

# 搭乗型倒立モビリティの VSS 適応制御

学生員 竹田 勇 正員 稲葉 毅, 平田 弘志 (東海大学)

VSS Adaptive Control of Riding Mobility

Isamu Takeda, Hiroshi Hirata

## 1. はじめに

近年、セグウェイを代表としたパーソナルモビリティが多く見受けられる。これらのパーソナルモビリティは不安定系のものが多く、コンピュータによる安定化制御が必要不可欠である。本研究では、車椅子型の自動二輪車ロボットを構成し、対象の物理パラメータを未知とした制御設計を行い適応安定化制御することを目的としている。

## 2. 制御対象

本研究で使用する倒立モビリティの実機本体を Fig.1 に、運動モデル図を Fig.2 にそれぞれ示す。Fig.2 より導出した運動方程式を式(1)に示す。



Fig.1 実機本体

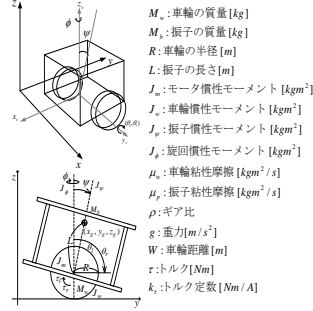


Fig.2 モデル図

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

$$M = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & ArC \\ 0 & JJ & 0 \\ ArC & 0 & AJ_3 \end{bmatrix}, Cq = \begin{bmatrix} -ArS\dot{\psi}^2 \\ 2AJ_2SC\dot{\psi}\dot{\phi} \\ -AJ_2SC\dot{\phi}^2 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -ArgS \end{bmatrix}, Dq = \begin{bmatrix} \rho^2 d_m \dot{x}_v \\ (W/2)^2 \rho^2 d_m \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}, Nu = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 \\ -WR/4 & WR/4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

$$E_2 := WR\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) - E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/4$$

式(1)に線形化を施す。なお、クーロン摩擦項  $E_b$  は簡易の為に省略する。式(1)を線形化した式は

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_v \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ar \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{\psi} + \begin{bmatrix} \rho^2 \mu_w \dot{x}_v \\ W^2 \rho^2 \mu_w \dot{\phi}/4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$r\ddot{x}_v + J_3\ddot{\psi} - rg\psi = 0$$

となる。ここで、左右モータ電流を  $i_l, i_r$ 、電流和を  $i_1 := i_l + i_r$ 、その差を  $i_2 := i_l - i_r$  とする。

## 3. VSS 制御系設計

並進系と旋回系それぞれにVSSの制御系を構成する。

### 3-1. 並進系 (振り子の安定化)

式(2)から並進振子系方程式は

$$\det M \ddot{\psi} + P_1 \dot{\psi} + P_2 \dot{x}_v + P_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + P_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) = nu_1 \quad (3)$$

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

$$P_2 = r \rho^2 \mu_w, \quad P_3 = -RrE_l/2, \quad P_4 = -RrE_r/2$$

$\psi$ : 振り回転角度,  $r_r$ : 目標角,  $e_1$ : 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。

$$e_1 := \psi - r_f, \quad \dot{\psi}_r := \dot{r}_f - h_1 e_1, \quad (h_1 > 0), \quad s_{c1} := \dot{\psi} - \dot{\psi}_r = \dot{e}_1 + h_1 e_1,$$

(3)の対象に対して不確定外乱  $w_1$  を考慮すると式(5)となる。

$$Y_\psi^T \alpha_\psi + H_1 \dot{s}_{c1} = i_1 + w_1 \quad (4)$$

$$\therefore H_1 := \det M / C_l, \quad C_l = Rr k_\tau / 2$$

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

### 3-2. 旋回系

式(2)から旋回系の方程式は

$$J_4 \ddot{\phi} + (B^2 \rho^2 d_m) \dot{\phi} = u_2 \quad (5)$$

$\phi$ : 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。

$$e_2 := \phi - \phi_{ref}, \quad \dot{\phi}_r := \dot{\phi}_{ref} - h_2 e_2, \quad (h_2 > 0), \quad s_{c2} := \dot{\phi} - \dot{\phi}_r = \dot{e}_2 + h_2 e_2$$

(5)式の対象は不確定外乱  $w_2$  を考慮して

$$Y_\phi^T \alpha_\phi + H_2 \dot{s}_{c2} = i_2 + w_2, \quad H_2 = J_4 / C_r, \quad C_r = WR k_\tau / 4 \quad (6)$$

$$Y_\phi^T = [\ddot{\phi}_r & \dot{\phi}_r], \quad \alpha_\phi^T = [H_2 & W^2 \rho^2 \mu_w / C_r]$$

### 3-3. VSS 適応則

$$\begin{cases} \dot{i} = Y^T \hat{\alpha} - k_v \operatorname{sat}(s_c / \delta) & k_v > 0 \\ \hat{\alpha}^T = [\hat{\alpha}_1 & \hat{\alpha}_2 & \hat{\alpha}_3 & \dots & \hat{\alpha}_n] \end{cases} \quad (7)$$

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

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

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

## 4. STC設計

VSS適応制御の有界な振り目標角  $r_f$  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。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_v \\ \dot{r}_f \\ \ddot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f \quad (\rho_0 = g, \rho_1 = -J_3/r) \quad (8)$$

ここで、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)。

$$\ddot{r}_f = -F_o^T x, \quad F_o^T := [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4] \quad (9)$$

以上のSTCにより、振り系の安定化が達成される。