

# ZMP を用いた平面上の人型ロボットの コンプライアンス応答制御

武蔵工業大学 岡本 和晃, 長尾 学, 金宮 好和, 佐藤 大祐

## ZMP Based Responsive Compliance Control of a Humanoid Robot in the Plane

K. Okamoto, M. Nagao, Y. Kanamiya, D. Sato, Musashi Institute of Technology

**Abstract**—In a previous work, we addressed the problem of acceleration-sensor based reaction control of a humanoid robot, in response to an impulsive external force. The robot was responding by two reaction patterns, called "ankle" and "hip" strategies. In this work, we extend our study by tackling the problem of response to a continuously acting external force. The robot selects one of the above two patterns, depending on the magnitude of the applied force, measured via ZMP calculations.

**Key Words:** Humanoid balance control, External disturbance, ZMP, Compliance, Reaction Null-Space

### 1. 序論

人型ロボットが人の住環境に適応するにあたり、ロボットが人に対して安全である必要がある。ロボットが衝撃を受け転倒してしまうと危険であり、バランスを保つことが重要になっている。これまで我々は、人間が外乱を受けた場合の対応として知られている立位姿勢制御法 [1] と宇宙ロボットの姿勢を制御する手法として考案した反動零空間法 [2] を用い、瞬間的な力に対してバランスを保つ研究を行ってきた [3]。しかし、実世界において外乱は力積として加えられるため、それを随時算出する必要がある。本論文では、矢状面において、立位姿勢制御法と反動零空間法を用いた上で、外乱を ZMP (Zero Moment Point) を用いて算出し、押している間姿勢を変化させてバランスを保つコンプライアンスなバランス制御法について述べる。また、HOAP-2 [4] を用いたバランス制御実験の結果について述べる。

### 2. 人型ロボットにおける反動零空間法

立位姿勢制御法には ankle strategy, hip strategy, step strategy の三段階の対応がある [1]。人間は力の大きさに比例して ankle strategy から hip strategy, step strategy へと対応が変化する。本論文では 2 次元平面で考えることのできる ankle strategy および hip strategy について述べる。

反動零空間法とは、宇宙ロボットの姿勢を制御する手法として考案されたものである [2]。宇宙ロボットはベース部が固定されていない。このことは、足裏と地面が固定されていない人型ロボットについても同じである。そこで、人型ロボットを、足部をベース部、脚部と胴体部をリンクとした平面 3 リンクマニピュレータにモデル化し、反動零空間法を用いて姿勢を制御する。モデルの運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} H_f & H_{fl} \\ H_{fl}^T & H_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_b \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_f \\ c_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_f \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{fl}^T \\ J^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ n \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $H_l \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  はリンク部慣性行列、 $H_f \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は足慣性行列、 $H_{fl} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$  は慣性干渉行列、 $c_f \in \mathbb{R}^3$  は足部遠心力およびコリオリ項、 $c_l \in \mathbb{R}^2$  はリンク部遠心力およびコリオリ力項、 $g_f \in \mathbb{R}^3$  は足部重力項、 $g_l \in \mathbb{R}^2$  はリンク部重力項、 $\tau \in \mathbb{R}^2$  はリンク部関節トルク、 $R_{fl} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  は力・モーメントの変換行列、 $J \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$  はヤコビ行列、 $\ddot{x}_b \in \mathbb{R}^3$  は足部並進加速度および角加速度、 $\ddot{\theta} \in \mathbb{R}^2$  はリンク部関節角加速度、 $f \in \mathbb{R}^2$  はロボットのエンドリンクに加わる力、 $n$  はロボットのエンドリンクに加わるモーメントである。この式から、ベース部の運動方程式を抜き出し、 $f = 0, n = 0$  として積分する。干渉運動量が一定となることより、一般解は以下ようになる。

$$\dot{\theta} = (I - H_{fl}^+ H_{fl}) \xi \quad (2)$$

ここで、 $\xi \in \mathbb{R}^2$  は任意のベクトルである。これについて、反動零空間法を適用すると以下の式が得られる。

$$\dot{\theta}_1^{ref} = \frac{-m_2 l_{g2} C_{12} \dot{\theta}_2}{(m_1 l_{g1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{g2} C_{12}} \quad (3)$$

また、ankle strategy においては Fig. 1(a) のように、足首から上を 1 リンクとした倒立振子として考え、足首関節にはね-ダンパを仮定し、制御を行う。Fig. 1 (a) 倒立振子モデルの運動方程式は以下ようになる。

$$(I + m l_g^2) \ddot{\theta}_1 + C \dot{\theta}_1 + K \theta_1 - m g l_g \sin \theta_1 = \tau_1 \quad (4)$$

ここで、 $I$  は足首関節周りの慣性モーメント、 $K$  はばね係数、 $C$  は弾性係数、 $g$  は重力加速度、 $l_g$  は足部を除いた足首関節からロボット全体重心までの距離、そして  $m$  は足部を除いたロボットの質量を表しており、 $m = m_1 + m_2$  である。HOAP-2 の各関節はハイゲイン制御によって制御が行われており、重力の影響を無視することができる。したがって式 (4) から重力項を除くことができ、次式のようになる。

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{1}{I + m l_g^2} (\tau_1 - C \dot{\theta}_1 - K \theta_1) \quad (5)$$

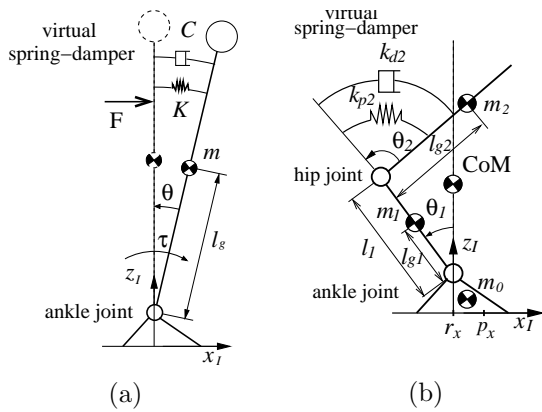


Fig.1 Models for ankle (a) and hip (b) strategies

hip strategy の場合は、腰関節に仮想ばね-ダンパをおく．そのため、式 (5) の各項について、 $I$  は腰関節周りの慣性モーメント、 $K$  はばね係数、 $C$  は弾性係数、 $g$  は重力加速度、 $l_g$  は腰関節からロボットの腰から上の部分の重心までの距離、そして  $m$  はロボットの腰から上の部分の質量を表す．

### 3. ZMP を用いた制御実験

人型ロボットにおいて外力を加えられた際のモーメント  $\tau_1$  は、ZMP の  $x$  座標変位を  $p_x$ 、全体重心の  $x$  座標変位を  $r_x$  とおくと以下のように表される．

$$\tau_1 = mg(p_x - r_x) \quad (6)$$

この値を式 (5) に代入すると以下の式が得られる．

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{1}{I + ml_g^2} \left( mg(p_x - r_x) - C\dot{\theta}_1 - K\theta_1 \right) \quad (7)$$

得られた角加速度を 2 回積分して関節の角度変位を求める．ここで言う関節角度は、ankle strategy の場合は足首関節、hip strategy の場合は腰関節である．以上の理論を用いて、実験を行った．また、圧力センサを用いて ZMP の値を算出した．ただし、ankle strategy および hip strategy のそれぞれで、ダンパ係数は  $4.0 \times 10^4$  Ns/m である．

#### 3.1 Ankle strategy

式 (7) によって制御を行った．実験データを以下の Fig. 2 に示す．ただし、ばね定数は  $1.0 \times 10^4$  N/m である．実験結果から、足首関節は外力を受けた場合に体を前方に出すように変位し、力を加えるのを止めた場合には初期状態に収束していることから、ばね-ダンパによって支えられた倒立振子の動きが生成されていることがわかる．また、力を加えている間は変位し続けていることから、コンプライアンス応答制御ができていることがわかる．

#### 3.2 Hip strategy

式 (3) および式 (7) によって制御を行った．実験データを Fig. 3 に示す．ただし、ばね定数は  $1.0 \times 10^3$  N/m である．実験結果から、ロボットの全体重心は  $x$  軸方向にほとんど変位することなく推移していることから、反動零空間法によって安定したバランス維持が行われ

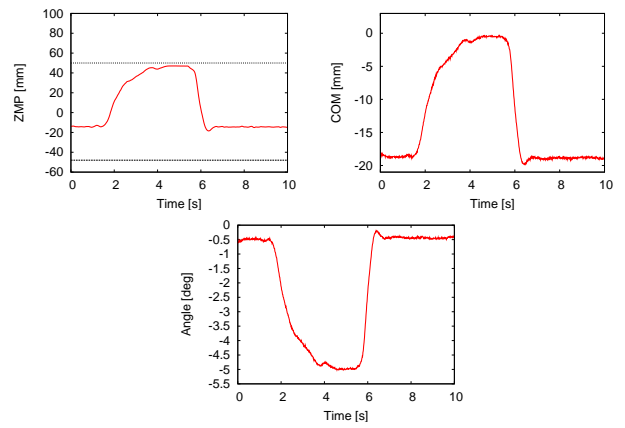


Fig.2 Ankle strategy experiment.

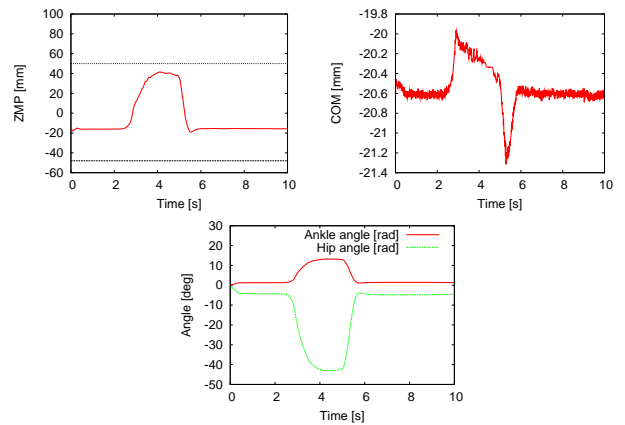


Fig.3 Hip strategy experiment.

ていることがわかる．また、力を加えている間は変位し続けていることから、hip strategy においても、コンプライアンス応答制御ができていることがわかる．

### 4. 結論

人型ロボットの制御において、ankle strategy においては、足首に仮想のばね-ダンパをおき、また ZMP によって常時与えられた力を算出することによって、コンプライアンス応答制御を行うことができた．また、hip strategy においては、腰部に仮想のばね-ダンパをおき、ZMP によって力を算出し反動零空間法によってコンプライアンスなバランス制御を行うことが確認できた．

### 参考文献

- [1] A. Shumway-Cook, F. B. Horak, "Vestibular Rehabilitation: An Exercise Approach to Managing Symptoms of Vestibular Dysfunction," *Seminars in Hearing*, vol. 10, no. 2, pp. 196–209, 1989.
- [2] D. N. Nenchev and K. Yoshida, "Impact Analysis and Post-Impact Motion Control Issues of a Free-Floating Space Robot Subject to a Force Impulse," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 15, no. 3, June, pp. 548–557, 1999.
- [3] A. Nishio, D. N. Nenchev, "Ankle and Hip Strategies for Balance Recovery of a Biped Subjected to an Impact," *Robotica*, vol. 26, pp. 643–653, 2008.
- [4] "Miniature Humanoid Robot HOAP-2 Instruction Manual," 1st ed., Fujitsu Automation Co., Ltd., Dec. 2004.