

反動零空間を用いたヒューマノイドロボットの姿勢制御

Balance Control of a Humanoid Robot Based on the Reaction Null Space Method

西尾 彰倫 (武蔵工大) 高橋 健太郎 (武蔵工大)
岩倉 崇 (武蔵工大) Dimiter Zlatanov (武蔵工大)
正 Dragomir. N. Nenchev (武蔵工大)

Akinori NISHIO, Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo
Kentaro TAKAHASHI, Musashi Institute of Technology
Takashi IWAKURA, Musashi Institute of Technology
Dimitar ZLATANOV, Musashi Institute of Technology
Dragomir NENCHEV, Musashi Institute of Technology

Abstract: A humanoid robot should be able to keep its balance even in the presence of disturbing forces. Studies of human body reaction patterns to sudden external forces are useful to develop balance control strategies. In this paper we show that one such reaction pattern, called "hip strategy," can be modeled by means of the Reaction Null Space method. We use a simple simulation model to confirm the validity.

Key Words: Reaction Null-Space, Human balance control, Humanoid Robot

1 緒言

現在多くのヒューマノイドロボットは、そのバランス制御の方法として、ZMP (Zero Moment Point)[1][2] を逆運動学を用いることによって操作し制御を行っている。ヒューマノイドロボットのバランス制御は、歩行時などの動的状態でのバランス制御については前述したような制御法を用いた研究がなされているが、静的状態でのバランス制御はあまり研究がなされていない [3]。そこで、人間が直立状態で外力を受けた場合にとる 3 つの立位姿勢制御法に着目し、各パターンにおける姿勢制御法をヒューマノイドロボットに適用することで、ヒューマノイドロボットのバランス制御が可能になると考えられる。

宇宙空間で使用されるマニピュレータの代表的なものとして、マクロ・マイクロマニピュレータというものがある。長大なマクロ・マニピュレータの先端にマイクロマニピュレータが取り付けられているため、作業領域の広さと器用な作業を行えるという利点がある。しかし、軽量化されたマクロマニピュレータの剛性の低さが問題となり、マイクロマニピュレータを動かした際生じる反力、反モーメントがマクロマニピュレータに伝わり、マイクロマニピュレータ、及び、船体に悪影響を与える。そこで、Nenchev らは、マクロマニピュレータを柔軟ベースと仮定した柔軟ベース上マニピュレータを考え、これに、反動零空間 (Reaction Null Space)[4][5] を利用した無反動制御法を適用することによって、柔軟ベース部に振動、反力を生じさせることなく、柔軟ベース上のマニピュレータを制御することが可能であることを提案した。

本論文では、人間が外力を受けた場合にとる 3 つの立位姿勢制御パターンのうち、腰関節を曲げることによる姿勢制御パターンに反動零空間を利用した無反動制御法を適用

し、シミュレーションを行うことでその有効性を検証した。

2 外力を受けた場合の立位姿勢制御法

人間が直立状態で外力を受けた場合にとる姿勢制御には下記の 3 つの行動パターン (Fig. 1) が存在する。

- ・足首による姿勢制御 (Ankle strategy)
- ・腰関節を曲げることによる
姿勢制御 (Hip strategy)

- ・片足をステップさせることによる
姿勢制御 (Step strategy)

上記の 3 つのパターンは受ける外乱が強い程、下のパターンへと移行する。

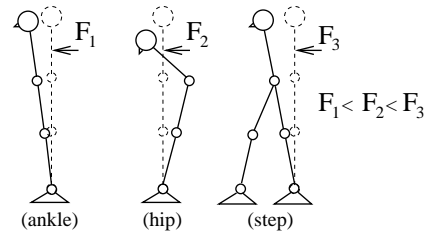


Fig.1: Three strategies for human balance control

Fig. 1 に示す 3 つの姿勢制御のうち、腰関節を曲げることによる姿勢制御に反動零空間を適用し、ヒューマノイドロボットの姿勢制御を行う。

3 柔軟ベース上のマニピュレータにおける反動零空間

柔軟ベース上におけるマニピュレータの運動方程式は、マイクロマニピュレータ部の動力学とマクロマニピュレータの動力学で表される。

$$H_m(\theta)\ddot{\theta} + H_{bm}^T(\theta)\ddot{e} + C_m(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

$$H_{bm}(\theta)\ddot{\theta} + H_b(\theta)\ddot{e} + C_b(\theta, \dot{\theta}) + K_b e = 0 \quad (2)$$

ただし、

- $\theta \in R^n$: 関節角ベクトル
- $e \in R^m$: ベース部位置・姿勢ベクトル
- $H_m \in R^{n \times n}$: マニピュレータ慣性行列
- $H_b \in R^{m \times m}$: ベース部慣性行列
- $H_{bm} \in R^{m \times n}$: 慣性干渉行列
- $C_m \in R^n$: マニピュレータ遠心力, コリオリ力項
- $C_b \in R^m$: ベース部遠心力, コリオリ力項
- $K_b \in R^{m \times m}$: ベース部剛性行列
- $\tau \in R^n$: マニピュレータの関節トルク

ベース部に発生する振動の原因は、エンドエフェクタの動作による反動である。この反動は、反動零空間を利用した無反動制御法を用いることによって打ち消すことが可能である。マニピュレータの動作とベースの関係を見るために、式 (2) の柔軟マニピュレータの方程式を θ, e を含む項ごとに分ける。

$$H_{bm}(\theta)\ddot{\theta} + C_b(\theta, \dot{\theta}) = -H_b\ddot{e} - K_b e \quad (3)$$

これより左辺がベース部変位 e に影響を与えていることが分かる。左辺第二項は $\dot{H}_{bm}\dot{\theta}$ に置き換えることができ、マニピュレータがベース部に及ぼす反力 F は

$$H_{bm}\ddot{\theta} + \dot{H}_{bm}\dot{\theta} = F \quad (4)$$

となる。 $L(0) = 0$ の下で F を時間積分すると次式を得る。

$$H_{bm}\dot{\theta} = L \quad (5)$$

この L は特に干渉運動量と呼ばれるものである。ベース部への反動を零にするには $F = 0, L = \text{const}$ でなければならない。式 (4), 式 (5) の $\ddot{\theta}, \dot{\theta}$ に関する一般解は次式より与えられる。

$$\ddot{\theta} = -H_{bm}^+ \dot{H}_{bm} \dot{\theta} + (I - H_{bm}^+ H_{bm}) \xi_2 \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = (I - H_{bm}^+ H_{bm}) \xi_1 \quad (7)$$

ここで、 $H_{bm}^+ \in R^{n \times m}$ は疑似逆行列、 ξ_1, ξ_2 は任意のベクトルである。 $(I - H_{bm}^+ H_{bm})$ は H_{bm} の零空間射影であり、特に $F = 0, L = \text{const}$ となる空間を反動零空間と呼ぶ。この条件を満たす限り、マニピュレータを操作してもベース部に反動、振動が生じることはない [4]。

4 ヒューマノイドロボットの反動零空間

ヒューマノイドロボットのバランス制御を行うために、床面からの反力を制御をする必要がある。そこで、反動零空間を用いることによってヒューマノイドロボットのバランス制御を行う。初期条件として、CoM が z 軸上にあるとすると、 x, y 軸方向の反力 f_x, f_y が零になればロボットのバランスを取ることが可能になる。ここで、ヒューマノイドロボットの Foot を柔軟ベース上マニピュレータにおけるベース部分、残りのリンクをマニピュレータである

とすると (4) 式の反力 F は次式で表される。以下の式で表される。

$$F' = [f_x \ f_y]^T = 0 \quad (8)$$

即ち、 L' は一定でなければならない。ここで、初期運動量は零であるので、(5) 式から以下の式を得られる。

$$H'_{bm} \dot{\theta} = 0 \quad (9)$$

ただし、 H'_{bm} は H_{bm} から z 軸に関する行を除いたものである。次に、(9) 式は運動量の式として以下のように表すことができる。

$$H'_{bm} \dot{\theta} = M \dot{r}' \quad (10)$$

ただし、 \dot{r}' は $\dot{r} = [\dot{r}_x \ \dot{r}_y \ \dot{r}_z]$ から z 軸方向の速度成分を除いたものである。以上の関係を用いて、ヒューマノイドロボットのバランスを保つための関節速度は

$$\dot{\theta} = [I - (H'_{bm})^+ H'_{bm}] \xi_3 \quad (11)$$

になる。

5 シミュレーション内容

モデルには、脚部分と胴体部分とで構成された 2 リンク機構 (Fig. 2) を仮定し、反動零空間 [5] を利用した無反動制御法を適用することで、ロボットの姿勢制御を行う。これにより、システム全体の CoM の座標は z 軸方向のみの変位が可能であり、 x 軸方向は運動量が零となるよう制御を行うので変位は零となる。 θ_1 を足首関節の角度、 θ_2 を腰関節の角度とする。シミュレーションモデルの各リンクの質量を Table 1 に示す。制御法には前述した反動零空間を適用し、ロボット胴体部の CoM に進行方向に対し 14 N の外力がかかるものとしシミュレーションを行った。

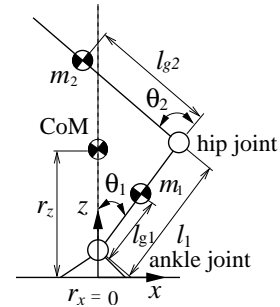


Fig.2: Two link model

Table1: Link mass

Link name	Foot	Link1	Link2	Upper body
質量 [kg]	1.0	0.9174	0.878	4.961

Link1 は足首関節から膝関節のリンク、Link2 は膝関節から腰関節までのリンク、Upper body は胴体部のリンクである。又、膝関節については今回は無視することができるので、Fig. 2 では省略している。このモデルの x, z 座標の CoM は以下の式で求められる。

$$r_x = \frac{m_1 l_{g1} S_1 + m_2 (l_1 S_1 + l_{g2} S_{12})}{m_1 + m_2} \quad (12)$$

$$r_z = \frac{m_1 l_{g1} C_1 + m_2 (l_1 C_1 + l_{g2} C_{12})}{m_1 + m_2} \quad (13)$$

ただし, $C_1 = \cos \theta_1$, $S_1 = \sin \theta_1$, $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$, m_1 は Link1, 2 の質量, m_2 は Upper body の質量, l_1, l_{g1} は Link1 の距離と, Joint1 から Link1 の CoM までの距離, l_{g2} は Joint2 から Link2 の CoM までの距離である. (12), (13) 式をそれぞれ一階微分し行列にすると, 次式が得られる.

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_x \\ \dot{r}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_z & a \\ -r_x & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

ただし, a, b は,

$$a = \frac{m_2 l_{g2} C_{12}}{m_1 + m_2} \quad (15)$$

$$b = \frac{m_2 l_{g2} S_{12}}{m_1 + m_2} \quad (16)$$

である. 式 (14) は式 (10) と同じ形であることが分かる. 又, このとき考えなければならないのは x 軸方向についてのみであるので, z 軸方向については無視することができる. 以上 $r_x = 0$ と式 (12) の関係から目標角度 $^{ref}\theta_1$ を, 式 (9) と式 (14) の関係から目標角速度 $^{ref}\dot{\theta}_1$ を得ることができる.

$$^{ref}\theta_1 = \text{atan2}(m_2 l_2 S_2, m_1 l_1 + 2m_2 l_1 + m_2 l_2 C_2) \quad (17)$$

$$^{ref}\dot{\theta}_1 = \frac{-m_2 l_2 C_{12} \dot{\theta}_2}{(m_1 l_1 + 2m_2 l_1) C_1 + m_2 l_2 C_{12}} \quad (18)$$

これによって, 足首関節の目標値を得ることができる. 又, 腰関節には, 初期姿勢を目標値としたバネ・ダンパを仮定することで, 外力からの姿勢回復を行う. ここまでに求めた目標値を用いて以下に示す式 (19) を用いて PD 制御を行い, 足首関節, 腰関節の制御を行う. ただし, 与えたゲイン k_p, k_d は, $k_{p1}=3000 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$, $k_{d1}=10 \text{ kgm}^2/\text{s}$, $k_{p2}=9 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$, $k_{d2}=1 \text{ kgm}^2/\text{s}$ である.

$$\tau_i = k_p(^{ref}\theta_i - \theta_i) - k_d(^{ref}\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_i), i = 1, 2. \quad (19)$$

6 シミュレーション結果

Fig. 3 の左図はシステム全体の重心の x 座標, 右図はその z 座標である. Fig. 4 の左図は腰関節と足首関節の目標角度と実際の角度との差を示しており, 右図は腰関節と足首関節の角度を表している. Fig. 4 の左図を見ると足首関節は目標角度を追従していることが, 右図からは足首, 腰関節がそれぞれ比例係数に x 座標の CoM の変位を零にするよう変位していることが見て取れる. 又, Fig. 3 から CoM の z 座標はおおよそ 0.11 m 変位しているのに対して, x 座標に関してはほとんど変位していないことが分かる.

この結果より, ヒューマノイドロボットの安定性が保たれていることが分かる.

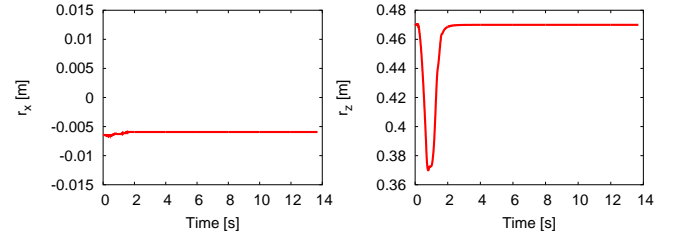


Fig.3: Hip strategy: CoM position

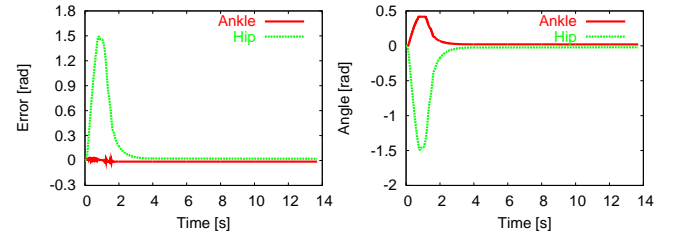


Fig.4: Hip strategy: angle and error

7 結言

シミュレーション結果より, 反動零空間をヒューマノイドロボットに適用することによって, ロボットの姿勢制御を行うことが可能であることが検証された. 今回は, ロボットの CoM の x 座標を $r_x = 0$ としてシミュレーションを行ったが, これが零から多少ずれた場合においても制御可能であるかどうか今後検証していく必要がある.

文 献

- [1] 梶田秀司: "ゼロモーメント (ZMP) と歩行制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No.3, pp.229-232, 2002.
- [2] 水戸部和久, 矢島克知, 那須康雄: "ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御", 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No.3, pp.359-365, 2000.
- [3] 橋口宏衛, 有本卓, 小澤隆太, 村上秀雄: "ゼロモーメント多様体安定化法による体操ロボットの姿勢制御". 第 5 回システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2004).
- [4] Dragomir N. Nenchev, Kazuya Yoshida, Prasert Vichitkul-sawat, Masaru Uchiyama: "Reaction Null-Space Control of Flexible Structure Mounted Manipulator Systems," IEEE Trans. on Robomec and Automation, Vol. 15, No. 6, Dec 1999.
- [5] 吉田和哉, Dragomir N. Nenchev: 橋詰健一, 我孫子聡子, 小田光茂 "ETS-V II を用いた宇宙ロボット制御実験", 日本航空宇宙学会論文集. Vol. 50, No. 584, pp.351-359, 2002.