

D6 VSS 適応制御を用いた 1 脚ロボットの安定化に関する研究

発表者：8ADGM021 山田 佑樹
 指導教員：大内 茂人 教授
 平田 弘志 准教授

Stabilization Control of One-legged Robot with VSS Adaptive Control

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.

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 ような人間のつま先部から大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なシステムの構築も目指す。

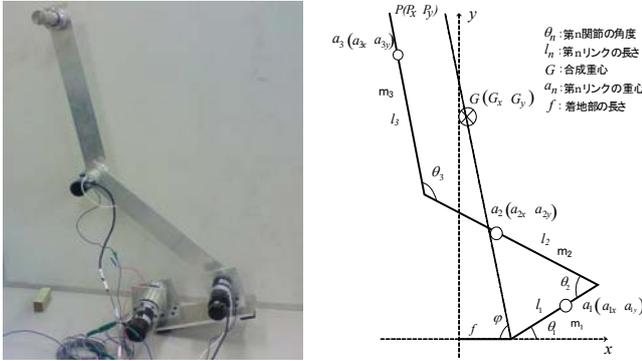


Fig.1 Model of one-legged robot

2. VSS 型適応制御系の設計

2.1 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。また、屈伸運動時は、接地面積が小さく安定域が狭い為、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(1)で求めることができる。

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

また、仮想倒立振子の重心までの長さは次式である

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

2.2 仮想倒立振子のモデル化

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

$$L = \frac{1}{2} m a^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 - m g a \cos \theta \quad (3)$$

となり、関節トルクを τ とすると次式を得られる。

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = m g^2 \dot{\theta} + J \dot{\theta}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = (m a^2 + I) \ddot{\theta} \quad (4)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = m a g \sin \theta \quad (5)$$

$$(m a^2 + I) \ddot{\theta} - m g a \sin \theta = \tau \quad \because I = \frac{1}{12} m l^2 \quad (6)$$

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。

$$J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} - m a g \sin \theta = \tau_r K_{iv} \gamma e \quad (7)$$

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

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。

2.3 VSS 型適応制御論

続いて VSS 型適応制御の仮想倒立振子への適用法を述べる。不確定外乱を考慮し $N = \tau_r K_{iv} \gamma$ とすると式(7)は

$$\alpha_0 \ddot{\theta} + \alpha_1 \dot{\theta} + \alpha_2 \theta = e + w \quad (8)$$

$$\because \alpha_0 = J/N \quad \alpha_1 = B/N \quad \alpha_2 = -m g a / N$$

となり、切換関数を式(9)とすれば式(8)は式(10)となる。

$$s_c = \dot{\theta} + c \theta \quad (9)$$

$$Y^T \alpha + H s_c = e + w \quad \because H = J/N \quad (10)$$

ただし、計測ベクトル Y とパラメータベクトル α は

$$\begin{cases} Y^T = [-c \dot{\theta} & \dot{\theta} & \theta] \\ \alpha^T = [H & B/N & -m g a / N] \end{cases} \quad (11)$$

とし、制御入力を式(12)、適応則を式(13)とする。

$$e = Y^T \hat{\alpha} - k \operatorname{sgn}(s_c) \quad (12)$$

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

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

$$V(t) = \frac{1}{2} [s_c H s_c + \tilde{\alpha}^T \Gamma \tilde{\alpha}] \quad (\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}) \quad (14)$$

とすれば、リアプノフ関数の時間微分は

$$\dot{V}(t) = -(k |s_c| - s_c w) \leq -|s_c| (k - |w|) \leq 0 \quad (15)$$

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。

$$\operatorname{sat}(s_c / \delta) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(s) & |s_c| > \delta \\ s_c / \delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (16)$$

3. VSS 型適応制御シミュレーション

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

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は Table.1, Table2 のものを使用する。

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、開始後、ロボット脚を屈伸動作を行う姿勢にさせた後、第2、第3関節に正弦波指令を与え屈伸動作を行わせる。結果を以下に示す

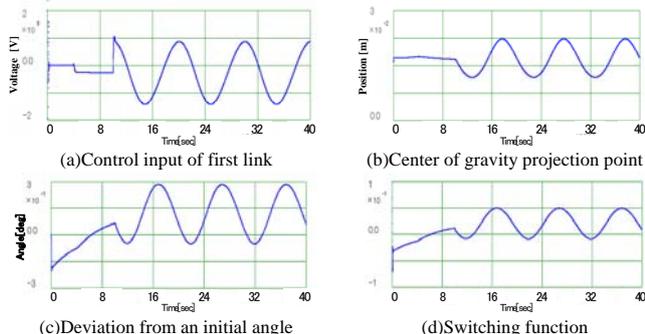


Fig.2 VSS adaptive control simulation with the inertia change

Fig.2(a)より、第1関節の操作量は、最大で-1.4[V]であり、実機での実現が可能な値となっている。また、Fig.2(b)から振子の重心投影点は、常に安定域内に存在し、脚の自重を支えられている。加えて、Fig.2(c)より初期角からの角度偏差も0.3[deg]程度であり、振子は非常に安定している。また、Fig.2(d)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、荷重の重さに応じて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。

シミュレーションは、開始から6[sec]後に荷重を1[kg]変化させる。その後、ロボット脚を屈伸動作を行う姿勢にした後、屈伸動作を行わせる。結果を以下に示す。

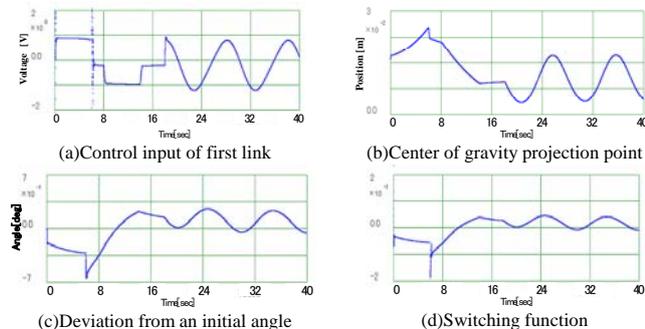


Fig.3 VSS adaptive control simulation with the load change

Fig.3(a)より、第1関節の操作量は、荷重が変化した瞬間は大きくなっているが、屈伸運動の際には、最大で-1.2[V]であり、実機での実現が可能な値である。また、Fig.3(b)から、振子の重心投影点は、常に安定域内にあり、脚の自重を支えられていることが分かる。加えて、Fig.3(c)より、初期角からの角度偏差は、荷重が変化した際に0.7[deg]、屈伸運動の際には、最大で0.3[deg]であることから、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。Fig.3(d)では、切換関数 s_c は、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。

4. VSS 型適応制御による安定化実験

続いて、実機による安定化実験を行う。前章同様、制御対象は、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。

まずは、対象の慣性変化を伴う中で安定化制御実験を行う。実験は、開始後5[sec]でロボット脚を屈伸動作を行

う姿勢にした後、屈伸動作を行わせる。パラメータは、シミュレーションと同様の値を用いた。結果を以下に示す。

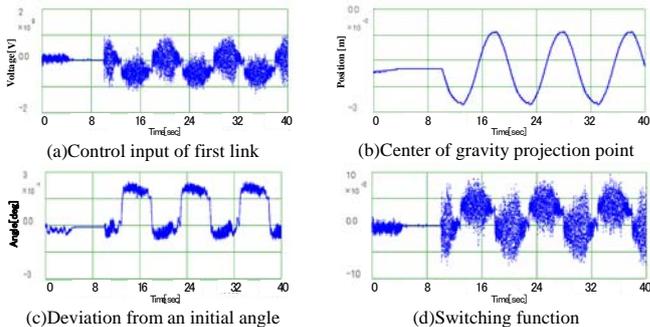


Fig.4 stabilization experiment result with the inertia change

Fig.4(a)より、第1関節の操作量は最大で-1.1[V]程度という結果が得られた。また、Fig.4(b)より、振子の重心投影点は、常に安定域内に存在し、実機の自重を支えることができている。加えて、Fig.4(c)から、振子の角度偏差は約0.25[deg]であり、振子は非常に安定しているという結果となった。またFig.4(d)より切換関数 s_c は、境界層 δ の範囲内にあり、チャタリングせず、安定した制御できている。

続いて、対象の荷重変化を伴う場合の安定化制御を行う。実験は、開始から8[sec]後に荷重を1[kg]変化させた後、脚を屈伸動作を行う姿勢にし、屈伸動作を行わせる。パラメータは前章と同様の値を用いた。以下に結果を示す。

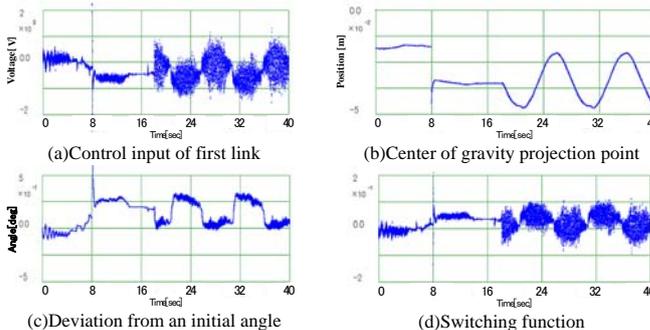


Fig.5 stabilization experiment result with the load change

Fig.5(a)より、第1関節の操作量は、荷重が変化した瞬間は、大きくなっているが、屈伸運動の際には、最大で-1.5[V]程度であった。また、Fig.5(b)より、振子の重心投影点は、常に安定域内に存在しており、実機の自重を支えることができている。加えて、Fig.5(c)より振子の角度偏差は、荷重変化の際には、大きくなっているが、屈伸運動の際には最大で約0.3[deg]であり、振子は非常に安定しているという結果となった。Fig.5(d)より切換関数 s_c は、境界層 δ の範囲内であり、チャタリングせず、安定した制御ができている。

5. 結論

制御対象の慣性及び荷重変化を伴う場合でも、対象は安定であり、VSS 適応制御のロバスト性の高さが実証できた。

参考文献

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)

業績

1)中山,平田,大内,山田:”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”,日本機械学会 2008 年度年次大会,vol.5,pp157-158(2008)

2)山田,平田,大内:”重量変化を伴う1脚ロボットのつま立ちによる屈伸動作安定化制御”第27回日本ロボット学会学術講演会,pp132(2009)