

# 特異点適合法を用いた Hoap-2 の姿勢制御

## On the Singularity-Consistent Control of Hoap-2

岩倉 崇 (武蔵工大)      高橋健太郎 (武蔵工大)  
西尾 彰倫 (武蔵工大)      逸見 孝司 (武蔵工大)  
正 D. N. Nenchev (武蔵工大)      関口 暁宣 (弘前大)  
正 妻木 勇一 (弘前大)

Takashi IWAKURA, Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo  
Kentarō TAKAHASHI, Musashi Institute of Technology  
Akinori NISHIO, Musashi Institute of Technology  
Koji HENMI, Musashi Institute of Technology  
Dragomir N. NENCHEV, Musashi Institute of Technology  
Akinori SEKIGUCHI, Hirosaki University, 3, Bunkyo-cho, Hirosaki, Aomori  
Yuichi TSUMAKI, Hirosaki University

**Abstract:** The Singularity Consistent Method is applied to control the lifting motion of one of the legs of the HOAP-2 humanoid robot. We apply a resolved-acceleration type feedback controller to track the desired ankle trajectory. The initial configuration of the robot is a singular one, with stretched knees. Both, simulation with the OpenHRP simulator, and experiments with the real robot confirm the feasibility of the control algorithm.

**Key Words:** Humanoid Robot, Singularity-Consistent Method, Hoap-2, Simulation

### 1 序論

近年、ヒューマノイドロボットは注目を集めており盛んに研究が行われている。これまで ZMP をはじめとする、様々な制御方法が行われている<sup>[1][2]</sup>。しかしヒューマノイドロボットの多くは逆運動学を基に制御されているため特異点問題が生じてしまう。すなわち、ロボットのひざ関節等の関節がまっすぐに伸びた状態（特異点）になると過大な関節角速度が生じてしまい、制御が困難になる。

一方、Nenchev らはロボットの特異点を利用するために特異点適合法を考案した<sup>[3][4]</sup>。この手法を用いることにより、より人間に近い動作を実現することが出来る。本論文では、特異点適合法を用いてより人間に近い動作を実現させるために特異姿勢からの脚上げ動作のシミュレーションを行い、その結果について報告する。シミュレーションでは Hoap-2 と等しい脚自由度を持つ Hoap-1 モデルを用いた。

### 2 特異点適合法

従来のヤコビ行列を用いた逆運動学では、手先 (EE) の軌道から関節角度を求める場合に特異点での制御が困難とされていた。そこで、ヤコビ行列  $J$  を  $\det J$  と  $\text{adj} J$  に分解して考える。Nenchev らが提唱する特異点適合法によると関節の角加速度  $\ddot{\theta}_{ref}$  は以下ようになる。

$$\ddot{\theta}_{ref} = J^T J^* (K_v \dot{e} + K_p e - \dot{J} \dot{\theta}) + b (\text{adj} J) S_d \quad (1)$$

ここで、 $e$  は EE の目標軌道と実軌道との誤差であり、 $S_d$  は方向を表す行列、 $K_v$ 、 $K_p$  はフィードバックゲインで

ある。また  $J^*$  は、 $J^* = (J J^T + S_d S_d^T)^{-1}$  で表される。 $b$  は、EE 加速度の大きさを表すスカラー量である。EE が特異点付近に存在しない場合は、 $b$  は以下のようにして求める。

$$b = (\ddot{p}_d + S_d^T J^* (K_v \dot{e} + K_p e - \dot{J} \dot{\theta})) / (\det J) \quad (2)$$

これは逆行列を求める式と等しい。

しかし、この式を用いてシミュレーションを行うと  $b$  の切り替えの際に不連続な変化を起こしてしまう。そこでこの式を用いてシミュレーションを行う際の  $b$  の切り替えの条件を以下に示す。

$$b = \begin{cases} b_{const} & (\det J < \epsilon) \\ \frac{\bar{b}(\ddot{p}_d + S_d^T J^* (K_v \dot{e} + K_p e - \dot{J} \dot{\theta}))}{(\det J)} & (\det J \geq \epsilon) \end{cases} \quad (3)$$

シミュレーション実行時には  $b$  の値が  $b = b_{const}$  から切り替わる瞬間に次式を用いて  $\bar{b}$  の値を得る。以降は  $\bar{b}$  の値は書き換えを行わず定数とする。

$$\bar{b} = b_{const} \frac{(\det J)}{(\ddot{p}_d + S_d^T J^* (K_v \dot{e} + K_p e - \dot{J} \dot{\theta}))} \quad (4)$$

切り替え後は  $b$  を式 (3) より計算する。その際に  $\bar{b}$  は式 (4) より得た定数を用いる。これにより切り替え時における  $b$  の不連続性を解決する。

### 3 シミュレーション

#### 3.1 姿勢制御

姿勢制御には CoM (Center of Mass) を用いてフィードバック制御を行った。地面についている脚を原点として倒

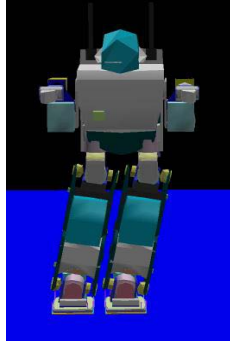


Fig.1: CoM Transfer

立振子モデルを考え、その際に質量  $M$  は CoM 一点にあるものとし、脚は無重量脚とする。

### 3.2 CoM の移動

特異姿勢から特異点適合法を用いて脚上げシミュレーションを行うには、脚を上げないほうの片脚（軸脚）でバランス制御を行う必要がある。そのためには CoM を軸脚の上に移動させる必要がある。Fig.1 に示すように、CoM を左脚の足首ジョイントの上に移動させた。目標位置までの移動に必要な軌道は 5 次補間法を用いることで、目標位置への緩やかな移動を実現した。

### 3.3 脚上げシミュレーション

脚上げ動作シミュレーションでは、5 秒かけて脚を床 (0 m) から 0.09 m まで真上に上げた。 $S_d = [0.0 \ 0.0 \ 1.0]^T$  とし、Z 方向（真上）への移動とした。特異点付近における  $b$  は、 $b = 1500$  とし、フィードバックゲインは  $K_v = \text{diag}[50.0 \ 50.0 \ 50.0] \text{ s}^{-1}$   $K_p = \text{diag}[500.0 \ 500.0 \ 500.0] \text{ s}^{-2}$  とした。

## 4 シミュレーション結果

脚上げ動作シミュレーション開始時の様子を Fig.2 に、シミュレーション終了時の図を Fig.3 に示す。またシミュレーション結果を Fig.4 ~ 7 に示す。

Fig.4 を見るとパラメータ  $b$  は、特異点付近から 0.7 s 付近で滑らかではないが連続的に切り替えられていることがわかる。一方、Fig.6 を見ると、関節角度レベルでは比較的滑らかに行われていることがわかる。Fig.5 をみると多少の時間遅れがあるものの、目標軌道へは追従しており、かつ 5 次補間法を用いることにより、滑らかに変位していることがわかる。

以上のことより、特異点適合法が有効であると考えら

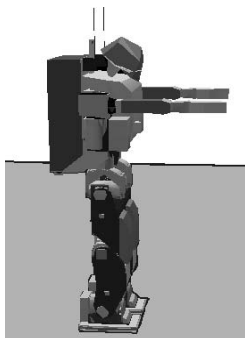


Fig.2: Initial condition.

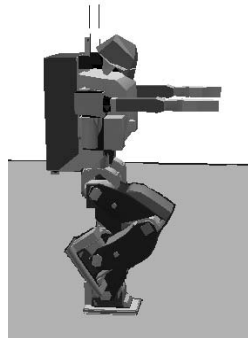


Fig.3: Subsequent posture.

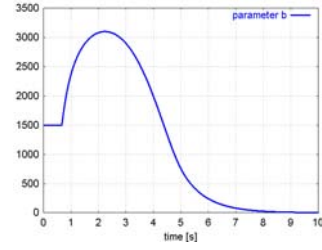


Fig.4: Parameter b.

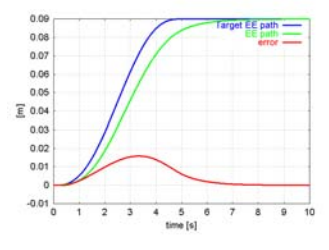


Fig.5: EE path.

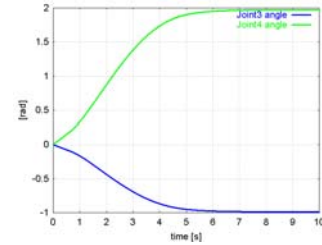


Fig.6: Joint angle.

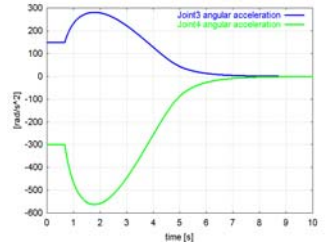


Fig.7: Joint acceleration.

れる。

## 5 結言と今後の展開

今回は特異点適合法の脚上げシミュレーションを行い特異点適合法の有効性を示すことができた。直立状態からの脚上げを行うのと同時にロボットのバランスを制御することができた。

今後は目標軌道を歩行軌道とすることで特異点である直立状態からの階段のぼりのシミュレーションと、実機 Hoap-2 を用いた検証を行う。

## 文 献

- [1] T. Sugihara, Y. Nakamura, H. Inoue, "Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control," Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1404–1409, 2002.
- [2] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, H. Hirukawa "Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point," Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1620–1626, 2003.
- [3] D. N. Nenchev, Y. Tsumaki, A. Sekiguchi "Motion Feedback Control at a Singular Configuration," 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 508–509, 2003.
- [4] 関口 暁宣, 跡部 有希, 亀田 幸秀, 妻木 勇一, D. N. Nenchev "特異点適合法によるヒューマノイドロボットの動作生成に関する考案," 第 21 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2A27, 2003.