

# 片脚ロボットの爪先による屈伸動作の制御性能改善

東海大学大学院工学研究科情報通信制御システム工学専攻

○中村 裕聡

東海大学情報理工学部コンピュータ応用工学科

平田 弘志

## 1. はじめに

本研究では3関節片脚ロボットを使用し、つま先立ち姿勢のまま安定な屈伸動作を実施する。このとき、脚部の慣性変化が姿勢安定化制御に影響を及ぼし、固定の制御器では転倒してしまう場合がある。そこで、パラメータ変化を想定したVSS適応制御系を設計し、従来よりも屈伸動作において重心投影点の移動を小さく抑えるような制御系を提案する。

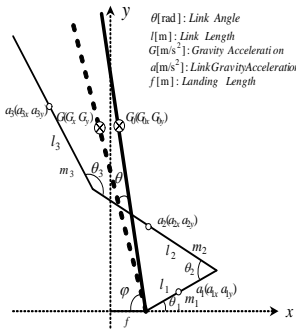


Fig.1 Model of one-legged robot

## 2. VSS 適応制御の設計

### 2.1 重心計算

Fig.1に示すようなロボット脚の重心を通る長さ $l$ の倒立振子を仮想する。今回使用するロボット脚は、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(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。

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

### 2.2 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。そこで、ラグランジュの運動方程式を用い、仮想倒立振子をモデル化する。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 $\tau$ とすると次式を得られる。

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

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

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

また、第1関節部分の粘性摩擦係数 $B$ を考慮した仮想倒立振子の運動方程式は、以下ようになる。

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

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

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、 $\tau_r$ はトルク定数、 $K_{iv}$ は増幅器変換定数、 $\gamma$ はギア比とする。

### 2.3 重心投影点の変動を最小とするVSS適応制御

重心投影点の変移を小さくするVSS適応制御を仮想倒立振子に適用する方法を述べる。ここで、重心投影点の初期値 $G_0$ と重心投影点 $G$ の偏差を

$$x = G \sin \theta \quad (8)$$

とし、 $\theta$ を微小と考え線形化すると

$$x = G \theta \quad (9)$$

となる。また、 $N = \tau_r K_{iv} \gamma$ とし、 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, w$ は $w_n$ を入力外乱として式(7)を整理すると

$$\alpha_0 \ddot{x} + \alpha_1 \dot{x} + \alpha_2 x = e + w \quad (10)$$

$$\because \alpha^T = [\alpha_0/G \quad \alpha_1/G \quad \alpha_2/G], \quad w = -\frac{D}{N} \text{sgn}(\dot{\theta}) + w_n$$

となる。切換関数を式(11)とすれば式(10)は式(12)となる。

$$s_c = \dot{x} + c x \quad (11)$$

$$Y^T \alpha + H s_c = e + w \quad \because H = \alpha_0/G \quad (12)$$

ただし、計測ベクトル $Y$ とパラメータベクトル $\alpha$ は

$$\begin{cases} Y^T = [-c \dot{x} & \dot{x} & x] \\ \alpha^T = [H & \alpha_1/G & \alpha_2/G] \end{cases} \quad (13)$$

とし、制御入力を式(14)、適応則を式(15)とする。

$$e = Y^T \hat{\alpha} - k \text{sgn}(s_c) \quad (14)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y s_c \quad (15)$$

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

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

とすれば、リアプノフ関数の時間微分は

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

となり、 $|w|$ より大きな $k$ を選ぶことで、 $s_c \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ 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 $\text{sgn}(s_c)$ をそのまま使用せず、飽和関数を使用する。

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

## 3. まとめ

ロボット脚の屈伸運動シミュレーション及び実機実験を行った結果、仮想倒立振子の重心投影点の変移は、1.65[cm]~2.25[cm]の範囲であった。本実機の接地面は5[cm]であり、第1関節のモータ重量を加味すると、安定域は-1[cm]~5[cm]となる。これより、仮想倒立振子の重心投影点は常に安定域内に存在し、十分に自重を支えることができているといえる。