

E4 着座型倒立モビリティの VSS 適応制御に関する研究

発表者: 6BEIM034 竹田 勇
 指導教員: 稲葉 毅 教授
 平田 弘志 教授

A Research on Motion Control for Seating Type Inverted Mobility by Using VSS Adaptive Control

Abstract: The change of the payload and momentum of inertia appear in the application of Wheeled Inverted Pendulum (WIP) robot such as Segway frequently. Therefore, the adaptive control method that removes the problem of uncertainty concerning the design parameter is useful to WIP robot system. In this paper, motions of Seating Type WIP Mobility are controlled to VSS (Variable Structure System) adaptive control system including STC (self-tuning control) with estimating unknown parameters. In addition, the validity of the proposed adaptive system is proved through the practical experiment.

1. はじめに

本研究では、着座状態で人為的に操作を行うパーソナルモビリティに対し、全物理パラメータを未知とした適応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、有界な振り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

本研究で使用する着座型倒立モビリティの実機と運動モデル図を Fig.1 と Fig.2 にそれぞれ示す。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、 ϕ は旋回角度、 ψ は振り角度である。

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

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

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

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

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

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

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



Fig. 1 Inverted mobility

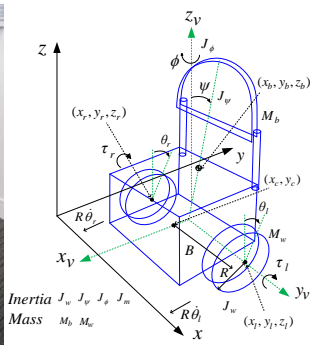


Fig. 2 Diagram of mobility

3. 制御系設計

対象を並進振子系と旋回系に分け、2種類の適応制御機構により、並進安定化系及び旋回制御系を構築する。

3-1. 並進振子系と旋回系の VSS 適応制御

(1)式に平衡点近傍で線形化を施すと次式となる。

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

(2)式から並進振子系方程式は以下のように求められる。

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

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

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

ψ : 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。

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

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

同様に、(2)式から旋回系方程式を求めると次式となる。

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

ϕ : 旋回角度, ϕ_{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

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

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

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

VSS 適応制御の操作量 i を(9)式, パラメータ適応則を(11)式とする. また, $\hat{\alpha}^T$ は可調整パラメータとする.

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

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

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

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象行列とする. 目標角 r_f , ϕ_{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 ψ , 旋回角 ϕ は目標角 r_f , ϕ_{ref} に追従する.

3-2. 振り目標角を与える STC

VSS 適応制御の有界な振り目標角 r_f を与える STC 系を構成する. (2)式 2 番目の方程式において, ψ を r_f で置換すると

$$\ddot{x}_v = \rho_0 r_f + \rho_1 \ddot{r}_f, \quad \therefore \rho_0 = g, \quad \rho_1 = -J_3 / r \quad (12)$$

となり, 状態方程式で表すと次式となる.

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

未知パラメータ ρ_1 を制御周期毎に推定しながら, 次の評価関数 J を最小にする LQ 制御器ゲイン F_o を更新する(推定には RLS 法を使用).

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + \ddot{r}_f^T R_L \ddot{r}_f) dt, \quad (Q \geq 0, R_L > 0) \quad (14)$$

$$\ddot{r}_f = -F_o^T x, \quad F_o^T = [f_1 \quad f_2 \quad f_3] \quad (15)$$

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. モビリティのモータドライバは電圧指令入力型 1[V]-1.6[A]仕様の PWM アンプを使用しており, 車輪角度は 1 回転 32400 パルス, 振り角度は 1 回転 10000 パルスとして検出している. 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, 手元のポテンシオメータを用いて旋回動作を行った. また, 実験時の諸条件を Table1 に, 結果グラフを Fig.3 に示す.

Table 1 Condition of Experiment

constants of adaptive control system	translational system	rotational system
coefficient in switching function : h	$h_1 = 30$	$h_2 = 30$
VSS scalar gain in control input : k_v	$k_{v1} = 20$	$k_{v2} = 20$
VSS adaptive gain of $\hat{\alpha}$: k_a	$k_{a1} = 1.5$	$k_{a2} = 1.5$
VSS adaptive gain : $\Gamma = \gamma I$	$\gamma_1 = 10$	$\gamma_2 = 10$
boundary layer in sat function : δ	$\delta_1 = 1.0$	$\delta_2 = 1.0$

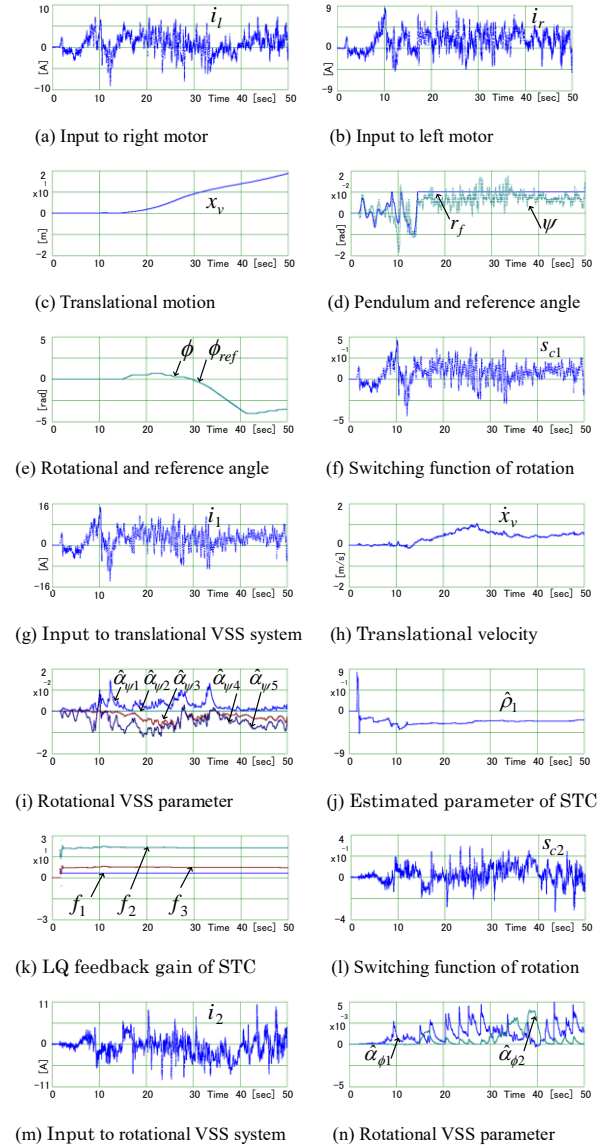


Fig. 3 Experiment result

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, 着座型倒立モビリティ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. 動作実験を通し提案法の有用性が確認できた.

参考文献

[1] 藤田廉, 野口晃寛, 平田弘志: “簡易 STC を用いた車輪型倒立振り子ロボットの VSS 適応制御”, 東海大学情報理工学部紀要, Vol.14, 2014

業績リスト

1. 竹田勇, 平田弘志: “搭乗型倒立モビリティの VSS 適応制御”, 【D】平成 28 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Y-70(2016)

他 3 件