

反動零空間法に基づいた平面上の外乱に対する 人型ロボットのリアルタイムバランス制御

Reaction-Null-Space Based Real-Time Balance Control of a Humanoid Robot in the Plane Subjected to an Impact

長尾 学 (武蔵工大) 西尾 彰倫 (武蔵工大)
正 金宮 好和 (D. N. ネンチェフ) (武蔵工大)

Manabu NAGAO, Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo
Akinori NISHIO, Musashi Institute of Technology
Yoshikazu KANAMIYA (D. N. Nenchev), Musashi Institute of Technology

Abstract: Humanoid robots must maintain balance to ensure safe operation. The purpose of this paper is to introduce a balance control method for a humanoid robot based on the Reaction Null-Space Method, when a sudden disturbance is applied to the robot. Experiments with a HOAP-2 humanoid robot confirm the validity of the proposed control approach for mimicking the so-called ankle and hip strategy used by humans.

Key Words: Humanoid balance control, Reaction Null-Space, External impact

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。ロボット自身が衝撃を受け、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。

現在行われているバランスの研究では、Goswami らは 2 段階に分けたバランス制御がある [1]。また、人を模した、全身動作によるバランス維持 [2] の研究も行われている。

本論文では、ロボットが突発的な外乱を受けた際における姿勢回復の理論、及び実機を用いての実験について述べる。姿勢制御法には西尾らの理論 [3] に基づき、Nenchev らがフリーフライング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 [4] を用いる。

2 外乱を受けた際の人の対応 (立位姿勢制御法)

人間が外力を受けたとき、立位姿勢制御法という ankle strategy, hip strategy, step strategy の三段階の対応があり [5]、それを用いて人型ロボットの制御を行う。弱い外力の場合、足首の力だけでその力に耐える ankle strategy が行われる。ankle strategy では対応できない比較的大きな力に対しては、腰を曲げることによって力に耐え、バランスを保つ hip strategy を行う。それでも耐えられない大きな力に対しては、片足を踏み出すことによってバランス step strategy を行う。以上の三段階が外乱を受けた際に行う人の対応となる。

3 反動零空間法の人型ロボットへの応用

反動零空間法とは、フリーフライング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 [4]。人型ロボットの足は固定されておらず、変位する。これはベース部が固定されていないという点でフリーフライング宇宙ロボットと共通しており、そこで、我々は Fig. 1 のように足部をベース部、脚部と胴体部を各々リンクとした平面 3

リンクのマニピュレータと考える。このモデルに対し、反動零空間法を用いて姿勢を制御する。

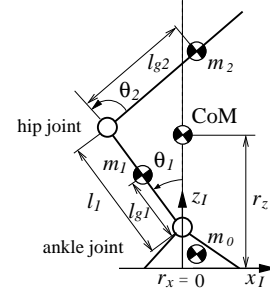


Fig.1: Three link model

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、

$H_l \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$	リンク部慣性行列
$H_f \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	足慣性行列
$H_{fl} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$	慣性干渉行列
$c_f \in \mathbb{R}^3$	足部遠心力, コリオリ項
$c_l \in \mathbb{R}^2$	リンク部遠心力, コリオリ力項
$g_f \in \mathbb{R}^3$	足部重力項
$g_l \in \mathbb{R}^2$	リンク部重力項
$\tau \in \mathbb{R}^2$	リンク部関節トルク
$R_{fl} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	力・モーメントの変換行列
$J \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$	ヤコビ行列
$\ddot{x}_b \in \mathbb{R}^3$	足部並進加速度及び角加速度
$\ddot{\theta} \in \mathbb{R}^2$	リンク部関節角加速度

$f \in \mathbb{R}^2$ ロボットのエンドリンクに加わる力
 n 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， $f = 0$, $n = 0$ のと仮定の元積分し，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．バランス維持のために考えるのは x 軸方向のみであるため，慣性干渉行列 H_{fl} はシステム全体の重心座標から，以下のように求めることができる．

$$H_{fl} = [r_z(m_1 + m_2) \quad m_2 l_{g2} C_{12}] \quad (3)$$

ここで， $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ である． H_{fl} の零空間ベクトルを Mathematica® を用いて求めると，以下のような式が導ける．

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = b \begin{bmatrix} -m_2 l_{g2} C_{12} \\ (m_1 l_{g1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{g2} C_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで， b は任意のスカラー量， $C_1 = \cos\theta_1$ である．この関係角速度を出力することによって，全体の重心を x 軸方向に変位することなく制御することができる．

4 加速度センサーをベースにした制御実験

実験では富士通オートメーションの HOAP-2 を用いる [6]．HOAP-2 は，サーボモータをオンにすると，その姿勢を維持しようとトルクを働かせ，外力に対して受動的に動くことはない．そこで，Fig. 2 のように，ankle strategy では足首関節に，hip strategy では腰関節に，仮想バネダンパ系を設定，与えられた力に対してバネダンパに支えられた倒立振子のように動き，外力に合わせて動く．また，外力の計測には，胴体部にある 3 軸の加速度センサの x 軸方向の値を用いる．

5 Ankle strategy の実験

ここでは，弱い力を受けたときの，ankle strategy 制御について述べる．Fig. 2 の (a) 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，足首関節にバネダンパを仮定し，制御を行う．

Fig. 2 の (a) 倒立振子のモデルの運動方程式は以下のようになる．

$$(I + ml_g^2)\ddot{\theta}_1 + C\dot{\theta}_1 + K\theta_1 - mgl_g \sin\theta_1 = \tau_1 \quad (5)$$

ここで， I は足首関節周りの慣性モーメント， K はバネ係数， 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．

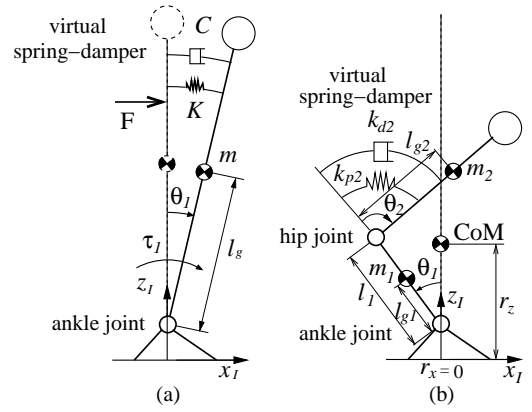


Fig.2: Models for ankle(a) and hip(b) strategies

HOAP-2 の各関節はハイゲイン制御によって行っており，重力の影響を無視することができる．足首関節に関しては，free joint であることを仮定しているため，関節トルク τ_1 は無視することができる ($\tau_1 = 0$)．したがって式 (5) からこれらを除けば，次式のようになる．

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{1}{(I + ml_g^2)} (-C\dot{\theta}_1 - K\theta_1) \quad (6)$$

前述したように，実験では胴体部の加速度センサの値を用いて加えられた力の強弱の判断，及びそれに対応した関節角加速度を算出する．足首関節が free joint と仮定した時の外力によって生じる角加速度は，物体同士の衝突によって生じる角速度と同等に扱われる．外力を加えられた際の足首関節のモーメントは，加速度センサで測定される加速度 a を用いて，以下のように表される．

$$(I + ml_g^2)\ddot{\theta}_1 = mal_g \quad (7)$$

ここで，この式における角加速度 $\ddot{\theta}$ は，衝突時には以下のように表される．

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (8)$$

サンプリングタイム Δt の間では，ロボットに物体が衝突した場合の足首関節に生じる角速度 $\Delta\omega$ は次式から求まる．

$$\Delta\omega = \frac{mal_g \Delta t}{I + ml_g^2} \quad (9)$$

この角加速度を式 (6) に代入することにより，衝突時の軌道が生成することができる．それ以降は式 (6) から算出される角加速度を 2 回積分し，足首関節の角度変位を求め軌道を生成する．

実験では，ロボット胴体部を背中側から手で押すことで，外力としている．また，加速度の強弱から力の大きさを判断している．鋭敏に，且つ素早く姿勢を回復するために，バネ係数 K と弾性係数 C は 5 次補間法を用いてスプライン補間を行った．

これらの条件下で実験を行った． x 軸方向加速度が 0.89 m/s^2 の時の実験データを以下の Fig. 3 に示す．

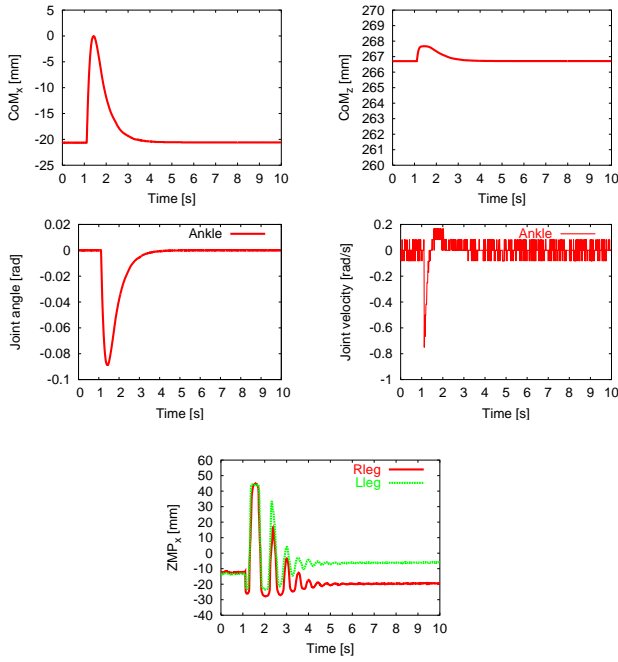


Fig.3: Ankle strategy experiment

実験結果から、足首関節は外力を受けた時に体を前方に出すように変位し、その後初期状態に収束していることから、バネ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。重心投影点はHOAP-2の足裏の凸包内に収まっており、安定していることがわかる。ZMPからも同様のことがわかり、転倒するほどのモーメントは発生していない。しかし、ここでは割愛するが、加速度が 1.00 m/s^2 の時では転倒してしまう。そこで、加速度が 0.90 m/s^2 以上の場合からは、hip strategy によって制御を行う。

6 Hip strategy の実験

hip strategy を行うにあたって、腰関節は、仮想バネダンパによって軌道生成される。そのため、式 (4) の $\dot{\theta}_2$ は算出された目標軌道 $\dot{\theta}_2^{ref}$ となるため、式を変形させ、 b を消して、足首関節の目標関節角速度 $\dot{\theta}_1^{ref}$ は下の式によって求められる。

$$\dot{\theta}_1^{ref} = \frac{-m_2 l_{g2} C_{12} \dot{\theta}_2^{ref}}{(m_1 l_{g1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{g2} C_{12}} \quad (10)$$

これにより、足首関節の目標関節角度が求まる。反動零空間法を適用することによって、 x 軸方向の干渉運動量が一定 ($= 0$) となるように制御され、全体重心の x 軸方向変位は零となり、バランス維持を行う。

ankle strategy での実験同様背中から手で押すことによって外力を与えた。 x 軸方向加速度が 2.48 m/s^2 の時の実験データを Fig. 4 に示す。

実験結果から、反動零空間法を用いることによって、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。ZMP の値は、外力が与えられた直後は激しく変位しているが、その後収束しており、転倒するよう

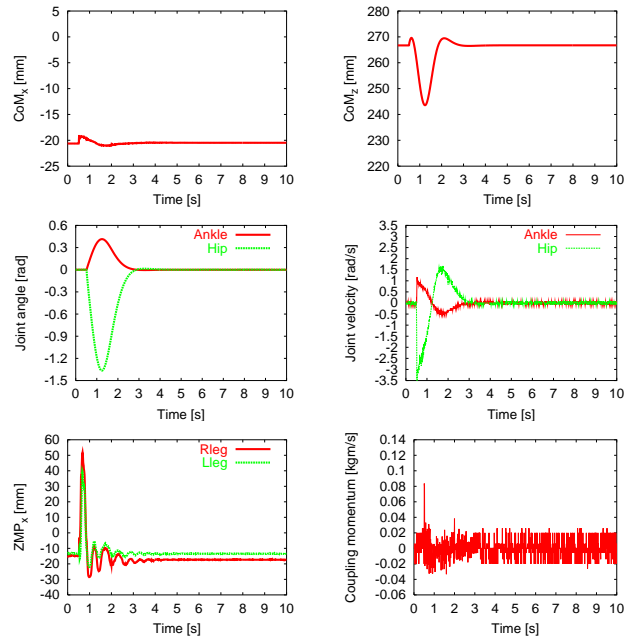


Fig.4: Hip strategy experiment

なモーメントは発生していない。以上の結果より、安定したバランス維持が行われていることが見て取れる。

7 結論

人型ロボットの制御において、ankle strategy と hip strategy を適応させることにより、ロボットに外力が加わった際転倒することなく外乱から立位姿勢を保ち続けることができた。また、その際関節に倒立振子の動力学を用いて軌道生成を行うことにより、人型ロボットを受動的に動作させることができた。hip strategy においては、フリーフライング宇宙ロボットの制御に用いられる反動零空間法を適用させることで安定したバランス制御を行うことができ、その有効性を示すことができた。

文 献

- [1] M. Abdallah, A. Goswami, "A Biomechanically Motivated Two-phase Strategy for Biped Upright Balance Control," IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Dec. 2005, pp. 1996–2001.
- [2] P. Gorc, "Dynamic control of bipeds using postural adjustment strategy," IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1997, Vol. 1, pp. 453–458.
- [3] A. Nishio, K. Takahashi, D. N. Nenchev, "Balance Control of a Humanoid Robot Based on the Reaction Null Space Method," IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, Oct. 2006, pp. 1996–2001.
- [4] 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, pp. 548–557, June 1999.
- [5] A. Shumway-Cook, F. B. Horak, "Vestibular rehabilitation: An exercise approach to managing symptoms of vestibular dysfunction," Seminars in Hearing, Vol. 10, No. 2, 1989, pp. 196–209.
- [6] Fujitsu Automation Co., Ltd, Miniature Humanoid Robot HOAP-2 Instruction Manual.