

# 人型ロボットにおける反動零空間法に基づくモーション・フォース制御

## Motion/Force Control of Humanoid Robots With the Reaction Null-Space Method

学 大川 涼平 (東京都市大学)  
正 佐藤 大祐 (東京都市大学)

村松 雄基 (東京都市大学)  
正 金宮 好和 (東京都市大学)

田口 翔一 (東京都市大学)

Ryohei OKAWA, Tokyo City University, okawa@rls.mse.tcu.ac.jp

Yuki MURAMATSU, Tokyo City University

Shoichi TAGUCHI, Tokyo City University

Daisuke SATO, Tokyo City University

Yoshikazu KANAMIYA, Tokyo City University

This research shows how to apply the Reaction Null-Space method for controller design of a humanoid robot such that the balance and motion/force control subtasks are dynamically decoupled. The performance of the controller is verified via simulations, using the model of a miniature humanoid robot HOAP-2.

**Key Words:** Humanoid robot, Balance control, Motion/force control, Reaction Null-Space method

### 1 緒言

人間の住環境は人間にとって使いやすいように整備されており、道具もまた同じように人間に合わせて作られている。したがって、環境インフラに再投資をする必要なく導入が容易な人型ロボットに注目が集まっている。

しかし、人型ロボットにおいてさまざまな運動を実現するために必要となる高度な制御則が不足している。人型ロボットが人間の作業の代行をする上で必要なことは実用的な作業が行えることである。実用的な作業の例として机の上の清掃やドアの開閉、組み立て作業などが挙げられる。これらの作業は作業を行う手先の位置制御と対象物に加える力制御を同時に行うハイブリット制御（モーション・フォース制御）が必要である。

また、人型ロボットは作業専用の環境で活動する産業用ロボットと異なり、床面や壁面に固定されていない。人型ロボットは突発的な外乱により転倒などの恐れがあり、それによる周囲の人間への危害、人型ロボット自身の破損、周辺環境の破壊の可能性が考えられる。よって外乱に対するバランス制御も必要がある。

そこで、我々はモーション・フォース制御とバランス制御の研究を行ってきた。モーション・フォース制御は Khatib ら [1] や吉川ら [2] によって研究が進められてきた。我々は、簡易的なシリアルリンクモデルにおいて宇宙で用いる浮遊ベースロボットのために開発された反動零空間法 (Reaction Null-Space: RNS) [3] を応用した制御法を提案し [4], Khatib らが考案した制御と同等な性能を持つことを示した [5]。

人型ロボットにおいては、全身の動作生成と制御に関する研究 [6][7] が増えてきているが、対象物に接触し、接触した手先の力を制御する作業については研究が十分には行われていない。そこで我々は人型ロボットが浮遊ベースで

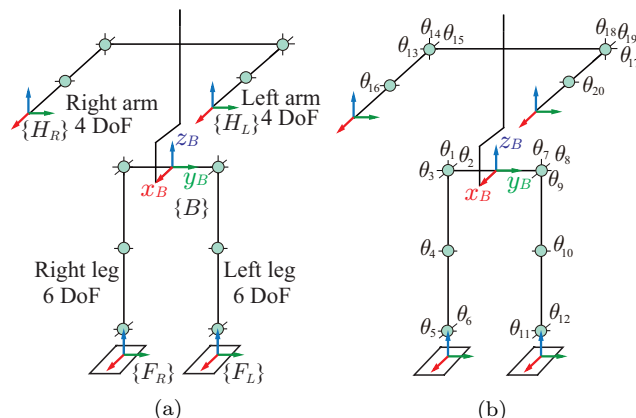


Fig. 1: Simulation model (HOAP-2).

あることから、RNS を人型ロボットに対しても適用できると考え、それを応用することにより手先のモーション・フォース制御を実現する。

バランス制御については人型ロボットの重心位置を制御する方法が多く研究されている [8][9]。我々は過去の研究成果として、RNS を応用することにより突発的に発生する外乱に対して、簡易モデルを用いた立位姿勢制御を実現した [10]。

これらを統合することでモーション・フォース制御とバランス制御を両立した制御を実現することが可能である [11]。そこで、本稿では、人型ロボットにおける反動零空間法に基づく運動量変化率を考慮したバランス制御と、バランス制御とは非干渉な各リンクの先端部におけるモーション・フォース制御の統合について述べる。そして、小型人型ロボット HOAP-2 をモデルとしたシミュレーションを行い、統合された制御手法の正当性を確認する。

### 2 基本式

今回用いる小型人型ロボット HOAP-2 のシミュレーションモデルを図 1 に示す。図 1 のモデルにおいて、腰部

をベース部と設定することで各リンクを独立した固定マニピュレータとして扱うことが可能となる．またベース部の自由度を 6, 腕部の自由度を 8, 脚部の自由度を 12 とする．

人型ロボットの全身における運動方程式を次式に示す．式中, ベース部を  $B$  部, 手先部を  $H$  部, 足部を  $F$  部とする．

$$\begin{bmatrix} M_B & M_{Bl} \\ M_{Bl}^T & M_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_B \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{C}_B \\ \mathcal{C}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{G}_B \\ \mathcal{G}_l \end{bmatrix} \quad (1) \\ = \begin{bmatrix} \mathcal{F}_B \\ \tau_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_F \\ J_F^T \end{bmatrix} \mathcal{F}_F + \begin{bmatrix} P_{Hf} \\ J_H^T \end{bmatrix} f_H$$

各項については以下に示す．

- $M_B \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  :  $B$  部回りの系全体の慣性行列
- $M_l \in \mathbb{R}^{20 \times 20}$  : リンク部の慣性行列
- $M_{Bl} \in \mathbb{R}^{6 \times 20}$  :  $B$  部とリンク部の干渉慣性行列
- $\mathcal{C}_B \in \mathbb{R}^6$  :  $B$  部回りの系全体の非線形項
- $\mathcal{C}_l \in \mathbb{R}^{20}$  : リンク部の非線形項
- $\mathcal{G}_B \in \mathbb{R}^6$  :  $B$  部回りの系全体の重力項
- $\mathcal{G}_l \in \mathbb{R}^{20}$  : リンク部の重力項
- $\mathcal{V}_B \in \mathbb{R}^6$  :  $B$  部のツイスト
- $\theta_l \in \mathbb{R}^{20}$  : リンク部の関節角度
- $\mathcal{F}_B \in \mathbb{R}^6$  :  $B$  部に加わる力とモーメント
- $\mathcal{F}_F \in \mathbb{R}^{12}$  :  $F$  部に加わる力とモーメント
- $f_H \in \mathbb{R}^6$  :  $H$  部に加わる力
- $J_F \in \mathbb{R}^{12 \times 20}$  :  $B$  部から  $F$  部までのヤコビ行列
- $J_H \in \mathbb{R}^{6 \times 20}$  :  $B$  部から  $H$  部までのヤコビ行列

次に  $B$  部と各先端部にかかる力の関係を示す Pose Matrix を以下に示す． $P_{(\circ)f}$  は先端部にかかる力を  $B$  部へ変換する行列,  $P_{Fm}$  は  $F$  部のモーメントを  $B$  部へ変換する行列である．

$$P_{(\circ)f} = \begin{bmatrix} I_3 & I_3 \\ r_{(\circ)R}^\times & r_{(\circ)L}^\times \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \\ P_{Fm} = \begin{bmatrix} 0_3 & 0_3 \\ I_3 & I_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$$

式中,  $r_{(\circ)R}, r_{(\circ)L}$  は  $B$  部から  $(\circ)$  部のそれぞれ右側と左側への位置ベクトル,  $(\circ)^\times$  は歪み対称行列,  $I_i \in \mathbb{R}^{i \times i}$  は単位行列とする．今回のモデルにおいて,  $H$  部に対しては点接触,  $F$  部に対しては床面に対して面接触として仮定し, 各先端部における Pose Matrix は次式となる．

$$P_F = [P_{Ff} \ P_{Fm}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \\ P_{Fhf} = [P_{Ff} \ P_{Hf}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12}$$

## 2.1 運動量変化率を用いたバランス制御

バランス制御を行っていくために, 運動量とベース部回りの角運動量を制御に用いる．ベース部回りの運動量方程式を次式に示す．

$$\mathcal{H} = M_B \mathcal{V}_B + M_{Bl} \dot{\theta}_l \quad (2)$$

式中,  $\mathcal{H} = [p^T \ l_b^T]^T \in \mathbb{R}^6$  とし,  $p \in \mathbb{R}^3$  は並進運動量,  $l_b \in \mathbb{R}^3$  はベース部回りの角運動量とする．しかしバラン

ス制御などの高速で動作するロボットの制御の際には, 動力学を考慮する必要があり, 加速度の次元で制御するために, 式 (2) の時間微分から運動量および角運動量変化率を表す次式を求める．

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{H}} &= M_B \dot{\mathcal{V}}_B + \dot{M}_B \mathcal{V}_B + M_{Bl} \ddot{\theta}_l + \dot{M}_{Bl} \dot{\theta}_l \\ &= M_B \dot{\mathcal{V}}_B + M_{Bl} \ddot{\theta}_l + \underbrace{\dot{M}_B \mathcal{V}_B + \dot{M}_{Bl} \dot{\theta}_l}_{\mathcal{C}_B} \\ &= [M_B \ M_{Bl}] \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_B \\ \ddot{\theta}_l \end{bmatrix} + \mathcal{C}_B \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3) に外力およびシステム全体に働く重力を考慮すると, 次式のように書き換えることができる．

$$\dot{\mathcal{H}} + \mathcal{G}_B = \mathcal{F}_B + P_F \mathcal{F}_F + P_{Hf} f_H \quad (4)$$

式 (3) から  $B$  部および関節の加速度指令値を求める．式中,  $M_{BBl} = [M_B \ M_{Bl}] \in \mathbb{R}^{6 \times 26}$  と置く．

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_B^{ref} \\ \ddot{\theta}_l^{ref} \end{bmatrix} = M_{BBl}^+ (\dot{\mathcal{H}}^{ref} - \mathcal{C}_B) \quad (5)$$

次に運動量変化率および  $B$  部回りの角運動量変化率の指令値  $\dot{p}^{ref}, \dot{l}_b^{ref}$  について示す．運動量と重心速度,  $B$  部回りおよび重心回りの角運動量の関係は次式のようにそれぞれ表すことができる．

$$p = m \dot{r}_c \quad (6)$$

$$l_b = l_c + r_{bc}^\times p \quad (7)$$

式中,  $l_c \in \mathbb{R}^3$  は重心回りの角運動量を示す．運動量および角運動量の変化率指令値を求める際, 重心位置と速度および角運動量に対して初期値に収束するようなフィードバックを行う．このフィードバックを用いた制御式を式 (6) および式 (7) の時間微分より求め, 次式に示す．ただし式 (7) から確認できるとおり,  $B$  部回りの角運動量は運動量に依存するため, 運動量と  $B$  部回りの角運動量を独立に制御することができない．このことから, 重心回りの角運動量を用いてフィードバックを行う．

$$\dot{p}^{ref} = m \ddot{r}_c^{des} + m K_{dv} \dot{r}_c^{err} + m K_{pv} r_c^{err} \quad (8)$$

$$\dot{l}_b^{ref} = \dot{l}_c^{des} + K_{d\omega} \dot{l}_c^{err} + m \dot{r}_{bc}^\times \dot{r}_c + m r_{bc}^\times \ddot{r}_c \quad (9)$$

式中,  $(\circ)^{err} \in \mathbb{R}^3$  は  $(\circ)$  の目標値  $(\circ)^{des}$  と現在値  $(\circ)$  の誤差を,  $K_{dv}, K_{pv}, K_{d\omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はゲイン行列をそれぞれ示す．

## 2.2 モーション・フォース制御

本章では人型ロボットに作業を行わせるためのモーション・フォース制御について示す．本手法のモーション・フォース制御では内力および内モーメントを用いる．ここでは, 内力および内モーメントを, 各先端部に作用する力及びモーメントにおいてベース部に影響を与えない成分とする．各先端部の力およびモーメントと内力および内モーメントの関係を次式に示す [12][13]．

$$\begin{bmatrix} f_{FH} \\ m_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{Fhf}^+ & E & -P_{Fhf}^+ P_{Fm} \\ 0 & 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_I^{imp} \\ f_I \\ m_I \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中の各項については以下に示す．

- $f_I \in \mathbb{R}^6$  : 内力
- $m_I \in \mathbb{R}^6$  : 内モーメント
- $\mathcal{F}_{imp} \in \mathbb{R}^6$  : 各先端部から  $B$  部に対する合力および合モーメント
- $f_{FH} \in \mathbb{R}^{12}$  : 先端部にかかる力
- $m_F \in \mathbb{R}^6$  :  $F$  部にかかるモーメント
- $E \in \mathbb{R}^{12 \times 6}$  : 各先端部にかかる内力の関係を示す行列

ここで，式 (4)  $\mathcal{F}_{imp}$  は  $B$  部における各運動量変化率と重力項を補償していると考えられるため， $\mathcal{F}_{imp} = \dot{\mathcal{H}}^{ref} + \mathcal{G}_B$  と変換できる．また，式における  $[E - P_{FHf}^+ P_{Fm}] \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$  は  $P_{FHf}$  の零空間に含まれるため， $B$  部に対して非干渉である．以上より  $B$  部に非干渉な  $f_I, m_I$  を用い，次式によって  $H$  部のモーション・フォース制御を実現する．

$$\begin{bmatrix} f_I^{ref} \\ m_I^{ref} \end{bmatrix} = [E - P_{FHf}^+ P_{Fm}]_H^+ \left\{ S_H f_H + S_H^+ M_H \dot{v}_H^{ref} - [P_{FHf}^+ (\dot{\mathcal{H}}^{ref} + \mathcal{G}_B)]_H \right\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f_H^{ref} &= f_H^{des} + K_{Hf} (f_H^{des} - f_H) \\ \dot{v}_H^{ref} &= \dot{v}_H^{des} + K_{Hv} (\dot{v}_H^{des} - \dot{v}_H) \\ M_H &= (J_H M_l^{-1} J_H^T)^{-1} \end{aligned}$$

式中， $S_H \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  は選択行列であり，これを用いることにより， $H$  部の運動と力の制御軸を直交化している． $[E - P_{FHf}^+ P_{Fm}]_H \in \mathbb{R}^{6 \times 12}$ ， $[P_{FHf}^+ (\dot{\mathcal{H}}^{ref} + \mathcal{G}_B)]_H \in \mathbb{R}^6$  は  $[E - P_{FHf}^+ P_{Fm}]$ ， $[P_{FHf}^+ (\dot{\mathcal{H}}^{ref} + \mathcal{G}_B)]$  から  $H$  部に関する項を抜き出した行列およびベクトルである．式 (10) に式 (11) を代入することで，各先端部の力とモーメントを求める．そして，この得られた各先端部の力と，式 (5) によって得られた加速度指令値と，式 (1) 中のリンク部の運動方程式から，次式に示すように関節トルク指令値を算出する．

$$\begin{aligned} \tau_l^{ref} &= M_{Bl}^T \dot{v}_B^{ref} + M_l \ddot{\theta}_l^{ref} + c_l + g_l \\ &\quad - J_F^{ref} \mathcal{F}_F^{ref} - J_H^T f_H^{ref} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで，本手法における冗長運動の問題について示す．手先の作業によって発生した関節運動が作業終了時以降でも発生し続けるため，関節角速度に対するダンパを式 (12) に加えるが，ベース部の運動および関節角加速度指令値と干渉する問題がある．そのため人型ロボットによる作業終了時に次式の関節トルク指令値に切り替えることによって，冗長運動を抑制する．

$$\tau_l^{ref} = c_l + g_l - J_F^{ref} \mathcal{F}_F^{ref} - J_H^T f_H^{ref} - K_d \dot{\theta}_l \quad (13)$$

式中， $K_d \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はゲイン行列を示す．

### 3 シミュレーション

上記の制御式の正当性を確認するために，シミュレーションによる検証を行った．

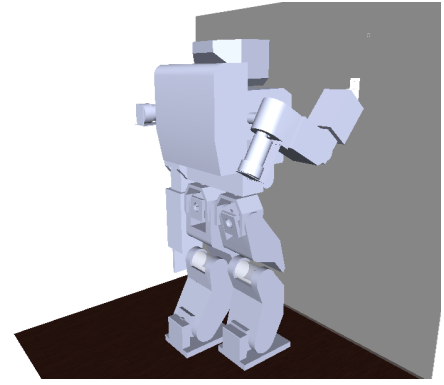


Fig. 2: State of the simulation.

シミュレーション時間は 10 s とし，シミュレーションにおける積分の刻み幅は 1 ms とした．モデルに対して，立位状態において右手先を利用し， $x$  軸に対して垂直な壁面を拭く作業を行わせた．慣性座標系は，初期姿勢においては  $B$  部の座標系と一致する．右手先には壁面を模擬するために， $x$  軸に対して仮想のばねを設定し反力が発生するようにした． $F$  部に対しては床面との摩擦が十分に大きいとし，それにより  $F$  部が動かないと仮定し，ラグランジュの未定乗数法による拘束力を加えた．

右手先に対しては  $x$  軸方向に対して力制御を行い，初期値を 0 N とし 2 s で 3 N となるようにし，その後 4 s までに 0 N となるように五次補間によるスプライン軌道を与えた． $y$  軸， $z$  軸方向に対しては位置制御を行い， $y$  軸方向は初期位置に留まるように制御を加えた． $z$  軸方向には 4 s で 20 mm の直線軌道を一往復するように五次補間によるスプライン軌道を与えた．4 s 以降はすべての軸において力，位置制御ともに初期値を維持するように制御を加えた．左手先に対しては位置，力とともに初期値を維持するように制御を加えた．重心位置に対しては運動量変化率を利用して，初期位置に留まるように制御を加えた．また  $B$  部回りの角運動量および角運動量変化率の目標値は 0 とし制御を行う．

#### 3.1 シミュレーション結果

シミュレーション中におけるモデルの状態を図 2 に示し，図 3 にシミュレーション結果を示す．(a)，(b) には右手先位置と右手先反力について目標値との誤差を示す．(c) には重心位置の目標値との誤差を示す．(d)，(e) には運動量と慣性座標系の原点を参照点とおいた重心の角運動量を示す．(f)，(g)，(h)，(i) には右足と左足，右腕と左腕の関節角速度をそれぞれ示す．

図 3 から手先位置と反力，重心位置の誤差が発生しているが 0 に収束している．運動量，角運動量についても値が発生しているが 0 に収束している．この値は手先の制御における目標値との誤差によって，内力，内モーメントの関係が破綻してしまい，運動量，角運動量の変化率に干渉を与えてしまったことが原因と考えられる．また，(f)-(i) から右手先の動作終了後の 4 s 以降においても関節角速度が発生し続けているが，シミュレーション終了時までにはすべての関節角速度が 0 に収束していることが確認できる．

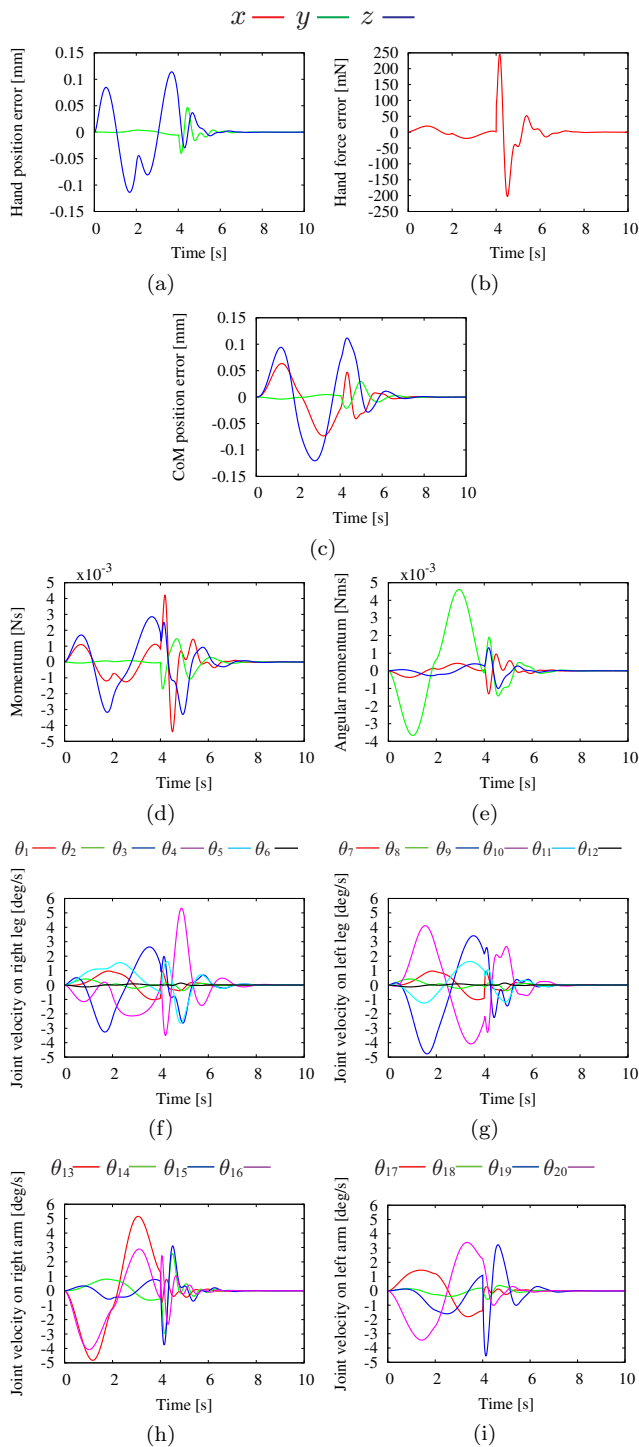


Fig. 3: Simulation results

以上のことから運動量変化率を用いたバランス制御を考慮したモーション・フォース制御は正しく制御が行われたと考えられ、本制御式を用いることにより、人型ロボットのバランス制御と各先端部の制御を行うことが可能であり、今後より複雑な作業の実現が期待できる。

#### 4 結言

本稿では、反動零空間法に基づく人型ロボットにおける、運動量変化率に基づくバランス制御と、バランス制御とは非干渉な各リンクの先端部におけるモーション・フォース制御の統合について述べ、シミュレーションによりその正

当性を確認した。しかし、今回の制御では手先部のみの制御となってしまう、足部について考慮されていないため、左右のそれぞれの足部にかかる力の分配を制御することができない。また運動によって発生する関節の冗長運動に対しては、今回指令トルクを切り替えることにより考慮しているが、トルクの切り替えによって各目標値に誤差を発生させている。

今後の課題は、足部について摩擦などを考慮した制御を加えることと、今回利用していない  $M_{BBl}$  の零空間を利用した、トルクの切り替えを行わない冗長運動の制御について検討していく。そして実機実験により制御式を評価する。

#### 文 献

- [1] O. Khatib, "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation," *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. 3, no. 1, pp. 43–53, Feb. 1987.
- [2] T. Yoshikawa, "Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators—description of hand constraints and calculation of joint driving force," *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. 3, no. 5, pp. 386–392, 1987.
- [3] D. Nenchev, K. Yoshida, and Y. Umetani, "Introduction of redundant arms for manipulation in space," in *IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots*, 1988, pp. 679–684.
- [4] D. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat, and M. Uchiyama, "Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 15, no. 6, pp. 1011–1023, 1999.
- [5] N. Hara, Y. Handa, and D. Nenchev, "End-link dynamics of redundant robotic limbs: The Reaction Null Space approach," *2012 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 299–304.
- [6] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "Pushing manipulation by humanoid considering two-kinds of zmps," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. and Autom.*, 2003, pp. 1627–1632.
- [7] E. Yoshida, M. Poirier, J.-P. Laumond, O. Kanoun, F. Lamiraux, R. Alami, and K. Yokoi, "Pivoting based manipulation by a humanoid robot," *Autonomous Robots*, vol. 28, no. 1, pp. 77–88, 2010.
- [8] S.-H. Lee and A. Goswami, "A momentum-based balance controller for humanoid robots on non-level and non-stationary ground," *Autonomous Robots*, vol. 33, no. 4, pp. 399–414, 2012.
- [9] L. Righetti, J. Buchli, M. Mistry, M. Kalakrishnan, and S. Schaal, "Optimal distribution of contact forces with inverse-dynamics control," *The Int J. Robot. Research*, vol. 32, no. 3, pp. 280–298, 2013.
- [10] D. N. Nenchev and A. Nishio, "Ankle and hip strategies for balance recovery of a biped subjected to an impact," *Robotica*, vol. 26, no. 05, pp. 643–653, 2008.
- [11] L. Sentis and O. Khatib, "Compliant Control of Multicontact and Center-of-Mass Behaviors in Humanoid Robots," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 26, no. 3, pp. 483–501, 2010.
- [12] D. Williams and O. Khatib, "The virtual linkage: A model for internal forces in multi-grasp manipulation," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 1993, pp. 1025–1030.
- [13] T. Yoshikawa and K. Nagai, "Manipulating and grasping forces in manipulation by multifingered robot hands," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 1, pp. 67–77, 1991.