

F5 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

発表者：6ADGM016 中山 浩太郎
 指導教員：大内 茂人 教授
 平田 弘志 准教授

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

Abstract: We pay our attention to a bending and stretching in foot movement in this study and consider stabilized motion control for one-legged robot. In the initial posture that stood on tiptoe, we imagine one pendulum going along the center of gravity. We make the optimal regulator control for this virtual pendulum model on the first joint. Furthermore, we give the sine wave order as agitation and bend and stretch to a joint of the second and the third. We tried the control system how a little center of gravity movement was possible of the deviation corner in this study.

1. はじめに

今日の 2 足ロボット技術の発展はめざましいものがある。しかし、2 足ロボットのほとんどがエンターテイメント用途以外では実用域に達していない。それは、ロボットが荷物等を持ち上げたり、支えたりする際に対象のパラメータが既知である場合、そのパラメータを考慮した制御方式を組むことにより制御を行うことは容易であるが、対象のパラメータが未知である場合、それは難しいからである。

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。

まず最初に制御対象のパラメータが既知であるときを想定し、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。レギュレータ制御では、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。

そして、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であると評価されている。対象のパラメータが未知であっても 1 脚ロボットが安定な屈伸動作を行ない、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。

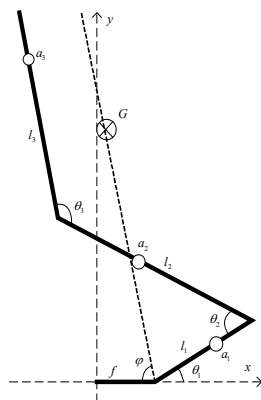


Fig.1 片足型モデル

θ_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

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 は身体運動の観点から

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

であり、実機先端部までの長さを $|P|$ とすると

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

よって、仮想倒立振子の長さは $L = |P|$ となる。

仮想倒立振子の重心までの長さは

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

である。これらを用いて仮想倒立振子の運動方程式を求め、粘性摩擦項を B とすると、

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} - Mg\sin\theta = \tau_r K_n \gamma e, \quad \left(J = \frac{1}{12} ML^2 + Ma^2 \right) \quad (4)$$

となる。ただし、 τ_r はトルク定数、 K_n は帰還電流定数、 γ はギア比である。式(4)を線形化すると、

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

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。

重み行列 $Q = \text{diag}(10, 1)$, $R = 9$ として LQR 法から

$$F_1 = 8.29613, \quad F_2 = 1.09920 \quad (7)$$

とフィードバックゲインが決定された。

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 関節には正弦波指令を外乱として与えている。なお、第 2, 第 3 関節には I-PD 制御が施されている。以下に実験結果を示す。

Table.1 最適レギュレータ制御実験諸条件

サンプリング周期	$T = 0.002$ [sec]
第 2, 第 3 関節への外乱	$\omega_i = 20 \sin\left(2\pi \times \frac{t}{4000}\right)$ [deg]
I-PD 制御器の応答速度	$\tau_2 = 0.10, \tau_3 = 0.12$
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	$F_1 = 8.2961, F_2 = 1.0992$

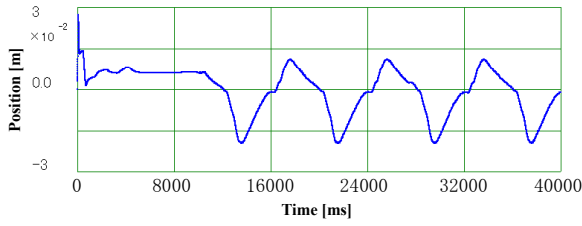


Fig.2 仮想倒立振り子重心水平位置

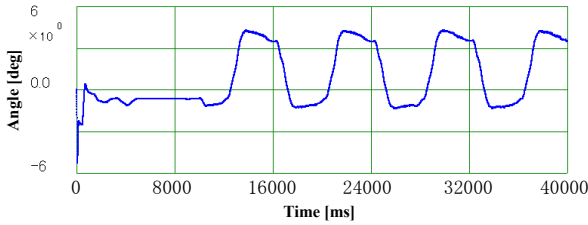


Fig.3 仮想倒立振り子初期角からの変化量

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り子の重心の水平位置を表している. およそ $\pm 1.5[cm]$ のところに仮想倒立振り子の重心があり, 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り子に適用する方法を述べる. 振り子を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.

$$a_0\ddot{\theta} + a_1\dot{\theta} + a_2\theta = e + \omega \quad (a^T = [J/N \quad B/N \quad -rg/N]) \quad (8)$$

ここで, 切換関数を式(9)とすれば式(8)は式(10)となる.

$$s = \dot{\theta} + c\theta \quad (9) \quad Y^T a + H\dot{s} = e + \omega \quad (H = J/N) \quad (10)$$

計測ベクトル Y とパラメータベクトル a を式(11)とする.

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

制御入力を式(12), 適応則を式(13)とする.

$$e = Y^T \hat{a} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (12) \quad \dot{\hat{a}} = -\Gamma^{-1} Y s \quad (13)$$

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

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

とすれば, リアプノフ関数の微分が

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

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, 振り子の安定性も保証される.

振り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り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(16)に示す飽和関数を使用する.

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

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, 仮想倒立振り子に対し 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 型適応制御実験諸条件

サンプリング周期	$T = 0.002[\text{sec}]$
重み行列	$Q = \operatorname{diag}(100, 100, 1), R = 1$
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	$\delta = 0.30$

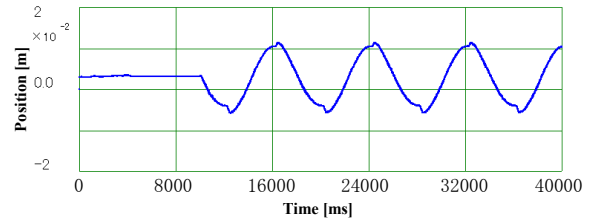


Fig.4 仮想倒立振り子重心水平位置

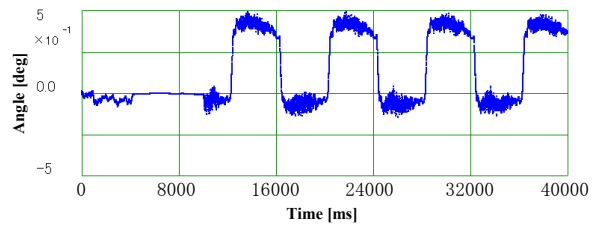


Fig.5 仮想倒立振り子初期角からの変化量

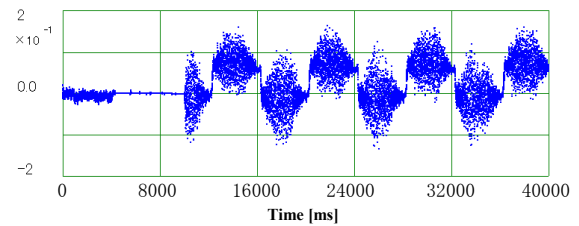


Fig.6 切換関数 s

Fig.4 から仮想倒立振り子の重心が, およそ $1[cm]$ のところにあり, 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 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)