

スライド式重心制御機構を有する倒立振り子型車両の開発 -小型車両の設計製作および姿勢制御実験-

Development of an Inverted Pendulum Cart with a Sliding Mechanism for Posture Control -Design and Manufacture of a Small Mobility and Experiment of Posture Control-

○ 大槻 有輝 (岡山大) 正 松野 隆幸 (岡山大)
正 矢納 陽 (岡山大) 正 見浪 護 (岡山大)

Yuki OTSUKI, Okayama University, u-ki0825@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Takayuki MATSUNO, Okayama University
Akira YANOU, Okayama University
Mamoru MINAMI, Okayama University

A lot of researches on inverted pendulum cart are done in recent years. And it is attracted as a personal vehicle which realizes energy saving for many practical applications, such as the Segway and the P.U.M.A. The personal mobility has the advantage of energy efficiency for transportation because the cart is small and light. However, since most conventional personal vehicles require a certain level of physical ability from the driver, it is not suitable for elderly and disabled people to drive. Therefore, as an inverted pendulum cart capable of driving to anyone, I develop an inverted pendulum cart with a sliding mechanism for posture control, and aim for realization of acceleration and deceleration while keeping perpendicular cart angle. In this research, proposed inverted pendulum cart with a sliding mechanism for posture control was designed and manufactured, and the posture control performance was verified through experiment.

Key Words: Inverted pendulum, Wheeled robot, Personal mobility

1. 緒 言

倒立振り子は、子供が傘や棒を逆さに立てる遊びと同様の動作を自動制御で行う機械システムであり、構造的には振り子機構部分にアクチュエータをもたないため、自由度数よりアクチュエータ数の少ないシステム、いわゆる劣駆動系 (Under actuated system) の一種でもある [1]。この倒立振り子機構を取り入れ、故意にバランスを崩すことによって生じる加速度を移動に利用することで制御を行う車両を倒立振り子型車両と呼ぶ。研究としての倒立振り子型車両は現代制御理論の応用例として山藤ら [2] によって提案され、今日に至るまで様々な研究者によって構造の違いによる機能の実現が提案された。また、近年倒立振り子型車両に関する研究が盛んに行われており [3-9]、パーソナルビークルやモバイルロボット、高速階段昇降ロボットなどに応用されている。実用に目を向けるとセグウェイ [10] や P.U.M.A. [11]、MOBIRO [12] に代表される倒立振り子型車両は省エネルギーを実現するパーソナルモビリティとして注目を集めている。特にセグウェイは平行 2 輪のみで実用上問題ない程度の安定性を確保しており、車輪型倒立振り子制御の信頼性を実証している。これらのパーソナルモビリティは、占有体積が小さく軽量であり人ひとりに対する移動エネルギー効率が良いという利点を持っている [13]。これはパーソナルモビリティの大きな長所である。従来のパーソナルモビリティは搭乗者が自分で重心を制御するため一定の運動能力が必要となり、高齢者や体が不自由な者には適していない。しかし、省エネルギー社会を実現するためには誰でも搭乗可能であることが求められる。

そこで誰にでも搭乗可能なパーソナルモビリティとして、スライド式重心制御機構を備えた倒立振り子型車両を開発する。また、現代制御では実現できないような車体の姿勢を垂直に保ちながらの加減速の実現を目指す。提案する倒立振り子型車両では車体の姿勢が常に垂直を維持するため、搭乗者は加減速やカーブなどで自ら重心を意識して移動させる必要はない。つまり高齢者や体が不自由な者でも容易に操縦が可能となる。本報告では、車体を垂直に保つためのスライド式重心制御機構を備えた倒立振り子型車両を設計製作し、マイコンを含む制御回路系を構築した。最後に、実験を通して姿勢制御性能を検証した。

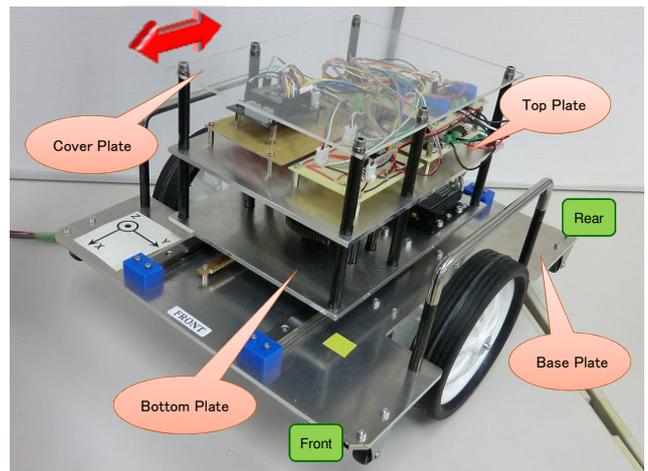


Fig. 1 External view of the inverted pendulum cart

2. 倒立振り子型車両の概要

2.1 倒立振り子型車両の構造

倒立振り子型車両の外観を図 1 に示す。下から順にベースプレート、ボトムプレート、トッププレート、カバープレートとする。アクチュエータとして、ラックギアやレール、ストッパをベースプレートに取り付ける。コントローラとして、モータドライバをボトムプレートに、マイコンをトッププレートに取り付ける。また、車両が転倒した場合にモータ等に掛かる負荷を減らすため、ベースプレートにはキャスタを取り付ける。キャスタがある状態でも前後約 25° まで傾くことができ、重心制御には影響を及ぼさない。

車体の上部を図 2(a)、下部を図 2(b) に示す。車両全体が移動するだけでなく、図 2(a) に示すスライドも前後に移動することで重心位置を制御し、姿勢を垂直に保つことが可能となる。

平歯車を組み合わせて 2 段減速機とし、車体が傾いたときにスライドの自重に負けない十分な大きさの減速比を設定する。

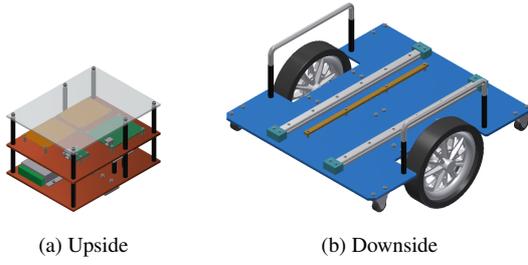


Fig. 2 Structure of the inverted pendulum cart

Table 1 Parameters

SYMBOLS	MEANINGS
m_1 [kg]	Weight of cart
m_2 [kg]	Weight of slider
m_w [kg]	Weight of wheel
r [m]	Radius of wheel
I_1 [kgm ²]	Inertia moment of cart
I_2 [kgm ²]	Inertia moment of slider
I_w [kgm ²]	Inertia moment of wheel
l_1 [m]	Height of COG of cart from center of wheel
l_2 [m]	Height of COG of slider from center of wheel
D_1 [Nms]	Coefficient of viscous friction for wheel axis
D_2 [Ns/m]	Coefficient of viscous friction for velocity of slider
D_w [Nms]	Coefficient of viscous friction or angular velocity of wheel angle
g [m/s ²]	Gravitational acceleration

2.2 倒立振り子型車両のモデル

倒立振り子型車両のダイナミクスのモデルを図3に示す。ここで状態量は θ_1 [rad]:車体姿勢角度, θ_w [rad]:ホイール回転角度, λ_2 [m]:スライダの移動量, 制御入力は τ_w [Nm]:ホイールモータトルク, F_s [N]:スライダモータが発生させるシート移動推進力である。

次に, 倒立振り子型車両のシステムダイナミクスを導出する。モデルパラメータは表1に示す。図3より, 運動エネルギー T とポテンシャルエネルギー V を考え, ラグランジュ L を求める。

$$L = T - V \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2}m_w(r_w\dot{\theta}_w)^2 + \frac{1}{2}I_w\dot{\theta}_w^2 + \frac{1}{2}m_1(r_w\dot{\theta}_w + l_1\dot{\theta}_1 \cos \theta_1)^2 + \frac{1}{2}m_1(l_1\dot{\theta}_1 \sin \theta_1)^2 + \frac{1}{2}m_2\{r_w\dot{\theta}_w + (l_2 \cos \theta_1 - l_2 \sin \theta_1)\dot{\theta}_1 + \dot{\lambda}_2 \cos \theta_1\}^2 + \frac{1}{2}m_2\{(-l_2 \sin \theta_1 - \lambda_2 \cos \theta_1)\dot{\theta}_1 - \dot{\lambda}_2 \sin \theta_1\}^2 + \frac{1}{2}(I_1 + I_2)\dot{\theta}_1^2 \quad (2)$$

$$V = m_1gl_1 \cos \theta_1 + m_2g(l_2 \cos \theta_1 - \lambda_2 \sin \theta_1) \quad (3)$$

従って

$$L = \frac{1}{2}I_w^*\dot{\theta}_w^2 + \frac{1}{2}(m_1l_1^2 + m_2l_2^2 + m_2\lambda_2^2 + I_1 + I_2)\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{\lambda}_2^2 + \{m_1l_1 \cos \theta_1 + m_2(l_2 \cos \theta_1 - \lambda_2 \sin \theta_1)\}r_w\dot{\theta}_1\dot{\theta}_w + m_2r_w \cos \theta_1\dot{\theta}_w\dot{\lambda}_2 + m_2l_2\dot{\theta}_1\dot{\lambda}_2 \quad (4)$$

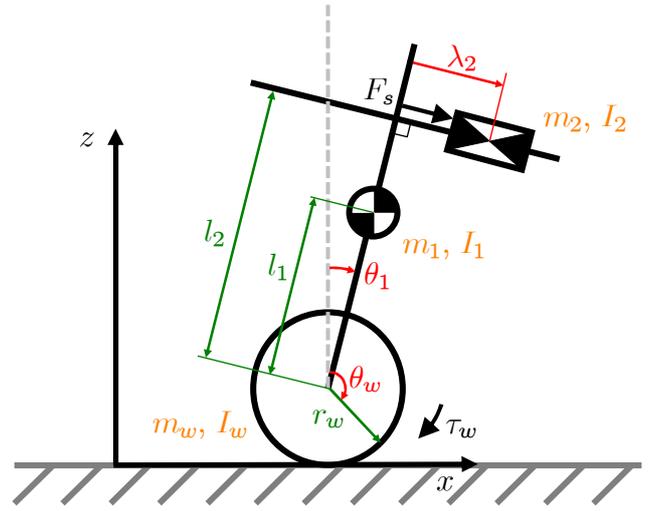


Fig. 3 Model of the inverted pendulum cart with sliding mechanism

$$-m_1gl_1 \cos \theta_1 - m_2g(l_2 \cos \theta_1 - \lambda_2 \sin \theta_1) \quad (5)$$

ここで

$$I_w^* = I_w + (m_1 + m_2 + m_w)r_w^2 \quad (6)$$

である。

ラグランジュ方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_w} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_w} + D_w\dot{\theta}_w + D_1(\dot{\theta}_w - \dot{\theta}_1) = \tau_w \quad (7)$$

より次式を得る。

$$I_w^*\ddot{\theta}_w + r_w\{(m_1l_1 + m_2l_2) \cos \theta_1 - m_2\lambda_2 \sin \theta_1\}\ddot{\theta}_1 + m_2r_w \cos \theta_1 \ddot{\lambda}_2 = \tau_w - (D_w + D_1)\dot{\theta}_w + D_1\dot{\theta}_1 + r_w\{(m_1l_1 + m_2l_2) \sin \theta_1 + m_2\lambda_2 \cos \theta_1\}\dot{\theta}_1^2 - 2m_2r_w \sin \theta_1\dot{\theta}_1\dot{\lambda}_2 \quad (8)$$

また, ラグランジュ方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} + D_{\theta_1}\dot{\theta}_1 = -\tau_w \quad (9)$$

より次式を得る。

$$r_w\{(m_1l_1 + m_2l_2) \cos \theta_1 - m_2\lambda_2 \sin \theta_1\}\ddot{\theta}_w + (m_1l_1^2 + m_2l_2^2 + m_2\lambda_2^2 + I_1 + I_2)\ddot{\theta}_1 + m_2l_2 \ddot{\lambda}_2 = -\tau_w - D_1\dot{\theta}_1 + D_1\dot{\theta}_w - 2m_2\lambda_2\dot{\theta}_1\dot{\lambda}_2 + (m_1l_1 + m_2l_2)g \sin \theta_1 + m_2g\lambda_2 \cos \theta_1 \quad (10)$$

また, ラグランジュ方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\lambda}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} + D_2\dot{\lambda}_2 = F_s \quad (11)$$

より次式を得る。

$$m_2r_w \cos \theta_1 \ddot{\theta}_w + m_2l_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 \ddot{\lambda}_2 = F_s - D_2\dot{\lambda}_2 + m_2\lambda_2\dot{\theta}_1^2 + m_2g \sin \theta_1 \quad (12)$$

2.3 制御システム

倒立振り子型車両の制御システムを図4に示す。まず, 加速度センサやジャイロ, ホイールエンコーダ, スライダエンコーダ

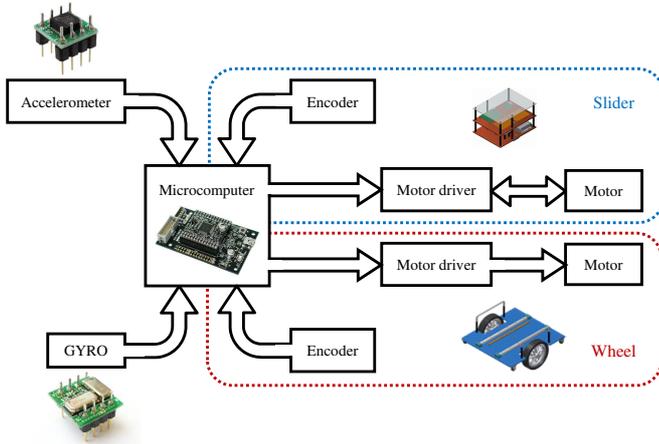


Fig. 4 Configuration of control system

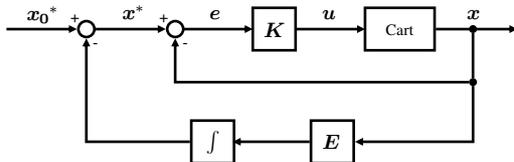


Fig. 5 Block diagram of state feedback

の値を取得してマイコン内で演算を行う。それに基づきホイールモータドライバやスライダモータドライバに適切な電圧を加える事で各ホイールの制御を行うというシステムである。

3. 姿勢制御性能の検証

スライド式重心制御機構を有する倒立振り型車両の姿勢制御性能を検証するため、実際に設計製作した車両を用いて実験を行う。

3.1 実験方法

本論文では、状態フィードバックにより実験を行う。加速度センサより得られた車体姿勢角度 θ_1 [rad] を用い、ホイールのトルクやスライダのトルク、スライダの移動量を導出する。制御則を図 5 に示す。

ここで、

$$\mathbf{x} = [\theta_1 \quad \lambda_2 \quad \dot{\lambda}_2]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{x}^* = [\theta_1^* \quad \lambda_2^* \quad \dot{\lambda}_2^*]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{x}_0^* = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (15)$$

$$\mathbf{u} = [\tau_w \quad F_s]^T \quad (16)$$

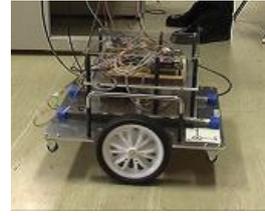
$$\mathbf{e} = \mathbf{x}^* - \mathbf{x} \quad (17)$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

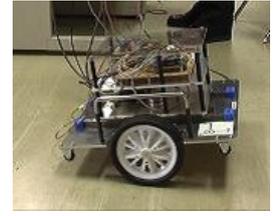
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_p & 0 & 0 \\ 0 & K_s & K_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

である。また、コントローラを式 (20) に示す。

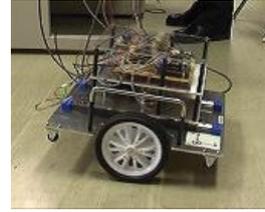
$$\begin{bmatrix} \tau_w \\ F_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_p & 0 & 0 \\ 0 & K_s & K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \lambda_2 \\ \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$



(a) 5.5 (s)



(b) 6.3 (s)



(c) 6.7 (s)



(d) 7.0 (s)

Fig. 6 First experiment for posture control

それぞれのゲインはヒューリスティックに決定し、 $K_s = 0.8$, $K_d = 0.03$, $\epsilon = 7.0 \times 10^{-5}$ とした。また、車体を傾けた時にホイールの動き始める閾値が左右で異なるため、左ホイールのゲインは $K_{pL} = 1.4$, 右ホイールのゲインは $K_{pR} = 2.0$ とする。

3.2 実験結果

実験の様子を図 6 に示す。1 回目の実験で得られた車体姿勢角度 θ_1 , ホイールモータトルク τ_w , ホイール回転角度 θ_w について図 7(a)-(c) に示す。また、2 回目の実験で得られた車体姿勢角度 θ_1 , シート移動推進力 F_s , スライダ移動量 λ_2 について図 7(b)-(f) に示す。

3.3 考察

図 7 に示すように、いずれの実験においても転倒する直前までは意図した動きが実現できている。よって、安定な状態へ向かう動作は見られるが、これを維持することができていないと考えられる。

図 7(b) と図 7(f) に着目すると、12 秒付近で λ_2 が大きく変化し、これに伴い F_s も変化していることがわかる。ラックギアの両端を削り歯がかみ合わないようにしているため、ここで空回りしていると考えられる。その後スライダがストップに当たって跳ね返り、歯がかみ合い初期値に戻っている。このことから、スライダの減速比は十分であると思われる。

また、一つの加速度センサで車体姿勢角度を検出していることが、 θ_1 の検出誤差に影響していると推測される。前述の通り、加速度センサは車両の動きによる加速度も検出してしまうためである。ジャイロを併用することで、この検出誤差は少なくなるとと思われる。

4. 結 言

本報告では、誰にでも搭乗可能な倒立振り型車両としてスライド式重心制御機構を有する倒立振り型車両の概要を示し、小型試作機として車両を設計製作した。そして最後に実験により姿勢制御性能を検証した。

課題として、姿勢の安定化、加速度センサとジャイロを併用した姿勢角度の検出、電源ケーブルや通信ケーブルによる張力

文 献

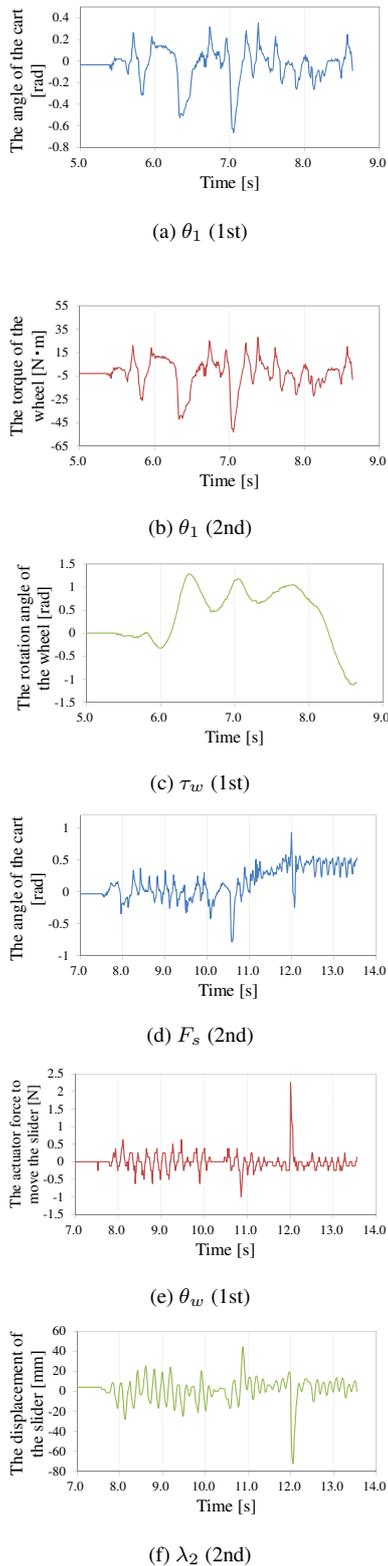


Fig. 7 Experimental results

の影響を受けないための無線化，各センサのデジタル化等が挙げられる．今後はこれらの課題に取り組み，車体の姿勢を垂直に保ちながらの加減速の実現を目指す．

- [1] 島田 明, 畠山 直也, "Zero Dynamics を利用する倒立振子の高速移動制御", 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.9, (2006) pp.1035-1041
- [2] 山藤 和男, 馮 青, "平行二輪車の姿勢制御に関する研究 (第 1 報)", 精密工学会誌, Vol.53, No.10, (1987) pp.1622-1625
- [3] 松本 治, 梶田 秀司, 谷 和男, "移動ロボットの内外センサのみによる姿勢検出とその姿勢制御", 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.5, (1990) pp.37-46
- [4] 松本 治, 梶田 秀司, 西郷 宗玄, 谷 和男, "動的軌道制御間の連続性を考慮した 2 足歩行型脚車輪ロボットの高速度昇降制御", 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.1, (2000) pp.94-101
- [5] Mattia Castelnovi, Ronald Arkin, Thomas R. Collins, "Reactive Speed Control System Based on Terrain. Roughness Detection", *Journal of International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 903-908
- [6] 佐々木 牧子, 柳原 直人, 松本 治, 小森谷 清, "重心移動のみで操縦可能な小型・軽量パーソナルビークル", 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.4, (2006) pp.553-542
- [7] Feng Ding, Jian Huang, Yongji Wang, Xueshan Gao, Takayuki Matsuno, Toshio Fukuda, Kosuke Sekiyama, "Optimal Braking Control for UW-Car Using Sliding Mode", *Journal of International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2009, pp. 337-344
- [8] Lars-Peter Ellekilde, Henrik I. Christensen, "Control of Mobile Manipulator using the Dynamical Systems Approach", *Journal of International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 1370-1376
- [9] Geoffrey Hollinger, Dave Ferguson, Siddhartha Srinivasa, Sanjiv Singh, "ombining Search and Action for Mobile Robots", *Journal of International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 952-957
- [10] Segway Inc., <http://www.segway.com> (参照日 2013 年 1 月 24 日)
- [11] Project P.U.M.A., <http://www.segway.com/puma/> (参照日 2013 年 1 月 24 日)
- [12] トヨタ自動車株式会社, http://metapolis.toyota.co.jp/beginner/personal_mobility.html (参照日 2013 年 1 月 24 日)
- [13] T.Matsuno, H.Jian, T.Fukuda and K.Doi, "Stabilization of Inverted Pendulum Cart with Balancing Mechanism by Integrity Trajectories in Acceleration Behavior", *Proceedings of International Conference on Advanced Mechatronics*, 2010, pp. 337-344