

D4 VSS 適応制御を用いた車輪型倒立ロボットの安定化制御に関する研究

発表者：3BDRM008 藤田 廉
 指導教員：平田 弘志 教授

Stabilization Control for a Wheeled Inverted Pendulum Robot Using a VSS Adaptive Control

Abstract: Inverted pendulum is an unstable system and have been used to confirm the effectiveness of the control method for a long time. In recent years, application study of wheeled inverted pendulum (WIP) robot is very active. Most of these discussions are either the stabilization or the position control in parameter known system. Few studies consider case of unknown parameter system. In this study, such VSS adaptive control system as tracking the reference input is applied to the pendulum of WIP and the wheel part is also stabilized by means of self-tuning control (STC) that assures the boundary reference angle of the pendulum. In addition, the estimation rule for estimating a parameter is simplified.

1. はじめに

近年、セグウェイ等に代表される倒立二輪ロボット技術には安定化制御や位置姿勢の制御が必要不可欠である。このような対象は、重量・慣性が一定ではなく変化がみられることがある。このように不安定な対象では、安定度に大きな影響を及ぼす要因となるため、設計パラメータ不一致の問題は可能ならば排除して適応的手法の導入を考慮すべきである。したがって、本実験では運転に際して、未知パラメータを推定しながら適切な制御器の調整を実施することが必要である。

本研究では、左右の車輪が独立して動く車輪型倒立振子を構成し、振子の重量変化及び慣性モーメントの変化に対する制御系を考察する。また、倒立振子の制御方法として用いられている、振子を下げた状態でパラメータ推定後に振上げ制御の実施をするような方法は車輪型倒立振子ロボットには運用上適切ではない。よってこの場合は、未知パラメータ系として倒立制御を実施し、必要な情報は制御中に取得することが妥当である。

2. 制御対象

実験で使用する車輪倒立振子ロボットの実際写真と、それを簡略化したモデル図を Fig.1 及び Fig.2 にそれぞれ示す。また、Table1 に制御対象の物理パラメータを示す。実験機は、左右の車輪を独立して動かすために、ハーモニックギア付 DC モータが車輪別のシャフトに、タイミングプーリを介して連結されている。モータ側とシャフト側のギア比は、車輪の速度を出すため 2.4 倍となっている。このモータはエンコーダと一体型となっていて、車輪の角度検出も兼ねている。また、振子の角度検出のため 1 回転 2500 パルスの光学式エンコーダを別に取り付け、出力を 4 通倍し値を得ている。

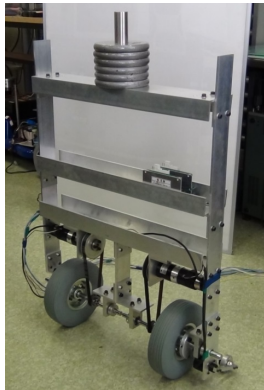


Fig.2.1 実験機

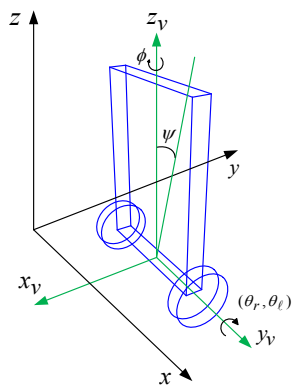


Fig.2.2 モデル図

Table1 制御対象のパラメータ

L	振子の長さ[m]	θ_r	右車輪角度[deg]
R	車輪半径[m]	θ_l	左車輪角度[deg]
W	軸距[m]	ψ	振子角度[deg]
M_w	車輪の質量[kg]	ϕ	旋回角度[deg]
M_b	車体の質量[kg]	x_v	並進位置[m]

3. 運動方程式

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D\dot{q} + E(\dot{q}) = Qu \quad (1)$$

$$H(q) = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & 0 \\ h_1 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -h_a & h_a & h_b \\ h_a & -h_a & h_b \\ h_b & h_b & 0 \end{bmatrix}, \quad Qu = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_a & -c_a & c_b \\ -c_a & c_a & c_b \\ c_c & -c_c & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \beta_b + \beta_m & 0 & -\beta_b \\ 0 & \beta_b + \beta_m & -\beta_b \\ -\beta_b & -\beta_b & 2\beta_b \end{bmatrix}$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -gL M_b \sin \psi \end{bmatrix}, \quad E(\dot{q}) = \begin{bmatrix} E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) \\ E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} \theta_r \\ \theta_l \\ \psi \end{bmatrix}$$

$$h_0 = \frac{M_b R^2}{4} + M_w R^2 + \frac{M_b L^2 R^2}{2W^2} + \frac{R^2}{W^2} J_\phi + J_w + \rho^2 J_m$$

$$h_1 = \frac{M_b R^2}{4} - \frac{M_b L^2 R^2}{2W^2} - \frac{R^2}{W^2} J_\phi, \quad h_2 = M_b L^2 + J_w$$

$$h_a = \frac{M_b L^2 R^2 \cos(2\psi)}{2W^2}, \quad h_b = \frac{M_b L R \cos \psi}{2}$$

また、導出した(1)式に対して並進位置や旋回角度を含む式にするため $r := [x_v \ \phi \ \psi]^T$ を使用し、座標変換を施したものが(2)式である。この時、 $\beta \equiv 0$ としている。

$$H_b(r)\ddot{r} + C_b(r, \dot{r})\dot{r} + G_b(r) + D_b\dot{r} + E_b(\dot{q}) = Q_b u \quad (2)$$

$$H_b = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & ArC \\ 0 & AS^2 J_2 + J_4 & 0 \\ ArC & 0 & AJ_3 \end{bmatrix}, \quad C_b(r, \dot{r}) = \begin{bmatrix} -ArS\dot{\psi}^2 \\ 2AJ_2 SC\dot{\psi}\dot{\phi} \\ -AJ_2 SC\dot{\phi}^2 \end{bmatrix}$$

$$G_b(r) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -ArgS \end{bmatrix}, \quad E_b(\dot{q}) = \begin{bmatrix} R\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/2 \\ WR\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) - E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/4 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D_b\dot{r} = \begin{bmatrix} \rho^2 \beta_m \dot{x}_v \\ W^2 \rho^2 \beta_m \dot{\phi}/4 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q_b u = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 \\ -WR/4 & WR/4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}$$

4. 制御系設計

対象を振り系と車輪系に分け 2 種類の適応制御系を構築する。振り系に対し目標追従型の VSS 適応制御系を構築し振り系がスライディングモードであることを仮定する。また、車輪系の安定性と有界な振り目標角を保証するために STC 系を構築する。

4.1 振り系の安定化

(2)式を平衡点近傍で線形化を行うと、倒立振子の運動方程式は(3)式となる。

$$\begin{cases} H_k \ddot{f} + G_k \ddot{\psi} + D_k \dot{f} + E_k = \tau_k \\ Ar\ddot{x}_v + AJ_3\ddot{\psi} - Arg\psi = 0 \rightarrow r\ddot{x}_v + J_3\ddot{\psi} - rg\psi = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix}, G_k = \begin{bmatrix} Ar \\ 0 \end{bmatrix}, D_k = \begin{bmatrix} \rho^2 \beta_m & 0 \\ 0 & W^2 \rho^2 \beta_m / 4 \end{bmatrix}$$

$$E_k = \begin{bmatrix} R\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\} / 2 \\ WR\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) - E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\} / 4 \end{bmatrix}, \tau_k = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} x_v \\ \phi \end{bmatrix}$$

また、 k_r はトルク定数、 i はモータ電流で入力トルク $\tau_l = k_r i$ としている。(3)式から振り系方程式は

$$\det M \ddot{\psi} - p_1 \psi - p_2 \dot{x}_v - p_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) - p_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) = r u_1 \quad (4)$$

但し、 $\det M = J_1 J_3 - Ar^2$, $p_1 = J_1 rg$, $p_2 = r \rho^2 \beta_m$

$$p_3 = RrE_l / 2, p_4 = RrE_r / 2, \tau_l = k_r i_l, \tau_r = k_r i_r$$

ここで、振り系の角度を安定にする設計を行う。

ψ : 振り回転角度, r_f : 目標角, e : 誤差, $\dot{\psi}_r$: 参照速度

s_c : 切替関数を次式のように定義する。

$$e := \psi - r_f, \dot{\psi}_r := \dot{r}_f - he, (h > 0), s_c := \dot{\psi} - \dot{\psi}_r = \dot{e} + he \quad (5)$$

また、(4)の対象に対して不確定外乱を考慮すると次のように表わすことができる。

$$\begin{cases} Y^T \alpha + Hs_c = i + w \\ H := \det M / C_t, C_t = Rrk_r / 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Y^T = [\dot{\psi}_r, \psi, \dot{x}_v, \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l), \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)] \\ \alpha^T = [H, p_1 / C_t, p_2 / C_t, p_3 / C_t, p_4 / C_t] \end{cases} \quad (7)$$

以上の仮定の下で、VSS 適応制御則を以下に示す。

$$\begin{cases} \dot{i} = Y^T \hat{\alpha} - k_v \operatorname{sat}(s_c / \delta), k_v > 0 \\ \dot{\hat{\alpha}} = -k_a \hat{\alpha} - \Gamma^{-1} Y s_c, \hat{\alpha} = [\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{\alpha}_4, \hat{\alpha}_5]^T \end{cases} \quad (8)$$

k_v は VSS ゲインであり、 Γ は適応則ゲインで対象行列とする。よって、目標角 r_f が安定に与えられるとき、 $t \rightarrow \infty$ で $s_c \rightarrow 0$ となり、振り角 ψ は目標角 r_f に追従する。

4.2 振り目標角を生成する簡易推定 STC

VSS 適応則により、振り制御系が素早くスライディングモード制御に到達し、振り角度 ψ は目標角度 r_f に追従する。すなわち、(2)式の車輪系

$$r\ddot{x}_v + J_3\ddot{\psi} - rg\psi = 0 \quad (9)$$

において $\psi = r_f$ とみなし ψ を r_f と置き換えると車輪系方程式は次式となる。

$$\ddot{x}_v = \rho_0 r_f + \rho_1 \dot{r}_f \quad (10)$$

但し、 $\rho_0 := g$, $\rho_1 := -J_3 / r$ である。

また、(10)式を状態方程式で表すと(11)式ようになる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_v \\ \dot{r}_f \\ \ddot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f \quad (11)$$

式(11)の未知パラメータ系において、パラメータ ρ_1 を

逐次推定しながら制御系を調整する STC を実施する。振り目標角速度 \dot{r}_f を制御入力と考えた(11)式のシステムにおいて、次の評価関数 J

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + \dot{r}_f^T R \dot{r}_f) dt, (Q \geq 0, R > 0), x^T := [\dot{x}_v, r_f, \dot{r}_f] \quad (12)$$

を最小にするフィードバックゲインを制御周期毎に求め $\ddot{r}_f = -F_o^T x$, $F_o^T := [f_1, f_2, f_3]$ (13)

を更新する。

5. 実験結果

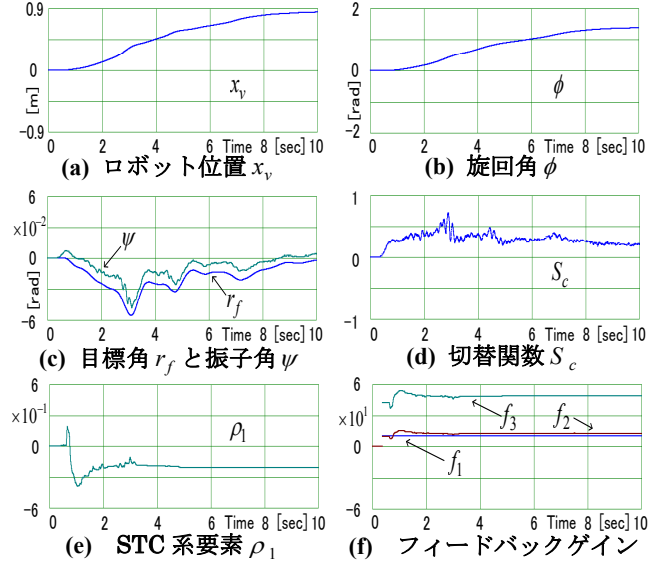


Fig5.1 実験結果(錘無)

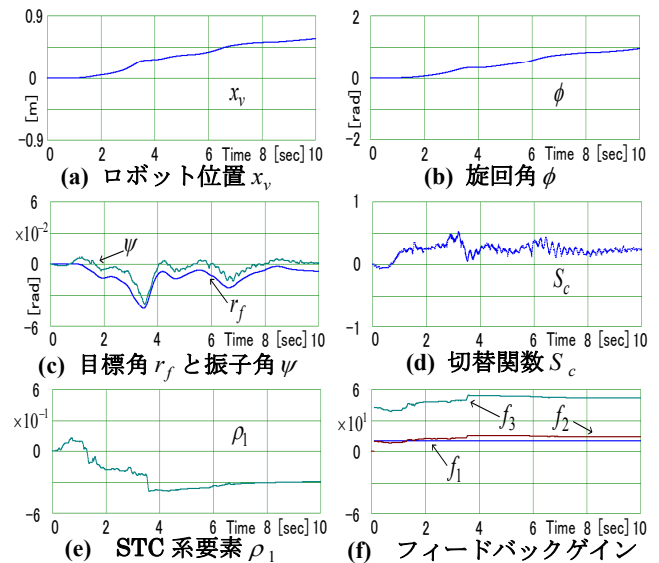


Fig5.2 実験結果(錘有 6 kg)

6. おわりに

本研究で提案したシステムの評価をおこなった。結果として、先行研究が必要であった摂動信号の除去が可能となった。また、モビリティタイプの応用への一歩として、制御対象モデルを独立車輪駆動系として旋回項を加えることにより、対象の自由度拡張をおこなった。

業歴リスト

- (1) 藤田廉, 下山修, 平田弘志, “簡易推定側による車輪型倒立振子の適応制御”, 電気学会全国大会 (2014)
- (2) 藤田廉, 平田弘志, “簡易推定 STC による車輪型倒立ロボットの VSS 適応制御”, 平成 26 年度第 15 回 SICE SI 部門講演会 (2014)