

# 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

藤田 廉\*<sup>1</sup> 野口 晃寛\*<sup>1</sup> 平田 弘志\*<sup>2</sup>

## VSS Adaptive Control Using a Simplified STC for a Wheeled Inverted Pendulum Robot

by

Ren Fujita, Akihiro Noguchi and Hiroshi Hirata

(received on Nov. 6, 2014 & accepted on Nov. 28, 2014)

### Abstract

The control system for various inverted pendulums contributes to the practical utilization of unstable objects, for example, Segway etc. Application study of wheeled inverted pendulum (WIP) robot is recently very active because personal mobility is attractive field. Most of these discussions are either the stabilization or the position control in parameter known system. Few studies consider case of unknown parameter system, for example, payload change, inertia change, and so on. The change of the payload and the momentum of inertia appear in the application of WIP robot frequently. Therefore, the adaptive control method that removes the problem of uncertainty concerning the design parameter is useful to WIP robot system. The WIP robot is discussed as a system with unknown parameters except the radius of the wheel, and the stabilization and motion control of whole system are achieved by two VSS adaptive control and a self-tuning control (STC). This paper proposes that such VSS adaptive control system as tracking the reference input is applied to the pendulum stabilization of WIP and the translational motion is also controlled by means of STC that assures the boundary reference angle of the pendulum, furthermore another VSS adaptive control system is applied to the rotational motion system that is independent to the translational motion dynamics. The distinct feature of proposed method does not only reduce the estimated parameters of STC system but also achieve VSS adaptive control system without a perturbation signal that had been required in order to estimate many parameters at a previous study. Finally, the validity of the proposed adaptive system is proved through some numerical simulations.

**Keywords:** wheeled inverted pendulum, VSS adaptive control, self-tuning control (STC), recursive least squares method

## 1. はじめに

コンピュータの発展に伴い、現代社会は航空機・宇宙開発などの分野で数多くみられる不安定な対象を巧みに制御することにより利用している。制御工学の果たす役割は大きく、安全な技術を維持するために必要不可欠なものとなっている。しかし、これらの実機は身近なものではなく制御性能の検証が容易ではない。一方、容易に実験が行える不安定な制御対象としては古くから倒立振り子モデルが知られている。倒立振り子は既に多くの研究者により制御系設計の検証に使用され、制御理論の発展のみならず不安定な工学的対象の実用化に寄与してきている。

近年、倒立振り子の中で二つの車輪を持つタイプの応用研究が盛んである。この車輪型倒立振り子(WIP)を大別するとセグウェイに代表されるパーソナルモビリティ<sup>1)-4)</sup>と荷役目的の自律走行型ロボット<sup>5)-8)</sup>に分けられる。これらの議論の中心は安定化制御と2輪移動体の位置姿勢制御に関するものが殆どである。WIP応用系においてはいずれの用途でも振り子の重量およ

び慣性モーメントの変化が想定される。しかしながら、対象の重量・慣性変化を考慮した場合の未知パラメータ系の議論が少ないのが現状である。また、移動体の高速度化を優先して駆動部分の減速比を小さくすると動特性変化の影響が顕著になり安定度が劣化することが予想される。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、本対象の用途では運転に際して、適切なチューニング機能を有する制御系が望ましい。

著者等の研究グループは先に、回転型倒立振り子系の振り子部分にVSS(可変構造系)適応安定化制御系を構成し、回転アームの安定化にSTC(セルフチューニング制御)を実施する手法を既に提案<sup>9),10)</sup>している。その適応制御系では振り子を倒立させた状態で運転を開始し、STC系の推定精度を向上させる意味で、操作量に適切な摂動信号を短時間重畳してシステム全体の基本パラメータ推定を実施する手法を採っていた。

本研究でもWIPロボットに対して、全ての物理パラメータを未知とした制御系設計について議論する。未知パラメータ倒

\*1 東海大学大学院工学研究科情報理工学専攻  
\*2 情報理工学部コンピュータ応用工学科 教授

立振子系の制御法として、たとえば振子を倒した状態の運動からパラメータを推定し、その後に振上げ制御<sup>11),12)</sup>を実施する運転方法が考えられる。しかし、WIPロボットにおいて、そういう手法は運用上無理があり適当ではない。ロボット振子部が倒立した自然な姿勢の状態安定化制御を開始し、必要な情報は運動制御中に取得する方法が妥当であると考え。

したがって、本研究ではWIPロボットの倒立姿勢を初期状態と考え、適応安定化制御と移動制御を実施する。パーソナルモビリティ<sup>13),14)</sup>（独立二輪駆動で前進・後退動作を振り角度の変化により与える仕様）および二輪移動ロボットの何れにも展開可能であるが、本稿では後者の移動ロボットを想定し、まずWIPロボットの振子部分に目標値追従型のVSS適応安定化制御系を構成する。そして並進系の安定性と有界な振り目標角生成の保証にSTCを構成する。文献10)ではSTC構築において、システムの基本パラメータ推定値を全て用いたが、本稿では推定モデルを変更し、必要パラメータのみ推定する形に簡素化した。その結果、摂動トルクの使用が不要になることが判明した。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。以上、WIPロボットに2種類の適応制御器を使用して安定化系および並進移動・旋回制御系を実現する。この提案手法の有効性を実証するために、数値シミュレーションを実施した結果、本手法の有効性が確認された。

## 2. 制御対象

WIPロボットの運動モデル図と実験機モデル図をFig.1とFig.2にそれぞれ示す。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ーを介して連結されている。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、振り角は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、振子上部にはペイロードが変更可能な構成となっている。ここでは、以上のWIPロボットの運動方程式について述べる。Fig.1の制御対象の運動方程式は各車輪と車体重心における運動エネルギー

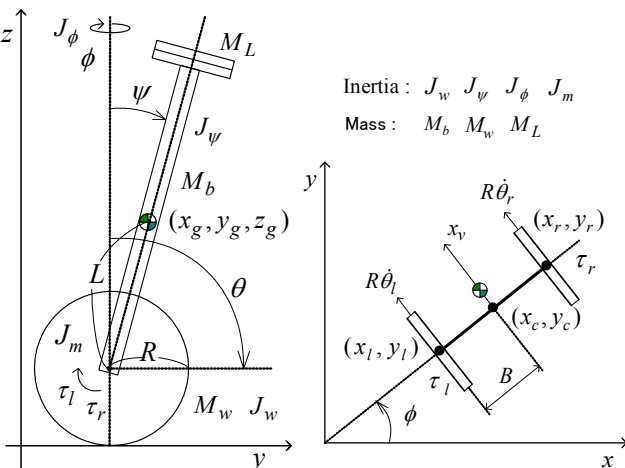


Fig. 1. Diagram of a wheeled inverted pendulum (WIP) robot.

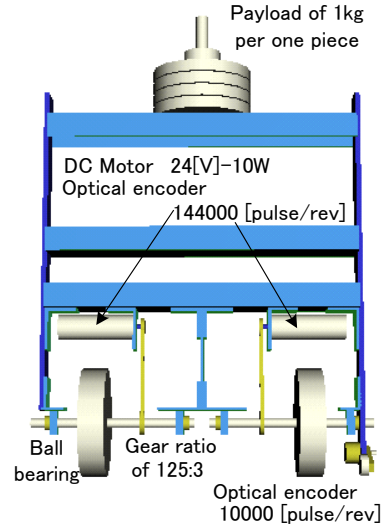


Fig. 2. Experiment model of a WIP robot.

一および車体重心の位置エネルギー算出より、Euler-Lagrange方程式を使用して(1)式のように導出される。

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

ここで、 $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ はそれぞれ角度、角速度、角加速度、 $\tau$ はトルクであり、 $M(\theta)\ddot{\theta}$ は慣性項、 $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ は遠心力およびコリオリ力などの非線形項、 $G(\theta)$ は重力項、 $D\dot{\theta}$ は粘性摩擦項、 $E(\dot{\theta})$ はクーロン摩擦項である。また、(1)式の各項は次式で与えられる。

$$\begin{cases} M(\theta) = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_2 & m_1 & m_3 \\ m_3 & m_3 & m_4 \end{bmatrix}, C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 & c_2 \\ -c_1 & c_1 & c_2 \\ c_3 & -c_3 & 0 \end{bmatrix}, \\ G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \rho^2 d_m + d_b & 0 & -d_b \\ 0 & \rho^2 d_m + d_b & -d_b \\ -d_b & -d_b & 2d_b \end{bmatrix}, \\ E(\dot{\theta}) = \begin{bmatrix} E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) \\ E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) \\ E_\psi \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{但し, } \theta := [\theta_r \ \theta_l \ \psi]^T, \quad \tau := [\tau_r \ \tau_l]^T$$

$$\begin{aligned} m_1 &:= R^2 M_b / 4 + M_w R^2 + M_b L^2 R^2 / 8B^2 + R^2 J_\phi / 4B^2 \\ &\quad + J_w + \rho^2 J_m - M_b L^2 R^2 \cos(2\psi) / 8B^2, \\ m_2 &:= R^2 M_b / 4 - R^2 J_\phi / 4B^2 + M_b L^2 R^2 \{\cos(2\psi) - 1\} / 8B^2, \\ m_3 &:= M_b L R \cos \psi / 2, \quad m_4 := M_b L^2 + J_\psi \\ c_1 &:= M_b L^2 R^2 \sin(2\psi) \dot{\psi} / 4B^2, \quad c_2 := -R M_b L \sin \psi \dot{\psi} / 2, \\ c_3 &:= M_b L^2 R^2 \sin(2\psi) (\dot{\theta}_l - \dot{\theta}_r) / 8B^2, \quad g_1 := M_b L g \sin \psi \end{aligned}$$

また、 $g$ は重力加速度、 $\tau_l, \tau_r$ は左右モータの入力トルク、 $\eta$ 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 $E_\psi$ は微小とみなして $d_b = 0, E_\psi = 0$ とする。(1)式、(2)式の一般化座標 $\theta := (\theta_r, \theta_l, \psi)$ は並進位置 $x_r$ や旋回角度 $\phi$ を含んでいないので、新たな一般化座標として $q := (x, \phi, \psi)$ を使用した次の座標変換

$$\mathbf{q} = T\boldsymbol{\theta}, \quad T = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 & 0 \\ -R/2B & R/2B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

を施し、各要素を基本パラメータ  $J_1, J_2, J_3, J_4, r$  を用いて記述すると次の系  $\Sigma_b(M_b, C_b, G_b, D_b, E_b)$  が得られる。

$$M_b(q)\ddot{q} + C_b(q, \dot{q})\dot{q} + G_b(q) + D_b\dot{q} + E_b(\dot{q}) = N_b\tau \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{但し, } M_b(q) &= TM(\boldsymbol{\theta})T^{-1}, \quad C_b(q, \dot{q}) = TC(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})T^{-1}, \\ G_b(q) &= TG(\boldsymbol{\theta}), \quad D_b = TDT^{-1}, \quad E_b(\dot{q}) = TE(\dot{\boldsymbol{\theta}}), \quad N_b = TN, \end{aligned}$$

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

$$\left\{ \begin{aligned} M_b &= \begin{bmatrix} J_1 & 0 & ArC \\ 0 & JJ & 0 \\ ArC & 0 & AJ_3 \end{bmatrix}, \quad C_b\dot{q} = \begin{bmatrix} -ArS\dot{\psi}^2 \\ 2AJ_2SC\dot{\psi}\dot{\phi} \\ -AJ_2SC\dot{\phi}^2 \end{bmatrix}, \\ G_b &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -ArgS \end{bmatrix}, \quad D_b\dot{q} = \begin{bmatrix} \eta^2 d_m \dot{x}_v \\ B^2 \eta^2 d_m \dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ E_b &= \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad N_b = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 \\ -BR/2 & BR/2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} J_1 &:= (M_b/2 + M_w)R^2 + J_w + \eta^2 J_m, \quad r := M_b L, \\ JJ &:= AS^2 J_2 + J_4, \quad A := R^2/2, \quad C := \cos\psi, \quad S := \sin\psi, \\ J_2 &:= M_b L^2, \quad J_3 := M_b L^2 + J_w, \\ J_4 &:= B^2(M_w R^2 + J_w + \eta^2 J_m) + AJ_\phi, \\ E_1 &:= R\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/2, \\ E_2 &:= BR\{E_l \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) - E_r \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)\}/2. \end{aligned}$$

このとき、Lagrange 方程式を満たすように(4)式の第2行目を  $B^2$  倍していることに留意する。また、(4)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。

### 3. 制御系設計

本研究では対象を並進振子系および旋回系に分け、2種類の適応機構により並進安定化系および旋回制御系を構築する。対象を非線形系のままVSS適応制御系<sup>15),16)</sup>を設計し安定系を構成することも可能であるが、振子目標角を線形STC系<sup>17)</sup>で構成する為、対象を線形化して設計する。

まず、並進振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。このとき、並進振子系のスライディングモードを仮定し、並進移動量と振子目標角を生成するSTC系を構築する。

**<3.1> 並進振子系の安定化と旋回系の制御** (4)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子ロボットの運動方程式は次式となる。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_v \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Ar \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{\psi} + \begin{bmatrix} \eta^2 d_m \dot{x}_v \\ B^2 \eta^2 d_m \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ r\ddot{x}_v + J_3\ddot{\psi} - rg\psi = 0 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、左右モータ電流を  $i_l, i_r$ 、トルク定数を  $k_\tau$  とすると  $\tau_l = k_\tau i_l, \tau_r = k_\tau i_r$  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

$$u_1 = Rk_\tau i_1/2, \quad u_2 = C_r i_2, \quad C_r := BRk_\tau/2 \quad (7)$$

与えられる。(6)式から並進振子系の方程式は

$$\det M \ddot{\psi} + p_1 \dot{\psi} + p_2 \dot{x}_v + p_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) + p_4 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) = r u_1 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \therefore \det M &= J_1 J_3 - Ar^2, \quad \det M > 0, \quad p_1 = -J_1 rg, \\ p_2 &= -r\eta^2 d_m, \quad p_3 = -RrE_l/2, \quad p_4 = -RrE_r/2. \end{aligned}$$

となる。同じく(6)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

$$J_4 \ddot{\phi} + (B^2 \rho^2 d_m) \dot{\phi} = u_2 \quad (9)$$

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。

先ず、振子回転角度  $\psi$  に対し目標角を  $r_f$ 、その誤差  $e_1$  を

$$e_1 := \psi - r_f \quad (10)$$

とする。また、参照角速度  $\dot{\psi}_r$  を

$$\dot{\psi}_r := \dot{r}_f - h_1 e_1, \quad (h_1 > 0) \quad (11)$$

と定義する。さらに、切換関数  $s_{c1}$  を

$$s_{c1} := \dot{\psi} - \dot{\psi}_r = \dot{e}_1 + h_1 e_1 \quad (12)$$

と定義するとき、(8)式の対象は不確定外乱  $w_1$  を考慮して

$$\begin{cases} Y_\psi^T \alpha_\psi + H_1 \dot{s}_{c1} = i_1 + w_1 \\ H_1 := \det M / C_l, \quad C_l := Rr k_\tau / 2 \end{cases} \quad (13)$$

のように記述される。ここで、 $Y_\psi$  は計測値から構成されるベクトル、 $\alpha_\psi$  は並進系パラメータベクトルである。

$$\begin{cases} Y_\psi^T = [\dot{\psi}_r \quad \psi \quad \dot{x}_v \quad \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_l) \quad \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r)] \\ \alpha_\psi^T = [H_1 \quad p_1/C_l \quad p_2/C_l \quad p_3/C_l \quad p_4/C_l] \end{cases} \quad (14)$$

次に、旋回角度  $\phi$  に対し目標角を  $\phi_{rf}$ 、その誤差  $e_2$  を

$$e_2 := \phi - \phi_{ref} \quad (15)$$

とする。また、参照角速度  $\dot{\phi}_r$  を

$$\dot{\phi}_r := \dot{\phi}_{ref} - h_2 e_2, \quad (h_2 > 0) \quad (16)$$

と定義する。さらに、切換関数  $s_{c2}$  を

$$s_{c2} := \dot{\phi} - \dot{\phi}_r = \dot{e}_2 + h_2 e_2 \quad (17)$$

と定義するとき、(9)式の対象は不確定外乱  $w_2$  を考慮して

$$Y_\phi^T \alpha_\phi + H_2 \dot{s}_{c2} = i_2 + w_2, \quad H_2 := J_4 / C_r \quad (18)$$

$$Y_\phi^T = [\ddot{\phi}_r \quad \dot{\phi}], \quad \alpha_\phi^T = [H_2 \quad B^2 \eta^2 d_m / C_r] \quad (19)$$

のように記述される。ここで、 $Y_\phi$  は計測値から構成されるベクトル、 $\alpha_\phi$  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]<sup>10),18)</sup> VSS適応制御の操作量  $u$  を(20)式、パラメータ適応則を(22)式とする。また、 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}^T$  は可調整パラメータとする。

$$\begin{cases} u = Y^T \hat{\alpha} - k_v \text{sat}(s_c/\delta), & (k_v > 0) \\ \hat{\alpha}^T := [\hat{\alpha}_1 \quad \hat{\alpha}_2 \quad \dots \quad \hat{\alpha}_n] \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{sat}(s_c/\delta) := \begin{cases} \text{sgn}(s_c) & |s_c| > \delta \\ s_c/\delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (21)$$

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

ここで、 $k_v$  は VSS ゲイン、 $\delta$  は境界層幅、 $\Gamma$  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

$$|s_c| > \delta \text{ のとき, } k_v > |w| \quad (23)$$

$$|s_c| \leq \delta \text{ のとき, } k_v |s_c|/\delta > |w| \quad (24)$$

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  $Y_\psi, Y_\phi$  を  $Y$ 、各可調整パラメータ  $\hat{\alpha}_\psi, \hat{\alpha}_\phi$  を  $\hat{\alpha}$ 、各切換え関数  $s_{c1}, s_{c2}$  を  $s_c$  に対応させ、境界層  $\delta_1, \delta_2$ 、VSS ゲイン  $k_{v1}, k_{v2}$ 、調整ゲイン  $\Gamma_1, \Gamma_2$  を適切に指定する。さらに、(22)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<sup>19)</sup>

$$\dot{\hat{\alpha}} = -k_a \hat{\alpha} - \Gamma^{-1} Y s_c, \quad (\Gamma > 0). \quad (25)$$

を使用したことに留意する。

尚、電流和と差の関係より左右のモータ指令はそれぞれ

$$i_l = (i_1 + i_2)/2, \quad i_r = (i_1 - i_2)/2 \quad (26)$$

で与えられる。また、VSS系  $\dot{x}_v, \dot{\psi}$  は直接制御則に必要な変数なので、 $x_v, \psi$  をそれぞれ入力とする擬似微分フィルタ

$$G_S := \frac{s}{1 + \tau_s s} \quad (27)$$

により算出している。

### 〈3.2〉 振り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り目標角  $r_f$  およびロボット並進移動量は以下に示す STC 系により構成される。並進振り制御系が素早くスライディングモード制御<sup>20)</sup> (SMC) に到達すると、振り角度  $\psi$  は目標角度  $r_f$  に追従する。このとき、(6)式 2 番目の方程式

$$r\ddot{x}_v + J_3\ddot{\psi} - rg\psi = 0 \quad (28)$$

において SMC の仮定の元、 $\psi$  を  $r_f$  で置換すると (27) 式は

$$\ddot{x}_v = \rho_0 r_f + \rho_1 \ddot{r}_f \quad (\rho_0 = g, \rho_1 = -J_3/r) \quad (29)$$

と記述できる。また、状態方程式で記述すると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v \\ \ddot{x}_v \\ \dot{r}_f \\ \ddot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ \dot{x}_v \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f \quad (30)$$

となる。振子の目標角加速度  $\ddot{r}_f$  を制御入力とする (30) 式の

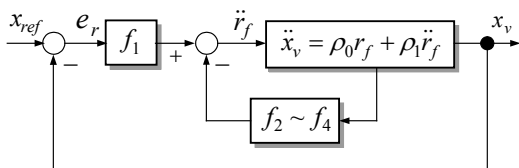


Fig. 3. A STC for stabilization and translation.

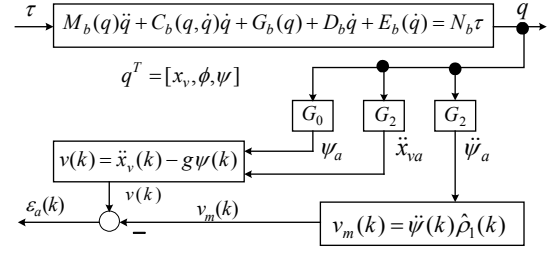


Fig. 4 Signal processing for the motion data.

未知パラメータ系において、パラメータ  $\rho_1$  を推定しながら制御器を調整する STC を実施する。次の評価関数  $P_E$

$$\begin{cases} P_E = \int_0^\infty (x^T Q x + \ddot{r}_f^T R \ddot{r}_f) dt, & (Q \geq 0, R > 0) \\ x^T := [x_v \quad \dot{x}_v \quad r_f \quad \dot{r}_f] \end{cases} \quad (31)$$

を最小にする以下のフィードバックゲイン  $F_o$

$$\begin{cases} \ddot{r}_f = -F_o^T x, \\ F_o^T := [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4] \end{cases} \quad (32)$$

を制御周期毎に更新する。以上の STC により、振子系の安定化が達成される。ここで、Fig. 3 に示す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 (30) 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。

また、本研究では、(30)式からハミルトン行列を構成し、QR法 (ダブルQR法を含む) により固有値を求め、リカッチ解を得る固有ベクトル法を採用している。その特徴は文献(20)に基づきQR法の収束を加速する原点移動法および繰返し計算の収束判定部分などを工夫し、実時間処理に適した形に独自開発した点にある。STC実施においてパラメータ推定値  $\hat{\rho}_1$  に偏りが生じてもLQ規範により導出される系は常に安定系である為、ロボットの並進移動位置  $x_v$  を指定する適切な目標角加速度  $\ddot{r}_f$  が求められる。この(32)式  $\ddot{r}_f$  を積分することにより振り目標角  $r_f$  を得ている。

### 〈3.3〉 車輪系の未知パラメータ逐次推定 文献(10)ではS

TC系の未知パラメータ要素を系全体の基本パラメータ推定値から得ていた。その際、除算を使用する為、ゼロ割対策が必要であった。ここでは、基本パラメータを使用せず、ゼロ割がなく簡易化した推定法について説明する。

まず、推定対象(28)式は観測ノイズ  $n(k)$  に対し

$$v(k) := \dot{x}_v(k) - g\psi(k) = \ddot{\psi}(k)\rho_1 + n(k) \quad (33)$$

と記述でき、推定モデルを次式

$$v_m(k) := \ddot{\psi}(k)\hat{\rho}_1(k) \quad (34)$$

とする。但し、運動データ  $\Lambda = \{\psi(k), \dot{x}_v(k), \ddot{\psi}(k)\}$  は(28)式の  $\psi, \dot{x}_v, \ddot{\psi}$  の  $k$  時刻値を表す。いま、計測値は並進位置  $x_v$  と振り角度  $\psi$  のみである。そこで、推定に必要な運動データは(35)式のデジタル信号処理によって求めている。

$$\begin{cases} G_0 := 1/(1 + \tau_s s)^3, \quad G_2 := s^2 G_0 \\ \psi_a = G_0 \psi, \quad \ddot{x}_{va} = G_2 x_v, \quad \ddot{\psi}_a = G_2 \psi \\ s := C_T(z-1)/(z+1), \quad C_T = 2/T_S \end{cases} \quad (35)$$

ここで、 $T_S$  はサンプリング周期である。

このとき、Fig. 4 に示すセンサ特性の違いによる推定精度の劣化を補償した信号処理系<sup>22),23)</sup>を採用している。また、パラメータ逐次推定はサンプリング周期毎に(35)式から得られる運動データ  $\Lambda_a = \{\psi_a(k), \ddot{x}_{va}(k), \ddot{\psi}_a(k)\}$  を用いて実施される。パラメータ推定則は幾つか考えられるが、観測ノイズ  $n(k)$  の影響は比較的小さいと考えられるので、ここでは、以下の最小2乗形一般化適応則<sup>24)</sup>を用いる。

[ 最小2乗形一般化適応則 ] パラメータ推定誤差  $\xi(k)$  および応答誤差  $\varepsilon_a(k)$  がそれぞれ次式

$$\xi(k) := \rho_1 - \hat{\rho}_1(k) \quad (36)$$

$$\varepsilon_a(k) := v(k) - \ddot{\psi}(k)\hat{\rho}_1(k) = \ddot{\psi}(k)\xi(k) \quad (37)$$

によって定義され、一段予測誤差  $\varepsilon_p(k)$  を次式とする。

$$\varepsilon_p(k) := v(k) - \ddot{\psi}(k)\hat{\rho}_1(k-1) \quad (38)$$

ここで、モデル化誤差やパラメータ変動外乱がなく、観測雑音は白色雑音、また(21)式の振子角加速度  $\ddot{\psi}(k)$  が PE (Persistency of Excitation) 性を満たし、推定パラメータ  $\hat{\rho}_1(k)$  が次の適応則

$$\xi(k) = \xi(k-1) - \beta(k)F(k-1)\ddot{\psi}(k)\varepsilon_a(k) \quad (39)$$

$$F^{-1}(k) = \lambda_1(k)F^{-1}(k-1) + \lambda_2(k)\ddot{\psi}^2(k) \quad (40)$$

$$\left[ \begin{array}{cc} 0 < F(0), & 0 < F^{-1}(0) \\ 0 < \lambda_1(k) \leq 1, & 0 < \lambda_2(k), \quad \beta(k) := \lambda_2(k)/\lambda_1(k) \end{array} \right] \quad (41)$$

によって調整されるならば、 $\psi(k)$  の有界、非有界にかかわらず、 $\varepsilon_a(k) \rightarrow 0$ 、 $(k \rightarrow \infty)$  が保証され、パラメータ推定値  $\hat{\rho}_1(k)$  は指数収束し、一致推定値<sup>24)</sup>となる。 ■

実際に適応則は  $\lambda_1(k) = \lambda$ 、 $\lambda_2(k) = 1$  とする以下の最小2乗適応則にして実施している。

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi(k) = \xi(k-1) - A(k)\varepsilon_p(k) \\ F(k) = \frac{1}{\lambda} [1 - A(k)\ddot{\psi}(k)]F(k-1) \\ A(k) := \frac{F(k-1)\ddot{\psi}(k)}{\lambda + F(k-1)\ddot{\psi}^2(k)} \end{array} \right. \quad (42)$$

また、重み  $\lambda$  は次式とし、定数  $\mu$  は  $\mu = 0.99$  を使用した。

$$\lambda := \mu\lambda + (1-\mu), \quad 0.98 < \lambda(0) \leq 1 \quad (43)$$

## 5. シミュレーション結果

本章では実機実験に先立ち数値シミュレーションを実施する。Fig. 2 に示した車輪型倒立振り(WIP)ロボットの車輪半径  $R$  以外を全て未知と仮定して、適応制御法を検証する。また、数値シミュレーションで使用した運動パラメータおよび適応制御で使用する諸定数をそれぞれ Table 1 と Table 2 に示す。制御対象は(4),(5)式のクーロン摩擦項を含む非線形運動方程式をルンゲクッタ4次、刻み時間  $0.5[\text{msec}]$  で計算している。尚、並進系 S T C 部の評価重み  $Q$ 、 $R$  として  $Q = \text{diag}(10,10,1,1)$ 、 $R = 1$  を使用した。ロボットの移動経路として、Fig. 5 に示す半径  $2[\text{m}]$  の半円軌道  $2\pi[\text{m}]$  を移動させ、同時に旋回角  $\pi[\text{rad}]$  を指令値とした。以下にロボット並進系安定化と運動制御のシミュレーション結果を示す。

Table 1. Motion parameters of WIP robot.

$M_w$ [kg]	$M_b$ [kg]	$L$ [m]	$B$ [m]	$R$ [m]	$k_r$ [Nm/A]	$\eta$
1.089	6.026	0.210	0.170	0.090	2.046	125/3
$J_w$ [kgm <sup>2</sup> ]	$J_m$ [kgm <sup>2</sup> ]	$J_\psi$ [kgm <sup>2</sup> ]	$J_\phi$ [kgm <sup>2</sup> ]	$d_m$ [kgms]	$E_l, E_r$ [Nm]	
$4.410 \times 10^{-3}$	0.043	0.4714	$7.903 \times 10^{-2}$	0.80	0.10, 0.11	

Table 2. Condition for VSS adaptive control.

constants of adaptive control system	translational system	rotational system
coefficient in switching function : $h$	$h_1 = 30$	$h_2 = 3$
VSS scalar gain in control input : $k_v$	$k_{v1} = 2.0$	$k_{v2} = 1.5$
VSS adaptive gain of $\hat{a} : k_a$	$k_{a1} = 1.5$	$k_{a2} = 1.5$
VSS adaptive gain : $\Gamma = \gamma I$	$\gamma_1 = 10$	$\gamma_2 = 10$
boundary layer in sat function : $\delta$	$\delta_1 = 0.5$	$\delta_2 = 1.0$
filter constant for control system: $\tau_v$	$\tau_{v1} = 0.01$	$\tau_{v2} = 0.01$
filter constant for estimation : $\tau_f$	$\tau_f = 0.03$	—
adaptive gain of RLS system : $F(0)$	$F(0) = 10^4$	—
sampling period : $T$ [sec]	$T = 0.001$	—

Fig. 6(a)~(d)は WIP ロボットの運動データである。Fig. 6(a)は左右モータへの指令電流を示し、Fig. 6(b)の  $i_1$  は並進振子系の安定化および並進移動のための操作電流であり、 $i_2$  は旋回運動のための電流である。Fig. 6(c), (d)は並進移動量  $x_v$  とその速度  $\dot{x}_v$  をそれぞれ示している。移動目標値  $x_{ref}$  はランプ関数状に増加（増分刻みは  $2\pi \times 10^{-4} [\text{m}]/\text{sample}$ ）させている。このとき S T C 系において偏差  $e_r = x_{ref} - x_v$  を補正值として使用していることから、 $e_r$  がある程度大きくなった後に並進移動が開始されることが分かる。また、Fig. 6(e)は V S S 制御の切換関数  $s_c$  であり、制御中  $s_c$  が境界層  $\delta = 0.5$  以内の値を維持しているためスライディングモード近傍に到達した制御 (SMC) となっている。Fig. 6(f)は倒立振子の参照角  $r_f$  と振子角  $\psi$  を示している。倒立振子の安定化は制御開始から遅れることなく適切に実施されていて、振子角  $\psi$  の振幅も最大  $2[\text{deg}]$  程度である。さらに、Fig. 6(g)は V S S 適応則の可調整パラメータ  $\hat{\alpha}_\psi$  であり、Fig. 6(d)の並進速度  $\dot{x}_v$  の変化が大きい時点ではパラメータ調整も大きく変化している。Fig. 6(g), (h)は S T C 系の推定パラメータ  $\hat{\rho}_1$  とフィードバックゲイン  $F_0$  をそれぞれ示している。 $\hat{\rho}_1$  の収束が非常に速く、 $\hat{\rho}_1$  に基づいて導出される  $F_0$  の収束も速いことが分かる。

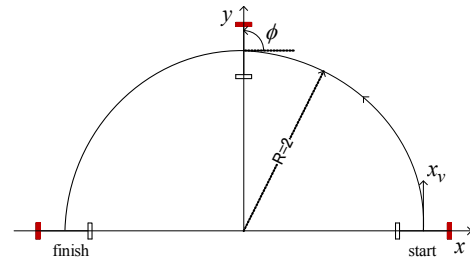


Fig. 5. A semicircle course for WIP robot control.

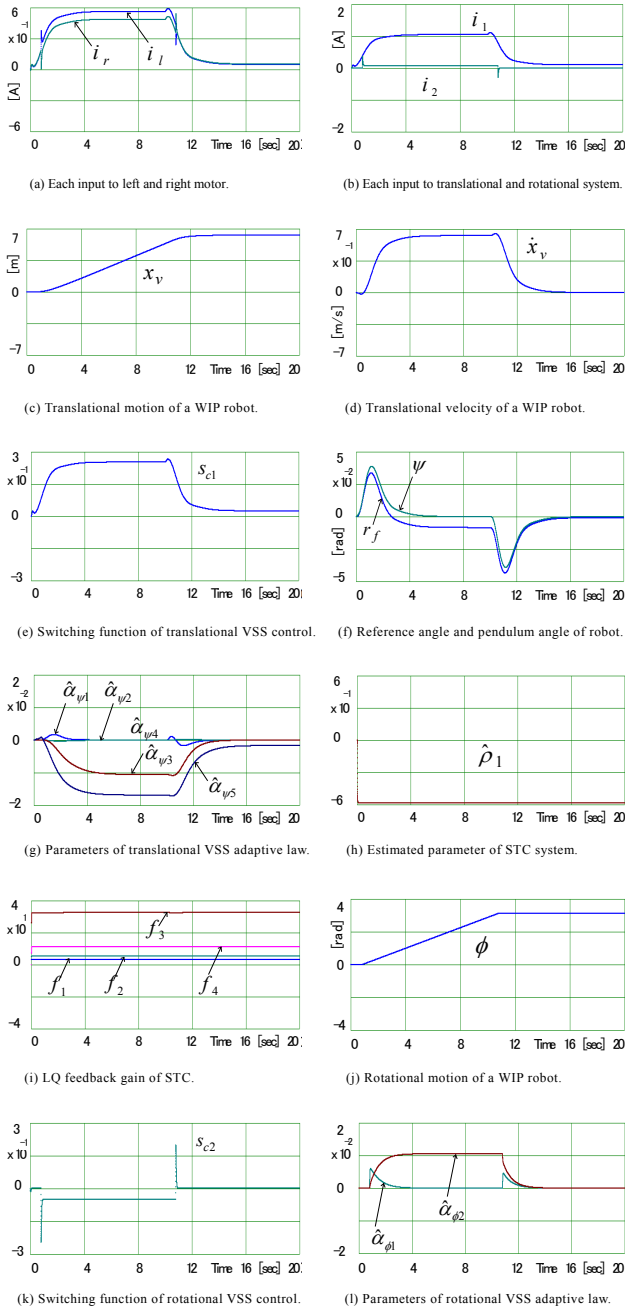


Fig. 6. Control simulation .

この  $F_0$  の各要素の最終値および真値との誤差を Table 3 に示す。このように  $\hat{\rho}_1$  の整定状況は先行研究で必要とした摂動信号を制御信号に重畳させなくても、適応安定化の実現可能性を示唆していることに留意する。

次に, Fig. 6(j)は旋回系の回転角  $\phi$  を示している。旋回目標値  $\phi_{ref}$  はランプ関数状に増加 (増分刻みは  $\pi \times 10^{-4}$  [rad]/sample) させている。実際には,  $\phi_{ref}$  を並進系移動の開始時に合わせているため 1 秒程度、遅れて旋回が開始される。

Table 3. STC feedback gain for WIP control system.

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
3.162	5.567	32.55	11.36
0[%]	0.01[%]	0.04[%]	0.07[%]

Fig. 6(j), (l)はそれぞれ旋回VSS系切換関数  $s_{c2}$  とVSS適応則の可調整パラメータ  $\hat{\alpha}_\phi$  である。旋回VSS系では並進系とは異なり, 目標値  $\phi_{ref}$  の構成にSTCを使用する必要はなく, 直接的に与えることが可能である。  $s_{c2}$  の推移を見る限りは並進系に比して適応動作が俊敏に実施されている。可調整パラメータ  $\hat{\alpha}_\phi$  の推移も並進系と同様に旋回角速度の変化の大きい時点において適切に調整されている。以上の結果から, 本提案手法の有効性が確認できた。

## 6. おわりに

本研究では, 車輪型倒立振り子(WIP)ロボットに対して, 全ての物理パラメータを未知とする適応制御系設計の一方法を提案した。提案法ではロボット並進振り系の安定化および移動に目標値追従型のVSS適応制御と推定系を簡素化したSTCによる2つの適応系からなる安定化系を構成した。また, ロボット旋回系に対してはSTCを使用しない目標値追従型のVSS適応制御系を構成した。提案手法は数値シミュレーションを通して, その有効性が確認された。その際, 先行研究で必要とした推定のための摂動信号を排除しても, 適応系が問題なく動作することも確認された。WIPロボットに対する本手法のようなアプローチの報告はなく, 慣性・重量変化が想定される用途には非常に有用性があり意義あるものと考えられる。既にパーソナルモビリティタイプの実験を終えているので, 早急に移動実験を実施し, 稿を改めて報告する予定である。

## 参考文献

- 1) M. W. Spong: Project-Based Control Education: Plenary Lecture, 7<sup>th</sup> IFAC Symposium on Advances in Control Education ACE' 06, 39/47 (2006)
- 2) 高木: トヨタパートナーロボット, 日本ロボット学会誌, 24 - 2, 208/210 (2006)
- 3) 佐々木, 柳原, 松本, 小森谷: 重心移動のみで操縦可能な小型・軽量パーソナルビークル, 日本ロボット学会誌, 24 - 4, 533/542 (2006)
- 4) 廣瀬, 鋤柄, 梶間, 山岡: パーソナルモビリティロボットの走行切替制御 - 初期値補償による4輪接地状態から倒立2輪走行への滑らかな移行 -, 電気学会論文誌. D, 131 - 9, 1157/1164 (2011)
- 5) 尾崎, 大串, 下川, 林: 車輪型倒立振り子の位置・姿勢制御, 日本機械学会論文集, C編, 65 - 637, 157/164 (1999)
- 6) K. Pathak, J. Franch, and S.K. Agrawal: Velocity and position control of a wheeled inverted pendulum by partial feedback linearization, IEEE Trans. Robotics, 21 - 3, 505/513 (2005)
- 7) 畠山, 島田: ロバスト性を考慮した倒立振り子型移動ロボットの高速移動制御, 計測自動制御学会論文集, 44 - 9, 721/728 (2008)
- 8) 福島, 新村, 松野: 車輪アームをもつ形態可変ロボットの部分線形化による倒立制御, 日本ロボット学会誌, 29 - 6, 554/561 (2011)
- 9) H. Hirata, K. Haga, M. Anabuki, S. Ouchi and P. Ratiroch

- Anant: Self-Tuning Control for Rotation Type Inverted Pendulum Using Two Kinds of Adaptive Controllers, Proc. IEEE RAM Conf., 418/423 (2006)
- 10) 平田, 高部, 穴吹, 大内: セルフチューニング制御器を組み込んだ回転型倒立振子のVSSロバスト適応制御, 電気学会論文誌C, 128-4, 618/627 (2008)
  - 11) M. W. Spong: The Swingup Control Problem for the Acrobot, IEEE control Systems Magazine, vol.15, No.1, 49/55 (1995)
  - 12) X. XIN, M. KANEDA: The Swing up Control for the Acrobot based on Energy Control Approach, Proc. the 41st IEEE CDC Las Vegas, Nevada USA, 3261/3266 (2002)
  - 13) 藤田, 下山, 平田: パラメータ数を減じたRLS推定則による車輪型倒立振子ロボットの適応安定化制御, 東海大学情報理工学部紀要, 13, 15/22 (2013)
  - 14) 藤田, 下山, 平田: 簡易推定則による車輪型倒立振子の適応制御, 平成26年電気学会全国大会, Vol. 4, 262/263 (2014)
  - 15) J.-J. E. Slotine and W. Li: Applied Nonlinear Control, Prentice Hall (1991)
  - 16) J.-J. E. Slotine and W. Li: Adaptive manipulator control - A Case study -, IEEE Trans. AC, 33-11, 995/1003 (1988)
  - 17) K. J. Åström and B. Wittenmark: Adaptive Control, Addison Wesley (1989)
  - 18) 平田, 水嶋, 大内, 小谷: 1脚ロボットの爪先による屈伸動作の姿勢安定化, 電気学会論文誌C, 133-3, 663/671 (2013)
  - 19) P. A. Ioannou and P. V. Kokotovic: Robust Redesign of Adaptive Control, IEEE Trans. AC, 29-3, 202/211 (1984)
  - 20) 野波, 田: スライディングモード制御, コロナ社 (1994)
  - 21) 戸川: マトリクスの数値計算, オーム社 (1985)
  - 22) 大須賀: メカニカルシステムの同定, 計測と制御, 33-6, 487/493 (1994)
  - 23) R. Phornsuk, M. Anabuki and H. Hirata: Adaptive motion control of a two-link Direct Drive Manipulator using disturbance observer, IEEE TENCON' 02, 1725/1728 (2002)
  - 24) 新中: 適応アルゴリズム, 産業図書 (1990)