

# 1 脚ロボットに対する屈伸動作の安定化制御に関する研究

## Stabilized Motion Control of Bending and Stretching for One-legged Robot

○ 山田 佑樹(東海大学) 中山 裕介(東海大学)  
正 平田 弘志(東海大学) 大内 茂人(東海大学)

Yuki YAMADA, Tokai University Kitakaname1117, Hiratuka-shi, Kanagawa

Yusuke NAKAYAMA, Tokai University Hiroshi HIRATA, Tokai University Sigeto OUCHI, Tokai University

**Abstract:** This paper reports with respect to the stabilized motion control of a one-legged robot. Two kinds of controls are tried to the virtual inverted pendulum that is supposed through a center of gravity from the first joint. One of the controls is the optimal regulator control, and another is VSS adaptive control. In this experiment, the state of standing on tiptoe is considered to be initial posture. The sine wave-command disturbance is given to the second joint and third joint, and these controls are evaluated by the deviation angle of the pendulum. Finally, the validity of VSS adaptive control is confirmed through the experiment.

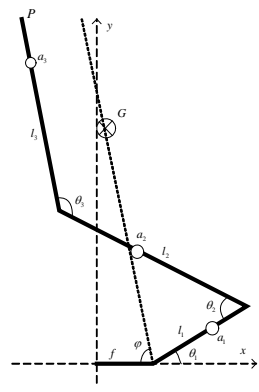
**Key words:** Regulator control, VSS adaptive control, Posture control, virtual inverted pendulum

### 1. はじめに

本研究では、荷重変化を伴う足運動の中で屈伸運動に着目し、安定化制御について研究を行う。人間のつま先部から腿骨部までの足の形を模した1脚ロボットを用いてつま先立ち状態での屈伸運動を考える。つま先立ちした初期姿勢において、重心を通る1本の倒立振子を仮想する。

まず、制御対象のパラメータが既知である場合、仮想倒立振子モデルに対する最適レギュレータ制御を第1関節に施す。さらに、第2関節と第3関節には正弦波指令を外乱として与え屈伸動作を行う。その際、1脚ロボットは重力項ならびに姿勢変化により、初期姿勢角からの偏差が発生するが、偏差角の小さな重心移動ができるような制御方式を試みる。

また、制御対象のパラメータが未知である場合、仮想倒立振子モデルに対してVSS型適応制御を第1関節に施す。VSS型適応制御は対象の不確定性に対してロバスト性が高く、実用的に優れた適応制御法だと評価されている。対象のパラメータが未知でも1脚ロボットが安定した屈伸動作を行い、最適レギュレータ制御よりロバスト性が高いことを確かめる。



$\theta_n$ : 第n関節の角度  $l_n$ : 第nリンクの長さ  $G$ : 合成重心  
 $a_n$ : 第nリンクの重心  $f$ : 着地部の長さ

Fig.1 Model of one-legged robot

### 2. 最適レギュレータによる安定化制御部の構成

Fig.1のように重心を通る1本の倒立振子を仮想する。仮想倒立振子の重心  $G(G_x, G_y)$  は各リンクの合成重心より

$$G_x = \frac{\sum m_n a_{nx}}{\sum m_n}, \quad G_y = \frac{\sum m_n a_{ny}}{\sum m_n} \quad (1)$$

であり、実機先端部までの長さを  $|P(P_x, P_y)|$  とすると

$$|P(P_x, P_y)| = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (2)$$

よって、仮想倒立振子の長さは  $L = |P(P_x, P_y)|$  となる。

仮想倒立振子の重心までの長さは、以下のように表せる。

$$a = \sqrt{|G_x - f|^2 + G_y^2} \quad (3)$$

これらを用いて、 $\theta = 90 - \varphi$  として仮想倒立振子の運動方程式を求めると、以下ようになる。

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} - Mga \sin \theta = \tau_r K_v \gamma e \quad (4)$$

$$\left( J = J_1 + \gamma^2 J_m, B = B_1 + \gamma^2 B_m, J_1 = \frac{1}{12} ML^2 + Ma^2 \right)$$

ただし、 $B_1$  は負荷軸粘性摩擦項、 $B_m$  はモータ軸粘性摩擦項、 $M$  は仮想振子の重さ、 $J_m$  はモータ軸慣性モーメント項、 $\tau_r$  はトルク定数、 $K_v$  は帰還電流定数、 $\gamma$  はギア比とする。式(4)を線形化すると、

$$\ddot{\theta} = -\frac{B}{J}\dot{\theta} + \frac{rg}{J}\theta + \frac{N}{J}e, \quad (\sin \theta = \theta, N = \tau_r K_v \gamma, r = Ma) \quad (5)$$

となり、運動方程式は以下のように表すことができる。

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ rg/J & -B/J \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ N/J \end{bmatrix} e \quad (6)$$

これにより、 $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$  と制御対象をおくことができ、最適レギュレータを設計することができる。

$$J = \int_0^\infty (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (7)$$

なる評価関数を最小化する状態フィードバックを求める。その解はリカッチ行列方程式

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0, \quad P > 0 \quad (8)$$

における正定対称解  $P$  より、以下の式より得ることが出来る。

$$u(t) = -R^{-1}B^T Px(t) \quad (9)$$

### 3. 最適レギュレータによる安定化実験

最適レギュレータ制御による1脚ロボットの屈伸動作に対する安定化制御を行う。1脚ロボットの各パラメータは既知であるとし、仮想倒立振子に対し最適レギュレータによる制御則を施す。第2、第3関節にはI-PD制御にて正弦波指令を外乱として与えている。以下に実験結果を示す。

Table.1 Optimal Regulator control experiment conditions

サンプリング周期	$T = 0.002$ [sec]
第2、第3関節への外乱	$\omega_1 = 20 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{4000}\right)$ [deg]
I-PD制御器の応答速度	$\tau_1 = 0.10, \tau_2 = 0.12$
ローパスフィルタの時定数	$\delta_n = 0.01$
最適レギュレータの重み	$Q = \text{diag}(10, 1), R = 9$
フィードバックゲイン	$F_1 = 8.2961, F_2 = 1.0992$

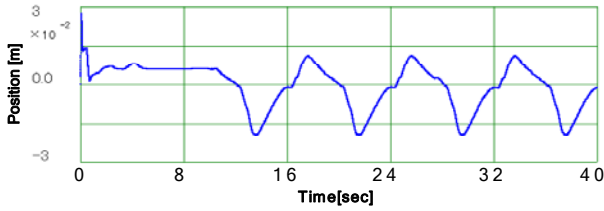


Fig.2 virtual pendulum's center of gravity horizontal position

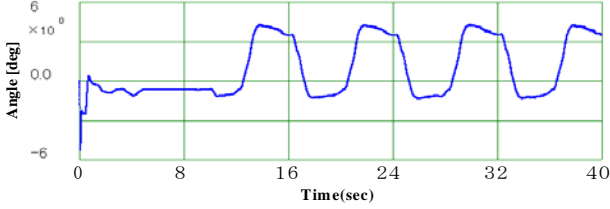


Fig.3 virtual pendulum's deviation from an initial angle

Fig.2は実機の足裏部の先端(つま先)を原点とした仮想倒立振子の重心の水平位置を表している。およそ $\pm 1.5[cm]$ の範囲に仮想倒立振子の重心があり、実機の足裏部上近辺に重心があることにより自重を支えることができているといえる。また、重力項と姿勢変化による外乱トルクによって偏差が発生するが、Fig.3より最適レギュレータによっておよそ $6[deg]$ 弱に抑えられていることが分かる。

#### 4. VSS 型適応制御による安定化制御部の構成

VSS 型適応制御を仮想倒立振子に適用する方法を述べる。振子が受ける反力などは外乱として扱われる。式(4)を次のように整理する。

$$a_0\ddot{\theta} + a_1\dot{\theta} + a_2\theta = e + \omega \quad (a^T = [J/N \quad B/N \quad -rg/N]) \quad (10)$$

ここで、切換関数を式(11)とすれば式(10)は式(12)となる。

$$s = \dot{\theta} + c\theta \quad (11) \quad Y^T a + Hs = e + \omega \quad (H = J/N) \quad (12)$$

計測ベクトル $Y$ とパラメータベクトル $a$ を式(13)とする。

$$\begin{cases} Y^T = [-c\dot{\theta} & \dot{\theta} & \theta] \\ a^T = [H & B/N & -rg/N] \end{cases} \quad (13)$$

制御入力を式(14)、適応則を式(15)とする。

$$e = Y^T \hat{a} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (14) \quad \dot{\hat{a}} = -\Gamma^{-1} Y s \quad (15)$$

ここで VSS ゲイン $k$ は正の定数で、適応ゲイン $\Gamma$ は正定行列である。リアプノフ関数を

$$V(t) = \frac{1}{2} [s H s + \tilde{a}^T \Gamma \tilde{a}] \quad (\tilde{a} = a - \hat{a}) \quad (16)$$

とすれば、リアプノフ関数の微分が

$$\dot{V}(t) = -(k|s| - s\omega) \leq -|s|(k - |\omega|) \leq 0 \quad (17)$$

となることにより、 $|\omega|$ より大きな $k$ を選んでおけば $s \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ が保証され、振子の安定性も保証される。

振子角度と目標角度との誤差に対する切換関数を定義し、上記の定理を用いることで振子を目標角へと制御させるサーボ型の VSS 型適応制御とすることができる。なお、実験では制御入力に存在する符号関数 $\operatorname{sgn}(s)$ をそのまま使用するのではなく、式(18)に示す飽和関数を使用する。

$$\operatorname{sat}(s/\delta) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s) & |s| > \delta \\ s/\delta & |s| \leq \delta \end{cases} \quad (18)$$

#### 5. VSS 型適応制御による安定化実験

VSS 型適応制御による 1 脚ロボットの屈伸動作に対する安定化制御を行う。1 脚ロボットの各パラメータは未知であるとし、仮想倒立振子に対し VSS 型適応制御を施す。第 2, 第 3 関節には正弦波指令を外乱として与え屈伸動作を行わせる。以下に実験結果を示す。

Table.2 VSS Adaptive control experiment conditions

サンプリング周期	$T = 0.002[\text{sec}]$
重み行列	$Q = \operatorname{diag}(100, 100, 1, 1), R = 1$
VSS ゲイン	$k = 2.0$
VSS 適応ゲイン	$\Gamma = 10.0$
切換関数の定数	$c = 10.0$
飽和関数の定数	$\delta = 0.30$

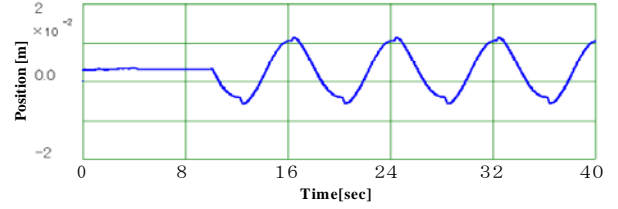


Fig.4 virtual pendulum's center of gravity horizontal position

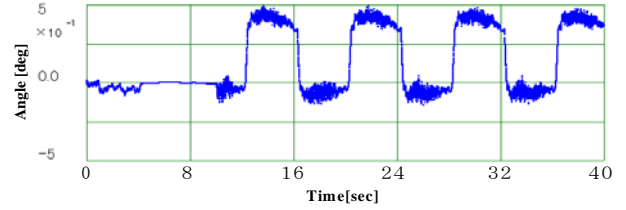


Fig.5 virtual pendulum's deviation from an initial angle

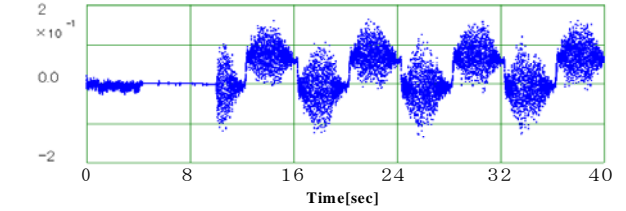


Fig.6 Switching function

Fig.4 から仮想倒立振子の重心が、およそ $1[cm]$ 以内で止まっており、実機の自重を支えられていることが分かる。Fig.5 で表される初期角からの変化量はおよそ $0.5[deg]$ であり、Fig.3 と比べても約 $1/10$ まで抑えられている。Fig.6 は切換関数 $s$ の値を示しているが、定数 $\delta$ の範囲内にあるため、チャタリングすることなく安定して制御できている。

#### 6. 結論

本研究で提案した VSS 型適応制御を用いることで、制御対象のパラメータが未知であっても制御可能であることが実験より証明できた。しかし、VSS 型適応制御はパラメータ未知の系に対し安定性を理論的に保証するもので、この適応則は外乱の影響を受けやすい。そこで、よりロバストにするためには、安定性を保証しつつ外乱による影響も軽減するように改良した VSS 型適応制御を考える必要がある。また、シミュレーションを行うことによって、あらかじめ適切なパラメータを決定し、安全性の高い実験を行うこともでき、様々な応用が効くと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 木和, 田崎, 柴田: "二足歩行ロボットの重心加速度制御による踏み出し動作", 電学誌 D 124.10, pp1017-1022 (2004)
- 2) 但馬, 菅: "1 脚ロボットによる跳躍動作の実現", 日本ロボット学会誌, Vol.25 No6 pp860-866 (2007)
- 3) 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", 電学誌 C 128.4, pp618-627(2008)