

倒立振り子機構に基づく階段昇降ロボットの姿勢制御

友國伸保, 三井賀貴, 小竹元基

A Control Method for Stair-climbing Personal Mobility Robot Based on Inverted Pendulum Mechanism

Nobuyasu TOMOKUNI*, Yoshitaka MITSUI**, Motoki SHINO**

synopsis

In this paper, a control method for an inverted pendulum type personal mobility robot with virtual wheel is described. The robot is able to run on not only paved flat plane but also stairs with two virtual wheels consists of rotaly link and two wheels. By using this contol method based on LQR with 2 dimentional physical model, a inverted pendulum type personal mobility robot is able to climb a stairs in simulation.

keywords: Inverted pendulum, personal mobility

1. はじめに

本稿では、平面内での高速な移動と、階段を含む段差上での移動を可能とする個人用移動体の制御手法について述べる。

本移動体では車輪付き回転リンクとスライダを持つユニークな機構を採用している。平面内での移動においては車輪機構が効率的な移動手段である。しかしながら、車輪機構は階段等の段差に対しては弱いという欠点をもつ。このため、本移動体は図1に示すような両端に車輪が取り付けられた回転リンクを回転させることにより、階段の踏み替えを可能としている。車輪付き回転リンクは一般に仮想車輪と呼ばれ、これによって階段の移動を可能にした機構はこれまでに多く提案されている^[1]が、静的安定性を保つために3組以上の仮想車輪を配置すると移動体が大型化するという欠点がある。本機構では左右2組の車輪付き回転リンクのみを用いてバランスを保つ倒立二輪移動機構を用いることで、小型軽量化を実現している。

車輪付き回転リンクを用いた階段の移動を考える場合、車輪および回転リンクの寸法によって移動可能な階段の

大きさが規定される。そこで本移動体は建築基準法にて規定されている公共建築物の階段上^[2]を移動可能とするように設計されている^[3]。

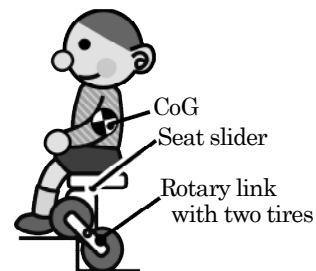


Fig. 1 Inverted pendulum type mobility with rotary link and wheel

*近畿大学工学部ロボティクス学科

Dept. of Robotics,
Faculty of Engineering, Kinki University

**東京大学

The University of Tokyo

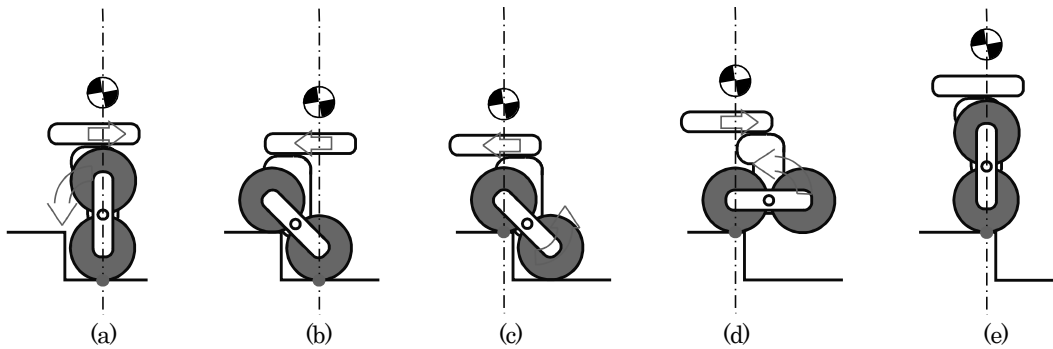


Fig. 2 Sequence to climb stairs.

回転リンク稼働時にも倒立を維持するためには、タイヤの接地点の直上に重心位置を維持する必要がある。このために、シートと本体の間に平行移動可能なスライダを配置し、このスライダによってシートを移動させている。また、このスライダを姿勢制御にも加えることで、車輪のみによる倒立制御に比べ、姿勢維持性能を向上させることが可能となる。

本稿では、姿勢制御として車輪、回転リンク、スライダの3自由度を持つ平面モデルを考え、最適レギュレータ(LQR)を用いて制御系の設計を行った。また、Open Dynamics Engine(ODE)を用いたシミュレーション環境によって動作確認を行い、制御の有効性を確認する。

2. 倒立振り機構を用いた階段昇降の概要

図2(a)~(e)に倒立振り機構を用いて階段昇降を可能とする移動体の階段を登る動作の概要を示す。図2(a)~(e)中のタイヤと地面の間の点は、倒立制御の支点位置を表す。この支点の直上に機体全体の重心が有る場合、倒立の維持が可能である。

図2において各手順は、

(a) 左右二輪倒立状態で段差の直前まで移動した後、回転リンクを前方へ回転させる。このとき支点となる車輪は相対的に機体の後方へ移動するため、スライダを後退させて重心を倒立支点上に維持する。

(b) 回転リンクを回転させ、上側のタイヤが接地すると、下側の車輪の接地点と合わせ、移動体は左右4点で支持されることになり、静的安定状態となる。このとき倒立制御を打ち切り、スライダを前進させ、重心を上側車輪の接地点上方へ移動させる。

(c) 重心が上側車輪の直上となった後、倒立支点を上側の車輪の接地点として倒立制御を行なう。姿勢制御と共に回転リンクを前方に回転させ段差を登る。このときスライダを前進させ、重心を支点の直上に維持する。

(d) 回転リンクが水平になった後は、重心維持のためにスライダを後退させる。

(e) 以上の手順により、段差を登る。階段の場合は段数分(a)~(e)を繰り返す。

3. 制御系の構成

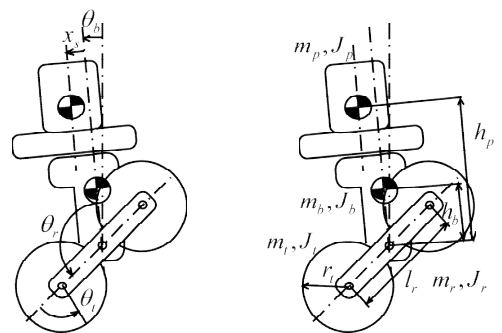
図2に示す階段上の移動動作を実現するためには車輪、回転リンクおよびスライダの運動が姿勢に与える影響を考慮する必要がある。このため、車輪、回転リンク、スライダおよび姿勢の4自由度を持つ地面と垂直な平面における物理モデルを考え、物理モデルよりLQRを用いて姿勢制御系を構成した。

3.1 機構のモデル化

図3に移動体の物理モデルを示す。この物理モデルは、2個の車輪、1個の回転リンク、1個の本体および、シートと乗員を1まとまりとした荷重の計5個の剛体から構成される。また、回転リンクが本体に取り付けられている軸を機体の原点とする。

自由度の配置を図3(a)に示す。回転リンクに対する車輪の回転量を θ_l 、本体に対する回転リンクの回転量を θ_r 、本体の地面に対する傾きを θ_b 、スライダの変位を x_s とする。非接地側の車輪は接地側の車輪と同じアクチュエータにより駆動されているが、全体に対する影響が小さいため物理モデル上では無視する。

物理パラメータを図3(b)に示す。各剛体は質点として扱い、車輪の質量を m_l 、慣性モーメントを J_l とする。以下同様に、回転リンクに対して m_b, J_b 、本体に対して m_p, J_p 、荷重に対して m_r, J_r とする。車輪と回転リンクの重心はリンクの中心に一致するものと仮定し、本体と荷重の



(a) Definition for freedom (b) Physical parameters
Fig. 3 Physical model for the vehicle

重心の回転リンク軸に対する高さをそれぞれ h_b, h_p とする。

表 1 に、制御系の計算およびシミュレーションに用いたモデルの物理パラメータを示す。

3.2 物理モデル（逆動力学）の導出

図 3 のモデルをラグランジュ法を用いて解くと、次の形式の逆動力学を得る。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここで、 $\ddot{\mathbf{x}}$ は自由度 \mathbf{x} に働く加速度を表す 4 次元ベクトル、 $\boldsymbol{\tau}$ は \mathbf{x} に対する一般化力を表す 4 次元ベクトル、 $\mathbf{M}(\mathbf{x})$ は \mathbf{x} の状態により変化する質量を表す 4x4 マトリクス、 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ は \mathbf{x} の状態により変化する重力項を表す 4 次元ベクトルであり、下記のように表される。

$$\mathbf{x} = [\theta_t \ \theta_r \ \theta_b \ x_s]^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = [\tau_t \ \tau_r \ 0 \ f_s]^T \quad (3)$$

$\mathbf{M}(\mathbf{x})$ および $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ の詳細は紙面の都合により省略する。

3.3 物理モデル（順動力学）の導出

(1)式を元に LQR を用いて制御系を設計する。しかしながら、(1)式において、 $\mathbf{M}(\mathbf{x})$ および $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ は \mathbf{x} によって変化するため、そのままでは状態方程式を求めることは困難である。このため、以下の手法を用いて導出する。

いま、機体の自由度 \mathbf{x} が、 $\mathbf{M}(\mathbf{x})$ に影響を与えない程度に $\Delta\mathbf{x}$ だけ微小変位したとする。このとき、(1)式は以下のように書き換えられる。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}'(\mathbf{x}) \cdot \Delta\mathbf{x} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{g}'(\mathbf{x}) \cdot \Delta\mathbf{x}$ は重力項を \mathbf{x} 周りで 1 次線形化すると導出される項である。

(4)式から状態方程式を求めるために、順運動学を求める必要があるため、(4)式を $\ddot{\mathbf{x}}$ について解く。

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}) \cdot \ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{g}'(\mathbf{x}) \cdot \Delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\tau} - \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{g}'(\mathbf{x}) \cdot \Delta\mathbf{x} + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x}) \cdot (\boldsymbol{\tau} - \mathbf{g}(\mathbf{x})) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x})$ を解析的に求めることは困難であり、数値的に求める。吐き出し法を用いて $\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x})$ を求めることとし、(6)式を変形すると以下のように変形できる

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \Delta\mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot (\boldsymbol{\tau} - \mathbf{g}(\mathbf{x})) \quad (7)$$

3.4 倒立コントローラ的设计

(7)式により、次の形式の状態方程式を求めることができ

r_t	0.12 m	h_b	0.16 m
m_t	6.0 kg	m_b	25.0 kg
J_t	4.32×10^{-2} kgm ²	J_b	4.52×10^{-2} kgm ²
l_r	0.26 m	h_p	0.6 m
m_r	10.0 kg	m_p	120.0 kg
J_r	6.47×10^{-2} kgm ²	J_p	8.50 kgm ²

る。

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{A}_s \cdot \mathbf{x}_s + \mathbf{B}_s \cdot \boldsymbol{\tau}_s \quad (8)$$

ここで、

$$\mathbf{x}_s = \left[\int \theta_b dt \ \theta_t \ \theta_r \ \theta_b \ x_s \ \dot{\theta}_t \ \dot{\theta}_r \ \dot{\theta}_b \ \dot{x}_s \right]^T \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\tau}_s = [\tau_t \ \tau_r \ f_s]^T - \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (10)$$

である。

(8)式より、LQR を用いて下記の制御則の \mathbf{K}_{LQR} を導出する。

$$\boldsymbol{\tau}_s = \mathbf{K}_{LQR} \cdot (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}_s) \quad (10)$$

また、(8)式の \mathbf{A}_s 、 \mathbf{B}_s は回転リンク角度によって大きく変化するため、回転リンク角度によってゲインスケジュールを行う。

3.5 スライダ目標値の導出

スライダ位置の目標値 x_s は、釣り合い位置で無ければならない。このため、(1)式より各自由度の加速度が 0、 $\tau_b = 0$ として、重力項を釣り合わせる x の値を目標値として採用する。

3.6 階段登りのための制御

階段上を移動する際に 2 通りの状態がある。このため、階段登り動作を下記の 2 つの期間に分割し、それぞれに制御を適用した。

(a) 4 輪接地期。タイヤ 4 つで接地しており、静的安定状態である期間。この期間は倒立制御は不要であるため、各軸 PID 制御にて対応している。図 2 の (b)-(c) の間の期間が相当する。

(b) 2 輪倒立期。2 つのタイヤで倒立している期間である。

3.4 節で求めた制御を用いて姿勢制御を実施する。

4. シミュレーションによる動作確認

これまでに求めた制御則の有効性を Open Dynamics Engine(ODE) を用いたシミュレーションにより確認した。

シミュレーション時の状態を図 5 に示す。制御周期は 1 ms、モデルのパラメータは表 1 と同じとした。シミュレーションにより、現実的なアクチュエータトルクにより制御

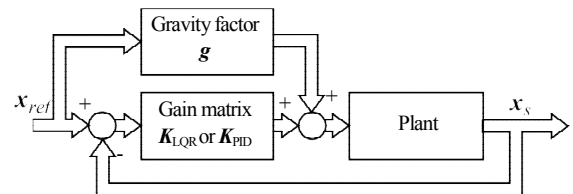


Fig. 4 Block diagram of the controller

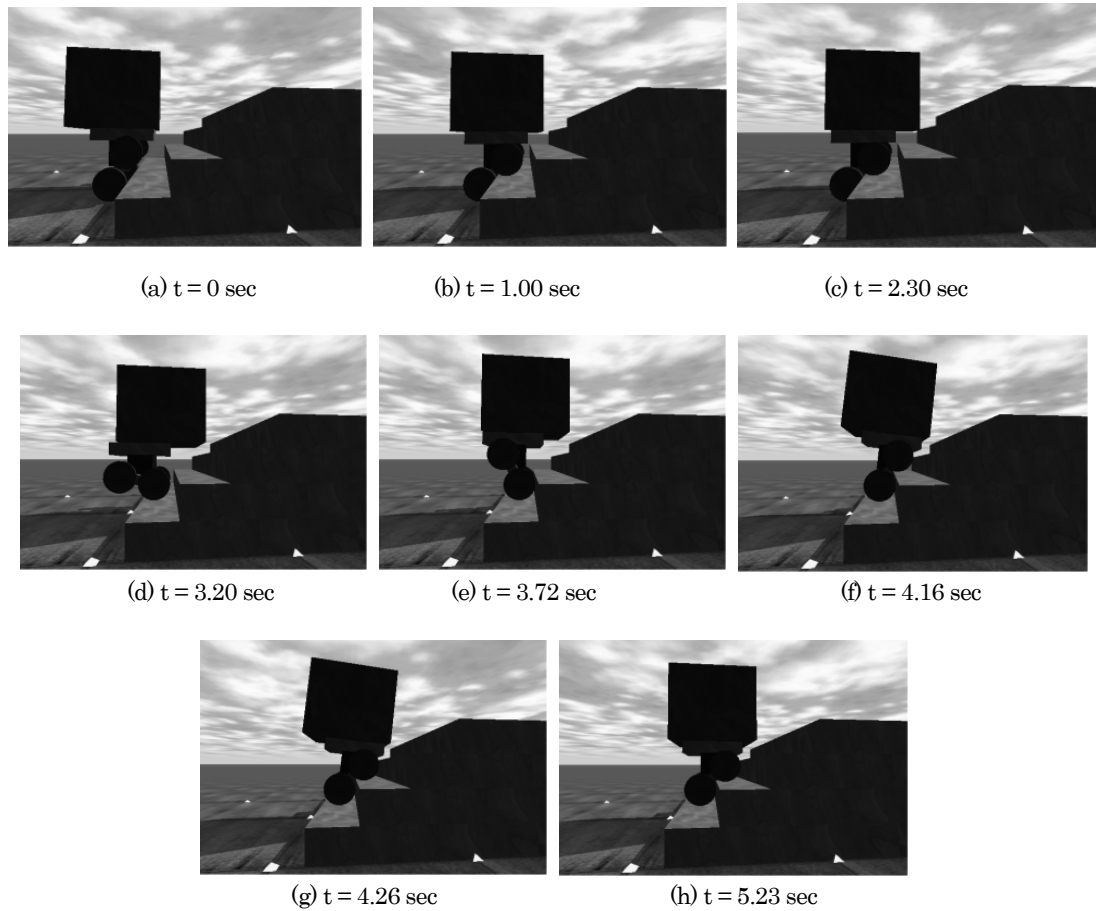


Fig. 5 Result of simulation

可能であることが確認できた。

5. まとめ

本稿では、回転リンク機構を用いる倒立2輪型個人用移動体の制御手法について述べた。本機構を3次元平面モデルにモデル化し、LQRを適用することで、制御系を構成可能であることを示した。構成した制御モデルに対しODEを用いたシミュレーションを実施し、制御可能性を確認した。今後実機に対して制御を行い、有効性を確認してゆく。

文 献

- [1] 柳原直人, 元村誠二, 沼倉俊郎, 鈴木夏夫:”車輪付き回転アームによる階段昇降ロボット”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集,1996,Vol B, pp.1453-1456,1996.
- [2] 建築基準法令第23条、第24条、第27条
- [3] 友國伸保:”倒立振り子機構に基づく階段昇降ロボットの設計”, 近畿大学工学部研究報告, No.46,pp.89-92,2012.