

パラメータ数を減じた RLS 推定則による車輪型倒立振り子 ロボットの適応安定化制御

藤田 廉*¹ 下山 修*¹ 平田 弘志*²

Adaptive Stabilization Control for a Wheeled Inverted Pendulum Robot by Reducing Parameter Numbers of a RLS Estimation Law

by

Ren Fujita, Osamu Shimoyama and Hiroshi Hirata

(received on Oct. 30, 2013 & accepted on Dec. 21, 2013)

Abstract

Many researchers are very interested in the stabilization method, which is indispensable to control an unstable system. Inverted pendulum models are well known as unstable experiment equipment that is easily able to validate the control theory; because those implement compares favorably with aircraft etc. in expense. 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 inaccuracy concerning the design parameter is useful to WIP robot system. The control system stabilizes the pendulum of WIP robot with unknown parameter except wheel radius, and the necessary information for the stabilization of whole system is simultaneously measured under real time operating. This paper proposes that such VSS adaptive control system as tracking the reference input is applied to the pendulum of WIP and the wheel part is also stabilized by means of self-tuning control (STC) that assures the boundary reference angle of the pendulum. The distinct feature of proposed method does not only reduce the estimated parameters of STC system but also achieve VSS adaptive control system without perturbation signal. Finally, the validity of the proposed adaptive system is proved through some numerical simulations and practical experiment without perturbation signal.

Keywords: wheeled inverted pendulum, VSS adaptive control, self-tuning control, least squares type adaptive law

1. はじめに

現代の社会は航空機・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。制御が不可欠な不安定系の安定化手法は非常に興味深い。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、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¹⁾⁻⁴⁾と荷役目的の自律走行型ロボット⁵⁾⁻⁸⁾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。車輪型倒立振り子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。

本研究では車輪型倒立振り子ロボットを構成し、車輪の径以外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。倒立振り子の制御法として、たとえば振り子を下げた状態で、パラメータ推定後に振上げ制御の実施を計画するような方法は車輪型倒立振り子ロボットには運用上適切ではない。ロボットを未知パラメータ系として倒立制御を実施し、必要な情報は制御中に取得する方法が妥当である。

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

* 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

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^{9),10)}している。その制御系では振子を倒立させた状態で運転を開始し、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。このような制御法は本稿の車輪型倒立振り子ロボットの安定化という目的にも適した運転手法である。

研究室では車輪型倒立振り子ロボット研究の手始めとして、車輪が原点に戻る仕様の適応制御系設計法を報告した¹¹⁾。ここでは、STC構築の為に系全体の基本パラメータ（6個）を推定し実施した。その際、数多いパラメータの推定精度を向上させる目的で摂動トルクを操作量に重畳させ実施している。摂動信号の影響により、制御開始時に振子と車輪部分は共に若干揺れることになる。この摂動トルク重畳を排除して適応系を運用できればパーソナルモビリティ型ロボット（独立二輪駆動で前進・後退動作は振子部分に外力を与える仕様）への応用にも有用と考えられる。そこで、本研究では車輪型倒立振り子ロボットの振子部分に前報告と同様に目標値追従型のVSS適応安定化制御系を構成する。そのVSS系に対する目標値発生の為のSTC構築に係わる未知パラメータ（最大2個）のみを推定するように最小2乗逐次推定系を簡素化した。その結果、適応制御シミュレーションおよび実験を通して操作量に摂動信号を重畳しなくても適応系が調整可能となることが判明した。

2. 制御対象

車輪型倒立振り子ロボットの簡略化した運動モデル図と実験機モデル図をFig. 1及びFig. 2にそれぞれ示す。また、その物理パラメータをTable 1に示す。車輪シャフトには24[V]-20[W]のハーモニックギア付DCモータがタイミングプーリを介して連結されている。車輪角度はモータ1回転4000パルスの光学式エンコーダを使用し、ギア50により車輪1回転20万パルスとして検出している。また、倒立振り子部は車輪シャフトとボールベアリングを介した機構で構成され、振子角は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、以上の系の運動方程式について述べる。

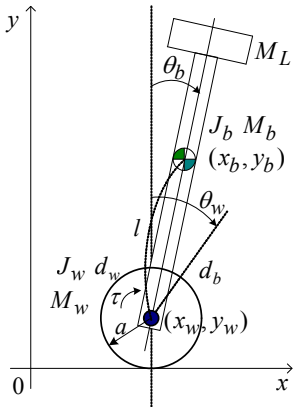


Fig. 1. Diagram of WIP.

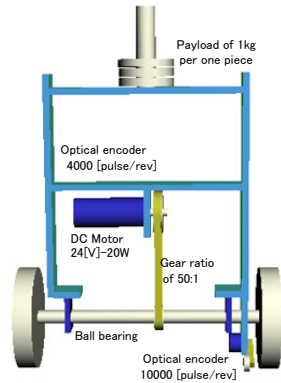


Fig. 2. Model of WIP.

Table 1. Parameters of WIP

θ_w	Wheel angle [deg]	θ_b	Pendulum angle [deg]
M_w	Mass of wheel [kg]	M_b	Mass of pendulum [kg]
l	Link length [m]	a	Wheel radius [m]
J_w	Momentum of Inertia of wheel [kgm ²]	J_b	Momentum of Inertia of pendulum [kgm ²]
d_w	Friction to wheel from motor	d_b	Friction coefficient of pendulum
M_L	Payload [kg]	τ	Wheel torque [Nm]

対象運動方程式の記述 Fig. 1の制御対象の運動方程式はEuler-Lagrange方程式を使用してシステムティックに導出され、次式で表される。

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

$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ はそれぞれ角度、角速度、角加速度、 τ はトルクであり、 $M(\theta)$ は慣性項、 $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ は非線形項、 $G(\theta)$ は重力項、 $D\dot{\theta}$ は粘性摩擦項である。

$$\begin{cases} M(\theta) = \begin{bmatrix} J_1 & RaC_b \\ RaC_b & J_2 \end{bmatrix}, & G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ -RgS_b \end{bmatrix}, \\ C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = \begin{bmatrix} -RaS_b\dot{\theta}_b^2 \\ 0 \end{bmatrix}, & D\dot{\theta} = \begin{bmatrix} d_w\dot{\theta}_w \\ d_b\dot{\theta}_b \end{bmatrix}, \\ \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ 0 \end{bmatrix}, & \tau_1 = k_\tau i, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_w \\ \theta_b \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{但し, } J_1 = J_w + M_w a^2 + M_b a^2, \quad J_2 = J_b + M_b l^2,$$

$$R = M_b l, \quad S_b = \sin \theta_b, \quad C_b = \cos \theta_b$$

また、 g は重力加速度、 τ_1 は駆動部の入力トルク、 k_τ はモータトルク定数、 i はモータ電流である。 d_w, d_b は粘性摩擦係数である。

制御対象の振り子を非線形系のままVSS適応制御系^{12),13)}を設計することも可能であるが、車輪系を線形STC系¹⁴⁾で設計する為、ここでは振り子を線形化して構成する。そこで、(1)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り子ロボットの運動方程式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} J_1 & Ra \\ Ra & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_w \\ \ddot{\theta}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -Rg\theta_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_w & 0 \\ 0 & d_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_w \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_w \text{sgn}(\dot{\theta}_w) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_\tau i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 E_w は車輪駆動部のクーロン摩擦係数である。尚、振り子部分のクーロン摩擦は微小とみなし無視している。

3. 制御系設計

本稿では対象を振り子系と車輪系に分け2種類の適応制御系を構築する。まず、車輪系の安定性と有界な振り目標角を保証するためにSTC系を構成し、次いでSTC系で導出される振り目標角に目標値追従型のVSS適応制御系を構築して全体系の安定化を図る制御系設計を行う。

〈3.1〉振り目標角を生成するSTC 車輪系の安定性を保

証し、次節で構成するVSS適応制御（スライディングモード制御¹⁵⁾：SMC）系に必要な有界な振子目標角 r_f を生成するSTC系は以下のように構成される。(3)式の車輪系

$$Ra\ddot{\theta}_w + J_2\ddot{\theta}_b - Rg\theta_b + d_b\dot{\theta}_b = 0 \quad (4)$$

において、振子角が目標角 r_f に一致する($\theta_b = r_f$)という仮定の元 θ_b を r_f で置き換えると、(4)式の車輪系方程式は

$$\ddot{\theta}_w = \rho_0 r_f + \rho_1 \dot{r}_f + \rho_2 \ddot{r}_f \quad (5)$$

$$\text{但し, } \rho_0 := g/a, \rho_1 := -d_b/Ra, \rho_2 := -J_2/Ra$$

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モビリティタイプのSTCを構成する。(5)式の車輪系未知パラメータは後述の逐次パラメータ推定により推定される。また、安定化制御器にLQ制御を使用するために、(5)式を以下の状態方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_w \\ \dot{r}_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \rho_0 & \rho_1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_w \\ r_f \\ \dot{r}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{r}_f \quad (6)$$

で記述する。振子目標角加速度 \ddot{r}_f を制御入力とする(6)式の未知パラメータ系において、パラメータ ρ_1, ρ_2 を逐次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 J

$$\begin{cases} J = \int_0^\infty (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \ddot{r}_f^T R \ddot{r}_f) dt, & (\mathbf{Q} \geq 0, R > 0) \\ \mathbf{x}^T := [\dot{\theta}_w \quad r_f \quad \dot{r}_f] \end{cases} \quad (7)$$

を最小にする次のフィードバックゲイン \mathbf{F}_o を制御周期毎に求め

$$\begin{cases} \ddot{r}_f = -\mathbf{F}_o^T \mathbf{x}, \\ \mathbf{F}_o^T := [f_1 \quad f_2 \quad f_3] \end{cases} \quad (8)$$

を更新する。ここでは、(6)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求める固有ベクトル法を採用している。また、文献16)に基づきQR法ルーチン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て、実時間処理に適するように独自開発している。このSTCにおいて基本パラメータ推定値に偏りが生じてもLQ規範により導出される系は常に安定系である為、倒立振子ロボットの車輪角度 θ_w を安定にする目標角加速度 \ddot{r}_f が求められる。この \ddot{r}_f を積分して有界な振子目標角 r_f を得ている。

〈3.2〉車輪系の未知パラメータ逐次推定 文献11)ではSTC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、全系の基本パラメータ数は6個存在し、推定則はベクトル形のものを使用して実施した。また、 ρ_i の算出に割算を使用する為、ゼロ割対策が必要であった。そこで、本論文の特徴の一つである未知パラメータ数を減らし、基本パラメータ推定値を使用しない最小2乗パラメータ逐次推定則について説明する。

前節で示した振子系(5)式は $\rho_0 := g/a$ が既知であることに留意すると2個の未知パラメータ ρ_i ($i=1,2$)を使用して定式化されている。実際には ρ_i は以下に示す逐次推定値 $\hat{\rho}_i(k)$ により置き換えられる。まず、推定対象(5)式は

$$\begin{cases} v := \ddot{\theta}_w - (g/a)\theta_b = \varphi^T(\dot{\theta}_b, \ddot{\theta}_b)\boldsymbol{\rho} \\ \varphi^T(\dot{\theta}_b, \ddot{\theta}_b) := [\dot{\theta}_b \quad \ddot{\theta}_b] \\ \boldsymbol{\rho}^T := [-(d_b/Ra) \quad -(J_2/Ra)] \end{cases} \quad (9)$$

のように記述される。また、推定モデルを次式とする。

$$\begin{cases} v_m(k) = \varphi^T(k)\hat{\boldsymbol{\rho}}(k) \\ \hat{\boldsymbol{\rho}}^T(k) := [\hat{\rho}_1(k) \quad \hat{\rho}_2(k)] \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 $v_m(k)$ は k 時刻におけるモデル応答出力、 $\varphi(k)$ は同じく k 時刻における振子角速度と角加速度からなるリグレッサベクトル $\varphi(\dot{\theta}_b(k), \ddot{\theta}_b(k))$ を表す。いま、計測値はモータ電流 i と各回転角度 θ_w, θ_b のみである。また、推定に必要な運動データ $\Lambda = \{\boldsymbol{\theta}(k), \dot{\boldsymbol{\theta}}(k), \ddot{\boldsymbol{\theta}}(k)\}$ 、 $\boldsymbol{\theta}^T(k) = [\theta_w(k), \theta_b(k)]$ は(11)式のデジタル信号処理によって求められる。

$$\begin{cases} q = G_0\theta, \quad \dot{q} = G_1\dot{\theta}, \quad \ddot{q} = G_2\ddot{\theta} \\ G_1 := sG_0, \quad G_2 := s^2G_0, \quad T: \text{sampling period.} \\ G_0 := 1/(1+\tau_f s)^3, \quad s = C_T(z-1)/(z+1), \quad C_T = 2/T \end{cases} \quad (11)$$

さらに、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^{17),18)}をFig. 3に示す。また、パラメータ逐次推定はサンプリング周期毎に(11)式から得られる運動データ $\Lambda_a = \{q(k), \dot{q}(k), \ddot{q}(k)\}$ 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¹⁹⁾に基づく適応則を用いることにより推定値 $\hat{\boldsymbol{\rho}}(k)$ を得ている。

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

$$\boldsymbol{\eta}(k) := \boldsymbol{\rho} - \hat{\boldsymbol{\rho}}(k) \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_a(k) := v(k) - \varphi^T(k)\boldsymbol{\rho}(k) = \varphi^T(k)\boldsymbol{\eta}(k) \quad (13)$$

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

$$\boldsymbol{\varepsilon}_p(k) := v(k) - \varphi^T(k)\hat{\boldsymbol{\rho}}(k-1) \quad (14)$$

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(9)式のリグレッサ $\varphi(k)$ がPE (Persistence of Excitation)性を満たし、推定パラメータ $\hat{\boldsymbol{\rho}}(k)$ が次の適応則

$$\boldsymbol{\eta}(k) = \boldsymbol{\eta}(k-1) - \beta(k)\mathbf{F}(k-1)\varphi(k)\boldsymbol{\varepsilon}_a(k) \quad (15)$$

$$\mathbf{F}^{-1}(k) = \lambda_1(k)\mathbf{F}^{-1}(k-1) + \lambda_2(k)\varphi(k)\varphi^T(k) \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} 0 < \mathbf{F}(0), & 0 < \mathbf{F}^{-1}(0) \\ 0 < \lambda_1(k) \leq 1, & 0 < \lambda_2(k), \quad \beta(k) := \lambda_2(k)/\lambda_1(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

によって調整されるならば、 $\varphi(k)$ の有界、非有界にかかわらず、 $\boldsymbol{\varepsilon}_a(k) \rightarrow \mathbf{0}$ 、($k \rightarrow \infty$)が保証され、パラメータ推定値 $\hat{\boldsymbol{\rho}}(k)$ は指数収束し、一致推定値となる。 ■

また、適応則の実際は重み係数を以下の $\lambda_1(k) = \lambda$ 、 $\lambda_2(k) = 1$ とした重み付き最小2乗アルゴリズムにして実施している。

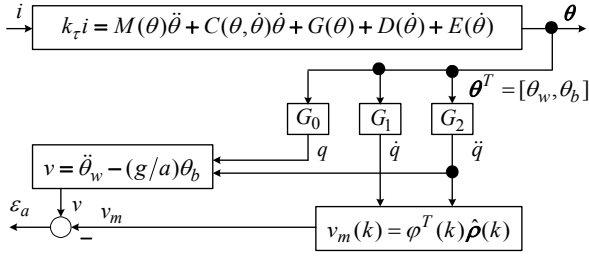


Fig. 3. Signal processing system for the motion data.

$$\begin{cases} \boldsymbol{\eta}(k) = \boldsymbol{\eta}(k-1) - \mathbf{A}(k) \boldsymbol{\varepsilon}_p(k) \\ \mathbf{F}(k) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{I} - \mathbf{A}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k)] \mathbf{F}(k-1) \\ \mathbf{A}(k) := \frac{\mathbf{F}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{F}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)} \end{cases} \quad (18)$$

また、重み λ は次式

$$\lambda := \mu \lambda + (1 - \mu), \quad 0.98 < \lambda(0) \leq 1 \quad (19)$$

とし、定数 μ は $\mu = 0.99$ を使用した。

以上のパラメータ逐次推定において、倒立振り子が安定している状態では平衡点近傍での入出力値しか得られない為、PE性が十分満たされないことがある。このような場合には、制御信号にパルス性の摂動信号を重畳してPE性の向上を図ることが必要である。この手法は操業中のプラントに摂動信号を重畳して動特性推定の情報を得る手段として従来から使用¹⁴⁾されているもので、短時間ならば許容されると考えられる。本論文においては可能な限り摂動信号を使用しないでパラメータ逐次推定を試みることに留意する。

〈3.3〉 振り子の安定化 前節のS T C構成において ($\theta_b = r_f$) という仮定をした。ここでは、この仮定を満足する有界な振り目標角 r_f に追従する目標値追従形のV S S適応制御系を設計する。この制御系により未知パラメータを有する不安定な振り子の安定性が保証される。

(3)式から振り系方程式は

$$-\det M \ddot{\theta}_b - J_1 d_b \dot{\theta}_b + J_1 M_b l g \theta_b + R a d_w \dot{\theta}_w + R a E_w \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_w) = R a k_\tau i \quad (20)$$

$$\det M := J_1 J_2 - (R a)^2, \quad \det M > 0 \quad (21)$$

となる。このとき、振り子の回転角度 θ_b に対して目標とする角度を r_f とし、その誤差 e を

$$e := \theta_b - r_f \quad (22)$$

とする。また、参照速度 $\dot{\theta}_r$ を

$$\dot{\theta}_r := \dot{r}_f - h e, \quad (h > 0) \quad (23)$$

と定義する。さらに、切換関数 s_c を次のように

$$s_c := \dot{\theta}_b - \dot{\theta}_r = \dot{e} + h e \quad (24)$$

と定義する。(20)式の対象に対し不確定外乱を考慮して

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^T \boldsymbol{\alpha} + H \dot{s}_c = i + w \\ H := -\det M / R a k_\tau \end{cases} \quad (25)$$

のように表す。ここで、 w は等価外乱項、 $\boldsymbol{\alpha}$ はパラメータ、 \mathbf{Y}

は計測値から成るベクトルであり、次式で与えられる。

$$\begin{cases} \mathbf{Y}^T = [\ddot{\theta}_r, \dot{\theta}_b, \theta_b, \dot{\theta}_w, \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_w)] \\ \boldsymbol{\alpha}^T = [H, -J_1 d_b / R a k_\tau, J_1 g / a k_\tau, d_w / k_\tau, E_w / k_\tau] \end{cases} \quad (26)$$

以上の仮定の下で次の定理が成立する。

[定理] ^{9),10)} V S S適応制御の操作量 i を(27)式、パラメータ適応則を(29)式とする。

$$\begin{cases} i = \mathbf{Y}^T \hat{\boldsymbol{\alpha}} - k_v \operatorname{sat}(s_c / \delta), & (k_v > 0) \\ \hat{\boldsymbol{\alpha}}^T := [\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{\alpha}_4, \hat{\alpha}_5], \end{cases} \quad (27)$$

$$\operatorname{sat}(s_c / \delta) := \begin{cases} \operatorname{sgn}(s_c) & |s_c| > \delta \\ s_c / \delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (28)$$

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

ここで、 k_v はV S Sゲインであり、 k_a はパラメータ推定値 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ のゲイン、 $\boldsymbol{\Gamma}$ 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、(25)式の外乱に関する次の条件

$$|w| < k_v + k_a \|\hat{\boldsymbol{\alpha}}\|^2 \lambda_{\min}(\boldsymbol{\Gamma}) - |\boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\Gamma} \hat{\boldsymbol{\alpha}}| / \delta, \quad (|s_c| > \delta) \quad (30)$$

$$|w| < k_a \|\hat{\boldsymbol{\alpha}}\|^2 \lambda_{\min}(\boldsymbol{\Gamma}) - |\boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\Gamma} \hat{\boldsymbol{\alpha}}| / \delta, \quad (|s_c| \leq \delta) \quad (31)$$

の元で、 $t \rightarrow \infty$ で $s_c \rightarrow 0$ となる。即ち、 $e \rightarrow 0$ となり、振り角 θ_b は目標角 r_f に追従する。 ■

尚、(26)式 $\dot{\theta}_w, \dot{\theta}_b$ は θ_w, θ_b を入力とする擬似微分フィルタ

$$G_v := \frac{s}{1 + \tau_v s} \quad (32)$$

により算出している。以上の設計により倒立振り角 θ_b が目標角 r_f に素早く到達するスライディングモード制御系が成立する。

4. 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 a 以外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基本パラメータをそれぞれ Table 2 と Table 3¹¹⁾ に示す。さらに、適応制御で使用した諸定数を Table 4 に示す。制御対象は(1),(2)式の非線形運動方程式にクーロン摩擦項を加えたものを採用し、ルンゲクッタ4次、刻み時間 0.5[msec] で計算している。最初に、クーロン摩擦係数を $E_w = 0.01$ とし倒立振り初期角を 0.03[rad] としたシミュレーション実施例を示す。

Table 2. Motion Parameters of WIP robot.

M_w [kg]	M_b [kg]	l [m]	a [m]	k_τ [Nm/A]
2.545	3.386	0.250	0.090	2.90
J_w [kgm ²]	J_b [kgm ²]	d_w [kgms]	d_b [kgms]	E_w [Nm]
7.290×10^{-3}	8.536×10^{-2}	0.854	0.001	0.010/0.490

Table 3. Basic Parameters of WIP robot.

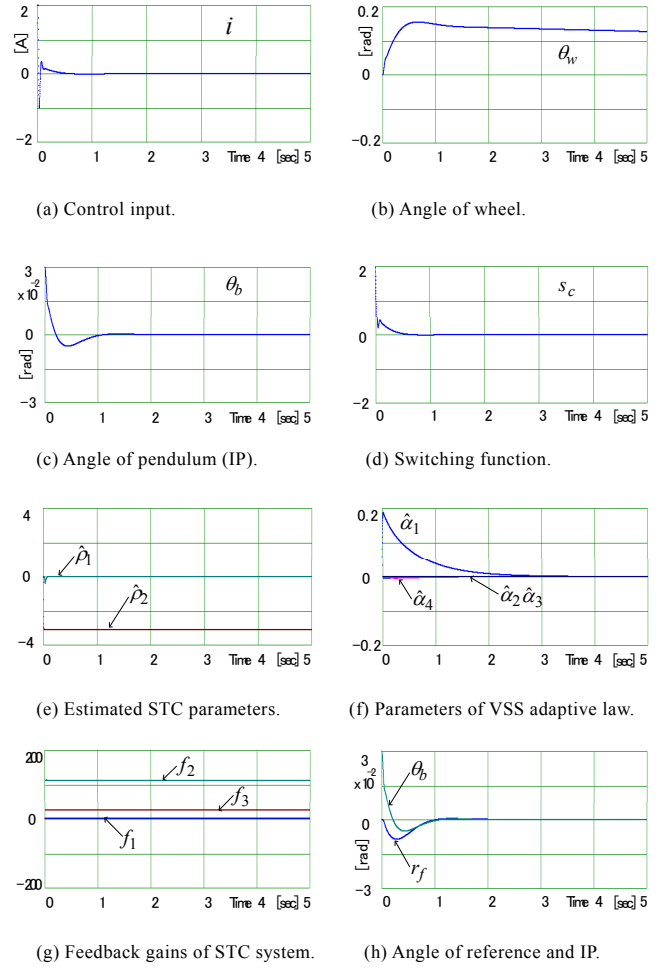
J_1	J_2	R	d_w	d_b	E_w
$7.533e-2$	$2.970e-1$	$8.465e-1$	$8.540e-1$	$1.000e-3$	0.01/0.49

Table 4. Conditions for VSS adaptive control.

coefficient in switching function : h	$h = 30$
VSS scalar gain in control input : k_v	$k_v = 1.5$
VSS adaptive gain of $\hat{\alpha}$: k_a	$k_a = 1.5$
VSS adaptive gain : $\Gamma = \gamma I$	$\gamma = 10$
boundary layer in saturation function : δ	$\delta = 1.0$
filter constant for control system : τ_v [sec]	$\tau_v = 0.05$
filter constant for estimation system : τ_f [sec]	$\tau_f = 0.03$
adaptive gain of RLS system : $F(0) = \kappa I$	$\kappa = 10^4$
sampling period : T [sec]	$T = 0.001$
performance weight of J : $Q = \text{diag}(5, 5, 1, 1)$, $R = 1$	

尚、この制御シミュレーションでは適応系実施において摂動信号を使用していないことに留意する。Fig. 4(a)~(c)はWIPロボットの運動データであり、Fig. 4(a)は操作電流、またFig. 4(b), (c)はそれぞれ車輪角 θ_w と振り角 θ_b を示している。クーロン摩擦係数が小さいこと、摂動信号を使用していないことから、操作電流は開始後1[sec]程度で速やかに小さくなり、振り角 θ_b も同様に平衡点に達している。しかし、車輪角 θ_w は(24)式の系を安定化している為、車輪角 θ_w は原点へは戻らないことが確認できる。Fig. 4(d)は切換関数 s_c であり、振り初期角の影響で開始時に大きな値を持つがVSS適応系の効果により、数ステップで速やかに境界層 $\delta = 1.0$ 以内に到達し、1[sec]程度で $s_c = 0$ 近傍に到達しスライディングモード制御(SMC)が達成されることが分かる。Fig. 4(e), (f)はSTC系パラメータ推定値 $\hat{\rho}$ とVSS系の可調整パラメータ $\hat{\alpha}$ の推移をそれぞれ示している。Fig. 4(e) $\hat{\rho}_i (i=1,2)$ の収束は非常に速い。また、Fig. 4(f)の $\hat{\alpha}$ も切換関数 s_c の減少と共に全て速やかに小さくなっている。Fig. 4(g)はSTC系のフィードバックゲイン f_i の推移を示している。制御開始直後に変化の少ない f_i が導出されている。この f_i は推定値 $\hat{\rho}_i$ に基づいて設計されるものであり、パラメータ推定が良好であることがわかる。最後にFig. 4(h)はSTC系で生成される振り目標角 r_f と振り角 θ_b を表示したものである。両者の差は誤差 e であり、開始時に見られる誤差はその後1[sec]程度で小さくなって行く。以上のシミュレーション結果より、クーロン摩擦係数が小さい場合には理想的なスライディングモード制御(SMC)に到達する結果が得られる。

次に、予備実験から得られた情報に基づき、クーロン摩擦係数を $E_w = 0.49$ と大きくしてみる。振り部分に振幅0.015[Nm]、周期8秒の正弦波トルク外乱 τ_d を与え、倒立振り初期角を前と同一としたシミュレーション結果を以下に示す。Fig. 5(a)~(c)はWIPロボットの運動データであり、Fig. 5(a)は操作電流 i 、Fig. 5(b), (c)はそれぞれ車輪角 θ_w と振り角 θ_b を示している。クーロン摩擦係数 E_w とトルク外乱 τ_d の影響により操作電流と振り角にリミットサイクル現象が発生している。車輪角 θ_w は徐々に増大し、25秒間で約1回転(56.5cm)程度の動きが確認できる。また、Fig. 5(d)は切換関数 s_c であり、先のシミュレーションと同様に振り初期角の影響で開始時に大きな値を持つが

Fig. 4. Simulation of adaptive control ($E_w = 0.01$).

VSS適応系の効果により、数ステップで速やかに境界層 $\delta = 1.0$ 以内に到達する。その後の制御動作中は境界層の0.2以内に拘束されているが $s_c = 0$ 近傍には到達しない。Fig. 5(e), (f)はSTC系パラメータ推定値 $\hat{\rho}$ とVSS系の可調整パラメータ $\hat{\alpha}$ の推移をそれぞれ示している。Fig. 5(e) $\hat{\rho}_i (i=1,2)$ の収束は前と同様、非常に速い。しかし、摂動信号を使用しない場合には振り部トルク外乱の影響により $\hat{\rho}_i$ が動揺する傾向があるので、5秒で推定を停止している。Fig. 5(g)はSTC系のフィードバックゲイン f_i の推移であり、制御開始直後に変化の少ない f_i が導出されている。Fig. 5(h)はSTC系で生成される振り目標角 r_f と振り角 θ_b を示している。その誤差 $e := \theta_b - r_f$ は $|e| \leq 0.01$ 程度の推移となる。

以上の実験機を想定したシミュレーションにおいてはクーロン摩擦と振り部分へのトルク外乱の影響により理想的なSMC系は得られないが切換関数 s_c を境界層内に拘束した制御性能となることが分かる。また、Table 5は両シミュレーションにおいて推定値 $\hat{\rho}_i$ に基づいて設計されたSTC系のゲイン f_i の最終値および真値との誤差を示している。両者共に良い精度でSTC系のゲイン f_i が導出される結果よりWIPシステムのパラメータを未知とする場合の適応制御法として、本提案法の有効性が確認できた。

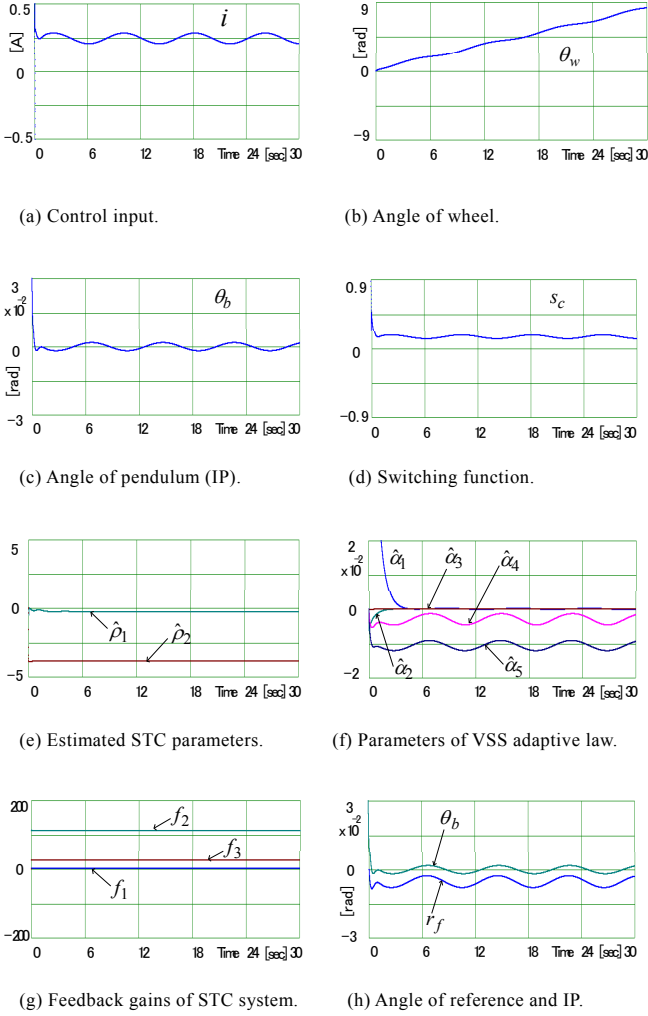


Fig. 5. Simulation of adaptive control ($E_w = 0.49$).

5. 実験結果

前章では提案法の有効性をシミュレーションにより確認した。本章では実機実験について説明する。本研究で使用した車輪型倒立振り子ロボットを Fig. 6 に示す。モータドライバは電圧指令入力型 1[V]-1[A]仕様のリニアアンプを使用し、制御用コンピュータとして、Core2 Quad Q9650 3.0GHz クロック CPU を使用し制御ソフトウェアは C 言語で開発した。尚、D/A 出力電圧の制限値は ±4 [V] としている。実験の諸条件はシミュレーションと同様に Table 4 の値を使用し、摂動信号を使用しないで実施している。Fig. 7(a)~(c) は WIP ロボットの運動データであり、Fig. 7(a) は操作電流 i 、Fig. 7(b), (c) はそれぞれ車輪角 θ_w と振り角 θ_b である。Fig. 7(d) は切換関数 s_c を示している。操作電流と切換関数にはリミットサイクル現象がほとんど現れなく

Table 5. STC feedback gain for WIP control system.

$E_w = 0.01$			$E_w = 0.49$		
f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
2.236	112.8	26.10	2.236	113.3	26.05
0 [%]	0.02 [%]	0.04 [%]	0 [%]	0.42 [%]	0.24 [%]



Fig. 6. Experimental device of WIP robot.

なり、振り角 θ_b でも不規則動作なリミットサイクル現象の判別が難しくなっている。車輪角 θ_w は徐々に増大し、10秒間で約 1 回転 (56.5cm) 程度の動きが確認できる。シミュレーション結果と少し異なる理由として、モビリティタイプの STC においては車輪角を最初の位置に戻す必要がない為実機へのトルク外乱の影響が少なくなってくるものと考えられる。また、切換関数 s_c はシミュレーション結果と同様に振り初期角の影響で開始時に大きな値を持つが VSS 適応系の効果により、数ステップで速やかに境界層 $\delta = 1.0$ 以内に到達する。その後の制御動作中は境界層の 0.3 近傍で推移しているが $s_c = 0$ 近傍には到達しない。Fig. 7(e), (f) は STC 系パラメータ推定値 $\hat{\rho}$ と VSS 系の可調整パラメータ $\hat{\alpha}$ の推移をそれぞれ示している。Fig. 7(e) $\hat{\rho}_i (i=1,2)$ の収束はシミュレーション結果と比べると遅くなっていることが分かる。(21)式に対し推定モデルを選定し、少ないパラメータを推定しているが、実機には不確定要素が存在するので粘性摩擦項に関連する $\hat{\rho}_1$ の整定が遅れてしまう。また、外乱の影響によりパラメータが動揺する傾向がみられるので、開始後 2 秒で推定を停止していることを付記する。Fig. 7(f) の VSS 系のパラメータではクーロン摩擦項に関連する $\hat{\alpha}_5$ の動きが少なくなっていることが分かる。これは先に述べた車輪角を最初の位置に戻す必要がないことにより、制御動作に車輪の反転動作が少なくクーロン摩擦の影響が出にくい状況になっていることから理解できる。Fig. 7(g) は STC 系のフィードバックゲイン f_i の推移である。推定パラメータ $\hat{\rho}_i (i=1,2)$ の整定が遅れていても、制御開始直後に変化の少ない f_i が導出されていることが分かる。Fig. 7(h) は STC 系で生成される振り目標角 r_f と振り角 θ_b を示している。その誤差 $e := \theta_b - r_f$ は $|e| \leq 0.01$ 程度の推移となり、シミュレーションと同程度の結果となる。以上の実験機による結果より、摂動信号を使用しなくても実用上支障のない制御結果が得られることが確認できた。

実機実験では、STC 系パラメータの推定精度を確認する意味から文献 11) で実施したのと同様に摂動信号を重畳した実験も試みている。その際の STC 系推定パラメータとフィードバックゲインを Fig. 8(a), (b) にそれぞれ示す。この場合、摂動信号により STC 系パラメータの推定精度が向上していると考えられるが、Fig. 7(e) と Fig. 8(a) の両推定値の違いによる設計ゲイン

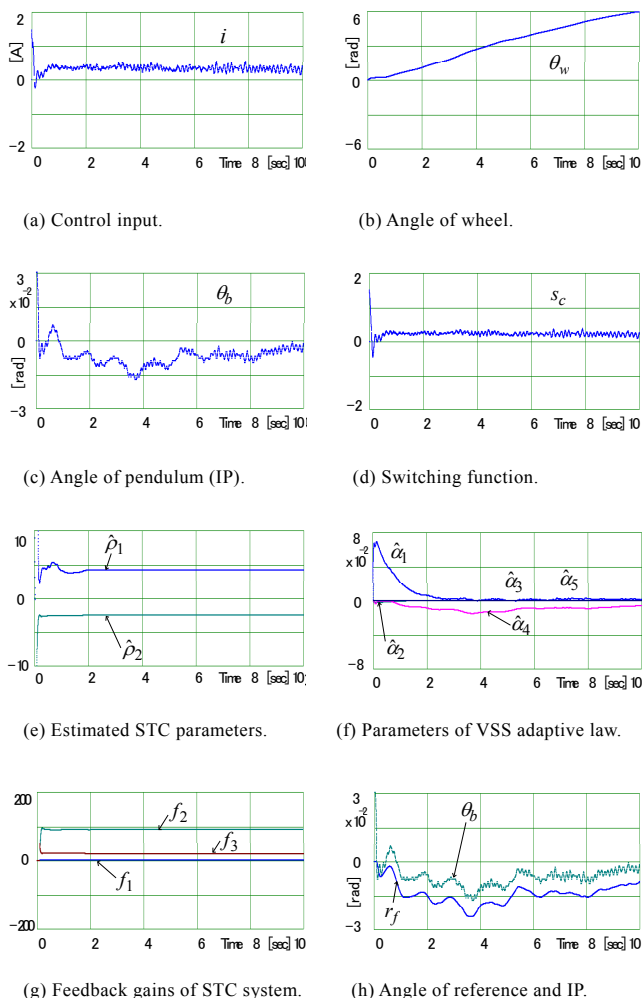


Fig. 7. Experiment result of WIP robot.

の違いは Fig. 7(g)と Fig. 8(b)からも僅かであり、制御性能にはほとんど影響が現われてこなかったことを付記する。さらに、実験中に人の手による外乱を加えても安定性に問題はなかったことに留意する。以上の実験結果からパラメータを未知とする場合の本適応制御法の有効性が検証できた。

6. おわりに

本研究では、車輪型倒立振り子ロボットのパラメータを未知とした場合に対する適応制御系設計の一方法(モビリティタイプ)を提案した。提案法では振り系安定化にVSS型の適応制御、車輪系安定化にモビリティタイプのSTC系と2つの適応制御器を構築してシステムの安定化を図った。VSS型適応制御には積分適応則ではなくシステム外乱に強い σ -修正法²⁰⁾適応

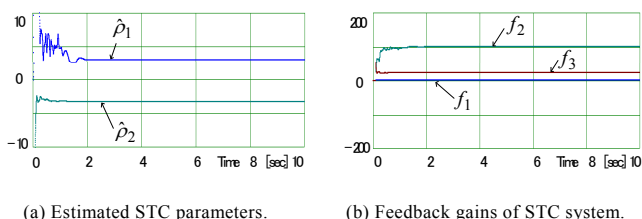


Fig. 8. Experiment result with perturbation signal.

則を使用して定式化を行った。また、STC系構成においては従来、基本パラメータ推定により実施してきた適応系を車輪系の未知パラメータを直接推定する手法に変更した。この変更により推定パラメータ数を6個から2個に減らすことができ、摂動信号も省くことが可能となった。さらに、数値シミュレーションと実機実験を実施し、提案法の有効性を検証した。今後はこの手法により、独立した車輪をもつ倒立振り子ロボットの実験を進める計画である。

参考文献

- 1) M. W. Spong: Project-Based Control Education: Plenary Lecture, 7th 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込んだ回転型倒立振り子のVSSロボバスト適応制御, 電気学会論文誌C, 128 - 4, 618/627 (2008)
- 11) 下山, 小谷, 平田: 車輪型倒立振り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, 12 - 2, 9/15 (2012)
- 12) J.-J. E. Slotine and W. Li: Applied Nonlinear Control, Prentice Hall (1991)
- 13) J.-J. E. Slotine and W. Li: Adaptive manipulator control - A Case study -, IEEE Trans. AC, 33 - 11, 995/1003 (1988)
- 14) K. J. Åström and B. Wittenmark: Adaptive Control, Addison Wesley (1989)
- 15) 野波, 田: スライディングモード制御, コロナ社 (1994)
- 16) 戸川: マトリクスの数値計算, オーム社 (1985)
- 17) 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)

- 18) 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)
- 19) 新中: 適応アルゴリズム, 産業図書 (1990)
- 20) P. A. Ioannou and P. V. Kokotovic: Robust Redesign of Adaptive Control, IEEE Trans. AC, 29-3, 202/211 (1984)