

片脚ロボットの爪先立ちによる屈伸動作の検証

東海大学大学院 工学研究科 ○水嶋 亮直
東海大学 情報理工学部 平田 弘志

1. はじめに

現在、普及している歩行ロボットの多くは爪先関節が付いておらず、ロボットの歩行動作は人間の動作と比べ腰を落とした不自然なものとなっている。しかし、爪先を付加することにより関節の自由度が増加し運動性能の向上や不自然な歩行動作の改善が期待できる。本研究は、爪先関節を付加した片脚ロボットを使用し、安定範囲の狭い爪先立ちでの屈伸動作を行い、制御性能を検証する。

片脚ロボットの制御法として、主にロボットアームの軌道制御法とロボスト制御法が挙げられる。前者は逆運動学に基づき軌道計画がなされサーボ系が構成され、後者は片脚ロボットの重心を通る仮想の倒立振子を対象として安定化制御を適用する。本研究の片脚ロボットは冗長リンク機構であるため前者は適しておらず、後者を採用する。

本研究では自律安定化機能を利用した爪先付きロボット脚の構成法を提案する。この片脚ロボットの膝と足首の関節に適切な屈伸指令角を与え、仮想倒立振子の重心投影点の変化を抑える姿勢となるように、爪先の関節角度が調整される制御を施す。このとき、屈伸動作により仮想倒立振子の長さや重心が変化する。まずはこの制御系の基礎として、変化する長さや重心の平均値をとり固定値としてLQ制御を用いてこれを制御する。しかし、この方法では変化するパラメータを固定値としているために誤差が生じ安定した屈伸動作ができない可能性がある。これをより安定した動作とするために、パラメータの変化を想定したVSS型の適応制御系を構成し制御する。また、この制御法は荷重変化が起きても重心計算部分のみ修正すれば良く、制御部を変更する必要がない特徴もある。

2. 制御設計

2.1 仮想倒立振子のモデル化

Fig.1 より鉛直軸Yからの角度 φ として、仮想倒立振子の重心Gの運動エネルギーと位置エネルギーを基に、運動方程式を求めると以下となる。

$$(ma^2 + I)\ddot{\varphi} + (2ma\dot{a} + \dot{I})\dot{\varphi} - mga \sin \varphi = \tau_1 \quad (1)$$

ここで、 I は仮想振子慣性モーメント、 g は重力加速度、 τ_1 は爪先関節トルクである。また、トルクアンプの電圧指令値 e と電圧電流変換定数 K_{AV1} 、アクチュエータのトルク定数 $\gamma K_{\tau 1}$ と慣性モーメント $\gamma^2 J_{a1}$ 、粘性摩擦 B とクーロン摩擦 D を考慮すると次式

$$J_r \ddot{\varphi} + B_r \dot{\varphi} - mga \sin \varphi + D \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) = Ne \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \therefore J_r &= ma^2 + I + \gamma^2 J_{a1}, B_r = 2ma\dot{a} + \dot{I} + B, \\ N &= \gamma K_{\tau 1} K_{AV1}. \end{aligned}$$

で記述される。さらに重心位置GのX軸への重心投影点 x における次の関係

$$x = a \sin \varphi \quad (3)$$

より、変位角 φ を微小とみなして平衡点近傍で線形化し、

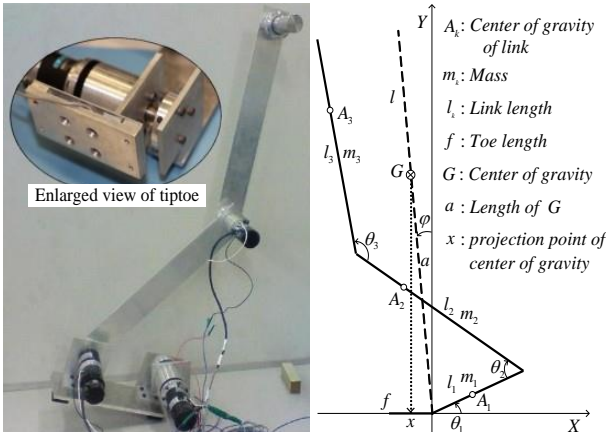


Fig.1 Model of one-legged robot

変数変換を行うと次式となる。

$$(J_r / a)\ddot{x} + (B_r / a)\dot{x} - mgx + D \operatorname{sgn}(\dot{x}) = Ne \quad (4)$$

以後、(4)式を重心投影点の変位 x の運動方程式とする。

2.2 重心投影点の変化を抑える制御

はじめに書いたように、まずはこの仮想倒立振子の制御の基礎としてレギュレータLQ制御を実施する。(4)式を基に、状態方程式の形に変形しQR法を用いてフィードバックゲインを求め、レギュレータ制御を施す。

次に、問題改善のために提案したパラメータの変化に影響を受け難いVSS型の適応制御系を設計する。(4)式を基に、重心投影点の変位 x を小さく抑える制御系を考える。まず、切換関数 s_c を

$$s_c = \dot{x} + hx, \quad (h > 0) \quad (5)$$

と定義する。(4)式の対象に対して外乱を考慮し

$$Y^T \alpha + H s_c = e + w \quad \therefore H = J_r / Na \quad (6)$$

と表す。ここで、 w はシステム外乱 w_s を含む等価外乱項、 Y は計測値から構成されるベクトル、 α はパラメータベクトルであり、次式で与えられる。

$$\begin{cases} Y^T = [-h\dot{x} & \dot{x} & x] \\ \alpha^T = [H & B_r / Na & -mg / N] \end{cases} \quad (7)$$

$$w := -(D/N) \operatorname{sgn}(\dot{x}) + w_s \quad (8)$$

制御入力とパラメータ適応則を次のようにし、VSS適応制御を構成する。

$$e = Y^T \hat{\alpha} - k_v \operatorname{sat}(s_c / \delta), \quad (k_v > 0) \quad (9)$$

$$\operatorname{sat}(s_c / \delta) := \begin{cases} \operatorname{sgn}(s_c) & |s_c| > \delta \\ s_c / \delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (10)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y s_c, \quad (\Gamma > 0) \quad (11)$$

最後に上記の2つの制御法の結果を比較検証する。