には，ステッピングモータと車輪からなる駆動系，モータの制御回路(マイクロステップ駆動，1600 [step/rev])，2軸の傾斜を各々検出する角速度センサと加速度センサ(ともにAnalogDevices製)，制御用のマイコン(ルネサスH8/3052, 16bit)，Ni-MHバッテリー(7.2 [V] 3300 [mAh] ×3)，モータ駆動用昇圧電源回路(22 [V] 36 [V])を搭載している(全機共通仕様)．

### 2.2 駆動部の構成

ロボットの車輪部はFig.2に示すように，能動の全方向移動車輪3輪で構成した．車輪は一点で接すると見なせる浅間らによる方式<sup>9)</sup>のものを使用し，接点において車輪は球にほぼ垂直に接するように傾けて配置する．

具体的な車輪配置をFig.3(c),(d)に示す．三つの車輪は鉛直軸に対して対称な位置(120 [deg]間隔)に配置した．球と接する点の，球に対する天頂角 $\phi$ は2号機で40 [deg]である．

### 2.3 球の駆動と車輪の速度決定

Fig.3(a)に示すように，球中心を原点とする座標軸を設定する．軸の方向はロボットに固定し，鉛直軸(球の中心とロボットの重心を通る軸)を $z$ 軸とし，これに垂直に $x, y$ 軸を設定する．また球の半径を $R$ とする．

以下，球に角速度 $\omega$ を与えるために必要な車輪速度を検討する．まず，車輪の接点を $P_i$ ，その座標を $p_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )とすると， $\omega$ に相当する接点における速度 $v_i$ は，

$$v_i = \omega \times p_i \quad (1)$$

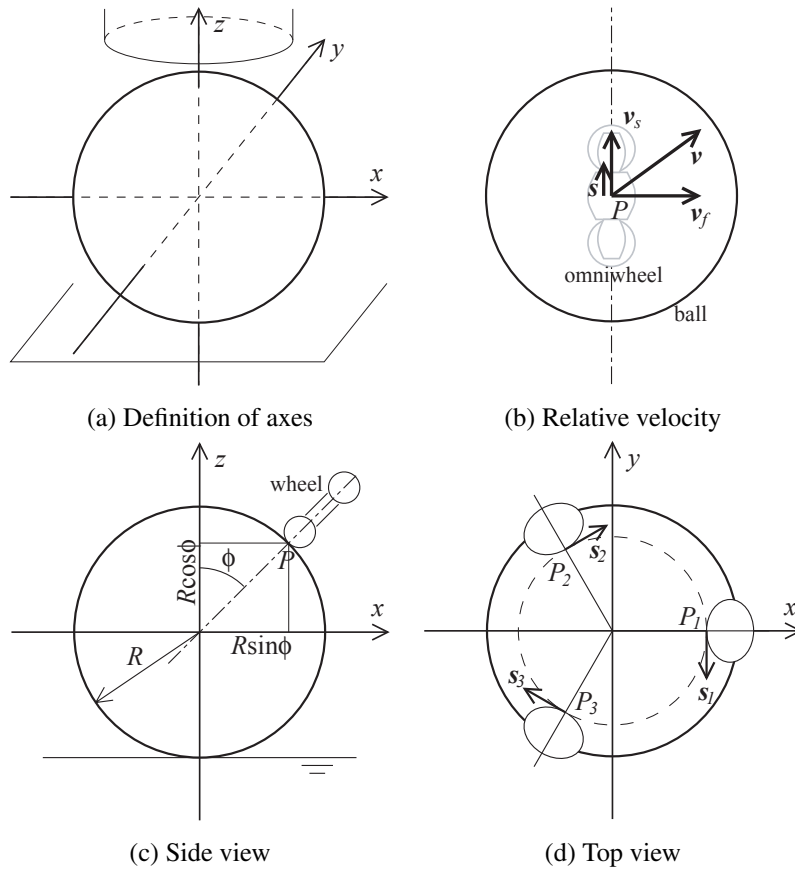


Fig. 3 Definition of axes and relationship between ball and wheels.

となる．

次に，接点における速度と全方向移動車輪の周速度の関係を求める．Fig. 3(b)に示すように，車輪接点において，球に接する面内での相対速度が $v$ となる場合，接点を通り，車軸に平行な速度成分 $v_f$ と，同じく垂直な速度成分 $v_s$ に分解できる．前者は全方向車輪の外周ローラが転動することで生じ，後者が車輪の駆動速度となる．接点における車輪の駆動方向の単位ベクトルを $s$ として， $v$ と内積をとると，

$$\begin{aligned} v \cdot s &= v_s \cdot s + v_f \cdot s \\ &= |v_s| |s| + 0 = |v_s| \end{aligned} \quad (2)$$

を得る．これにより車輪の周速度が求まる．

一方，車輪との接点をFig. 3(c)(d)に示すように，天頂角 $\phi$ の位置とし，水平方向で120 [deg]の等間隔配置とすると，

$$p_1 = (R \sin \phi, 0, R \cos \phi)$$

$$p_{2,3} = \left(-\frac{1}{2}R \sin \phi, \pm \frac{\sqrt{3}}{2}R \sin \phi, R \cos \phi\right) \quad (3)$$

である．ここで， $p_2$ および $p_3$ は対称性からまとめた．また，各点における駆動方向ベクトル $s_i$ は，設計の前提より水平方向を向いており，

$$\begin{aligned} s_1 &= (0, -1, 0) \\ s_{2,3} &= \left(\pm(\sqrt{3}/2), (1/2), 0\right) \end{aligned} \quad (4)$$

となる．

まず，球を $x$ 軸周りに角速度 $\omega$ で回転させる場合を考える．このとき $\omega = (\omega, 0, 0)$ であるため，

$$\begin{aligned} v_i &= (\omega, 0, 0) \times (p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}) \\ &= (0, -p_{iz}\omega, p_{iy}\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} |v_{s1}| &= v_1 \cdot s_1 \\ &= (0, -p_{1z}\omega, p_{1y}\omega) \cdot (0, -1, 0) = R \cos \phi \omega \\ |v_{s2,3}| &= -(1/2)R \cos \phi \omega \end{aligned} \quad (6)$$

となる．同様に $y$ 軸周りの回転， $\omega = (0, \omega, 0)$ の場合

合は，

$$\mathbf{v}_i = (p_{iz}\omega, 0, -p_{ix}\omega) \quad (7)$$

$$|\mathbf{v}_{s1}| = 0$$

$$|\mathbf{v}_{s2,3}| = \pm(\sqrt{3}/2)R \cos \phi \omega \quad (8)$$

である．これら 2 軸周りの回転は独立した成分であり， $x$  軸周りの制御と  $y$  軸周りの制御を各々計算した上で，車輪速度を決定する段階で加算する．

さらに，鉛直軸周りの回転を与えるには， $\omega = (0, 0, \omega)$  とすることで，

$$\mathbf{v}_i = (-p_{iy}\omega, p_{ix}\omega, 0) \quad (9)$$

$$|\mathbf{v}_{s1}| = -p_{1x}\omega = -R \sin \phi \omega$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{v}_{s2,3}| &= (-p_{iy}\omega, p_{ix}\omega, 0) \cdot (\pm(\sqrt{3}/2), (1/2), 0) \\ &= -R \sin \phi \omega \end{aligned} \quad (10)$$

となり，全車輪を  $(-R \sin \phi \omega)$  で回転させればよい．

さて，以上は球の回転を基準に車輪の回転を検討した．しかし，実際に車輪で球を駆動するには，天頂角  $\phi$ ，すなわち車輪を接する位置の検討が必要である．まず，支持点が水平に近い場合，つまり  $\phi$  が  $\pi/2$  に近い場合は，鉛直軸周りは問題ない．しかし， $x, y$  軸周りの回転については，機構的に考えて，球の回転ができない．たとえば， $\phi = \pi/2$  の場合，見かけ上  $|\mathbf{v}_{si}|$  がゼロとなるが，これは  $v = v_f$ ，すなわち周上のローラの回転だけになることを意味し，完全に受動になるため，駆動できない．一方，支持点を球の頂部に近づけると旋回に敏感になるほか，「球に乗る」構造であるため，ロボット本体が多少傾くのみで球から落ちかねない．そこで，本研究では 45 [deg] を採用した．実機には不都合もみられず，2 号機では構造面の検討から 40 [deg] とした．なお，車輪の接する方向を水平から傾ける，つまり  $s_i$  の  $z$  成分を非ゼロとすることで球の操作性は向上するが，構造は複雑となる．

荷重分散などのため 4 個以上の車輪を使用する場合は， $p_i, s_i$  を設定するのみである．トルク指令

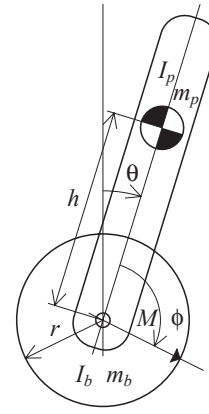


Fig. 4 Inverted pendulum model of the robot.

型の倒立振子の場合，各車輪に対するトルクの分配は検討の必要があり，かつ 1 輪でも浮いた場合にはトルク伝達に問題が生じ，車輪の空転によってモータの回転数も異常に上昇しうる．一方，本制御法では，最終的に車輪の回転速度だけを指令するため，成分に独立性のある 3 輪が接地していれば駆動でき，浮いた車輪もしかるべき速度で回転するのみで，問題にはならない．

## 2.4 制御方法

本ロボットでは，姿勢制御には単純な倒立振子制御のみを 2 軸周りに適用した．具体的な制御式は，

$$\begin{aligned} a_x &= K_A \theta_x + K_{AV} \dot{\theta}_x + K_T(x - x_0) + K_V \dot{x} \\ a_y &= K_A \theta_y + K_{AV} \dot{\theta}_y + K_T(y - y_0) + K_V \dot{y} \end{aligned} \quad (11)$$

とした．ここに， $\theta_x, \theta_y$  は  $x$  軸および  $y$  軸の正方向へのロボットの傾斜角(各々  $y$ - $z$ ,  $z$ - $x$  平面内)であり， $x, y$  は対応する車輪の転動した距離， $\dot{x}, \dot{y}$  は車輪の周速度である． $K_A, K_{AV}, K_T, K_V$  は各々フィードバックゲインであり， $x_0, y_0$  は制御の目標位置を定め，後述の移動に使用する．一般的な倒立振子制御では，操作量(指令値)である左辺がトルク，力の次元を持つが，本手法では車輪の加速度  $a_x, a_y$  である．

すでに加速度操作による倒立振子は複数を開発したことがあり、本ロボットも安定性の検証無しに開発を行い、実現した。しかし、種々の実験から加速度操作による方法はトルク操作に比べてロバスト性が高いように考えられ、伝達関数による解析を試みた。

ロボットの動きを平面内で考えると、Fig. 4に示すモデルが得られる。ここで、 $I_p$ ,  $I_b$ ,  $m_p$ ,  $m_b$  は各々、ロボット本体(振子)と球体の慣性モーメントと質量、 $r$  は球体の半径、 $h$  は振子の質量中心の高さ、 $\theta$  は振子の鉛直からの傾斜角、 $\phi$  は振子と球の相対的回転角(すなわち、車輪による駆動角度そのもの)、 $M$  は球体の駆動トルクである。このモデルより、二つの伝達関数が得られる<sup>4)</sup>。

$$\frac{\Theta(s)}{\Phi(s)} = \frac{(I_b + (m_p + m_b)r^2 + m_p hr)s^2}{m_p hg - \{I_p + m_p(h+r)^2 + I_b + m_b r^2\}s^2} \quad (12)$$

$$\frac{\Theta(s)}{M(s)} = \frac{1 + \frac{h/r}{1 + \frac{m_b/m_p + I_b/m_p r^2}}}{m_p hg - \{I_p + m_p h^2 (1 - \frac{1}{1 + \frac{m_b}{m_p} + \frac{I_b}{m_p r^2}})\}s^2} \quad (13)$$

ここに、 $g$ は重力加速度である。前者の伝達関数は以下のように書き換えられる。

$$\frac{\Theta(s)}{s^2 \Phi(s)} = \frac{(I_b + (m_p + m_b)r^2 + m_p hr)}{m_p hg - \{I_p + m_p(h+r)^2 + I_b + m_b r^2\}s^2}, \quad (14)$$

この式は、系への入力を球の角加速度( $s^2\Phi(s)$ )としたものである。これらの2式、(13)と(14)を比較すると、ロボットの質量や慣性モーメント( $I_p, m_p$ )の変化を想定して概算値を代入してみたところでは、加速度入力型の式(14)はトルク入力型の式(13)に比較して、分子、分母の項への影響が小さいようであった。その結果、質量変化の制御への影響が少ないと考えられる。今後、本ロボットの慣性モーメントの測定を行って、詳細な比較をしたい。

さて、制御式で得た加速度  $a_x, a_y$  を実時間で数値積分することで  $\dot{x}, \dot{y}$  を、さらに  $x, y$  を得るほか、

車輪の回転速度を決定する。具体的には、仮想的な速度である  $\dot{x}, \dot{y}$  から、(6)(8)(10)式を用いて、3個の駆動車輪の速度を求めた。

$$\begin{aligned} v_{s1} &= K_1 \dot{x} + K_2 v_r \\ v_{s2} &= K_1 \{-(1/2)\dot{x} + (\sqrt{3}/2)\dot{y}\} + K_2 v_r \\ v_{s3} &= K_1 \{-(1/2)\dot{x} - (\sqrt{3}/2)\dot{y}\} + K_2 v_r \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $K_1$ は各種定数を含む係数であるが、本機の場合は演算低減のため  $K_1 = 1$  として倒立振子制御の係数に含めた。 $K_2$ は旋回速度指令  $v_r$  の係数であるが、やはり  $K_2 = 1$  とした。

ロボットの移動機能は簡易的に実装した。並進に関しては、速度指令を、設定した加速度で制限して台形加減速とした上で、積分して  $x_0, y_0$  とするほか、 $\dot{x}, \dot{y}$  にフィードフォワードとして加えた。回転に関しては、同じく台形加減速として、 $v_r$  とした。これらは、ロボットの座標を基準としたものであり、意図的におよび外力で旋回した場合には、同じ指令でも並進方向が変わる。現在のところ、方位に関わるセンサは積んでおらず、自己位置推定は行っていない。

## 2.5 ロボットの受動的動作

本節では、玉乗りロボットを物体搬送に用いる際に使用する受動的動作とその応用について述べる。

まず、倒立振子を(11)によって制御した場合、ロボットは鉛直を保つとともに、固定の目標点  $(x_0, y_0)$  にとどまるように動作する。無理にロボットを押しつけた場合は、Fig. 5に示すように、位置  $\Delta x (= x - x_0)$  変位したところで  $\theta$  傾いて、 $K_A \theta + K_T \Delta x = 0$  の関係が成立して定常する。このとき、傾きによる重力分力が押し返す力となる。

ここで、位置に関するゲイン  $K_T$  をゼロとすることを考える。当然ながら位置のフィードバックが無くなるため、一点にとどまることはできない。一方、ロボットに外力を作用させた場合は、Fig. 6

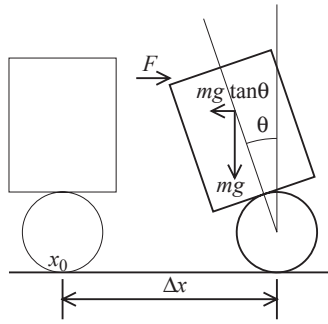


Fig. 5 Displacement of the robot and restoring force.

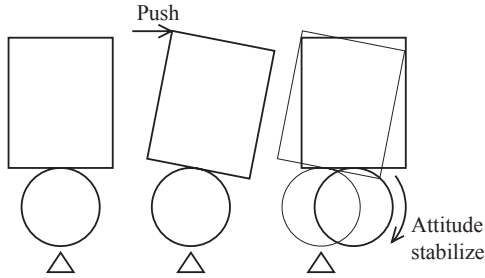


Fig. 6 Behavior of the robot when it pushed under free motion mode.

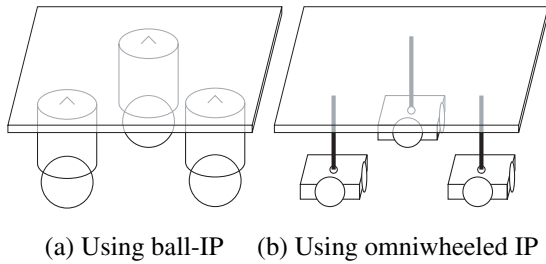


Fig. 7 Object supported by multiple inverted pendulums.

に示すようにロボットの頂部が変位するとともに僅かに傾くが、すぐに姿勢維持のフィードバックによって鉛直を復元しようとし、鉛直となるところまで移動する。結果的に鉛直を保ちつつ、外力に従って移動することになる。上部の位置を任意に移動させようとするれば、その動きにあわせてロボットが移動する。これが、玉乗りロボットの受動動作モードの発想である。通常は位置制御を有効にしておき、搬送物を搭載後、 $K_T$ をゼロにすることで、搬送物の荷重はロボットが受けつつ、自在に動かせるようになる。位置の制御が有効な場合は、搬送物を搭載したことによって質量中心がずれたとしても、新たな中心がボール接地点の直

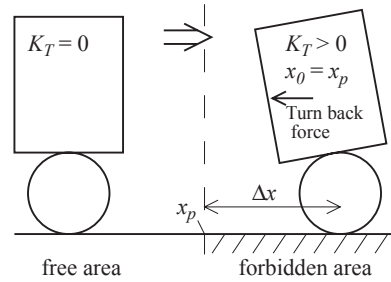


Fig. 8 Setting forbidden area using selective position gain.

上になる位置まで適宜移動して釣り合う。そのため、その時点の傾斜角を基準とし直せば、搭載物が静物なら問題は生じない。速度ゲイン $K_V$ については、ゼロとすることも可能であるが、移動速度に対するブレーキとしても作用するため、本研究ではそのまま使用している。

既存の協調搬送の研究では、たとえば、多軸の力センサを搭載し、その力情報をフィードバックすることでロボットの運動を制御してきた。本方法は、物体の変位そのものをロボット本体の傾斜という形で検出し、姿勢制御によって間接的にロボットが移動する。これはFig.7(a)に示すように複数台のロボットを用いて搬送する場合に、個々のロボットが支持しつつ、搬送物の運動にあわせて追従することを意味し、結果的に協調搬送が可能となる。ロボット自身に姿勢制御が常に必要である、という複雑さを除けば、追加のセンサ無しに、ゲイン一つを変更するのみで能動と受動が切り替えられることは利点であるといえる。なお、この方法の実現は玉乗りである必要はなく、たとえばFig.7(b)に示すような全方向移動ロボットに棒状のアームを立てる倒立振子の、振り子上に物を乗せる場合も同等である。この場合、アームの根本にはポテンショメータなど、絶対角の検出が容易なセンサを使用することができ、平滑な路面では搬送機としてはむしろ有利と期待される。

現状で実装はしていないが、障害物回避や経路誘導などのため、意図的に $K_T$ をゼロから選択的に



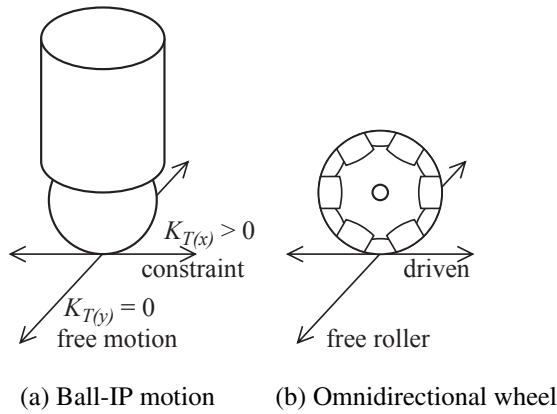


Fig. 9 Assuming the inverted pendulum with a ball as an omnidirectional wheel.

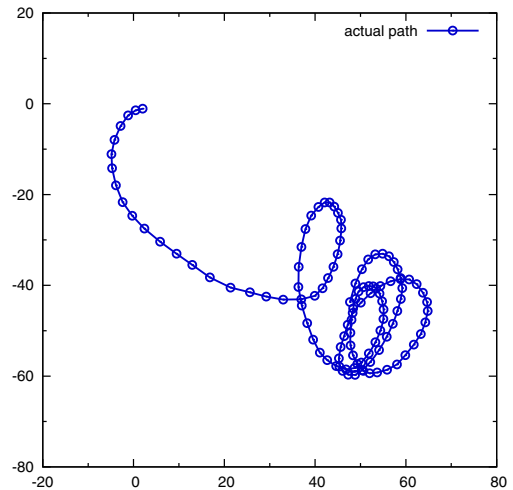
有効にすることで、受動な方向を限定することが可能と考えられる。Fig. 8に示すように、障害物検出などをもとに設定した禁止領域で $K_T$ を通常値に戻すことで前述の押し返しの力を発生させ、進行を押しとどめることができる。

また、2軸ある制御軸の一方のゲインをそのまま、もう一方をゼロとすることで、“一方向には能動、直交する方向には受動”という移動体の実現できる。これはまさに全方向移動車輪の特性であり、Fig. 9に示すように玉乗りロボット一体を1個の全方向移動車輪と見なすことができる。本ロボットを複数台併用した同期制御によって、既存の全方向移動車輪ロボットと同様の動作も可能となると考えられ、今後の研究課題である。

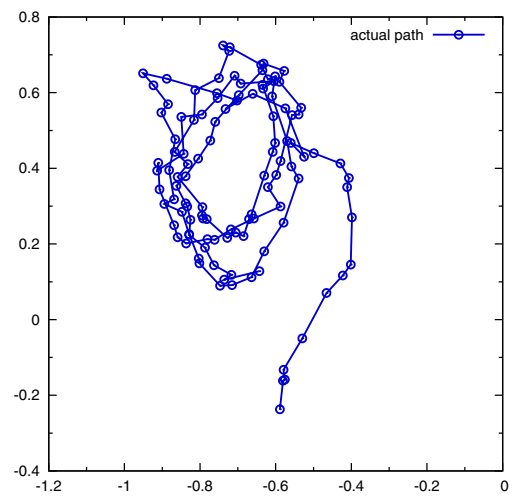
### 3. 実験

#### 3.1 基礎実験

1号機を用いて、基礎的な制御実験を行った。既報<sup>2)</sup>であるが、参考まで一部を再掲する。ロボット静止状態での挙動をFig. 10に示す。上図は位置の変動である。内部計算値であり、非ホロノミック性により実測値は若干異なると思われるが、定常状態では30 [mm]以内に収まっている。下図は傾斜角である。なお、各制御ゲインは実験的に決定した。



(a) Fluctuation in robot position ([mm]).



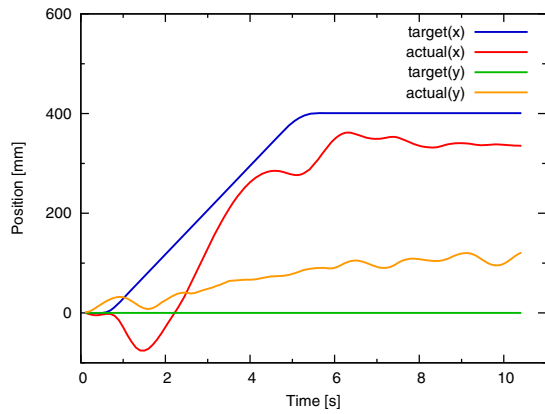
(b) Fluctuation in inclination ([deg]).

Fig. 10 Experimental results when robot was commanded to stand still. Acquisition interval (points on graphs) was 50 [ms].

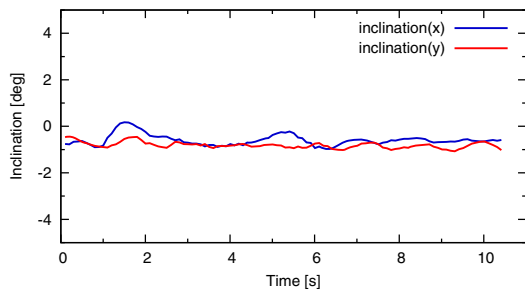
ロボットに移動指示を与えた場合の挙動をFig. 11に示す。位置にみられる初期のアンダーシュートは、移動の加速のために一時的にボールを逆方向に加速することで姿勢を傾ける動作による(基本の制御式による動作)。また、制御は2軸独立あるが、ロボットの姿勢を介しての干渉があるため、移動を指令したX方向の不足と、指令していないY方向の変位が生じたものと考えられ、正確な移動には上位のフィードバックが必要といえる。

#### 3.2 搬送実験

2号機を用いて、搬送実験を行った。

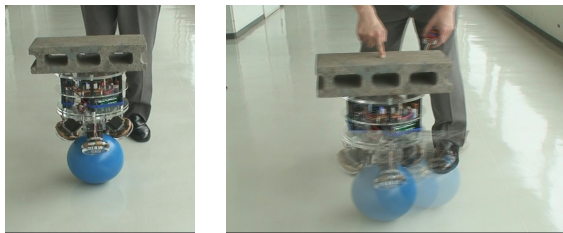


(a) Change in target point and actual position.

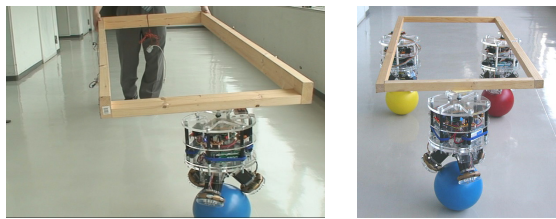


(b) Change in inclination of the robot.

Fig. 11 Experimental results when robot was commanded to move straight.



(a) Load the robot with a concrete block and move it.



(b) Human-robot cooperation. (c) Robots co-ope.

Fig. 12 Application of the robot in transportation.

まず、ロボットを静止させた状態で、10 [kg]のコンクリートブロックを搭載した(Fig. 12(a))。ロボット側の質量(本体9.5 [kg]、球3.6 [kg])に比較して大きな質量を加えたが、4個の制御ゲインを変更せずに安定性を維持した。当然、より軽いものを載せても問題はない。当初、ゲイン調整が必要であ

ると想定し、その検討のために数種の物品を搭載していった。しかし、安定性が失われなかったことから、前述の加速度を操作量とする倒立振り制御のロバストさを発見し、解析によって確認した。

さらに、搭載した状態で、位置ゲイン $K_T$ をゼロとして、外力で移動させた。ここでは指一本で、総質量20 [kg]程度の物体を軽く動かしている。これは、指で直接移動させるするわけではなく、指は上部を動かして、移動のきっかけとなる傾斜を生じさせるのみであるためである。傾斜地では球の接点が斜度に応じて質量中心の直下から移動するため、水平方向の成分が生じ、押す側が支える必要がある。しかし斜面であっても、質量中心が接点の直上であればよいため、斜度を推定し適切に全体を傾斜させれば、問題なく移動できると考えられる。

Fig. 12(b)は、人間と1台のロボットで協調した搬送である。先の事例はロボットが搬送しているものを人間が誘導する形であったが、本事例は人間も荷重を支持する。この場合、搬送物とロボットとの相対角度が変化しうる。図ではほぼ水平に搬送物を保持しているが、人間側を地面に下ろしたり、持ち上げたり、図中左右方向に傾ける可能性がある。一方、ロボットの天板は水平でなければならない(傾けた状態は姿勢制御で復元される)。また、ロボットと人間の相対的位置関係が変わる場合に、ロボットが鉛直軸周りに回転させられる。これらの角度差を吸収するため、ロボットと搬送物の間にはボールジョイントを介して載せており、一点で支えた形になっている(そのため、搬送物の姿勢は人間が保持している)。

Fig. 12(c)では、同型3台のロボットによる受動的な協調の実験を示す。個々のロボットは、Fig. 12(b)と同様に、位置の制御をせず、ボールジョイントを介して搬送物である木枠を載せている。この状態で木枠を任意の方向に移動し、回転させることが可能である。3台の場合は、搬送物が3点で支

持され、各々適宜荷重がかかっており、ロボットから浮き上がることはない。しかし、4台以上の場合には1台から浮く可能性があり、搬送物から離れたロボットは挙動が不定となる(姿勢維持はするが、位置の制御がない)。そのため、実用のためには、支持点のサスペンション機構や、ある程度は相対的な位置関係を保持するような相互の連携が必要であると考えられる。

## 4. おわりに

本論文では、開発した玉乗りロボットと、このロボットの物体搬送への応用について報告した。

玉乗りロボットそのものが現状では実現例が少なく、実用性の検討は今後の評価が必要であるといえるが、車輪移動型の倒立振子に比較して、すくなくとも全方位性がある点では優位である。

また、本ロボットが物体搬送に使用できることを実験で示した。加速度を操作量とする制御式を採用したことは偶然ではあったが、それがロバスト性につながり、ゲインの変更無く、様々なものが搭載できた。このことは搬送物を含めたパラメータ同定の必要がないことを意味し、システムの簡素化や信頼性につながる。加えて、ロボットを複数台製作し、人間 - ロボット、およびロボット - ロボットの協調が一つのゲインをゼロとするのみで実現できることを示した。倒立振子を移動体として用いる試みは増えつつあり、その延長での現実的な利用が期待される。

今後は、受動動作の応用面で述べた、障害物回避や複数台の積極的な協調について検討する予定である。

最後に、全方向移動車輪は、特許を保有している独立行政法人理化学研究所から研究用の製作許可を頂いたこと、ロボットの製作では東北学院大学工学部機械工場の方々の協力を得ていることをここに記し、謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) 熊谷正朗, 落合恭也, 今野範明: “平面上を移動可能な倒立振子の開発”, 日本機械学会 ロボティクス メカトロニクス講演会08, 講演番号 2P1-C11(CDROM) (2008)
- 2) Masaaki Kumagai, Takaya Ochiai: “Development of a Robot Balancing on a Ball”, Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2008, pp.433–438 (IEEE Xplore) (2008)
- 3) 松本治, 梶田秀司, 西郷宗玄, 谷和雄: “静的歩容を規範とした2足歩行型脚車輪ロボットの階段昇降制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.6, pp.868–875(1998)
- 4) 江村超, 酒井 高男: “反動力によって立位を維持する倒立振子の研究”, パイオメカニズム, pp.321–328 (1973)
- 5) T.B.Lauwers, G.A.Kantor, R.L.Hollis: “A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive”, Proc. ICRA 2006, pp.2884–2889 (2006)
- 6) Tatsuro Endo, Yoshihiko Nakamura: “An Omnidirectional Vehicle on a Basketball”, ICAR’05, pp.573–578 (2005)
- 7) 中村仁彦, 圓戸辰郎, 宇田寿一: “全方向移動ロボット及び該ロボットの全方向移動機構”, 特開 2006-282160(2006)
- 8) 熊谷正朗: “加速度センサ, 角速度センサの活用事例/車輪移動型倒立振子の開発にみるセンサの使い方”, デザインウェブマガジン, No.117, CQ出版社, pp.94–105 (2007)
- 9) 浅間一, 嘉悦早人, 遠藤勲, 佐藤雅俊: “全方向移動車輪”, 特許第3421290号(2003)