

# 倒立ロボット及びモビリティの VSS 適応制御

竹田勇\*, 稲葉毅, 平田弘志 (東海大学)

Motion Control for a Wheeled Inverted Pendulum Robot and Seating Inverted Mobility  
by Using VSS Adaptive Control

## 1. はじめに

セグウェイを代表とした車輪型倒立二輪は不安定な対象であるため、ロバスト性を考慮した制御系設計が必要である。本研究では、倒立二輪型の自律走行ロボット及び着座状態で人為的に操作を行うパーソナルモビリティを構成し、全物理パラメータを未知とした運動制御を行う手法を提案する。対象の倒立振り部分に目標値追従型の VSS 適応安定化制御系を構成し、有界な振子目標角と並進位置の制御に STC を用いる。また、旋回系にも VSS 適応制御を構成している点も大きな特徴である。

## 2. 制御対象

本研究で使用する車輪型倒立移動ロボットを Fig.1 に、着座型倒立モビリティを Fig.3 にそれぞれ示す。Fig.2, Fig.4 に示すモデル図より、一般化座標  $q := (x_v, \phi, \psi)$  に基づく運動方程式を導出すると(1)式が得られる。 $x_v$  は並進位置、 $\phi$  は旋回角度、 $\psi$  は振り角度である。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D\dot{q} + E(\dot{\theta}) = N\tau \quad (1)$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & ArC \\ 0 & JJ & 0 \\ ArC & 0 & AJ_3 \end{bmatrix}, C(q, \dot{q})\dot{q} = \begin{bmatrix} -ArS\dot{\psi}^2 \\ 2AJ_2SC\dot{\psi}\dot{\phi} \\ -AJ_2SC\dot{\phi}^2 \end{bmatrix}, G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -ArGS \end{bmatrix},$$

$$D\dot{q} = \begin{bmatrix} \eta^2 d_m \dot{x}_v \\ B^2 \eta^2 d_m \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix}, E(\dot{\theta}) = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}, N\tau = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 \\ -BR/2 & BR/2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_1 := (M_b/2 + M_w)R^2 + J_w + \eta^2 J_m, \quad J_2 := M_b L^2, \quad J_3 := M_b L^2 + J_w$$

$$J_4 := B^2 (M_w R^2 + J_w + \eta^2 J_m) + AJ_\phi, \quad JJ := AS^2 J_2 + J_4$$

$$A := R^2/2, \quad r := M_b L, \quad S := \sin\psi, \quad C := \cos\psi$$

$$E_1 := R\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/2, \quad E_2 := BR\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) - E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/2$$



Fig.1 Inverted robot

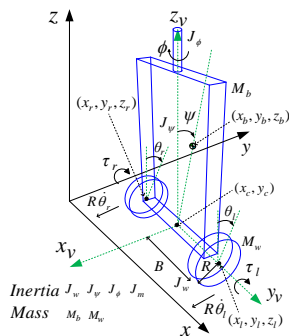


Fig.2 Diagram of robot



Fig.3 Inverted mobility

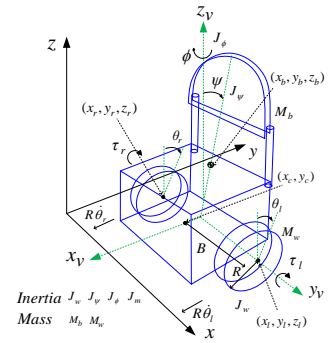


Fig.4 Diagram of mobility

## 3. 制御系設計

### 3-1. 並進振り系と旋回系の VSS 適応制御

(1)式に平衡点近傍で線形化を施すと

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

となり、(2)式から並進振り系方程式を求めると次式となる。

$$\det M \ddot{\psi} + p_1 \psi + p_2 \dot{x}_v + p_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + p_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) = ru_1 \quad (3)$$

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

$$p_2 = -r\eta^2 d_m, \quad p_3 = -RrE_l/2, \quad p_4 = -RrE_r/2$$

$\psi$ : 振り角度,  $r_f$ : 目標角度,  $e_1$ : 誤差,  $\dot{\psi}_r$ : 参照速度,

$s_{c1}$ : 切換関数を次式のように定義する。

$$e_1 := \psi - r_f, \quad \dot{\psi}_r := \dot{r}_f - h_1 e_1, \quad s_{c1} := \dot{\psi} - \dot{\psi}_r = \dot{e}_1 + h_1 e_1 \quad (4)$$

(3)式に対して不確定外乱  $w_1$  を考慮すると(5)式となる。

$$\begin{cases} Y_\psi^T \alpha_\psi + H_1 \dot{s}_{c1} = i_1 + w_1 \\ H_1 := \det M / C_t, \quad C_t = Rrk_\tau / 2 \end{cases} \quad (5)$$

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

また、同様に(2)式から旋回系方程式を求めると次式となる。

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

$\phi$ : 旋回角度,  $\phi_{ref}$ : 目標角,  $e_2$ : 誤差,  $\dot{\phi}_r$ : 参照速度,

$s_{c2}$ : 切換関数を次式のように定義する。

$$e_2 := \phi - \phi_{ref}, \quad \dot{\phi}_r := \dot{\phi}_{ref} - h_2 e_2, \quad s_{c2} := \dot{\phi} - \dot{\phi}_r = \dot{e}_2 + h_2 e_2 \quad (7)$$

(6)式に対して不確定外乱  $w_2$  を考慮すると(8)式となる

$$\begin{cases} Y_\phi^T \alpha_\phi + H_2 \dot{s}_{c2} = i_2 + w_2 \\ H_2 = J_4 / C_r, \quad C_r = BRk_\tau / 2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Y_\phi^T = [\ddot{\phi}_r \quad \dot{\phi}] \\ \alpha_\phi^T = [H_2 \quad B^2 \eta^2 d_m / C_r] \end{cases}$$

以上、2つの系に対する仮定の下、次の適応則となる。

### VSS 適応則

$$\begin{cases} \dot{i} = Y^T \hat{\alpha} - k_v \text{sat}(s_c / \delta) \quad k_v > 0 \\ \hat{\alpha}^T = [\hat{\alpha}_1 \quad \hat{\alpha}_2 \quad \hat{\alpha}_3 \quad \dots \quad \hat{\alpha}_n] \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{sat}(s_c / \delta) := \begin{cases} \text{sgn}(s_c) & |s_c| > \delta \\ s_c / \delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (10)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -k_a \hat{\alpha} - \Gamma^{-1} Y S_c, \quad (\Gamma > 0) \quad (11)$$

$k_v$ : VSS ゲイン  $\delta$ : 境界層幅  $\Gamma$ : 適応則ゲイン。

目標角  $r_f$ ,  $\phi_{ref}$  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  $\psi$ , 旋回角  $\phi$  は目標角  $r_f$ ,  $\phi_{ref}$  に追従する。

### 3-2. 振子目標角と並進移動量を与える STC

VSS 適応制御の有界な振子目標角度  $r_f$  および並進移動量は次の STC 系により構成される。ロボット制御時は、目標値  $x_{ref}$  を指定し、 $e_r := x_{ref} - x_v$  となる偏差  $e_r$  を次式の状態変数  $x_v$  と置き換えて補正した操作量  $\ddot{r}_f$  を求める。また、モビリティ制御時は置き換えを行わずに実施する。

- ロボット制御時の状態方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{x}_v \\ \dot{r}_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ \dot{x}_v \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f \quad (12)$$

- モビリティ制御時の状態方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \dot{r}_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f \quad (13)$$

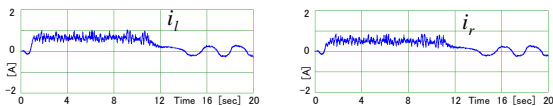
$$\therefore \rho_0 = g, \quad \rho_1 = -J_3 / r$$

未知パラメータ  $\rho_1$  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)。

$$\dot{r}_f = -F_o^T x \quad F_o^T = [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4] \quad (14)$$

## 4. 実験結果

対象の物理パラメータを全て未知として実験を実施し、適応制御法の検証を行った。ロボット実験では、半径 1[m] の半円軌道  $\pi$  [m] を進ませ、同時に  $\pi$  [rad] 旋回させた。モビリティ実験では、人が着座した状態で、姿勢を傾け前進・後退動作を行い、手元のポテンショメータを用いて旋回動作を行った。ロボットの実験結果グラフを Fig.5 に、モビリティの実験結果グラフを Fig.6 にそれぞれ示す。



(a) Input to right motor

(b) Input to left motor

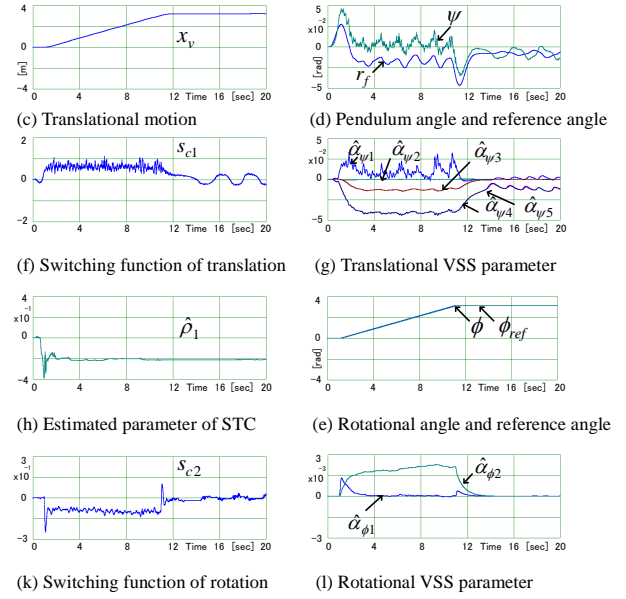


Fig.5 Control experiment of robot

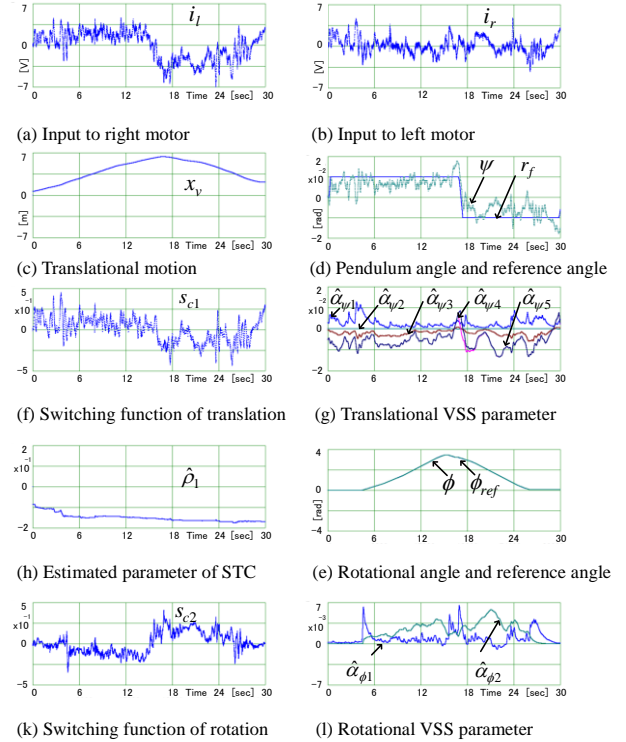


Fig.6 Control experiment of mobility

## 5. まとめ

本研究では、対象の全ての物理パラメータを未知とする適応制御系設計を提案し、自律走行ロボット及び、人為的に操作するモビリティタイプへの応用を検討した。提案法では、並進運動は目標値追従型の VSS 適応制御系と推定系を簡素化した STC によって制御し、旋回運動は STC を使用しない目標値追従型の VSS 適応制御系によって制御した。動作実験を通し、ロボット及びモビリティ共に提案法の有用性が確認できた。