

E4 車輪型倒立振り子ロボットの VSS 適応制御に関する研究

発表者：4BDRM 017 野口 晃寛
指導教員：平田 弘志 教授

VSS Adaptive Control of a Wheeled Inverted Pendulum Robot

Abstract: Inverted pendulum is an unstable system. In recent years, application study of wheel inverted pendulum robot is very active. In this study, a VSS adaptive control system that tracks the reference input is applied to the pendulum of wheel inverted pendulum. In addition, the wheels can be stabilized by STC (self-tuning control) that assures the boundary reference angle of the pendulum.

1. はじめに

近年、車輪型パーソナルモビリティの研究が盛んである。セグウェイ等に代表される倒立二輪ロボットには安定化制御が不可欠である。このような対象は、重量・慣性が一定ではなく変化を伴う。この動特性の変化はとく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、可能ならば設計パラメータ不一致の要因は排除して適応的手法の導入を考慮すべきである。本研究では、車輪型倒立振り子 (WIP) ロボットを構成し、振り子の重量変化及び慣性モーメントの変化に適応可能な VSS 適応制御系を考察する。

2. 制御対象の運動方程式

本研究で議論する車輪倒立振り子 (WIP) ロボットの運動モデル図を Fig.1 に示す。図より各車輪と車体重心における運動エネルギーおよび車体重心の位置エネルギー算出により、一般化座標 $\theta := (\theta_r, \theta_l, \psi)$ に基づく運動方程式がシステマティックに導出される。しかし、並進位置 x_v や旋回角度 ϕ を含まないので、新たな一般化座標 $q := (x_v, \phi, \psi)$ への座標変換 $q = T\theta$ を施すと、次の系 $\Sigma_b(M_b, C_b, G_b, D_b, E_b)$ が得られる。

$$M_b(q)\ddot{q} + C_b(q, \dot{q})\dot{q} + G_b(q) + D_b\dot{q} + E_b(\dot{q}) = N_b\tau \quad (1)$$

但し、 $M_b(q) = TM(\theta)T^{-1}$, $C_b(q, \dot{q}) = TC(\theta, \dot{\theta})T^{-1}$,

$$G_b(q) = TG(\theta), D_b = TDT^{-1}, E_b(\dot{q}) = TE(\dot{\theta}), N_b = TN,$$

$$T = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 & 0 \\ -R/2B & R/2B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T^{-1} = \begin{bmatrix} 1/R & -B/R & 0 \\ 1/R & B/R & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

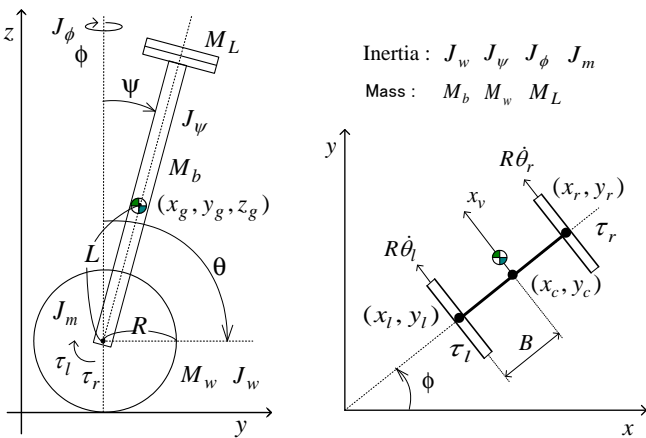


Fig. 1. Diagram of a wheeled inverted pendulum (WIP)

$$\left\{ \begin{array}{l} M_b = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & ArC \\ 0 & JJ & 0 \\ ArC & 0 & AJ_3 \end{bmatrix}, C_b\dot{q} = \begin{bmatrix} -ArS\dot{\psi}^2 \\ 2AJ_2SC\dot{\psi}\dot{\phi} \\ -AJ_2SC\dot{\phi}^2 \end{bmatrix}, \\ G_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -ArgS \end{bmatrix}, D_b\dot{q} = \begin{bmatrix} \eta^2 d_m \dot{x}_v \\ B^2 \eta^2 d_m \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ E_b = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}, N_b = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 \\ -BR/2 & BR/2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$J_1 := (M_b/2 + M_w)R^2 + J_w + \eta^2 J_m, J_2 := M_b L^2, r := M_b L,$$

$$JJ := AS^2 J_2 + J_4, A := R^2/2, C := \cos\psi, S := \sin\psi,$$

$$J_3 := M_b L^2 + J_\psi, J_4 := B^2(M_w R^2 + J_w + \eta^2 J_m) + AJ_\phi,$$

$$E_1 := R\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/2,$$

$$E_2 := BR\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) - E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/2.$$

(1)式右辺の第1行目は並進力、第2行目は旋回トルクである。また、 g は重力加速度、 τ_l, τ_r は左右モータ入力トルク、 η は減速比である。尚、振り部分の粘性摩擦係数 d_b およびクーロン摩擦係数 E_ψ は微小とみなして $d_b = 0, E_\psi = 0$ としている。

3. 制御系設計

本研究では並進振り子系および旋回系に対し目標値追従型の VSS 適応制御系を構築する。また、並進振り子系のスライディングモードを仮定し、並進移動量と振り目標角を生成する STC 系を構築する。

<3.1>並進振り子系の安定化と旋回系の制御 (1)式を平衡点近傍で線形化を行い、クーロン摩擦項を付加すると車輪型倒立振り子ロボットの運動方程式は次式となる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_v \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ar \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{\psi} + \begin{bmatrix} \eta^2 d_m \dot{x}_v \\ B^2 \eta^2 d_m \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ r\ddot{x}_v + J_3\ddot{\psi} - rg\psi = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

ここで、左右モータ電流を i_l, i_r 、トルク定数を k_r とすると $\tau_l = k_r i_l, \tau_r = k_r i_r$ である。また、電流和を $i_1 := i_l + i_r$ 、その差を $i_2 := i_l - i_r$ とすると並進力 u_1 と旋回トルク u_2 はそれぞれ

$$u_1 = Rk_r i_1/2, u_2 = C_r i_2, C_r := BRk_r/2 \quad (4)$$

で与えられる。(3)式から並進振り子系の方程式は

$$\det M \ddot{\psi} + p_1 \psi + p_2 \dot{x}_v + p_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + p_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) = r u_1 \quad (5)$$

$$\therefore \det M = J_1 J_3 - Ar^2, \det M > 0, p_1 = -J_1 r g,$$

$$p_2 = -r \eta^2 d_m, p_3 = -Rr E_l/2, p_4 = -Rr E_r/2.$$

となる。同じく(3)式 E_2 は $E_l \cong E_r$ とモータ回転方向が同一の条件下ではその影響は少なく無視でき、旋回系は

$$J_4 \ddot{\phi} + (B^2 \eta^2 d_m) \dot{\phi} = u_2 \quad (6)$$

と記述できる. 並進系と旋回系は互いに独立していることから 2 つの VSS 系を構成することが可能である.

$$\text{まず, 振子回転角度 } \psi \text{ に対し目標角を } r_f, \text{ その誤差 } e_1 \text{ を} \quad (7)$$

$$e_1 := \psi - r_f$$

とする. また, 参照角速度 $\dot{\psi}_r$ を

$$\dot{\psi}_r := \dot{r}_f - h_1 e_1, \quad (h_1 > 0) \quad (8)$$

と定義する. さらに, 切換関数 s_{c1} を

$$s_{c1} := \dot{\psi} - \dot{\psi}_r = \dot{e}_1 + h_1 e_1 \quad (9)$$

と定義するとき, (5)式の対象は不確定外乱 w_1 を考慮して

$$\begin{cases} Y_\psi^T \alpha_\psi + H_1 \dot{s}_{c1} = \dot{i}_1 + w_1 \\ H_1 := \det M / C_t, \quad C_t := R r k_t / 2 \end{cases} \quad (10)$$

のように記述される. ここで, Y_ψ は計測値から構成されるベクトル, α_ψ は並進系パラメータベクトルである.

$$\begin{cases} Y_\psi^T = [\dot{\psi}_r, \psi, \dot{x}_v, \text{sgn}(\dot{\theta}_1), \text{sgn}(\dot{\theta}_r)] \\ \alpha_\psi^T = [H_1, p_1 / C_t, p_2 / C_t, p_3 / C_t, p_4 / C_t] \end{cases} \quad (11)$$

次に, 旋回角度 ϕ に対し目標角を ϕ_{ref} , その誤差 e_2 を

$$e_2 := \phi - \phi_{ref} \quad (12)$$

とする. また, 参照角速度 $\dot{\phi}_r$ を

$$\dot{\phi}_r := \dot{\phi}_{ref} - h_2 e_2, \quad (h_2 > 0) \quad (13)$$

と定義する. さらに, 切換関数 s_{c2} を

$$s_{c2} := \dot{\phi} - \dot{\phi}_r = \dot{e}_2 + h_2 e_2 \quad (14)$$

と定義するとき, (6)式の対象は不確定外乱 w_2 を考慮して

$$Y_\phi^T \alpha_\phi + H_2 \dot{s}_{c2} = \dot{i}_2 + w_2, \quad H_2 := J_4 / C_r \quad (15)$$

$$Y_\phi^T = [\ddot{\phi}, \dot{\phi}], \quad \alpha_\phi^T = [H_2, B^2 \eta^2 d_m / C_r] \quad (16)$$

のように記述される. ここで, Y_ϕ は計測値から構成されるベクトル, α_ϕ は旋回系パラメータベクトルである. 以上, 2 つの系に対する仮定の下で次の適応則が得られる.

[VSS 適応則] VSS 適応制御の操作量 u を(17)式, パラメータ適応則を(19)式とする. また, $\hat{\alpha}^T$ は可調整パラメータとする.

$$\begin{cases} u = Y^T \hat{\alpha} - k_v \text{sat}(s_c / \delta), & (k_v > 0) \\ \hat{\alpha}^T := [\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_n] \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{sat}(s_c / \delta) := \begin{cases} \text{sgn}(s_c) & |s_c| > \delta \\ s_c / \delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (18)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y s_c, \quad (\Gamma > 0). \quad (19)$$

ここで, k_v は VSS ゲイン, δ は境界層幅, Γ は適応則ゲインで対称行列とする. 不確定外乱に関する次の条件

$$|s_c| > \delta \text{ のとき, } k_v > |w| \quad (20)$$

$$|s_c| \leq \delta \text{ のとき, } k_v |s_c| / \delta > |w| \quad (21)$$

の元で, $t \rightarrow \infty$ で $s_c \rightarrow 0$ となる. 即ち, $x \rightarrow 0$ となる. ■

また, 適応則では仮定における各操作量 i_1, i_2 を u , 各計測値 Y_ψ, Y_ϕ を Y , 各可調整パラメータ $\hat{\alpha}_\psi, \hat{\alpha}_\phi$ を $\hat{\alpha}$, 各切換関数 s_{c1}, s_{c2} を s_c に対応させ, 境界層 δ_1, δ_2 , VSS ゲイン k_{v1}, k_{v2} , 調整ゲイン Γ_1, Γ_2 を適切に指定する. さらに, (19)式の積分型適応則は外乱に対して, ロバスト性が十分ではなく, 以下のシグマ修正法を使用している.

$$\dot{\hat{\alpha}} = -k_a \hat{\alpha} - \Gamma^{-1} Y s_c, \quad (\Gamma > 0) \quad (22)$$

尚, 電流和と差の関係より左右のモータ指令はそれぞれ

$$i_l = (i_1 + i_2) / 2, \quad i_r = (i_1 - i_2) / 2 \quad (23)$$

で与えられる.

〈3.2〉振子目標角とロボット並進移動量を与える STC

VSS 適応制御の有界な振子目標角 r_f およびロボット

並進移動量は次の STC 系により構成される. 並進振子制御系が素早くスライディングモード制御(SMC)に到達すると, 振子角度 ψ は目標角度 r_f に追従するので, SMC 仮定の元, (6)式 2 番目式の ψ を r_f で置換し, 状態方程式で記述すると次式となる.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \ddot{x}_v \\ \dot{r}_f \\ \ddot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ \dot{x}_v \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f, \quad (\rho_0 = g, \rho_1 = -J_3 / r) \quad (24)$$

ここで, 未知パラメータ ρ_1 を制御周期毎に推定しながら以下の LQ 制御器ゲイン F_o を更新する (推定には RLS 法を使用).

$$\ddot{r}_f = -F_o^T x, \quad F_o^T := [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4]$$

以上の STC により, 振子系の安定化が達成される. ここで, ロボット並進移動目標値 x_{ref} を指定し, $e_r := x_{ref} - x_v$ なる偏差 e_r を(24)式の状態変数 x_v と置き換えて補正した操作量 \ddot{r}_f を求める. この補正值に基づく r_f により, 並進移動系としている.

4. シミュレーションおよび実験概要

構築した WIP ロボットの実験機を Fig.2 示す. 左右の車輪シャフトには 24[V]-10[W] のハーモニックギア付 DC モータがタイミングプーリを介して連結(減速比 125 : 3)されている. 車輪角度はモータ 1 回転 1440 パルスの光学式エンコーダを使用し, 減速ギアにより車輪 1 回転 6 万パルスとして検出している. また, 倒立振子部は車輪シャフトとボールベアリング軸受を介した機構で構成され, 振子角は 1 回転 10000 パルスの光学式エンコーダにより検出している. また, 振子上部には 1 個 1[kg] のペイロードが 10 個程度搭載でき, 随時変更可能な構成となっている.

まず, 提案手法の有効性を確認するために WIP ロボットの軌道制御シミュレーションを実施した. 半径 2[m] の半円軌道上 2π [m] を移動させ, 同時にロボットを π [rad] 旋回させるような指令値を与えた結果, 並進系は摂動信号を使用することなく VSS 適応安定化が達成でき, 旋回系も指令どおり VSS 旋回適応制御が実施できた.

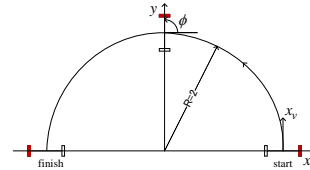


Fig.2 A semicircle course for WIP robot control

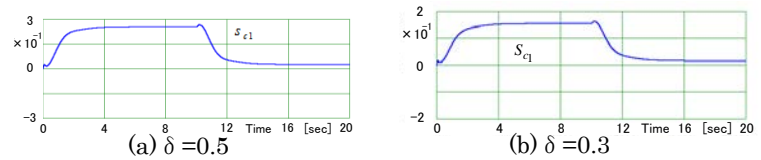


Fig.3 Switching function of translational VSS control

業績リスト

- (1) 野口, 平田, “倒立二輪ロボットのパラメータ変動に対する安定精度の問題” 平成 26 年神奈川県ものづくり技術交流会(2014)
- (2) 野口, 藤田, 平田 “車輪倒立振子ロボット制御における重量変化の考察” 平成 26 年電気学会産業応用部門大会(2014)
- (3) 野口, 藤田, 平田 “車輪型倒立振子ロボットの VSS 適応制御” 平成 27 年電気学会全国大会(2015)