

# D4 片脚ロボットの爪先による屈伸動作の制御に関する研究

発表者: 2BDRM020 水嶋 亮直

指導教員: 平田弘志 教授

## Study on Control of Bending and Stretching Movement by Using Tiptoe of a One-legged Robot

Abstract: Recently, the research of humanoid robotics is very popular. However, few humanoid robots usually have the tiptoe due to complicated mechanism and control, etc. though the degrees of freedom of the joint increase by appending a tiptoe to the robot foot and a leg construction with the high movement ability can be expected. In this paper, an autonomous attitude stabilization control based on a repetitive bending and stretching movement with standing on the tiptoe is proposed.

### 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を持たない。この場合、ロボットの歩行動作は腰を落とした姿勢となり、人間の歩行動作とは異なる。しかし、爪先関節を付加することで運動性能の向上や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の状態での屈伸動作を行い、制御性能の検証をする。

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バスタ制御法が挙げられる。前者は逆運動学に基づき軌道設計がなされるが、この片脚ロボットは冗長リンク機構のため適さない。後者は片脚ロボットの重心を通る仮想の倒立振子を考え、これを対象として屈伸動作に伴い変化する変化量を抑える制御系である。

本研究では、3関節の片脚ロボットを使用し、爪先立ちの姿勢で安定な屈伸動作を行う。この片脚ロボットの膝と足首関節に適当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ため、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これを制御する。

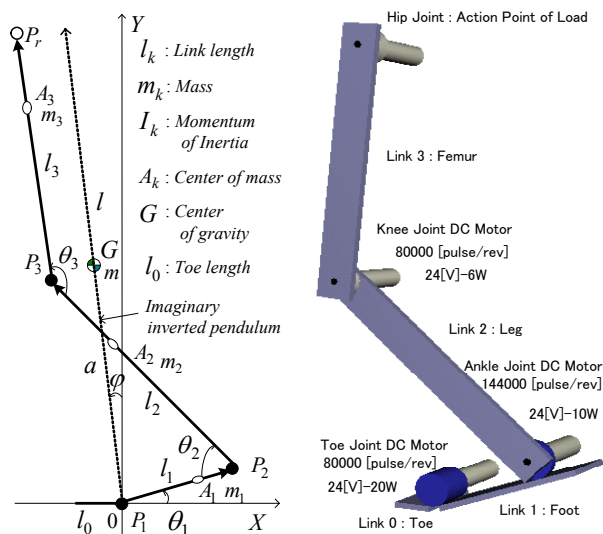


Fig.1 Model of One-legged Robot

### 2. 制御系設計

#### 2.1 重心計算

Fig.1 に示す片脚ロボットの重心を通る長さ  $l$ 、質量  $m$ 、原点から重心までの長さ  $a$  の仮想倒立振子を考える。各リンクの重心位置  $A_k(A_{kx}, A_{ky})$  から仮想倒立振子の重心位置  $G(G_x, G_y)$  を求めると次式となる。

$$G_x = \frac{\sum m_k A_{kx}}{\sum m_k}, \quad G_y = \frac{\sum m_k A_{ky}}{\sum m_k} \quad (1)$$

また、運動中のロボット安定度規範として用いられている ZMP を考える。ZMP とは、重力に加え慣性力を考慮したものである。単質点系の ZMP 軌道として X 軸方向のみを考慮し、 $Q_x$  とすると次式が成立する。

$$Q_x = G_x - \frac{G_y \ddot{G}_x}{\ddot{G}_y + g} \quad (2)$$

#### 2.2 仮想倒立振子のモデル化

ラグランジュ関数を用いてモデル化を行う。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。ここで、仮想振子慣性モーメント  $I$ 、重力加速度  $g$ 、トルクアンプの電圧指令値  $e$ 、電圧電流変換定数  $K_{AV1}$ 、爪先モータトルク定数  $\gamma K_{\tau 1}$ 、慣性モーメント  $\gamma^2 J_{a1}$ 、粘性摩擦  $B$ 、クーロン摩擦  $D$  とすると次式となる。

$$J_r \ddot{\varphi} + B_r \dot{\varphi} - mga \sin \varphi + D \text{sgn}(\dot{\varphi}) = Ne \quad (3)$$

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

本研究では仮想倒立振子の重心を X 軸へ投影した重心投影点  $x (= G_x)$  を用いて制御を行うため、次の関係

$$x = a \sin \varphi \quad (4)$$

より、変位角  $\varphi$  を微小とみなして線形化し、変数変換を行い、重心投影点の変位  $x$  の運動方程式を次に示す。

$$(J_r / a) \ddot{x} + (B_r / a) \dot{x} - mgx + D \text{sgn}(\dot{x}) = Ne \quad (5)$$

#### 2.3 VSS 型適応制御系

(5)式は仮想倒立振子の長さ  $l$  と重心長  $a$  に依存して各係数が変化する。ここでは、パラメータ変化に影響を受けにくい VSS 適応制御系を設計する。このとき、重心投影点  $x$  の変化を小さく抑える制御系を構成する。

まず、切関数  $s_c$  を次のように定義する。

$$s_c = \dot{x} + hx, \quad (h > 0) \quad (6)$$

(5)式に対し外乱を考慮して次のように表す。

$$\begin{cases} Y^T \alpha + Hs_c = e + w \\ H := J_r / Na \end{cases} \quad (7)$$

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、 $\alpha$  はパラメータベクトルであり、次式で与えられる。

$$\begin{cases} Y^T = [-h\dot{x} & \dot{x} & x] \\ \alpha^T = [H & B_r / Na & -mg / N] \end{cases} \quad (8)$$

$$w := -(D / N) \text{sgn}(\dot{x}) + w_s \quad (9)$$

また、VSS 適応制御の操作量  $e$  を(10)式、パラメータ適応則を(12)式とする。

$$\begin{cases} e = Y^T \hat{\alpha} - k_v \text{sat}(s_c / \delta), \quad (k_v > 0) \\ \hat{\alpha}^T := [\hat{\alpha}_1 & \hat{\alpha}_2 & \hat{\alpha}_3] \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{sat}(s_c / \delta) := \begin{cases} \text{sgn}(s_c) & |s_c| > \delta \\ s_c / \delta & |s_c| \leq \delta \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{\hat{\alpha}} = -\Gamma^{-1} Y s_c, \quad (\Gamma > 0) \quad (12)$$

ここで、 $k_v$  は VSS ゲイン、 $\delta$  は境界層幅、 $\Gamma$  は適応則ゲインで対称行列とする。外乱  $w$  に関して次の条件

$$|s_c| > \delta \text{ のとき, } k_v > w \quad (13)$$

$$|s_c| \leq \delta \text{ のとき, } k_v |s_c| / \delta > w \quad (14)$$

の元で、 $t \rightarrow \infty$  で  $s_c \rightarrow 0$  となり、 $x \rightarrow 0$  となる。

### 3. シミュレーション

各リンクのパラメータを Table1, VSS 適応制御の諸条件を Table2, シミュレーション結果を Fig.2 に示す。

ロボットは横たわった状態から全関節に I-PD 制御を用いて立脚させる。爪先関節を 24[deg] にし踵を浮かせ、重心投影点の位置が爪先の中心にくるような姿勢を屈伸動作の初期姿勢とする。初期姿勢で数秒間静止すると共に、爪先関節の制御を VSS 適応制御に変更する。足首と膝の関節は I-PD 制御のまま、振幅 20[deg], 周期 2[sec] の正弦波角度指令を与えて運動させる。

Table1. 各リンクのパラメータ

	$l_k$ [m]	$m_k$ [kg]	$a_k$ [m]
Link 0	0.05	1.025	0.052
Link 1	0.20	1.050	0.115
Link 2	0.40	0.640	0.210
Link 3	0.38	1.475	0.295

Table2. VSS 適応制御の諸条件

切関数の定数: $h$	$h = 10$
VSS ゲイン: $k_v$	$k_v = 2.0$
VSS 適応ゲイン: $\Gamma$	$\Gamma = \text{diag}(10, 10, 10)$
境界層幅: $\delta$	$\delta = 0.05$
サンプリング周期: $T$	$T = 0.002$

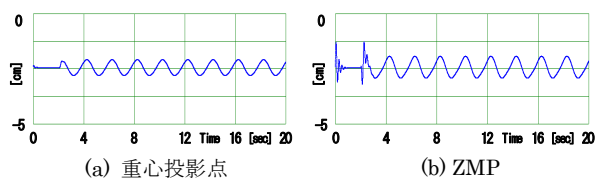


Fig.2 シミュレーション結果

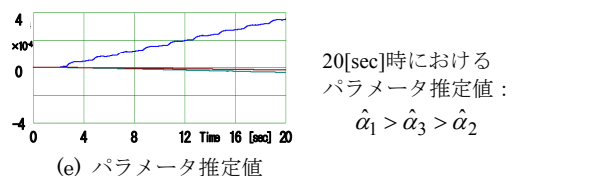
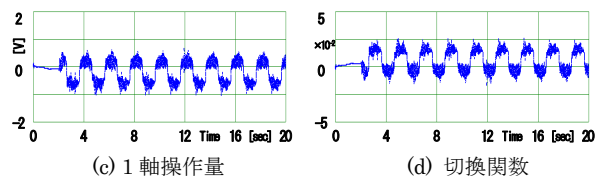
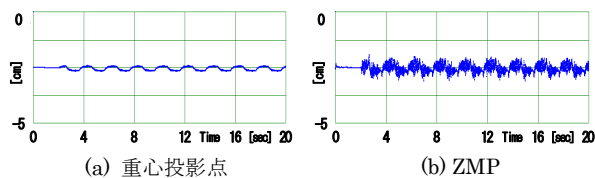


Fig.3 実験結果

### 4. 実験

片脚ロボットの各関節にはハーモニックギア内臓 DC モータを使用し、制御用コンピュータは Pentium4 3.2GHz CPU, 制御用ソフトウェアは C 言語で開発した。実験は Table.2 と同様の条件で行う。実験の結果を Fig.3 に示す。

実験ではシミュレーションより良好な結果が得られ、重心投影点および ZMP は爪先範囲内を推移し、ロボットは動作周期 2[sec]において安定した屈伸動作を行うことができた。

### 5. まとめ

本研究では、爪先関節の増加から生じる制御の複雑化を、VSS 適応制御を用いてその自律安定化機能を利用することで改善した。今後は、安定度の目安としている ZMP の検出精度向上とパラメータ推定値の単調増加及び減少の対策法を検討したい。

### 業績リスト

- (1) 水嶋亮直, 平田弘志, “片脚ロボットの爪先による屈伸動作に関する研究”, 平成 24 年産業応用部門大会, YPC, Y-61, (2012)
- (2) 水嶋亮直, 平田弘志, “片脚ロボットの爪先立ちによる屈伸動作の検証”, 平成 24 年神奈川県ものづくり技術交流会, (2012)
- (3) 水嶋亮直, 小谷齊之, 平田弘志, “片脚ロボットの爪先による屈伸動作の適応姿勢安定化”, 東海大学情報理工学部紀要, Vol.12, No.2, (2012)
- (4) 平田弘志, 水嶋亮直, 大内茂人, 小谷齊之, “1 脚ロボットの爪先による屈伸動作の姿勢安定化”, 電気学会論文誌 C, Vol.133, No.3, pp.663-671, (2013)