

反動零空間法に基づく人型ロボットにおける 重心と冗長運動を考慮したモーション・フォース制御

大川涼平 村松雄基 横山遼 田口翔一 佐藤大祐 金宮好和 (東京都市大学)

1. 緒言

我々は人型ロボットにおけるモーション・フォース制御と重心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 らが考案した制御に対して，関節空間における有用性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]-[8] や，重心位置を制御する方法が多く研究されている [9]-[11]．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 [12]．また人型ロボットが浮遊ベースであることから，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してきた．

しかし，関節空間における冗長運動を考慮した作業などについては十分に研究が行われていない．そこで，本稿では，反動零空間法に基づく人型ロボットにおける，運動量変化率を考慮した重心および姿勢への制御と，関節の冗長運動を利用した各リンク先端部の運動制御と，そして各リンクの先端部における対象物への力制御の統合について述べる．そして，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. 運動方程式と制御モデル

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 (a) に示す．図 1 (a) 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．

$$\begin{bmatrix} M_B & M_{Bl} \\ M_{Bl}^T & M_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_B \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_B \\ c_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_B \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_B \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_F \\ J_F^T \end{bmatrix} F_F + \begin{bmatrix} P_H \\ J_H^T \end{bmatrix} F_H \quad (1)$$

各項については以下に示す．

$$\begin{aligned} M_B &\in \mathbb{R}^{6 \times 6} : B \text{ 部回りの系全体の慣性行列} \\ M_l &\in \mathbb{R}^{20 \times 20} : \text{リンク部の慣性行列} \\ M_{Bl} &\in \mathbb{R}^{6 \times 20} : B \text{ 部とリンク部の干渉慣性行列} \\ C_B &\in \mathbb{R}^6 : B \text{ 部回りの系全体の非線形項} \\ c_l &\in \mathbb{R}^{20} : \text{リンク部の非線形項} \\ G_B &\in \mathbb{R}^6 : B \text{ 部回りの系全体の重力項} \\ g_l &\in \mathbb{R}^{20} : \text{リンク部の重力項} \\ V_B &\in \mathbb{R}^6 : B \text{ 部のツイスト} \\ \theta &\in \mathbb{R}^{20} : \text{リンク部の関節角度} \\ F_B &\in \mathbb{R}^6 : B \text{ 部に加わる力とモーメント} \\ F_F &\in \mathbb{R}^{12} : F \text{ 部に加わる力とモーメント} \\ F_H &\in \mathbb{R}^{12} : H \text{ 部に加わる力とモーメント} \\ J_F &\in \mathbb{R}^{12 \times 20} : B \text{ 部から } F \text{ 部までのヤコビ行列} \\ J_H &\in \mathbb{R}^{12 \times 20} : B \text{ 部から } H \text{ 部までのヤコビ行列} \end{aligned}$$

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_{if} , ($i = F, H$) は i 部にかかる力を B 部へ変換する行列， P_{im} は i 部にかかるモーメントを B 部へ変換する行列である．

$$\begin{aligned} P_{if} &= \begin{bmatrix} I_3 & I_3 \\ r_{iR}^\times & r_{iL}^\times \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \\ P_{im} &= \begin{bmatrix} 0_3 & 0_3 \\ I_3 & I_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6} \end{aligned}$$

式中， $r_{(i)R}$, $r_{(i)L}$ は B 部から i 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， $I_j \in \mathbb{R}^{j \times j}$ は単位行列とする．そして今回利用する行列を以下に示す．

$$\begin{aligned} P_i &= [P_{if} \ P_{im}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \\ P_f &= [P_{Ff} \ P_{Hf}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \\ P_m &= [P_{Fm} \ P_{Hm}] \in \mathbb{R}^{6 \times 12} \end{aligned}$$

3. 人型ロボットの制御

3.1 運動量変化率を用いたバランス制御

人型ロボットにおけるバランスの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 [14]．

$$\mathcal{L} = M_B V_B + M_{Bl} \dot{\theta} \quad (2)$$

式中， $\mathcal{L} = [p^T \ l_b^T]^T \in \mathbb{R}^6$ 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

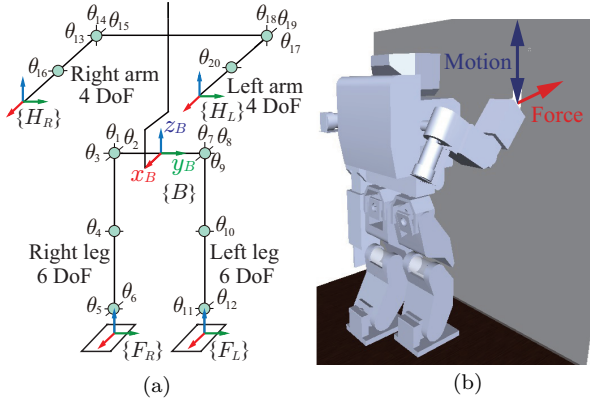


図1 シミュレーションモデル (HOAP-2)

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る、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。

$$\begin{aligned}\dot{\mathcal{L}} &= M_B \dot{\mathcal{V}}_B + \dot{M}_B \mathcal{V}_B + M_{Bl} \ddot{\theta} + \dot{M}_{Bl} \dot{\theta} \\ &= M_B \dot{\mathcal{V}}_B + M_{Bl} \ddot{\theta} + \underbrace{\dot{M}_B \mathcal{V}_B + \dot{M}_{Bl} \dot{\theta}}_{C_B} \\ &= \begin{bmatrix} M_B & M_{Bl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_B \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + C_B\end{aligned}\quad (3)$$

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。

$$\dot{\mathcal{L}} + \mathcal{G}_B = \mathcal{F}_B + \mathcal{P}_F \mathcal{F}_F + \mathcal{P}_H \mathcal{F}_H \quad (4)$$

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。

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_B^{ref} \\ \ddot{\theta}^{ref} \end{bmatrix} = M_{BBl}^+ (\dot{\mathcal{L}}^{ref} - C_B + \mathcal{F}_B) + (I_{26} - M_{BBl}^+ M_{BBl}) \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_{Bn} \\ \ddot{\theta}_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中、 $(\circ)^+$ は擬似逆行列、 $\dot{\mathcal{V}}_{Bn} \in \mathbb{R}^6$ は B 部のツイストに関する任意のベクトル、 $\ddot{\theta}_n \in \mathbb{R}^{20}$ は関節角加速度に関する任意のベクトルとする。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 $\dot{\mathcal{p}}^{ref}$ 、 $\dot{\mathcal{l}}_b^{ref}$ 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。

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

$$\mathcal{l}_b = \mathcal{l}_c + \mathcal{r}_{bc} \times \mathcal{p} \quad (7)$$

式中、 $\mathcal{l}_c \in \mathbb{R}^3$ 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。

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

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

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。

3.2 反動零空間に基づく

先端部の運動と冗長運動の制御

本稿では、式(5)における、右辺第二項の M_{BBl} の零空間の項について示す。この項は関節空間における冗長運動を示す項となり、この項における任意の加速度ベクトルを設定することにより、バランス制御を目的とした第一項のタスクに対して、両立するサブタスクを設定することが可能となる。それより、リンク先端部に対する運動制御を実現していく。現在、 B 部を腰部として設定しており、 M_{BBl} の零空間の項を利用することにより、ベース部への影響を無視できるため、それぞれのリンク部を独立したマニピュレータとして扱うことが可能となる。今回は H 部による作業の実現を目的とするため、 H 部にかかる力と関節のトルク $\tau_H \in \mathbb{R}^8$ の関係について、次式が成立する。

$$\tau_H = J_H^T (S_H \mathcal{F}_H + S_H^\perp M_H \dot{\mathcal{V}}_H) \quad (10)$$

$$M_H = (J_H M_l^{-1} J_H^T)^{-1}$$

式中、 $M_H \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ は、 H 部に関する腕部の移動度テンソル、 $S_H \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ は接触による力と H 部の運動の制御軸を直交化する選択行列とする。ここで τ_H における H 部の運動によるトルクから関節への任意の角加速度 $\ddot{\theta}_{nH} \in \mathbb{R}^{20}$ を求めるため、次式を用いる。

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_{nH}^{ref} &= M_l^{-1} J_H^T S_H^\perp M_H \dot{\mathcal{V}}_H^{ref} \\ \dot{\mathcal{V}}_H^{ref} &= \dot{\mathcal{V}}_H^{des} + K_{Hv} \mathcal{V}_H^{err} + K_{Hp} \mathcal{X}_H^{err}\end{aligned}\quad (11)$$

式中、 K_{Hv} 、 $K_{Hp} \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ はゲイン行列を示す。以上より、運動量変化率と関節空間の冗長運動を利用した、人型ロボットのバランスと H 部の運動について制御を行う。しかし、それらを加速度の次元で考慮しているため、いくつかの作業による運動を行い、加速度が0に収束しても、それぞれの関節における角速度は残留してしまう恐れがある。それらの角速度は関節空間において、予期せぬ冗長運動を引き起こす可能性があるため、それらの冗長運動を抑制するために、次式によって関節の速度に対して、ダンパを設定する

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_{Bn}^{ref} \\ \ddot{\theta}_n^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \ddot{\theta}_{nH}^{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -K_d \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中、 $K_d \in \mathbb{R}^{20 \times 20}$ はダンパにおけるゲイン行列である。上式により、バランス制御に対するサブタスクと

して、先端部の運動制御と、関節における冗長運動の制御を実現する。

3.3 対象物への接触力の制御

本章では人型ロボットに作業を行わせるための対象物への力制御について示す。本手法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およ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 [15][16]。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{FH} \\ \mathbf{m}_{FH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_f^+ & \mathbf{E} & -\mathbf{P}_f^+ \mathbf{P}_m \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{imp} \\ \mathbf{f}_I \\ \mathbf{m}_I \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中の各項については以下に示す。

- $\mathbf{f}_I \in \mathbb{R}^6$: 内力
- $\mathbf{m}_I \in \mathbb{R}^{12}$: 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
- $\mathbf{f}_{FH} \in \mathbb{R}^{12}$: 先端部にかかる力
- $\mathbf{m}_{FH} \in \mathbb{R}^{12}$: 先端部にかかるモーメント
- $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{12 \times 6}$: 各先端部への内力の関係を示す行列

ここで、式 (4) から \mathcal{F}_{imp} は B 部における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、 $\mathcal{F}_{imp} = \dot{\mathcal{L}}^{ref} + \mathcal{G}_B$ と変換できる。また、式中における $[\mathbf{E} \quad -\mathbf{P}_f^+ \mathbf{P}_m] \in \mathbb{R}^{12 \times 18}$ は \mathbf{P}_f 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 \mathbf{f}_I 、 \mathbf{m}_I を用い、次式によって H 部の力制御を実現する。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_I^{ref} \\ \mathbf{m}_I^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\mathbf{P}_f^+ \mathbf{P}_m \end{bmatrix}_H^+ \left\{ \mathbf{S}_H \mathbf{f}_H^{ref} - \left[\mathbf{P}_f^+ (\dot{\mathcal{L}}^{ref} + \mathcal{G}_B) \right]_H \right\} \quad (14)$$

$$\mathbf{f}_H^{ref} = \mathbf{f}_H^{des} + \mathbf{K}_{Hf}(\mathbf{f}_H^{des} - \mathbf{f}_H)$$

式中、 \mathbf{S}_H により、 H 部の運動と力の制御軸を直交化している。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、 $[\mathbf{E} \quad -\mathbf{P}_f^+ \mathbf{P}_m]_H \in \mathbb{R}^{6 \times 18}$ 、 $[\mathbf{P}_f^+ (\dot{\mathcal{L}}^{ref} + \mathcal{G}_B)]_H \in \mathbb{R}^6$ は $[\mathbf{E} \quad -\mathbf{P}_f^+ \mathbf{P}_m]$ 、 $[\mathbf{P}_f^+ (\dot{\mathcal{L}}^{ref} + \mathcal{G}_B)]$ から H 部に關する項を抜き出した行列およびベクトルである。式 (13) に式 (14) 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。

$$\boldsymbol{\tau}^{ref} = \mathbf{M}_{Bl}^T \dot{\mathbf{v}}_B^{ref} + \mathbf{M}_l \ddot{\boldsymbol{\theta}}^{ref} + \mathbf{c}_l + \mathbf{g}_l - \mathbf{J}_F^T \mathcal{F}_F^{ref} - \mathbf{J}_H^T \mathbf{f}_H^{ref} \quad (15)$$

4. 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。

シミュレーションモデルの初期姿勢については図 1 (b) に示す。シミュレーション時間は 12 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、重心 y 軸に運動させつつ、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った。初期値を 0 N とし 5 s で 3 N となるようにし、その後、10 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とどまるように制御を加えた。 z 軸方向には 10 s で 30 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。左手先に対しては初期位置にとどまるような制御を加えた。重心位置に対しては運動量変化率を利用して、 y 軸方向に 10 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。それ以外の方向には初期位置にとど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。10 s 以降はすべての部分、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。

図 2 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) には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。(e)、(f) には脚部の関節角速度をそれぞれ示す。(g)、(h) には腕部の関節角速度をそれぞれ示す。

図 2 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。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 H 部の運動によって腕部に発生した運動量による干渉が原因の一つとして考えられる。しかし、この運動量における干渉を抑制するためには、作業と関係ない部分の運動が不可欠である。その運動は複数の先端部を利用した作業の場合、両立することが困難あることから、この干渉については無視できると考えられる。もう一つの原因として、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_n^{ref}$ における先端部の運動に対する指令値と、関節速度に対するダンパの指令値の干渉が考えられる。

また、(e)、(f)、(g)、(h) から各動作終了後の 10 s 以降、関節速度が 0 に収束しており、関節の冗長運動を抑制できていると考えられる。

以上のことから運動量変化率を用いた重心制御と冗長運動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

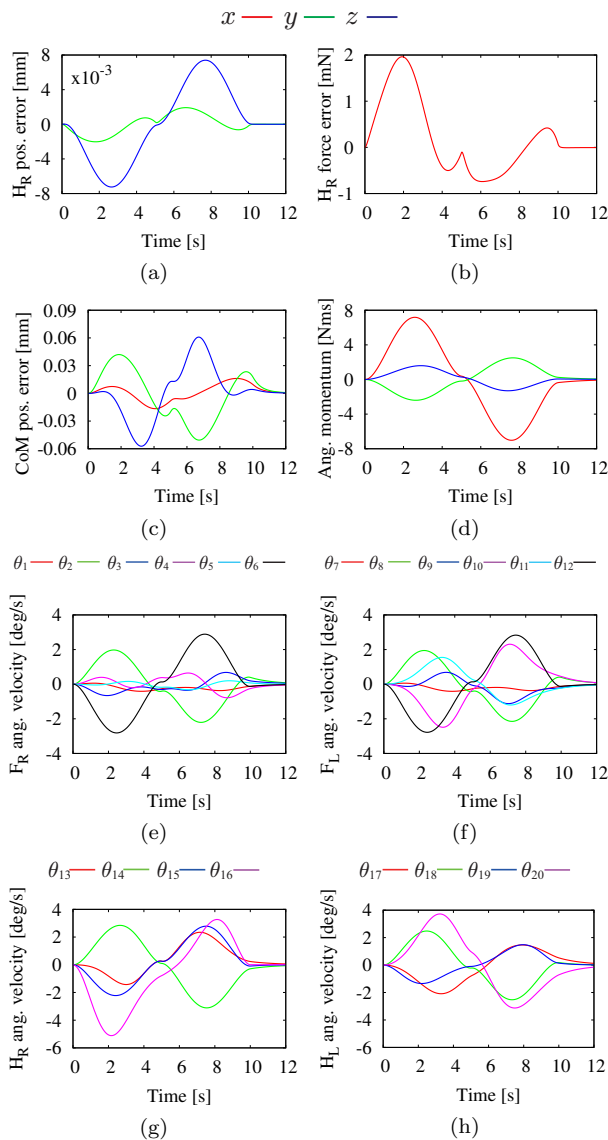


図2 シミュレーション結果：(a), (b) H 部に関する目標値との誤差, (c) 重心位置における目標値との誤差, (d) 重心まわりの角運動量, (e), (f) 脚部における関節角速度, (g), (h) 腕部における関節角速度

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。

5. 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, 重心と関節空間における冗長運動を考慮したモーション・フォース制御について述べ, 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 H 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ず, F 部と床面との間の摩擦について考慮することができない。また H 部と重心の制御を完全に区別して設定したため, 全身を利用した作業を実現することができない。

今後の課題は, F 部について摩擦などを考慮した制

御を加えた上で, 全身の協調運動による作業の実現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。

参考文献

- [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. Lamirault, R. Alami, and K. Yokoi, "Pivoting based manipulation by a humanoid robot," *Autonomous Robots*, vol. 28, no. 1, pp. 77–88, 2010.
- [8] 黄潤, 近野, 内山, "2A1-1F-G2 ヒューマノイドロボットによる全身協調押し作業," ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, vol. 2003, pp. 69–70, 2003.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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. 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.
- [13] 梶田, 金広, 金子, 藤原, 原田, 横井, 比留川, "分解運動量制御: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成," 日本ロボット学会誌, vol. 22, no. 6, pp. 772–779, 2004.
- [14] 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.
- [15] 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.