

玉乗りロボットの移動性能の向上に関する研究

Performance Improvement in Mobility of Ball Balancing Robots

○松本祥*, 熊谷正朗**

MATSUMOTO Syo*, KUMAGAI Masaaki*

*東北学院大学 大学院, **東北学院大学

*Tohoku Gakuin University

キーワード : 玉乗り(Ball balancing), 倒立振り子(Inverted pendulum), 双曲線関数(Hyperbolic function),
動力学(Dynamics), 移動(Mobility)

連絡先 : 〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目 1 3 - 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, 玉乗りロボットの移動性能の向上に関する研究を報告する.

玉乗りロボットとは球を駆動部とし, 装置の劣駆動部が球の上に乗った状態で安定な直立姿勢を保ち続ける倒立振り子ロボットである[1]. また, 玉乗りロボットは全方向からの外乱に対して安定姿勢の維持が可能な倒立振り子ロボットである. 従来より, 車輪型の倒立振り子は多く存在しており, 現在では Segway 等の乗り物への応用が進められている. このような車輪移動型の倒立振り子は車輪回転方向への移動や旋回を行うことはできるが, 車軸方向への移動は瞬時にできず, まず旋回する必要がある. その為, 車輪型の倒立振り子ロボットには移動・姿勢の制約が存在している. しかし, 全方向性を有する玉乗り型の倒立振り子は全方向の外乱に強く, 移動制約がなく瞬時に任意の方向へ移動ができる.

本研究室では既に玉乗りロボット BallIP (Fig.1)を開発しており[1], 球の回転の加速度操作による制御の有用性, 協調搬送等の成果が出

ているが, 安定状態を保ちながらの移動は簡易的な実装にとどまっている. 人間の住環境において移動を行う際は指定した経路に沿った移動が必要である. 従来の移動型の倒立振り子ロボットは重心による操作, 外部からの遠隔操作といった, 直接人間の操作が介入し移動を行っていた. よりサービスロボットとして活躍するためには事前に入力した経路を基に外部からの操作を省いた移動が望まれ, 実現できればサービスロボットとしてさらに有用性が期待できる.

本研究室の玉乗りロボットはマニュアル操作による移動を行っている. 玉乗りロボットは常に傾き角度を検出し, 鉛直軸を目標に球の加速度を操作して安定姿勢に戻そうとしている. それゆえ, 望むような移動結果が得られず移動の制約となっていた. そこで本研究は玉乗りロボットの動特性に自然な運動で無理なく自然な移動させることを目的とする.

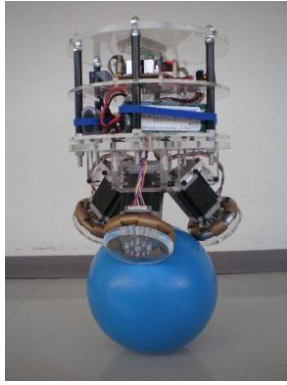


Fig.1 Ball balancing robot

玉乗り型の倒立振り子ロボットの移動の研究は既に U.Nagarajan らによって提案されており、ballbot による動作報告されている [2][3]. ballbot は 2 軸方向に設置したローラーにより球を駆動させ、トルクを指令値とした倒立制御を行っている。また、PD 制御を使用して位置保持制御を行っている。一方、本研究室の BallIP は鉛直軸に対して 3 つの車輪を 120[deg] 間隔で対称な位置に設置し球を駆動させる方式である。また、BallIP は加速度を指令値とした操作を行っており、傾き角度、同角速度、位置(球の回転距離)、速度(球の周速度)をフィードバックして倒立振り子制御を行っている。

ballbot に対して本研究室の BallIP は球を動かす駆動方法や形、大きさ、制御系に違いがある。そこで本研究は ballbot 用に提案された手法が異なる形式のロボットにも適用できるか試みる。

本研究室では、以前より倒立振り子の研究を行ってきた。一般的な倒立振り子はサーボモータなどを採用し、トルク操作を行っている。それに対し本研究室ではステッピングモータを採用し、操作指令値を加速度とした制御方法を採用している。ステッピングモータを採用した背景として、車輪を直接装着してダイレクトドライブにすることや、バックラッシュを減らすこと、実装の簡略化がある。

ステッピングモータを用いているため、倒立振り子で一般的なトルク操作を行うことは困難に

なったが、トルク操作にはない加速度操作の利点を確認された。トルク操作では慣性項の増加によってゲイン調整が求められるが、加速度操作ならモーターへの負荷は増えるが加速度は変わることなく、慣性項の増加に対してもゲイン調整がほぼ不要であった。また、同一ゲインによる安定の範囲が広いことも意味し、外乱による影響が少なくロバスト性にもつながっている。

2. 動作原理と構造

2.1 基本原理

玉乗りロボットの基本原理は、掌の上で箒や傘を立て、倒れないように直立の姿勢を維持させることと同じである。つまり、箒や傘にあたるものが倒立振り子である。秋田県の竿灯祭りなども同じ原理である。人間は目や掌から振り子の傾きを認識し、傾いた方向へ掌を移動させて、振り子の重心と掌の接点を鉛直線上に戻す動作を連続で行い、直立状態を維持し続けている。これが倒立振り子の基本原理である。これを玉乗りロボットに置き換えた場合、ロボットは人間、球は掌、目はセンサにあたる。鉛直軸からの傾き角をセンサで検出し、傾き角を無くそうと適当な回転速度を算出し、球を駆動させて姿勢の維持を行っている。

2.2 実験装置概要

BallIP は全高約 310[mm]、直径 260[mm]、質量は球を省いて 8.9[kg]である。球は剛体球であるボーリング玉を採用した。球は直径 220[mm]、質量 3.8[kg]である。また、球の表面には液状ゴム性コーティング剤を使用し、球と車輪の摩擦および床と球の摩擦を確保している。

ロボット本体には制御用マイコン(ルネサス H8/3052,16bit)、加速度・ジャイロセンサ(共に AnalogDevices 製)、Ni-MH バッテリー(7.2[V] 3300[mAh]×3 本)を搭載している。

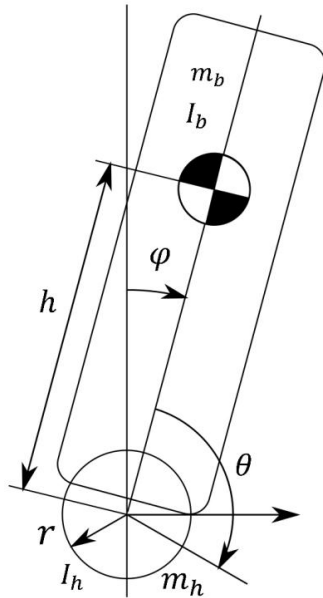


Fig.2 Inverted pendulum model

2.3 制御方法

玉乗りロボットは倒立振り子であり，直立状態を維持し続けるためには，一般的に用いられる倒立振り子制御を行う．具体的な制御式は，

$$\alpha = K_A \theta + K_{AV} \dot{\theta} + K_T x + K_V \dot{x} \quad (1)$$

となる[4]．この α は加速度操作量， θ と $\dot{\theta}$ はロボットの傾き角度と角速度， x と \dot{x} は位置と速度である．また， K_A ， K_{AV} ， K_T ， K_V は各々のフィードバックゲインである．これを直交する2方向に独立して行う．一般的な倒立振り子制御では操作量をトルクにしていることに対し，本研究では加速度を操作量とした制御方法を取り入れていることは前節で述べた通りである．

3. 玉乗りロボットの動的モデル

3.1 概要

玉乗りロボットを任意の位置へ移動させる手段として，直立状態を維持する制御をしたまま球に駆動を与える方法がある．これは目標地点へ車輪を駆動させて球と移動経路を追従させる方法である．大きく動かそうとしたときには振子の傾き角度も大きくなるため振動を起こしたり，転倒を起こす要因となる．一方，倒立制御

Table.1 BallIP parameters.

m_b	8.9 [kg]
I_b	0.11 [kgm ²]
m_h	3.8 [kg]
I_h	0.018[kgm ²]
r	0.11 [m]
h	0.23 [m]

への影響をおさえようとする，移動の重量は小さくとどめなければならない．本論文ではロボットの傾きを積極的に指示することで球を駆動させ，傾き角の軌道を追従させて移動する方法を試みる．傾き角による移動は静力学では求めることが出来ない動的な関係が生じる．したがって，玉乗りロボットの動力学方程式の導出する必要がある．

玉乗りロボットは剛体球の上に円柱状の装置が乗っているモデルになっており，矢状面や前額面での複雑さを考慮することはなく，平面内でモデルを作る事ができる．よって，玉乗りロボットは Fig.2 に示すようなモデルになる．ここで，モデルで用いるパラメータを Table.1 に示す． m_b と m_h はロボットと球の質量， I_b と I_h はロボットと球の慣性モーメント， φ はロボットの鉛直からの傾斜角， θ はロボットと球の相対角度である．また， h は質量中心の高さ． r は球の半径である．

Fig.2 に示すような平面モデルより，動力学方程式を導いていく．ただし条件として，(I)球と床との間に滑りは生じない．(II)球とロボットの間には滑りは生じない．(III)床は常に水平面である．これらの条件を考え，傾斜角の軌道と球の動的な入出力関係で必要な動力学方程式を導出していく．

本研究では動力学方程式を導出の際にオイラー・ラグランジュ方程式を用いて導出する．オイラー・ラグランジュ方程式は最小作用の原理より作用積分を最小化にすることで，理論的に

自然法則として確立しているニュートン力学と等価にする被積分関数である．一般的にラグランジュ関数は運動エネルギーとポテンシャルエネルギーから導かれ時間に関係した関数である．

3.2 動力学方程式の導出

動力学は静的状態における力の釣り合いで導かれる静力学とは違い，非平衡状態の関数である．玉乗りロボットのオイラー・ラグランジュ方程式は次式を用いる．

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{p}} \right) - \frac{\partial L}{\partial p} = \tau \quad (2)$$

L はラグランジアン， p は一般座標ベクトルである．ラグランジアンは運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの差であり，それぞれのエネルギーを求めていく．

Fig.2の簡略化モデルより，剛体の運動エネルギーは重心回りの回転運動エネルギーと重心の並進運動エネルギーの和で与えられる．球の回転運動エネルギーは軸回りの慣性モーメント I_h より，

$$K_1 = \frac{1}{2} I_h (\dot{\theta} + \dot{\varphi})^2 \quad (3)$$

となる．球の回転運動エネルギーにロボットの角速度 $\dot{\varphi}$ が加算されているのは，傾くことで球も回転するためである．傾斜角によるロボットの回転運動エネルギーは，

$$K_2 = \frac{1}{2} I_b \dot{\varphi}^2 \quad (4)$$

となる．次に並進運動エネルギーを求める．

$$K_3 = \frac{1}{2} m_b V^2 = \frac{1}{2} m_b (V_x^2 + V_y^2) \quad (5)$$

式(5)はロボット本体の並進運動エネルギーである．速度は平行成分と垂直成分に分解できる．各速度は具体的に次式と書き下せる．

$$\begin{cases} V_x = \frac{\partial}{\partial t} \{r(\theta + \varphi) + h \sin \varphi\} \\ V_y = \frac{\partial}{\partial t} (h \cos \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

球の回転に伴う並進速度は $V_h = r(\dot{\theta} + \dot{\varphi})$ であるため，球の並進運動エネルギーは次式になる．

$$K_4 = \frac{1}{2} m_h V_h^2 \quad (7)$$

式(3)(4)(5)(7)より，運動エネルギー K の総和を求めることができる．

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 \quad (8)$$

球の上下移動がないため，ポテンシャルエネルギー U は球の上に乗っている玉乗りロボットのみを計算すればよい．

$$U = m_b g h \cos \varphi \quad (9)$$

動力学方程式を書き下す為に必要なラグランジアン L は運動エネルギー K とポテンシャルエネルギー U の差で与えられる．

$$L = K - U \quad (10)$$

式(10)を式(2)へ代入することで動力学方程式の導出が可能になる．本モデルの変数は θ と φ であるため， $p = [\theta, \varphi]^T$ と一般座標ベクトルは定義される．したがって，式(2)は次のように書き換えができる．

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

右辺が τ と0になる理由は，駆動するのが θ だけで， φ は動特性によって受動に決まるからである．式(11)の動力学方程式より，式(10)のラグランジアンを球とロボットそれぞれの角度と角速度で偏微分を行う事で，式(12)に示すような行列の形式にすることができる．

$$M(p)\ddot{p} + C(p, \dot{p}) + G(p) = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで， $M(p)$ は慣性行列項， $C(p, \dot{p})$ は遠心力及びコリオリ力項， $G(p)$ は重力項である．

$$M(p) = \begin{bmatrix} \alpha & \alpha + \beta \cos \varphi \\ \alpha + \beta \cos \varphi & \alpha + \gamma + 2\beta \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C(p, \dot{p}) = \begin{bmatrix} -\beta \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ -\beta \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$G(p) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\beta g \sin \varphi}{r} \end{bmatrix} \quad (15)$$

ただし，式中の α ， β ， γ は $\alpha = I_h + (m_h + m_b)r^2$ ， $\beta = m_b r h$ ， $\gamma = I_b + m_b h^2$ である．以上で Fig.2の平面モデルから玉乗りロボットの動力学方程

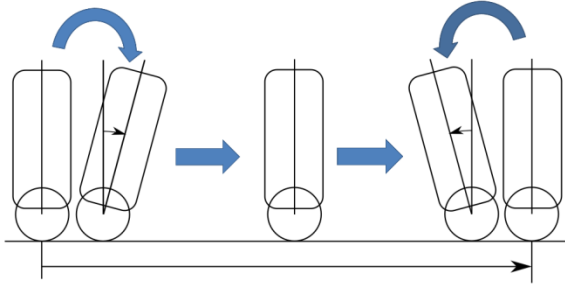


Fig.3 Outline of movement plan

式の導出をした。

式(12)は球の回転とロボットの傾きが対応する $p = [\theta, \varphi]^T$ について導かれた。 θ が球の駆動角度を表し、 φ はロボットの角度を表しており、式(13)(14)(15)を書きなおすことでロボットの傾き角に対応している動力学方程式は次式のように書き下せる。

$$(\alpha + \beta \cos \varphi) \ddot{\theta} + (\alpha + \gamma + 2\beta \cos \varphi) \dot{\varphi} - \beta \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - \frac{\beta g \sin \varphi}{r} = 0$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\frac{\beta g \sin \varphi}{r} + \beta \dot{\varphi}^2 \sin \varphi - (\alpha + \gamma + 2\beta \cos \varphi) \dot{\varphi}}{\alpha + \beta \cos \varphi} \quad (16)$$

よって、傾き角 φ の軌道を時間関数で設定し、角度、角速度、角加速度を式(16)へ代入することで、系の動特性に従った球の角加速度を導くことが可能となる。また、式(16)を積分して球の半径を乗じることで球の移動距離まで計算が可能となる。

4. 傾斜角の軌道の導出

4.1 概要

3節では傾き角 φ の軌道を設定することで球の角加速度が定まる、つまり移動することを述べた。また、移動によって玉乗りロボットは非平衡状態となり、動力学方程式の導出が必要となることから玉乗りロボットの平面モデルより動力学方程式の導出を行った。本節では傾斜角の軌道で求められる条件、関数の導出を行っていく。

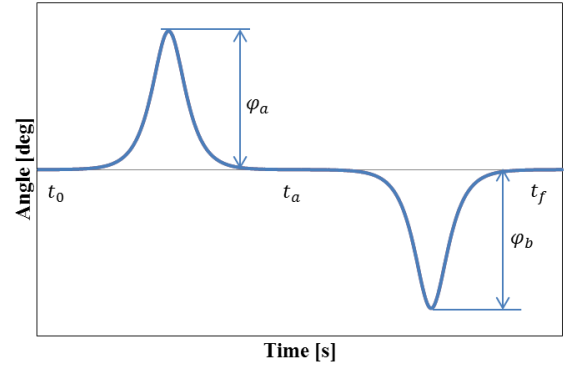


Fig.4 Inclination trajectory

4.2 移動条件

玉乗りロボットの移動をする際には条件がある。(I)動作時(時刻 t_0)と停止時(t_f)の傾斜角と速度は $\varphi_{t_0} = \dot{\varphi}_{t_0} = \varphi_{t_f} = \dot{\varphi}_{t_f} = 0$ である。(II)進行方向へ傾かせる。(III)その後、直立状態に戻すと等速運動する(IV)停止時は進行方向とは逆向きへ傾かせて減速、停止させる。(V) $\ddot{\theta}$ の連続性のために $\varphi(t)$ が微分連続性を有する。これらの条件を基に玉乗りロボットの具体的な移動手順を Fig.3 に示す。

4.3 傾斜角軌道の設定

移動条件に適合する関数として、本研究では双曲線正割関数(Hyperbolic secant, $\text{sech}(x) = 1/\cosh(x)$)を傾斜角の軌道として使用した。双曲線関数は指数関数より定義され、三角関数とは違い等速円運動や単振動する性質がないので適する。

$$\varphi(t) = \varphi_a \text{sech} \left(\frac{kt}{\frac{t_a - t_0}{2}} - \frac{(t_a + t_0)k}{t_a - t_0} \right) + \varphi_b \text{sech} \left(\frac{kt}{\frac{t_f - t_a}{2}} - \frac{(t_f + t_a)k}{t_f - t_a} \right) \quad (17)$$

φ_a と φ_b は双曲線正割関数の振幅であり、加速時と減速時の最大傾斜角になる。 k はピークの幅を決める係数、 t_0 は動作の開始時間、 t_f は停止時間、 t_a は中間時間(= $(t_f + t_0)/2$)である。

Fig.4は(17)式より得られたグラフである。双曲線関数は指数関数で定義されており、単調増

減(発散)や単振動はせず、区分的な傾斜角の軌道を作ることが可能である。

移動条件より開始時と停止時における角度、角速度はほぼ 0 とみなせることが Fig.4 より分かる。進行方向に対して φ_a という角度で傾き、 t_a 周辺では目標値が直立姿勢へ戻っていることが分かる。そして、 φ_b という進行方向とは逆向きの傾斜角で減速を行い、経過時間 t_f 以降は鉛直に戻ることが分かる。

傾斜角の軌道から一回微分、二階微分を行い、式(16)の各項を与えると球の目標角加速度が求まることになる。

5. シミュレーション

5.1 動力学と傾斜角の軌道

式(16)の球に関する動力学方程式で示すように、球の角加速度を求めるには傾斜角を一階微分、二階微分する必要がある。式(17)より、

$$\begin{cases} s_1 = \frac{kt}{t_a - t_0} - \frac{(t_a + t_0)k}{t_a - t_0} \\ s_2 = \frac{kt}{t_f - t_a} - \frac{(t_f + t_a)k}{t_f - t_a} \end{cases} \quad (18)$$

とする。軌道の導出は s_1 、 s_2 と置換して行う。

$$\varphi(t) = \varphi_a \operatorname{sech}(s_1) + \varphi_b \operatorname{sech}(s_2) \quad (19)$$

傾斜角の軌道による角速度は式(19)を微分すれば求まる。

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t) &= \frac{2k\varphi_a}{t_a - t_0} \left(-\frac{\tanh(s_1)}{\cosh(s_1)} \right) \\ &+ \frac{2k\varphi_b}{t_f - t_a} \left(-\frac{\tanh(s_2)}{\cosh(s_2)} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

そして、角加速度は式(20)をさらに微分すれば次式のように書くことが出来る。

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}(t) &= \varphi_a \left(\frac{2k}{t_a - t_0} \right)^2 \left\{ \frac{(\sinh(s_1))^2 - 1}{(\cosh(s_1))^3} \right\} \\ &+ \varphi_b \left(\frac{2k}{t_f - t_a} \right)^2 \left\{ \frac{(\sinh(s_2))^2 - 1}{(\cosh(s_2))^3} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

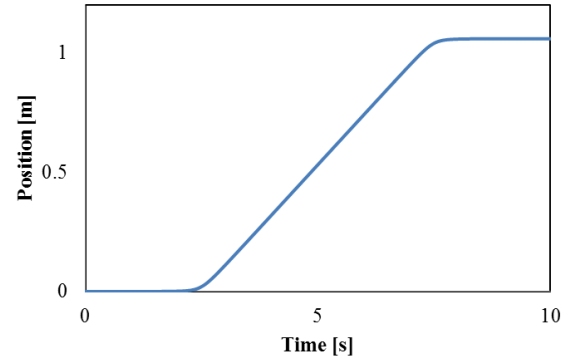


Fig.5 Motion of the BallIP simulated by (16),(17) with $(\varphi_a, \varphi_b) = (2.5[\text{deg}], -2.5[\text{deg}])$

式(19)(20)(21)を式(16)の動力学方程式 $\ddot{\theta}(t) = f(\varphi(t), \dot{\varphi}(t), \ddot{\varphi}(t))$ へ代入することで傾斜軌道に対応する球の目標角加速度を求めることが出来る。

これらにより、実際に BallIP のパラメータを使ってシミュレーションを行った。平面上の原点から約 1[m]を直線移動させることを目標とする。初期条件として $t_0 = 0[\text{s}]$ 、 $t_f = 10[\text{s}]$ 、 $k = 9$ とした。到達地点は初期条件より加速時と減速時の傾斜角を調節することで求められる。BallIP の傾斜角 $(\varphi_a, \varphi_b) = (2.5[\text{deg}], -2.5[\text{deg}])$ とすることで Fig.5 で示すように目標点の約 1[m]に達した。

5.2 移動に関する制御方法

玉乗りロボットが開始位置を目標点として直立状態で安定して倒立し続けるのは式(1)の位置ゲイン K_T と速度ゲイン K_V による。本来角度ゲイン K_A と角速度ゲイン K_{AV} のみでも倒立は可能だが、姿勢センサの誤差やロボットの重心位置の狂いなどによって、徐々に加速する場合がある。速度ゲインは倒立振子のブレーキとして作用し、位置ゲインは同じ位置に留まるよう動作する。

本研究では玉乗りロボットを移動させるには傾斜角を目標値とした制御が重要であると述べた。その為、玉乗りロボットの位置ゲインと速度ゲインの両方を $K_T = K_V = 0$ とする。これにより、

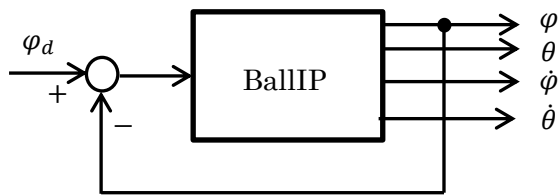


Fig.6 Trajectory control

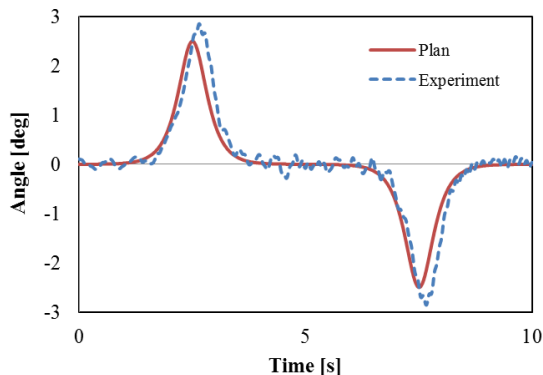


Fig.7 Body angle

目標姿勢角への追従制御のみを行う。ただし、位置、速度のフィードバックが無くなるため、上述の誤差や初期条件、路面の凹凸などの影響は受けやすくなる。この結果、Fig.6に示すようなフィードバック制御となる。傾斜角を目標値(指令値)とするので制御設計では、ロボットからの傾斜角 φ からフィードバックのみで構成され、連続した目標値を与える制御である。

6. 実験及び結果

本節では5節で行った傾き角の軌道と動力学方程式のシミュレーションと同等の条件で実機の動作試験を行い、動作結果とシミュレーションを比較し検討する。玉乗りロボットは非ホロノミックであるので実測値とは若干の誤差が出ると考えられる。また、シミュレーションは歪みのない平面で行われているので、実験環境によって移動の誤差が出てくると考えられる。

Fig.7は与えた目標傾斜角軌道の時間変化と動作試験で得られた傾斜角の測定値である。Fig.7より若干の誤差は見られるが、ほぼ目標通りに

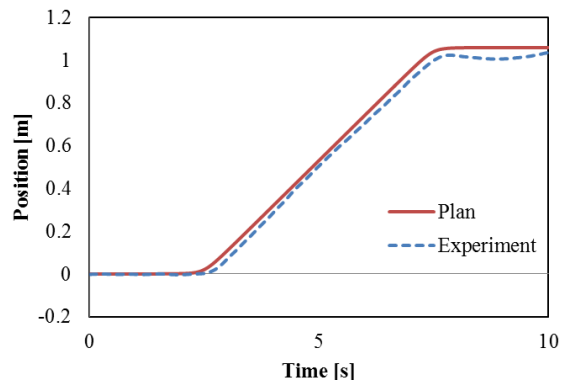


Fig.8 Movement result

傾き角の軌道を追従していることが分かる。

Fig.8はシミュレーションによる移動距離の時間変化と動作試験による移動距離の測定値である。シミュレーション通りの結果となった。移動条件より、原点から直線距離1[m]までの移動において若干の誤差が出たのは、玉乗りロボットが非ホロノミック性を持っていること、床の凹凸や傾斜によって目標位置とは異なった所へ移動してしまうことになると考えられる。本研究は位置の軌道指令ではなく傾斜指令のみで、ロボットの動特性を活かして狙った移動が実現できた。

7. 結論と今後の課題

本論文では、玉乗りロボットの移動性能の向上に関する研究を報告した。人間に対するサービスロボットとして活躍するには自然な運動で無理のない移動する能力が必要である。倒立振り子ロボットの移動方法に関する研究は少なく、本研究では指令値とする傾斜角の軌道と動力学方程式によりシミュレーションを行い実機による動作確認を行った。その結果、目標点までの移動には多少誤差が出たが、シミュレーション通りの成果が出た。誤差の原因は玉乗りロボットの非ホロノミック性やセンサの誤差が考えられ、そして、測定環境が完全な平面でないことが挙げられる。

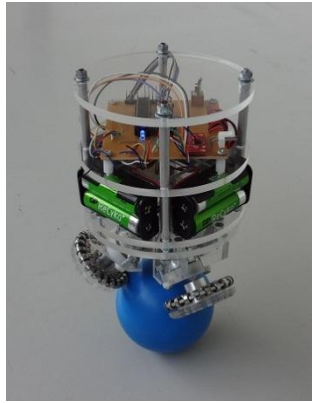


Fig.9 The MS-BIP

今後は、双曲線関数を使用した直線移動だけでなく複雑な移動経路に対して追従可能な傾斜角の導出及び移動方法について研究していく。

BallIP とは別に、約 3 分の 1 の大きさ小型の玉乗りロボット MS-BIP を開発しており、従来の BallIP の制御手法で、姿勢制御まで動作を実現した。今後、MS-BIP でも同様な傾斜指令による移動制御を試みる予定である。

参考文献

[1]Masaaki Kumagai, Takaya Ochiai:
“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)

[2]U,Nagarajan, 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.ICRA 2009,
pp.998-1003 (2009)

[3] U,Nagarajan, G. Kantor and R Hollis:
“Trajectory Planning and Control of an
Underactuated Dynamically Stable Single
Spherical Wheeled Mobile Robot”, Proc.ICRA

2009, pp.3743-3748 (2009)

[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”, バイオメカニズム, pp. 321-328 (1973)