

# 2つの適応則による回転倒立振子のVSSロバスト適応制御

中山裕介 平田弘志 穴吹雅敏 大内茂人 (東海大学)

VSS Robust Adaptive Control for a Rotary Inverted Pendulum Using Two kinds of Adaptive Laws

Y. Nakayama, H. Hirata, M. Anabuki, and S. Ouchi (Tokai University)

**Abstract:** This paper proposes a new VSS (Variable Structure System) robust adaptive control system including a self-tuning controller for a rotary inverted pendulum whose whole parameters are unknown. The control system prepares two kinds of adaptive controllers, and the stabilization of inverted pendulum is achieved by separating the system to two parts of the pendulum and the rotary arm. The rotational angle of the pendulum is stabilized by tracking type's VSS adaptive control method, and the rotary arm is simultaneously stabilized by STC (self-tuning control) system that assures the boundary reference angle of the pendulum. Whole basic parameters are recursively estimated in order to realize STC system by using least squares parameter adaptive law, and it is achieved by superposing the perturbation signal to the stable adaptive control input on limited short interval.

**Key Words:** Inverted pendulum, VSS adaptive control, Self-Tuning control, System identification, LQ optimal control

## 1 はじめに

倒立振子の制御は各種の制御系を検証する意味で広く使用されている。しかし、適応制御を検証した報告はそれほど多くはない。SlotineとLiは未知パラメータを持つ非線形ロボットアームに対し、適応スライディング制御を提案し、実機アームによりその有用性を検証した[1]。しかし、ロボットのように各関節にアクチュエータを持たない倒立振子に対しては容易に適用できなかった。その後、YamakitaとFuruta等は倒立振子に対して独自のVSS適応制御を提案し、その有効性を実証している[2]。しかし、振り部分は単純棒として扱っており、変動要素を排除した構成である。一方、倒立振子系は典型的な不安定系であることから、各種の制御系設計法を検証する意味で従来より広く使用されている[3]。

本研究では、回転型倒立振子に対して、ロバスト性を改善した新しいVSS適応制御系構成法を提案する。本手法では全ての運動パラメータを未知とし、適応制御実施において安定性確保のために振り部分に対し、適応スライディングモード制御(VSS適応制御)を設計する。また、アーム系の安定性と有界な振り目標角を保証する為にセルフチューニング制御器(STC)[4]を構築する。このとき、VSS適応制御のパラメータではSTCを構成するには不十分であるので、VSS制御と併行して適切な摂動トルクを一定時間操作量に重畳し、倒立振子系の基本パラメータを逐次推定する。この推定値から得られる情報を使用し、YamakitaとFuruta等のLQ最適制御をQR法に基づき導出し、STCを達成する。外部トルクを重畳させると振りとアームは共に揺れることになるが、振り部分は安定性が保証されているので倒れることはない。また、アーム部分は振り制御系がスライディングモードであるなら、STCにより安定した動作が確保される。したがって、安全に基本パラメータ推定のための情報を計測できる。この方法は操業中のプラントに摂動信号を加えて動特性推定の情報を得る際に従来から採用されている手法[4]であり、短時間であれば許容されると考えられる。このように2種類の適応機構を使用して適応安定化制御系を実現する。さらに、振り部分の安定化に用いたVSS適

応制御のロバスト化を図るために、 $\sigma$ -修正法[5]を応用したVSSロバスト適応制御則を提案する。そして、以上の手法に対する有効性を実証するために、全ての初期パラメータを未知としたシミュレーション及び実験を実施した。

結果として、振り部分への外乱に対して、提案したVSSロバスト適応制御則の有効性も確認された。本手法は摂動信号の重畳可能な不安定未知パラメータ系の適応制御法として有効と考えられる。

## 2 回転倒立振子の運動モデル

回転型倒立振子の簡略化した運動モデル図及び実験機をそれぞれFig.1及びFig.2に示す。第1リンクの回転アームには100[V]-250[W]のDCモータが直結し、振り部分は24[V]-6.4[W]のミニDCモータにラックとピニオン機構による伸縮可能な構成としている。

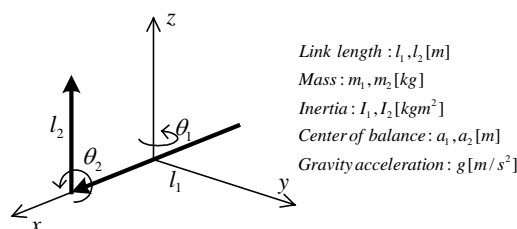


Fig. 1: Diagram of the rotary inverted pendulum.



Fig.2: Experimental device of the inverted pendulum.

Fig.1 より, 基本パラメータに関する線形関係式は

$$\begin{aligned}\tau &= M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + B\dot{\theta} + D(\dot{\theta}) \\ &= \Phi^T(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\zeta\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{cases} \Phi^T(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) := \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 & \phi_{12} & \phi_{13} & \dot{\theta}_1 & 0 & \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ 0 & \phi_{22} & \phi_{23} & 0 & \dot{\theta}_2 & 0 \end{bmatrix} \\ \phi_{12} := S_2^2 \ddot{\theta}_1 + 2S_2 C_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2, & \phi_{13} := l(S_2 \dot{\theta}_2^2 - C_2 \ddot{\theta}_2) \\ \phi_{22} := \ddot{\theta}_2 - S_2 C_2 \dot{\theta}_1^2, & \phi_{23} := -lC_2 \dot{\theta}_1 - gS_2 \\ \zeta^T := [J_1 & J_2 & r & b_1 & b_2 & d_1], & \tau^T = [\tau_1 & 0] \end{cases}\quad (2)$$

但し,  $J_1 = I_1 + m_1 a_1^2 + m_2 l^2$ ,  $l = l_1/2$ ,  $J_2 = I_2 + m_2 a_2^2$ ,  
 $r = m_2 a_2$ ,  $S_2 = \sin \theta_2$ ,  $C_2 = \cos \theta_2$

として表せる. ここで,  $\Phi(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  は regressor 行列,  $\zeta$  は基本パラメータである. また,  $g$  は重力加速度,  $\tau_1$  はモータからの入力トルク,  $b_1, b_2$  は粘性摩擦係数,  $d_1$  はアームのクーロン摩擦係数である. 振子部分のクーロン摩擦は微小とみなし無視する.

### 3 VSS適応制御による振子系の安定化

(1)式を平衡点近傍で線形化を行うと, 倒立振子の運動方程式は次式となる.

$$\begin{bmatrix} J_1 & -rl \\ -rl & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -rg\theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \text{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_\tau i \\ 0 \end{bmatrix}\quad (3)$$

ここで,  $k_\tau$  はトルク定数,  $i$  はモータ電流で入力トルクを  $\tau_1 = k_\tau i$  としている. (3)式から振子系方程式は

$$(\det M)\ddot{\theta}_2 + J_1 b_2 \dot{\theta}_2 - J_1 r g \theta_2 + r l b_1 \dot{\theta}_1 + r l d_1 \text{sgn}(\dot{\theta}_1) = r l k_\tau i\quad (4)$$

$$\det M := J_1 J_2 - (rl)^2, \quad \det M > 0\quad (5)$$

となる. ここで, 振子の回転角度  $\theta_2$  に対して目標とする角度を  $r_f$  とし, その誤差  $e$  を

$$e := \theta_2 - r_f\quad (6)$$

とする. また, 参照速度  $\dot{\theta}_r$  を

$$\dot{\theta}_r := \dot{r}_f - h e, \quad (h > 0)\quad (7)$$

と定義する. さらに, 切換関数  $s_c$  を

$$s_c := \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_r = \dot{e} + h e\quad (8)$$

と定義するとき, (4)式は不確定外乱を考慮して以下のように表すことができる.

$$\begin{cases} Y^T \alpha + H \dot{s}_c = i + w \\ H := (\det M) / r l k_\tau \\ \dot{s}_c := \ddot{\theta}_2 - \ddot{\theta}_r \end{cases}\quad (9)$$

但し,  $w$  は等価外乱項,  $Y$  は計測値から構成されるベクトル,  $\alpha$  はパラメータベクトルである. 本研究では, VSS ゲインが過大にならない点を考慮し, 不確定性の少ない次の(10)式を用いることにする.

$$\begin{cases} Y^T = [\ddot{\theta}_r & \dot{\theta}_2 & \theta_2 & \dot{\theta}_1 & \text{sgn}(\dot{\theta}_1)] \\ \alpha^T = [H & J_1 b_2 / r l k_\tau & -J_1 g / l k_\tau & b_1 / k_\tau & d_1 / k_\tau] \end{cases}\quad (10)$$

$$\ddot{\theta}_r := \ddot{r}_f - h \dot{e}\quad (11)$$

以上の仮定の下で次の定理が成立する.

[定理 1] VSS 適応制御の操作量及びパラメータ適応則をそれぞれ次式とする.

$$\begin{cases} i = Y^T \hat{\alpha} - k_v \text{sgn}(s_c), & (k > 0) \\ \dot{\alpha}^T := [\hat{\alpha}_1 & \hat{\alpha}_2 & \hat{\alpha}_3 & \hat{\alpha}_4 & \hat{\alpha}_5], \end{cases}\quad (12)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y s_c, \quad (\Gamma > 0).\quad (13)$$

ここで,  $k_v$  は VSS ゲインであり,  $\Gamma$  は適応則ゲインで対称行列とする. 目標角  $r_f$  が安定に与えられるとき,  $t \rightarrow \infty$  で  $s_c \rightarrow 0$  となる. 即ち,  $e \rightarrow 0$  となり, 振子角  $\theta_2$  は目標角  $r_f$  に追従する.

(証明) 詳細は省略し, 定理 2 で示す.

尚, (12)式操作量の切換えによって生じるチャタリングを防止する為に, 符号関数  $\text{sgn}(s_c)$  は次の飽和関数  $\text{sat}(s_c/\delta)$  で代用している.

$$\text{sat}(s_c/\delta) := \begin{cases} \text{sgn}(s_c) & |s_c| > \delta \\ s_c/\delta & |s_c| \leq \delta \end{cases}\quad (14)$$

### 4 基本パラメータ推定モデルと適応則

定理 1 によって振子の安定性が保証された状態で操作量に摂動信号を付加して倒立振子の基本パラメータを推定する. (1)式を次式のようにして使用する.

$$\begin{cases} i = \Phi^T(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\sigma, & i := [i \ 0]^T \\ \sigma := \zeta/k_\tau = [\sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 & \sigma_4 & \sigma_5 & \sigma_6]^T \\ \sigma_1 := J_1/k_\tau, & \sigma_2 := J_2/k_\tau, & \sigma_3 := r/k_\tau \\ \sigma_4 := b_1/k_\tau, & \sigma_5 := b_2/k_\tau, & \sigma_6 := d_1/k_\tau \end{cases}\quad (15)$$

また, 推定モデルは

$$\begin{cases} v(k) = \Phi^T(k)\hat{\sigma}(k) \\ \hat{\sigma}(k) := [\hat{\sigma}_1(k) & \hat{\sigma}_2(k) & \hat{\sigma}_3(k) & \hat{\sigma}_4(k) & \hat{\sigma}_5(k)]^T \end{cases}\quad (16)$$

であり,  $\Phi(k)$  は(2)式の行列  $\Phi(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  の  $k$  時刻を表す. 今, 計測値はモータ電流  $i$  と各回転角度  $\theta_1, \theta_2$  のみである.

推定に必要な運動データ  $\Lambda = \{i(k), \theta(k), \dot{\theta}(k), \ddot{\theta}(k)\}$  において角速度  $\dot{\theta}(k)$  と角加速度  $\ddot{\theta}(k)$  は信号処理によって求められる. また, 各フィルタ応答は次式の離散計算により求められる.

$$\begin{cases} i_a = G_0 i, & \theta_a = G_0 \theta, & \dot{\theta}_a = G_1 \dot{\theta}, & \ddot{\theta}_a = G_2 \ddot{\theta} \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_a) = G_0 \text{sgn}(\dot{\theta}), & \dot{\theta} := \{\theta(k) - \theta(k-1)\}/T \\ G_1 := s G_0, & G_2 := s^2 G_0, & T: \text{sampling period.} \\ G_0 := \frac{1}{(1 + \tau_f s)^3}, & s = \frac{z-1}{T(z+1)} \end{cases}\quad (17)$$

逐次推定はサンプリング周期毎に(17)式から得られる運動データ  $\Lambda_a = \{i_a(k), \theta_a(k), \dot{\theta}_a(k), \ddot{\theta}_a(k)\}$  を用いて実施される. 推定則は幾つか考えられるが, ノイズの影響は比較的少ないので, 次の最小 2 乗形一般化適応則[6]を使用する.

[最小 2 乗形一般化適応則]

パラメータ誤差  $\eta(k)$  が

$$\eta(k) := \sigma - \hat{\sigma}(k)\quad (18)$$

によって定義され, 応答の誤差式  $\varepsilon_a(k)$  が

$$\begin{cases} \varepsilon_a(k) := i(k) - \Phi^T(k)\hat{\sigma}(k) \\ \quad := \Phi^T(k)\eta(k) \end{cases} \quad (19)$$

であるとき，推定パラメータ  $\hat{\sigma}(k)$  が次の適応則

$$\eta(k) = \eta(k-1) - \rho(k)F(k-1)\Phi(k)\varepsilon_a(k) \quad (20)$$

$$F^{-1}(k) = \lambda_1(k)F^{-1}(k-1) + \lambda_2(k)\Phi(k)\Phi^T(k) \quad (21)$$

$$\begin{cases} 0 < F(0), & 0 < F^{-1}(0) \\ 0 < \lambda_1(k) \leq 1, & 0 < \lambda_2(k), \quad \rho(k) := \lambda_2(k)/\lambda_1(k) \end{cases} \quad (22)$$

によって調整されるならば， $\Phi(k)$  の有界，非有界にかかわらず  $\varepsilon_a(k) \rightarrow 0, (k \rightarrow \infty)$  が保証される．

## 5 回転アーム系の安定化

(3)式から回転アーム系方程式は次式となる．

$$rl\ddot{\theta}_1 = J_2\ddot{\theta}_2 + b_2\dot{\theta}_2 - rg\theta_2 \quad (23)$$

アーム部分は振子制御系がスライディングモードであるなら，定理 1 より振子角度  $\theta_2$  は目標角度  $r_f$  に追従する．

即ち， $\theta_2 = r_f$  とみなして  $\theta_2$  を  $r_f$  で置き換えると(23)式は

$$\ddot{\theta}_1 = -(g/l)r_f + (b_2/rl)\dot{r}_f + (J_2/rl)\ddot{r}_f \quad (24)$$

と記述できる．回転アームの制御方策として，未知パラメータを推定しながら制御器を調整する STC を実施する．基本パラメータ推定値  $\hat{\sigma}(k)$  を用いることで(24)式のパラメータを表現する．安定化制御器に LQ 制御を使用するために，(24)式を  $\hat{\sigma}(k)$  を用いた状態方程式で記述すると

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{r}_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g/l & \rho_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \rho_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f \quad (25)$$

$$\rho_1 := \hat{\sigma}_5(k)/\hat{\sigma}_3(k)l, \quad \rho_2 := \hat{\sigma}_2(k)/\hat{\sigma}_3(k)l \quad (26)$$

となる．振子目標角加速度  $\ddot{r}_f$  を制御入力と考えた(24)式のシステムにおいて，次の評価関数  $J$

$$\begin{cases} J = \int_0^\infty (x^T Q x + \ddot{r}_f^T R \ddot{r}_f) dt, \quad (Q \geq 0, R > 0) \\ x := [\theta_1 \quad \dot{\theta}_1 \quad r_f \quad \dot{r}_f]^T \end{cases} \quad (27)$$

を最小にするフィードバックゲイン  $F_o$  を制御周期毎に求めて更新する．

$$\begin{cases} \ddot{r}_f = F_o^T x, \\ F_o^T := [f_1 \quad f_2 \quad f_3 \quad f_4] \end{cases} \quad (28)$$

## 6 ロバスト性を向上させた VSS 適応制御系

定理 1 に示した(13)式の適応則は，振子部に突発的に外乱が加わると操作量が過大になる問題がある．したがって，外乱が継続的に加わるような場合を想定するとロバスト性を向上させることが重要である．この要求に対し， $\sigma$ -修正法を応用することにより，未知パラメータの事前情報を仮定しないで適応則の修正が可能となる．

[定理 2] (12)式の VSS 適応制御の操作量に対し，パラメータ適応則を(29),(30)式とする．また，(29)式のパラメータ  $\alpha$  は初期値を  $\alpha = 0$  とし，基本パラメータ推定値  $\hat{\sigma}(k)$  を用いて(31)式によって与えら

れるものとする．また， $\hat{\sigma}_3(k) \neq 0$  とする．

$$\begin{cases} i = Y^T \hat{\alpha} - k_v \text{sat}(s_c/\delta), \quad (k_v > 0) \\ \hat{\alpha}^T := [\hat{\alpha}_1 \quad \hat{\alpha}_2 \quad \hat{\alpha}_3 \quad \hat{\alpha}_4 \quad \hat{\alpha}_5], \end{cases} \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} := k_a \varphi - \Gamma^{-1} Y s_c, \quad (k_a > 0, \Gamma > 0) \quad (29)$$

$$\varphi := \alpha - \hat{\alpha} \quad (30)$$

$$\begin{cases} \alpha^T := [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4 \quad \alpha_5] \\ \alpha_1 := \frac{\hat{\sigma}_1(k)\hat{\sigma}_2(k) - \hat{\sigma}_3^2(k)l^2}{\hat{\sigma}_3(k)l}, \quad \alpha_2 := \frac{\hat{\sigma}_1(k)\hat{\sigma}_5(k)}{\hat{\sigma}_3(k)l} \\ \alpha_3 := -\frac{\hat{\sigma}_1(k)g}{l}, \quad \alpha_4 := \hat{\sigma}_4(k), \quad \alpha_5 := \hat{\sigma}_6(k) \end{cases} \quad (31)$$

ここで， $k_v$  は VSS ゲイン， $k_a$  はパラメータ誤差  $\varphi$  のゲイン， $\Gamma$  は適応則ゲインである．目標角  $r_f$  が安定に与えられ，(9)式のシステム外乱に関する次の条件  $|s_c| > \delta$  のとき， $|w| < k_v + k_a \|\varphi\|^2 \lambda_{\min}(\Gamma)/\delta$  (32)  $|s_c| \leq \delta$  のとき， $|w| < k_a \|\varphi\|^2 \lambda_{\min}(\Gamma)/\delta$  (33) の元で， $t \rightarrow \infty$  で  $s_c \rightarrow 0$  即ち， $e \rightarrow 0$  となり，振子角  $\theta_2$  は目標角  $r_f$  に追従する．

(証明) まず， $|s_c| > \delta$  では  $\text{sat}(s_c/\delta) = \text{sgn}(s_c)$  ゆえ

$$i = Y^T \hat{\alpha} - k_v \text{sgn}(s_c), \quad (k_v > 0) \quad (34)$$

でありリアプノフ関数の候補として次の正値関数  $V$

$$V = \frac{1}{2} H s_c^2 + \frac{1}{2} \varphi^T \Gamma \varphi \quad (35)$$

を考えると，その時間微分  $\dot{V}$  は(9)式，(34)式により

$$\begin{aligned} \dot{V} &= H s_c \dot{s}_c + \dot{\varphi}^T \Gamma \varphi / 2 + \varphi^T \Gamma \dot{\varphi} / 2 \\ &= s_c (i - Y^T \alpha + w) + \varphi^T \Gamma \dot{\varphi} \\ &= s_c [-k_v \text{sgn}(s_c) - Y^T \varphi + w] + \varphi^T \Gamma \dot{\varphi} \\ &= -k_v |s_c| + s_c w - \varphi^T \Gamma (\Gamma^{-1} Y s_c + k_a \varphi - \Gamma^{-1} Y s_c) \\ &\leq -|s_c| (k_v - |w|) - k_a \varphi^T \Gamma \varphi \\ &\leq \delta (|w| - k_v - k_a \|\varphi\|^2 \lambda_{\min}(\Gamma)/\delta) \\ &\quad \because \|\varphi\|^2 \lambda_{\min}(\Gamma) \leq \varphi^T \Gamma \varphi \leq \|\varphi\|^2 \lambda_{\max}(\Gamma) \end{aligned} \quad (36)$$

となり(32)式により， $\dot{V} < 0$  ( $s_c \neq 0$ ) となる．したがって，誤差システムは境界層  $\delta$  内へと導かれる．

また，切換関数  $s_c$  が  $|s_c| \leq \delta$  では操作量は次式

$$i = Y^T \hat{\alpha} - k_v s_c / \delta, \quad (k_v > 0) \quad (38)$$

であり，(35)式の時間微分  $\dot{V}$  は，同様に

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_c [-k_v s_c / \delta - Y^T \varphi + w] + \varphi^T \Gamma \dot{\varphi} \\ &= -k_v |s_c|^2 / \delta + s_c w - \varphi^T \Gamma (\Gamma^{-1} Y s_c - \varphi) \\ &\leq -|s_c| (k_v |s_c| / \delta - |w|) - k_a \varphi^T \Gamma \varphi \\ &\leq |s_c| \cdot |w| - k_a \varphi^T \Gamma \varphi \leq \delta |w| - k_a \varphi^T \Gamma \varphi \\ &\leq \delta |w| - k_a \|\varphi\|^2 \lambda_{\min}(\Gamma) \end{aligned} \quad (39)$$

となり(33)式により， $\dot{V} < 0$  ( $s_c \neq 0$ ) となる．

Q. E. D.

以上，飽和関数の代用により外乱に条件が加わるものの境界層  $\delta$  内には拘束可能なので，追従精度とロバスト性のトレードオフを踏まえて境界層幅  $\delta$  を決める必要がある．

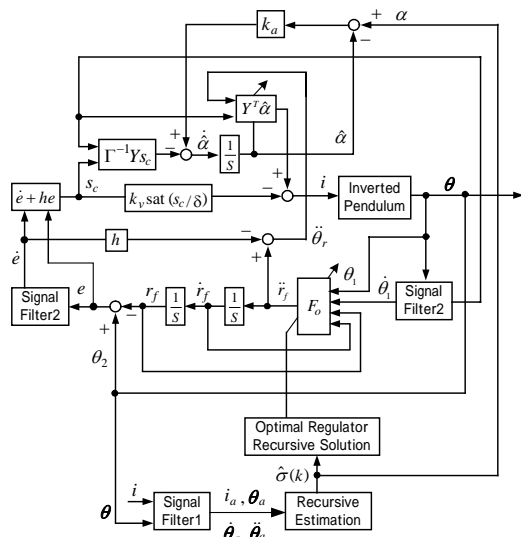


Fig. 3: Block diagram of VSS adaptive control system.

## 7 シミュレーション結果

本章では提案する手法を検証する為に、式(29)の適応則を用いた数値シミュレーションを実施する。シミュレーションの諸条件を Table 1. に示す。適応則ゲインとしてここでは、VSS 適応則パラメータの収束速度が速い  $K_a=1.5$  の場合を示す。開始から 4 秒間は STC の制御性能を高めるために振幅 1 [A], 周期 1 秒のパルス摂動信号を操作量に重畳させている。また、ロバスト性を検証する為に、振りへの外乱を考慮する。制御開始から 8, 10, 12, 14 秒後にそれぞれ 7 [deg] の突発外乱を振り子に与えた結果を示す。Fig.4(a)~(c)は倒立振子の運動データを示し、提案法では外乱を与えても不安定にはならず、レギュレーション特性が速やかであることがわかる。また、Fig.4(d)(e)は VSS 適応則パラメータの推移を示す。Fig.4(f)に示す基本パラメータ  $\hat{\sigma}$  は外乱の影響を若干受けるが、これに基づき導き出される Fig.4(g)のフィードバックゲインにほとんど変化がないことから、大きな影響はないと考えられる。Fig.4(h)の切換関数  $s_c$  も零近傍にあり妥当である。

この外乱によるシミュレーションにおいては基本パラメータ推定値  $\hat{\sigma}$  が安定した後の 8 秒時点から 2 秒間隔で突発外乱を与えている。しかし、これについては制御開始直後、 $\hat{\sigma}$  の推定過程において突発外乱を与えた場合であっても問題はないことが確認されている。

Table 1: Condition for control simulation.

coefficient in switching function : $h$	$h = 10$
VSS scalar gain in control input : $k$	$k = 2.0$
VSS adaptive gain : $\Gamma = \gamma I$	$\gamma = 10$
boundary layer in saturation function : $\delta$	$\delta = 0.5$
filter constant for estimation system: $\tau_f$ [sec]	$\tau_f = 0.03$
filter constant for control system: $\tau_v$ [sec]	$\tau_v = 0.01$
adaptive gain of RLS system : $F(0) = \kappa I$	$\kappa = 10^4$
sampling period : $T$ [sec]	$T = 0.002$
VSS adaptive gain of $\varphi$ : $k_a$	$k_a = 0.1, k_a = 1.5$
performance weight of $J$ : $Q = \text{diag}(100, 100, 1, 1), R = 1$	

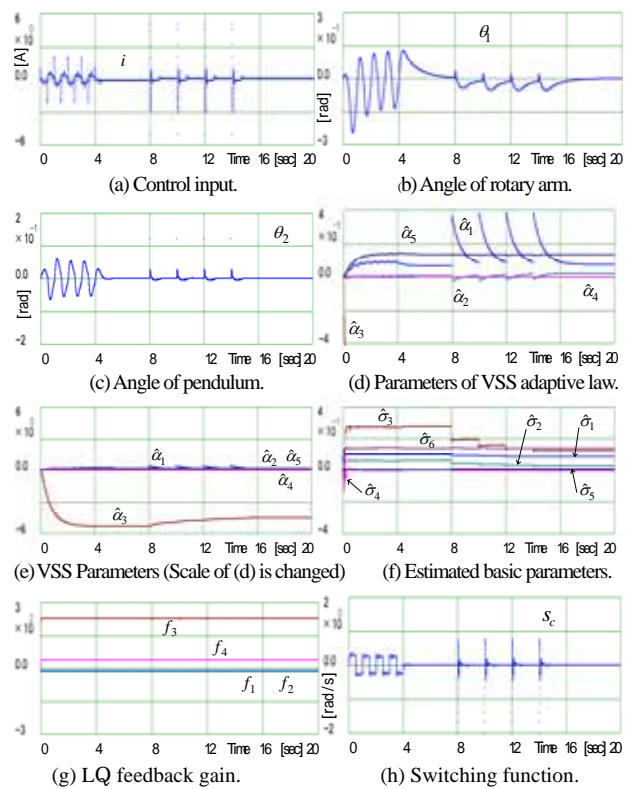


Fig.4: Control simulation with disturbance.

## 8 おわりに

本研究では、回転型倒立振子の基本パラメータを未知とした場合に対し、VSS ロバスト適応制御系設計の一方を提案した。提案法では倒立振子を振り子系と回転アーム系に分けることにより、振り子系に VSS 適応制御、アーム系に STC を設計して安定化を図った。その際、新たな VSS 適応則を提案し、飽和関数を使用する際の外乱条件を明らかにした。この提案法により、突発外乱に対して操作量が過大になる問題点を解決した。即ち振り部分の外乱に対するロバスト性を改善し、シミュレーション及び実機実験により検証を行った。大きな特徴として、STC で使用する基本パラメータの推定精度によらず安定性を確保できる点が挙げられる。今後は、提案法を応用して 2 足歩行ロボットなど不安定な機械系の適応制御系の検証を行う。

## 文献

- [1] J.-J. E. Slotine and W. Li, "Adaptive manipulator control: A Case study", IEEE Trans. AC-33, No.11, pp.995-1003 (1988)
- [2] M. Yamakita, K. Furuta, K. Konohara, J. Hamada and H. Kusano, "VSS Adaptive Control Based on Nonlinear Model for TITech Pendulum", Proc. IEEE IECON'92, pp.1488-1493 (1992)
- [3] G. A. Medrano-Cerda: "Robust computer control of an inverted pendulum", IEEE Contr. Syst. Magazine, pp.58-67 (1995)
- [4] K. J. Åström and B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison Wesley (1989)
- [5] P. A. Ioannou and P. V. Kokotovic: "Robust Redesign of Adaptive Control" IEEE Trans. AC-29, No.3, pp.202-211 (1984)
- [6] S. Shinnaka: Adaptive Algorithm, Sangyo tosho Publishing (1990) (in Japanese)  
新中新二：適応アルゴリズム，産業図書（1990）