

重量変化を伴う1脚ロボットのつま先立ちによる 屈伸動作安定化制御

○山田 佑樹(東海大学) 平田 弘志(東海大学) 大内 茂人(東海大学)

Stabilized Control for Stretching Movement by Using Toe of One-legged Robot with Load Variation

* Yuki YAMADA, 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. VSS adaptive control is tried to the virtual inverted pendulum that is supposed through a center of gravity from the first joint. In this experiment, the state of standing on tiptoe is considered to be initial posture. Disturbance is that the sine wave command disturbance is given to the second joint and the third joint, or the load is changed. And VSS adaptive control is evaluated in the deviation angle of the pendulum caused in those disturbances. Finally, the validity of VSS adaptive control is demonstrated through some numerical simulations and practical experimental result.

Key words: VSS adaptive control, Posture control, virtual inverted pendulum, one-legged robot

1. はじめに

本研究では、慣性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。今回使用する実機は Fig.1 のような人間のつま先部から腿部までの足の形を模した1脚ロボットを用いて、つま先立ち状態という安定域の狭い状態での屈伸運動を考える。その際、下図のような、実機の重心を通り、屈伸運動により長さや重心が変化する倒立振子を仮想し、それを制御対象とする。これにより、逆運動学を使用することなく、ロボット脚を安定させることを目指す。また、今後、両足型にすることを考慮し、荷重変化にも対応できるようにシステムの構築も目指す。

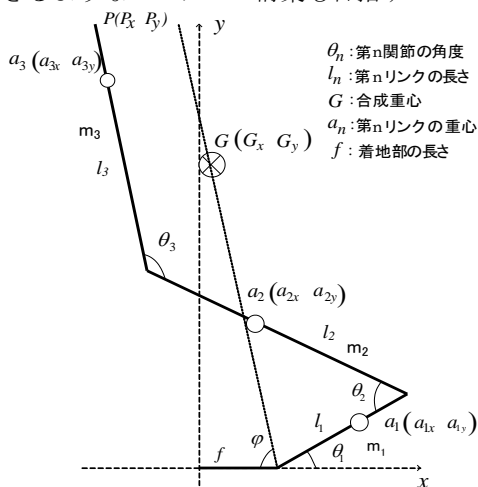


Fig.1 Model of one-legged robot

2. 1脚ロボットのモデル化

ラグランジュの運動方程式を用いて1脚ロボットの運動方程式を導出し、制御シミュレーションに用いる。その運動方程式は以下の式(1)で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} J_{11} + J_{a1}\gamma^2 & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} + J_{a2}\gamma^2 & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} + J_{a3}\gamma^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + h_f + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) \\ d_2 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) \\ d_3 \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) \end{bmatrix} + G_f = \tau \quad (1)$$

ただし、 $h_f = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T$, $G_f = [G_1 \ G_2 \ G_3]^T$, γ はギア比、 J_{an} を電気子慣性モーメント、 b_n 粘性摩擦、 d_n

をクーロン摩擦とし、

$$J_{11} = m_1 a_1^2 + m_2 l_1^2 + m_2 a_2^2 + m_3 l_1^2 + m_3 l_2^2 + m_3 a_3^2 - 2m_2 l_1 a_2 C_2 + 2m_3 l_1 a_3 C_{23} - 2m_3 l_2 a_3 C_3 - 2m_3 l_1 l_2 C_2 + J_1 + J_2 + J_3 \quad (2)$$

$$J_{12} = -m_2 a_2^2 - m_3 l_2^2 - m_3 a_3^2 - m_2 l_1 a_2 C_2 + m_3 l_1 l_2 C_2 - m_3 l_1 a_3 C_{23} + 2m_3 l_2 a_3 C_3 - J_2 - J_3 \quad (3)$$

$$J_{13} = m_3 a_3^2 + m_3 l_1 a_3 C_{23} - m_3 l_2 a_3 C_3 + J_3 \quad (4)$$

$$J_{21} = -m_2 a_2^2 - m_3 l_2^2 - m_3 a_3^2 + m_2 l_1 a_2 C_2 + m_3 l_1 l_2 C_2 - m_3 l_1 a_3 C_{23} + 2m_3 l_2 a_3 C_3 - J_2 - J_3 \quad (5)$$

$$J_{22} = m_2 a_2^2 + m_3 l_2^2 + m_3 a_3^2 - 2m_3 l_2 a_3 C_3 + J_2 + J_3 \quad (6)$$

$$J_{23} = -m_3 a_3^2 + m_3 l_2 a_3 C_3 - J_3 \quad (7)$$

$$J_{31} = m_3 a_3^2 + m_3 l_1 a_3 C_{23} - m_3 l_2 a_3 C_3 + J_3 \quad (8)$$

$$J_{32} = -m_3 a_3^2 + m_3 l_2 a_3 C_3 - J_3 \quad (9)$$

$$J_{33} = m_3 a_3^2 + J_3 \quad (10)$$

$$+ m_3 l_2 a_3 (\dot{\theta}_3 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3) S_3 + m_3 l_1 a_3 (\dot{\theta}_2^2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - 2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2) S_{23} \quad (11)$$

$$h_2 = (-m_2 l_1 a_2 \dot{\theta}_1^2 - m_3 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2) S_2 + m_3 l_2 a_3 (2\dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_3^2) S_3 + m_3 l_1 a_3 \dot{\theta}_1^2 S_{23} \quad (12)$$

$$h_3 = -m_3 l_2 a_3 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)^2 S_3 - m_3 l_1 a_3 \dot{\theta}_1^2 S_{23} \quad (13)$$

$$G_1 = g \{ (m_1 a_1 + m_2 l_1 + m_3 l_1) C_1 - (m_2 a_2 + m_3 l_2) C_{12} + m_3 a_3 C_{123} \} \quad (14)$$

$$G_2 = g \{ (m_2 a_2 + m_3 l_2) C_{12} - m_3 a_3 C_{123} \} \quad (15)$$

$$G_3 = g m_3 a_3 C_{123} \quad (16)$$

となる。ただし、

$$C_n = \cos \theta_n, C_{12} = \cos(\theta_1 - \theta_2), C_{23} = \cos(\theta_2 - \theta_3),$$

$$C_{123} = \cos(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3), S_n = \sin \theta_n, S_{12} = \sin(\theta_1 - \theta_2),$$

$$S_{123} = \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta_3) \text{ とする。}$$

また、 $g(x, t) = J(\theta)^{-1} [-h_f - G_f]$, $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$,

$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$ とし、式(1)を変形すると

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & -J(\theta)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} g(x, t) + \begin{bmatrix} 0 \\ J(\theta)^{-1} \end{bmatrix} \tau \quad (17)$$

となる。 $X = [\theta \ \dot{\theta}]^T$, $\dot{X} = [\dot{\theta} \ \ddot{\theta}]^T$ とすると、式(17)は

$$\dot{X} = FX + h + g\tau \quad (18)$$

となり、これをルンゲ・クッタ法によって解き、1脚ロボットの安定化制御シミュレーションに用いる。

3. VSS 型適応制御系の設計

3.1 重心計算

Fig.1 に示すような 1 脚ロボットの重心を通る長さ l の倒立振子を仮想する. 本研究における 1 脚ロボットは, 接地面積が小さく, 安定領域が狭い為, 重心位置を把握しておくことが重要となる. そこで, 仮想倒立振子の重心 $G(G_x, G_y)$ は各関節の合成重心より, 以下のような式(19)で求めることができる.

$$G_x = \frac{\sum m_n a_{nx}}{\sum m_n}, \quad G_y = \frac{\sum m_n a_{ny}}{\sum m_n} \quad (19)$$

また, 仮想倒立振子の重心までの長さは次式である

$$a = \sqrt{|G_x - f|^2 + G_y^2} \quad (20)$$

3.2 仮想倒立振子のモデル化

制御理論を適用するには対象のモデルが必要になる. 前章と同様にラグランジュの運動方程式を用いて, 仮想倒立振子のモデル化を行う. ラグランジュアン L は

$$L = \frac{1}{2} m a^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 - m g a \cos \theta \quad (21)$$

となり, 関節トルクを τ とすると次式を得られる.

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = m g^2 \dot{\theta} + J \dot{\theta}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = (m a^2 + I) \ddot{\theta} \quad (22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = m a g \sin \theta \quad (23)$$

$$(m a^2 + I) \ddot{\theta} - m a g \sin \theta = \tau \quad \because I = \frac{1}{12} m l^2 \quad (24)$$

ここで第 1 関節部分の粘性摩擦係数 B を考慮し, 仮想倒立振子の運動方程式を求めると, 以下ようになる.

$$J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} - m a g \sin \theta = \tau, K_{iv} \gamma e \quad (25)$$

$$\because J = I + m a^2 + \gamma^2 J_m, \quad B = B_l + \gamma^2 B_m$$

ただし, J_m はモータ軸慣性モーメント, B_l は負荷軸粘性摩擦, B_m はモータ軸粘性摩擦, m は仮想倒立振子の重さ, L は仮想倒立振子の長さ, τ_r はトルク定数, K_{iv} は増幅器変換定数, γ はギア比とする.

3.3 VSS 型適応制御論

続いて 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とし, $N = \tau_r K_{iv} \gamma$ とし式(25)を整理すると

$$\alpha_0 \ddot{\theta} + \alpha_1 \dot{\theta} + \alpha_2 \theta = e + w \quad (26)$$

$$\because \alpha^T = [J/N \quad B/N \quad -mga/N]$$

となり, 切換関数を式(27)とすれば式(26)は式(28)となる.

$$s_c = \dot{\theta} + c\theta \quad (27)$$

$$Y^T \alpha + H s_c = e + w \quad \because H = J/N \quad (28)$$

ただし, 計測ベクトル Y とパラメータベクトル α は

$$\begin{cases} Y^T = [-c\dot{\theta} & \dot{\theta} & \theta] \\ \alpha^T = [H & B/N & -mga/N] \end{cases} \quad (29)$$

とし, 制御入力を式(30), 適応則を式(31)とする.

$$e = Y^T \hat{\alpha} - k \operatorname{sgn}(s_c) \quad (30) \quad \dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y s_c \quad (31)$$

ここで VSS ゲイン k は正の定数で, 適応ゲイン Γ は正定行列である. リアプノフ関数を

$$V(t) = \frac{1}{2} [s_c H s_c + \tilde{\alpha}^T \Gamma \tilde{\alpha}] \quad (\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}) \quad (32)$$

とすれば, リアプノフ関数の時間微分は

$$\dot{V}(t) = -(k |s_c| - s_c w) \leq -|s_c| (k - |w|) \leq 0 \quad (33)$$

となり $|w|$ より大きな k を選んでおけば $s_c \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ が保証され, 振子の安定性も保証される.

なお, 今回は制御入力の切り換えによって生じるチャタリング低減の為, 制御入力に存在する符号関数 $\operatorname{sgn}(s_c)$ をそのまま使用せず, 飽和関数を使用する.

$$\operatorname{sat}(s_c / \delta) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s) & |s_c| > \delta \\ s_c / \delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (34)$$

また, 以下に本制御システムのブロック線図を示す.

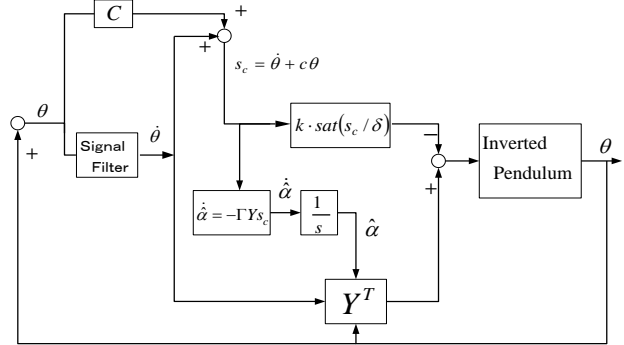


Fig.2 Diagram of VSS adaptive control system

4. I-PD 制御系の設計

第 2, 第 3 関節は, I-PD 制御を用いて制御を行う. I-PD 制御系は積分(I)コントローラと, 比例(P)・積分(D)コントローラを分離した制御である. よって, 角度制御系に対しては, 制御対象の積分器を打ち消し, オーバershootを少なくさせることができるため, 第 2, 第 3 関節の制御に適していると考えられる.

4.1 I-PD コントローラの設計

制御対象を $G_p = \frac{b}{s(s+a)}$ とし, I-PD 制御のコントローラ部を,

$G_1 = \frac{k}{s}$, $G_2 = f_0 + f_1 s$ とすると, 閉ループ伝達関数 $W(s)$ は, 以下ようになる.

$$W(s) = \frac{1}{1 + \frac{a_0 + f_0}{k} s + \frac{a_1 + f_1}{k} s^2 + \frac{a_2}{k} s^3} \quad (35)$$

ただし, $a_0 = 0$, $a_1 = a/b$, $a_2 = 1/b$

式(35)を以下の標準形 $H(s)$

$$H(s) = \frac{1}{1 + \alpha_1 s + \beta_2 \tau^2 s^2 + \beta_3 \tau^3 s^3} \quad (36)$$

と比較すると, パラメータ k, f_0, f_1 は以下ようになる.

$$k = \frac{a_2}{\beta_3 \tau^3}, \quad f_0 = k\tau - a_0, \quad f_1 = \beta_3 k \tau^2 - a_1 \quad (37)$$

4.2 I-PD コントローラの離散化

上記の I-PD 制御器を双一次変換により連続系 s 領域から離散系 z 領域に変換する. まず, I コントローラ $G_1(s)$ に対し, 双一次変換を用いると, 離散積分補償器 $C_1(z)$ は式(38)となる.

$$C_1(z) = \frac{M_1(z)}{E(z)} = \frac{B_0 + B_1 z^{-1}}{A_0 - A_1 z^{-1}} \quad (38)$$

ただし, $A_0 = 2, A_1 = -2, B_0 = T k, B_1 = T k$

次に, PD コントローラに対し, 時定数 λ の近似微分を

用いると、離散補償器 $C_2(z)$ は

$$C_2(z) = \frac{M_2(z)}{Y(z)} = \frac{B_0 + B_1 z^{-1}}{A_0 + A_1 z^{-1}} \quad (39)$$

ただし、 $A_0 = T + 2\lambda$, $A_1 = T - 2\lambda$,

$$B_0 = f_0 T + 2f_0 \lambda + 2f_1, \quad B_1 = f_0 T + 2f_0 \lambda - 2f_1$$

これより、操作量 $M_1(k)$, $M_2(k)$ は、以下ようになる。

$$M_1(k) = \frac{B_0}{A_0} E(k) + \frac{B_1}{A_0} E(k-1) + \frac{A_1}{A_0} M_1(k-1) \quad (40)$$

$$M_2(k) = \frac{B_0}{A_0} Y(k) + \frac{B_1}{A_0} Y(k-1) + \frac{A_1}{A_0} M_2(k-1) \quad (41)$$

5. VSS 型適応制御シミュレーション

制御対象である仮想倒立振子のパラメータは未知とし、そこに VSS 型適応制御を施す。シミュレーションで使用する定数を以下に示す。

Table.1 VSS Adaptive control simulation conditions

サンプリング周期	$T = 0.002[\text{sec}]$
VSS ゲイン	$k = 2.0$
VSS 適応ゲイン	$\Gamma = 10.0$
切換関数の定数	$c = 10.0$
境界層	$\delta = 0.15$

Table.2 link parameter

	第 1 関節	第 2 関節	第 3 関節
長さ[m]	0.20	0.40	0.38
質量[kg]	1.05	0.64	1.03

まず、慣性変化を伴う中で、仮想倒立振子に対する制御性能を検証する。シミュレーションは、開始から 10 秒間で脚を初期姿勢にさせ、その後、第 2、第 3 関節に正弦波指令を外乱として与え屈伸動作を行わせる。

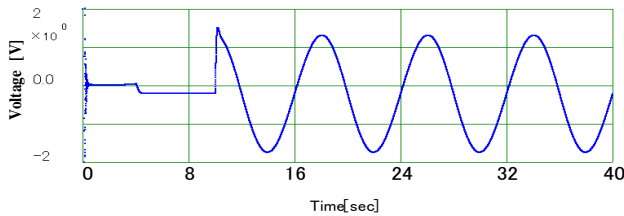


Fig.3 Control input of first link

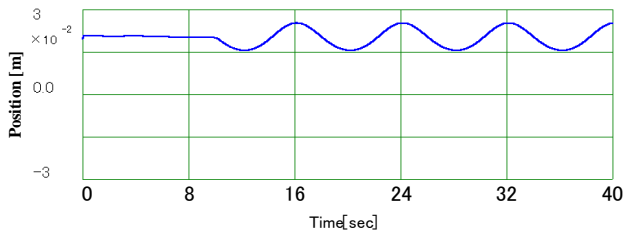


Fig.4 Center of gravity horizontal position

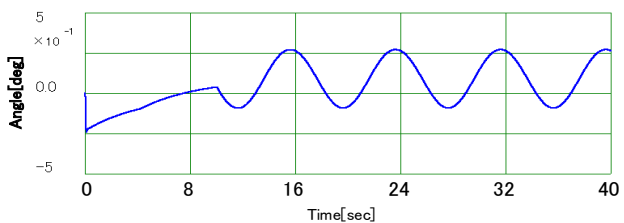


Fig.5 Deviation from an initial angle

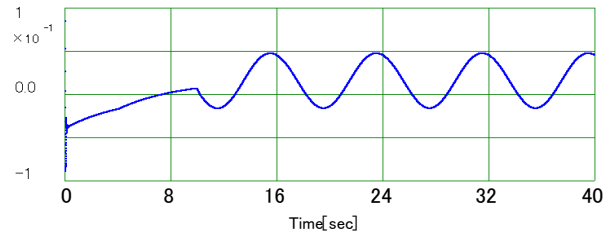


Fig.6 Switching function

Fig.3 より、第 1 関節の操作量は、最大で 1.8[V]であり、実機での実現が可能となっている。また、Fig.4 から、仮想倒立振子の重心は、常につま先に存在し、脚の自重を支えられている。加えて、Fig.5 より、初期角からの角度偏差も 0.3[deg]程度であることから、仮想倒立振子は、非常に安定している。また、Fig.6 より、切換関数 s_c が、境界層 δ の範囲内にあるため、チャタリングすることなく安定した制御となっている。

次に、荷重変化に対応する為、荷重の重さに応じ、重心位置を補正できるようにし、また、1 脚ロボットの姿勢も重心変化の影響を軽減するような姿勢にした。

シミュレーション方法は、開始から 6 秒後に荷重を 1[kg]変化させた後、12 秒間で脚を初期姿勢にする。その後、第 2、第 3 関節に正弦波指令を外乱として与え屈伸動作を行わせた。パラメータは、先ほどのシミュレーションと同様のものを使用した。結果を以下に示す。

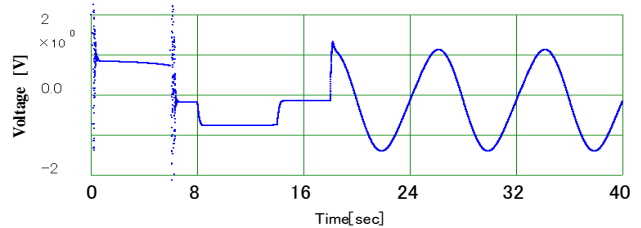


Fig.7 Control input of first link

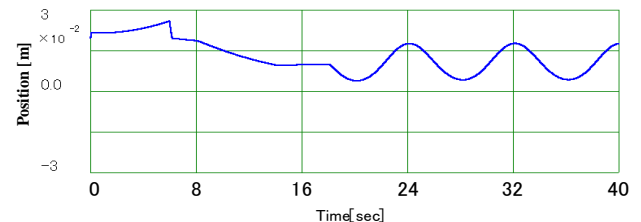


Fig.8 Center of gravity horizontal position

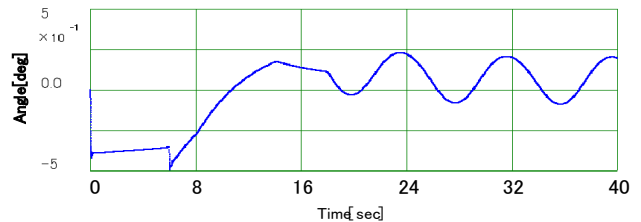


Fig.9 Deviation from an initial angle

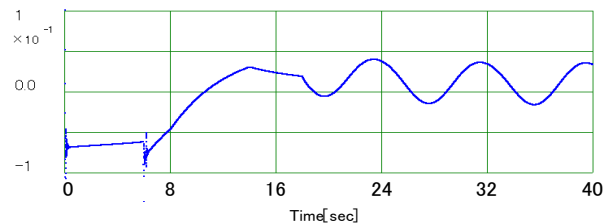


Fig.10 Switching function

Fig.7 より, 第1関節の操作量は, 荷重変化をさせた瞬間は大きくなっているが, その後の屈伸運動の際は, 最大で 1.5[V]程度であり, 実機での実現が可能だと考えられる. また, Fig.8 から, 仮想倒立振子の重心は, 常につま先上にあり, 脚の自重を支えられていることが分かる. 加えて, Fig.9 より, 初期角からの角度偏差は, 荷重が変化した際で 0.5[deg]であり, 屈伸運動の際には, 初期角からの角度偏差は, 最大で 0.2[deg]であることから, 仮想倒立振子は, 慣性変化だけでなく, 荷重変化にも十分対応できていることがわかる. また, Fig.10 では, 切換関数 s_c が, 境界層 δ の範囲内にあるため, チャタリングせず, 安定した制御となっている.

6. VSS 型適応制御による安定化実験

前章のシミュレーション結果より, 慣性や荷重が変化しても, 仮想倒立振子は, 常に安定した動作が可能であるという結果が得られた. この結果より, 前章のシミュレーションと同様の制御則を用いて, 以下の Fig.11 に示すような実機を使用し, 安定化実験を行う.

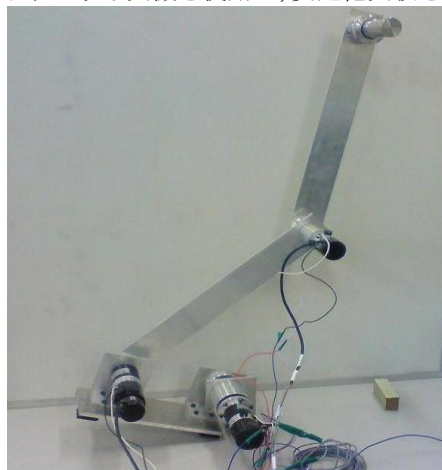


Fig.11 Experiment device of one-legged robot

実機による安定化実験の制御対象は, シミュレーション同様, パラメータが未知である倒立振子を仮想し, そこに VSS 型適応制御を施し, 1脚ロボットの安定化を図る. 開始から 10 秒間で脚を初期姿勢にし, その後, 第 2, 第 3 関節には正弦波指令を外乱として与え, 屈伸運動を行わせる. パラメータは, Table.2 の値を用い, 以下に実機による安定化実験の結果を示す.

Table.3 VSS Adaptive control simulation conditions

サンプリング周期	$T = 0.002[\text{sec}]$
VSS ゲイン	$k = 2.0$
VSS 適応ゲイン	$\Gamma = 10.0$
切換関数の定数	$c = 10.0$
境界層	$\delta = 0.15$

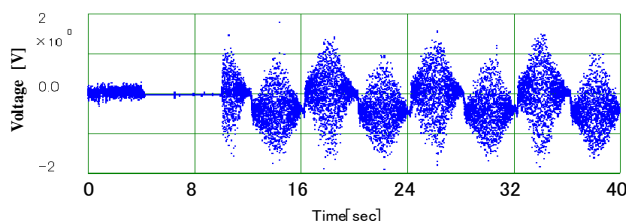


Fig.12 Control input of first link

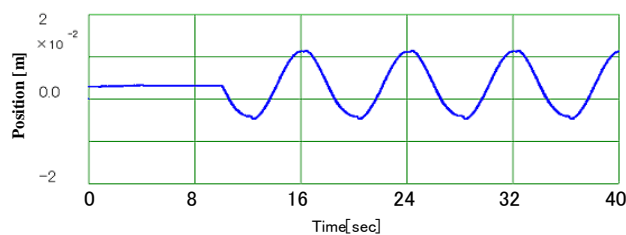


Fig.13 Center of gravity horizontal position

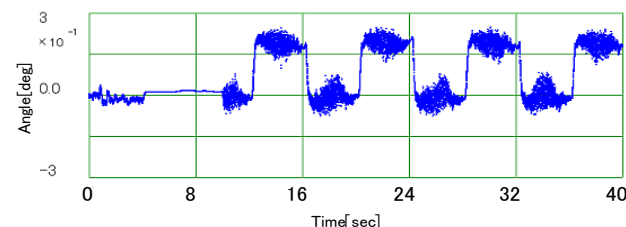


Fig.14 Deviation from an initial angle

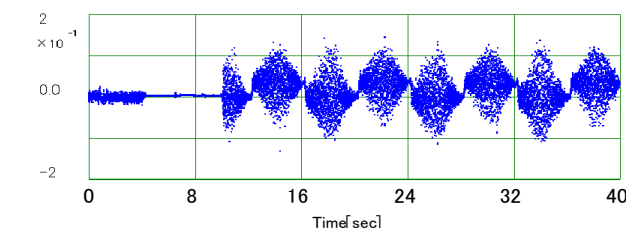


Fig.15 Switching function

Fig.12 より, 操作量が最大で 1.8[V]程度であり, シミュレーションと同様の結果が得られた. また, Fig.13 より, 仮想倒立振子の重心が, シミュレーション結果より, 1.5[cm]程度つま先先端部寄りではあったが, 重心の移動は, 約 1[cm]以内で収まっており, 常につま先上に重心があることから, 実機の自重を支えられていることが分かる. 加えて, Fig.14 より仮想倒立振子の初期角からの偏差は, 約 0.3[deg]であり, シミュレーション結果と比較しても, 大差は見られず, 仮想倒立振子は非常に安定しているという結果となった. また, Fig.15 より切換関数 s_c の値は, 境界層 δ の範囲内にあり, チャタリングせず, 安定して制御できている.

7. 結論

今回のシミュレーション及び実機による実験結果より, 制御対象である仮想倒立振子は, 屈伸運動により長さや重心位置が常に変化する状況下でも, 十分に安定していることから, VSS 型適応制御が, 慣性パラメータの変動に十分対応できていることが実証できた.

今後は, 慣性変化だけでなく, 荷重変化にも対応した実システムの実現を目指すとともに, 1脚ロボットが, より大きな外乱に対しても, 不安定な動作をしないよう VSS 型適応制御の安定性の向上や, 外乱の影響の低減できるようなシステムの構築を目指す.

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)