解説

マニピュレーションから見るヒューマノイドのトルク制御

Torque Control of a Humanoid Robot: A View from Manipulation

小澤 隆太* *立命館大学

Ryuta Ozawa* *Ritsumeikan University

1. はじめに

これまでヒューマノイドロボット（以下、ヒューマノイド）の制御は詳細な軌道計画と固い関節角制御系を組み合わせで行われることが多かった。しかし、この10年間でバランス制御[1]など、ヒューマノイドにトルク制御を用いようとする流れが増えてきた。一方、マニピュレータの世界では1970年代後半から多くの研究者がトルク制御を研究している。そこで本稿では、2016年9月に開催されたヒューマノイドロボット夏の学校で講義の一つとして行われた、マニピュレーションシステムとヒューマノイドの関連からみた構造の比較やトルク制御に関する講義の一部をまとめて解説する。

2. マニピュレータとヒューマノイドの比較

図1は三つの代表的なマニピュレータシステムとヒューマノイドを示している。これらのロボットシステムの運動方程式は、次のような統一的な表現ができる。

$$m\ddot{\mathbf{p}}_G + m\mathbf{g} - \mathbf{G}_1^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_{CC}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{H}_{CL}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_C - \mathbf{G}_2^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}, \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_{CL}^T \dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{H}_{LL}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}_L - \mathbf{J}^T \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\tau}, \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{p}_G$, $\mathbf{w}$, $\mathbf{q}$ はそれぞれ、重心位置、重心周りの角速度、関節角、 m , $\mathbf{H}_{CC}$, $\mathbf{H}_{LL}$, $\mathbf{H}_{CL}$ は全質量、重心周りおよび関節およびそれらの干渉項の慣性モーメント、 $\mathbf{g}$, $\mathbf{h}_C$, $\mathbf{h}_L$ は重力加速度、重心周りおよび関節の非線形項、 $\boldsymbol{\lambda}$ はロボットと環境の間の接触力であり、 $\mathbf{G}_i$, $\mathbf{J}$ は接触に関するヤコビ行列、 $\boldsymbol{\tau}$ は直接制御できる関節駆動力となる。

表1に示すように、ヒューマノイドとマニピュレータの制御を比較した場合、ロボットと接触対象の固定法、接触における内力操作法、アームの数、接触状態に大きな違いがあり、これが動力学方程式(1)~(3)の解釈を変える。

図1 様々なロボットシステム

表1 ロボットの性質の違い

	アームの 位置制御	アームの 力制御	ハンド・ 協調	人型
ロボット	固定	固定	固定	可動
接触対象	無	固定(可動)	可動	固定
接触 状態	無	固定・ 滑り	固定・滑り ・転がり	固定・ 滑り
アーム数	1	1	多	多
内力操作	無	能動	能動	受動(能動)

マニピュレータの位置制御の場合、式(1), (2)は存在せず、 $\mathbf{H}_{CL} = \mathbf{0}$, $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}$ となる式(3)のアームの動力学のみが存在する。固い環境に対する力制御の場合、 $\boldsymbol{\lambda} \neq \mathbf{0}$ となる。

環境がダイナミクスを持つ場合、式(1)~(3)により表現される。マニピュレータの力制御やハンドの場合、式(1), (2)は環境(物体)の並進と回転の動力学、式(3)はアーム(指)の動力学である。環境とアームの運動学は基部に設定された基準座標系に対して独立な変数で記述されるため、これらの慣性行列は非干渉($\mathbf{H}_{CL} = \mathbf{0}$)となる。一方、ヒューマノイドの場合、式(1), (2)は重心の並進と体幹の剛体の回転の動力学を表し、式(3)は四肢の動力

原稿受付 2017年12月6日

キーワード: Humanoid Robots, Torque Control, Passivity-based Control, Operational Space Control

*〒525-8577 草津市野路東1-1-1

*Kusatsu-shi, Shiga

学である。四肢は体幹の延長として座標が記述されるため、 $H_{CL} \neq 0$ となる。

ハンドやヒューマノイドは複数のアーム（脚）を持ち、それらが環境を介して閉ループを構成する。この場合、アーム間の協調的な制御が必要となり、制御の難しさが増す。

式 (1) と (2) の動力学が有効な場合に共通の特徴は、制御入力 τ の効果は式 (3) に直接的に働くが、式 (1), (2) には、押下方向の拘束力 λ を通じて間接的に働くことである。この拘束力は摩擦等の接触状態により上限が決まる。この限界を正確に知ることは難しいが、垂直抗力と摩擦係数の大きさを考慮した摩擦円すい条件 [2] により近似的にモデル化できることが知られている。

マニピュレーションの場合、ロボットと環境がつくる閉ループリンクに働く内力を変えることにより垂直抗力を調整し、接面方向の摩擦限界を制御することでマニピュレーションのロバスト性を上げることができる [3]。一方、平衡点でのヒューマノイドと地面の間の垂直抗力は重力の影響により受動的に決まる。そのため、摩擦力の限界を積極的に変えるのは難しい。ただし、近年、ヒューマノイドでも多点接触問題などを考えることで、能動的に接触力を制御する環境のマニピュレーション問題を扱うケースも出てきている [4] [5]。

接触におけるもう一つの大きな違いは転がりの扱いである。ハンドでは、転がり接触は重要な接触状態の一つである。一方、ヒューマノイドでは、受動歩行などの一部の歩行ロボットを除いて、転がりを扱っていない。転がりを扱わない場合、ロボットの姿勢が変わっても接触点が一一定のため、ヤコビ行列 G_i , J の計算が簡単になる。一方、転がり接触では接触点移動し、接触するリンクや物体の幾何パラメータにヤコビ行列が依存する。この接触のヤコビ行列は接触力を関節トルクに変換するために用いられるため、転がり接触は正確な接触力の推定と制御を難しくする。

制御系を設計する段階において、マニピュレーションとヒューマノイドでは、この動力学モデルの利用法に大きな違いがある。マニピュレーションにおいては、1980 年代後半から、動力学方程式 (1)~(3) はそのまま扱われることが多い。一方で、ヒューマノイドの場合、図 2 のように、全身モデルを単純な質量（重心）モデルに変換することが多い。すなわち、回転と四肢の動力学は無視することで、式 (1) を

$$m\ddot{\mathbf{p}}_G + m\mathbf{g} = \mathbf{f}, \quad (4)$$

とみなす。ここで $\mathbf{f} = \mathbf{G}_1^T \lambda$ はこの重心ダイナミクス (4) に直接作用する仮想入力である。すなわち、ヒューマノイ

図 2 ヒューマノイドモデルの単純化

ドでは、重心ダイナミクス (4) に対して床反力 λ を制御入力とみなすことが制御の基本的戦略となる。ロボットハンドでも接触力を制御入力とみなす方法はある [6]、また近年、モデルベースの方法でこのような方法がいくつか採用されている [7]。

3. ヒューマノイドの制御方法

ヒューマノイドの運動制御を取り扱うには大雑把に言って二つのことを考える必要がある。一つは、(4) のような、適切な次元に縮退させた動力学モデルに基づき、接触やトルク制限などの運動拘束を考慮した運動計画を行い、そこから得られた目標軌道を追従する方法である。もう一つは、外乱等にさらされるヒューマノイドが与えられた目標軌道（姿勢）に復帰するための制御系設計に関する問題である。前者はほかの解説に譲り、本稿では後者の問題について考える。

マニピュレーションでは、環境との相互作用を制御する方法としてハイブリッド位置・力制御などの接触力を直接制御する方法とインピーダンス制御のように運動を介して力を間接的に制御する方法がある。前者は、ロボットと環境が固く、環境との間に仕事のやりとりがないときに有効な手段であり、後者は環境にダイナミクス等があり、環境との間に仕事のやりとりがある場合にも有効な手段である。表 1 に示したように、ヒューマノイドでは環境とロボットの固定・可動の関係が逆転して四肢により体幹が動かされるので、体幹のダイナミクスを考慮する必要がある。そのためか、インピーダンス制御や剛性制御といった間接的な力制御を用いて制御することが多い[†]。

重心の間接的な力制御を実装するためには主にトルク制御系が使われる。これは大きく分けて二通りの実装方法がある。一つは、逆動力学に基づく線形化手法 [8] であり、もう一つは受動性に基づく制御方法である [9]。前者は、非

[†]実際にインピーダンス制御が使われた理由として正しいかどうかは分からない。

干渉化された目標線形ダイナミクスを作るために逆力学モデルを用いる方法である。この方法は目標力学が非干渉化されるため、外乱に対する応答が直感的で分かりやすい。一方で、この制御系の性能は逆力学モデルの精度に大きく依存する。

受動性に基づく制御は、システムの入出力ポートを定めるとき、そのポート間でエネルギーを生成しない受動要素で構成されているシステムとみなせるように制御系を設計する [10]。この方法の一番典型的な方法は、重力補償、関節ダンパと転置ヤコビ行列を用いた仮想的なバネを加える方法である [9]。この方法は、レギュレータとして使われることが多い。この場合、重力補償項以外は幾何学的なパラメータのみで制御できるため、実装しやすいことが知られている。一方で、システムの力学が非干渉化されないため安定解析が比較的難しい。

近年、この「受動性に基づく制御」は拡大解釈され、実際の受動性の確認はされてなくとも、仮想的なバネ・ダンパーをいれる方法を受動性に基づく制御と呼ぶ場合も多く見られる[†]。その意味で、これから紹介する論文は両方の意味の受動性に基づく制御法を含んでいることに注意されたい。

4. 受動性に基づく姿勢制御

玄ら [1] は受動性に基づく重心位置制御を最初にヒューマノイドのバランス制御に導入した。この方法では、姿勢が一定である仮定のもとで重心座標系を用いると、線形化の仮定を設けなくても重心ダイナミクス (4) がほかのダイナミクスから切り離せる性質を利用し、重心の運動を制御する。図 3 に示すように、この制御法はおおよそ三つの工程からできている。

まず、重心ダイナミクス (4) に対して安定化するための制御入力

$$\mathbf{f} = -\mathbf{K}(\mathbf{p}_G - \mathbf{p}_{Gd}) + m\mathbf{g}, \quad (5)$$

を構成する。ここで $\mathbf{p}_{Gd}$ は重心位置の目標位置、 $\mathbf{K}$ はバネ定数に相当するフィードバックゲインである。しかしながら、実際には重心を直接制御するモータはついていない。

そこで、次に $\mathbf{f}$ を床反力 λ に割り当てるための力分配の最適化問題を解く。時々刻々と変わる床反力の拘束条件などを含む軌道計画の場合、この力分配問題は力学モデルを含んだ形で解かれることが多い [12]。一方、受動性に基づく制御系での力分配問題では、ロボットの力学効果を含めず、目標入力のみを床反力に分配するために使われ

図 3 制御入力の変換

ることが多い [1] [13]。これは、目標入力にトルク飽和などの拘束条件に制約されない場合、次のような線形写像として与えられる。

$$\lambda = (\mathbf{G}_1^T)^\dagger \mathbf{f}. \quad (6)$$

ここで $(*)^\dagger$ は一般化逆行列である。

最後に得られた目標接触力 λ を関節トルク τ に変換することで制御する。これは、関節のダイナミクス (3) の動的効果が無視できる準静的な仮定のもとで、接触力 λ と関節トルク τ が力変換式とみなせるため、次のような接触力と関節トルクの間の準静的な力変換として与えられる。

$$\tau = -\mathbf{J}^T \lambda = \mathbf{J}^T (\mathbf{G}_1^T)^\dagger \mathbf{f} \quad (7)$$

理想な場合、制御入力は式 (7) に式 (5) を代入することで得られる。

重心の力学の影響が重心周りの角運動量や四肢の運動に対してに十分大きいとき、この方法は良い近似となる。一方で、これらの影響が無視できない場合、安定化させるのが難しくなる。そこで、Ott ら [13] は重心周りの力学 (2) の影響まで考慮した方法に拡張した。ここでは、式 (5) を姿勢まで考慮した制御則を用い、式 (6) の $\mathbf{G}_1^T$ を $(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)^T$ に置き換えることで実現している。その他の方法として、余剰関節の動きも同時に扱うために、式 (7) に変わる変換を導入する方法も提案されている [14]。これらの方法の特徴的なのはアルゴリズムが比較的簡潔であることである。そのため、実機に実装した研究が報告されている [13] [15]。

5. 逆力学に基づく全身制御

バランス制御に加え、物体を押しやり、手などで体を支えながら立つ多点接触の場合、接触による拘束を考慮しながら、複数の優先順位の異なる様々な制御目標を達成する必要がある。これを正確に行うにはバランス制御より難しい問題になる。そこで、主に逆力学に基づく方法が用い

[†]一般に、仮想的なバネダンパ (PD 制御効果) を入れても受動性を満足するとは限らない。例えば、弾性関節ロボットの関節 PD 制御は受動性を満足せず、モータ角に関する PD 制御にすることで受動性を満足させる [11]。

図4 関節・作業空間における力と加速度の関係. $x \xrightarrow{A} y$ は $y = Ax$ を表す. $\rightarrow$ は直接的な変換があるのに対して, $\dashrightarrow$ は次元等の問題で直接的な変換がないため, 迂回することで間接的に求まる

られる.

まず複数の目標を達成する方法について考えるために, 動力学方程式 (1)~(3) をまとめて,

$$H_z \ddot{z} + C_z \dot{z} + g_z = J_c^T \lambda + U^T \tau \quad (8)$$

$$= v \quad (9)$$

と記述する. ここで, $\dot{z} = (\dot{p}_G, \omega, \dot{q})$ である. 議論を簡単にするため, まず $v \in \mathbb{R}^n$ は完全駆動可能な入力とみなし, ある作業 $x_i \in \mathbb{R}^{m_i} (m_i < n)$ をその目標値 x_{di} に収束させる問題を考える. ここで $\dot{x}_i = J_i \dot{z}$ とするとき, 式 (8) を次の作業座標系 x_i の動力学方程式に変換できる.

$$A_i \ddot{x}_i + \bar{J}_i^{-T} (C_z \dot{z} + g_z) - A_i \dot{J}_i \dot{z} = f_i. \quad (10)$$

ここで, この変換には J_i^{-1} が必要となるが, 状態空間より作業座標系の次元が低いために逆行列が存在しない. そのため, 図4のような間接的な変換経路により $A_i = (J_i H_z^{-1} J_i^T)^{-1}$, $\bar{J}_i^{-T} = A_i J_i H_z^{-1}$ として求める. 次にシステム (10) を目標 x_{di} に安定化することを考える. このとき, 制御入力 f_i を

$$f_i = \bar{J}_i^{-T} (C_z \dot{z} + g_z) - A_i \dot{J}_i \dot{z} - A_i \ddot{x}_{di} - A_i \Delta \dot{x}_i - B_i \Delta x_i \quad (11)$$

ように与える. ここで $\Delta x_i = x_i - x_{di}$ である. これにより, 閉ループダイナミクスが

$$A_i \Delta \ddot{x}_i + A_i \Delta \dot{x}_i + B_i \Delta x_i = 0 \quad (12)$$

となるので, フィードバックゲイン A_i, B_i を適切に選べば目標に対する追従制御が実現できることが分かる.

全身制御では, バランスの安定化が最優先であり, その

他の事項が優先度が低い. このように, 複数の独立な制御目標に優先度がある場合, 上位の制御入力は優先的に与えられ, 下位の制御入力は上位系の零空間で制御するという優先順位付き制御法が取られる [16] [17]. そこで, J_i の零空間として N_i を次のように定義する.

$$N_i = I - \bar{J}_i^{-1} J_i \quad (13)$$

次に, 上位制御入力の影響を受けない範囲で下位制御系が制御を行うために, 次のような制限付きのヤコビ行列 J_{pi} を考える.

$$J_{pi} = J_i N_{p(i-1)} \quad (14)$$

とする. ここで $N_{pi} = N_i \cdots N_1$ であり, $J_{p1} = J_1$ である. この制限を受けた各部分空間での慣性行列と転置ヤコビ行列の逆行列は $A_{pi} = (J_{pi} H_z^{-1} J_{pi}^T)^{-1}$, $\bar{J}_{pi}^{-T} = A_{pi} J_{pi} H_z^{-1}$ で与えられる (図5は, 優先順位が2段階のときの写像の関係を表している). このとき, (11) の拡張として, 各目標 x_{pdi} に対する制御入力は以下のように定義される.

$$f_{pi} = \bar{J}_{pi}^{-T} (C_z \dot{z} + g_z) - A_{pi} \dot{J}_{pi} \dot{z} - A_{pi} \ddot{x}_{pdi} - A_{pi} \Delta \dot{x}_{pi} - B_{pi} \Delta x_{pi} \quad (15)$$

ここで $\Delta x_{pi} = x_{pi} - x_{pdi}$ である. 式 (15) を用いると優先順位付き制御入力は

$$v = \sum_{i=1}^L J_{pi}^T f_{pi} \quad (16)$$

となる. 例えば, $L=2$ のとき, この (16) を (9) に与え, 左から $\bar{J}_{p1}^{-T}$ をかけると, f_{p2} の影響は f_{p1} から完全に打ち消すことができる. そのため, 各制御目的は独立に達成できる. ここで x_{di} の決め方は, 作業の独立性以外に何も言及していないことに注意する. 実際には, 例えば, 零モーメントポイントが支持多角形内に収めるための運動計画等により目標運動 x_{di} は適切に設計してやる必要がある.

ヒューマノイドは, 全変数を直接的に制御する入力がない劣駆動機構であり, 拘束により床反力を受ける. そのため, 拘束による条件と非駆動による制限を考える必要がある. そこで, Sentis ら [4] は, 接触力 λ を制御入力とみなすことで最初の制御入力をすでに拘束条件の零空間でしか作用しないと考え, 最優先の作業を拘束条件を守ることとし, 次に重心の制御, その他の制御と入れ子構造にしておくことで, 目標接触力を求める方法を提案した.

まず, 接触位置 x_c における接触力 λ を制御入力として利用できると考える. このとき, 拘束力を次のように制御する.

図5 優先順位付きの作業座標の制御（目標が二つの場合）

$$\lambda = -\bar{J}_c^{-T} U^T \tau + \bar{J}_c^{-T} (C_z \dot{z} + g_z) - \Lambda_c \dot{J}_c \dot{z} \quad (17)$$

ここで J_c は $\dot{x}_c = J_c \dot{z}$ により求まるヤコビ行列である。拘束位置におけるヤコビ行列の転置の逆行列は図4と同様な変換を用いることで $\Lambda_c = (J_c H_z^{-1} J_c^T)^{-1}$, $\bar{J}_c^{-T} = \Lambda_c J_c H_z^{-1}$ となる。そこで、式(17)を式(8)に代入すると

$$H_z \ddot{z} + N_c^T (C_z \dot{z} + g_z) + \bar{J}_c^T \Lambda_c \dot{J}_c \dot{z} = (U N_s)^T \tau \quad (18)$$

となる。ここで $N_c = I - \bar{J}_c^{-1} J_c$ は接触のヤコビ行列 J_c の零空間である。左辺第二項は接触状態に影響を及ぼさないヒューマノイドの力学であり、右辺は零空間での制御入力であることがわかる。また、第三項は非線形補償項であり、式(18)に $\bar{J}_c^{-T}$ を掛けると、

$$\Lambda_c \ddot{x}_c + \bar{J}_c^{-T} N_c^T (C_z \dot{z} + g_z) = \bar{J}_c^{-T} (U N_c)^T \tau \quad (19)$$

となるため、接触の力学には影響を及ぼさないことがわかる。

接触により絶対的な位置関係が決まると、局所的な運動は関節の動きのみで表現できる。そこで、このような接触を保つヒューマノイドの運動 $\dot{z}$ は拘束された関節速度 $\dot{q}$ として次のように表現できる。

$$\dot{q} = U N_c \dot{z} \quad (20)$$

目標となる運動 x_i は、常にこの接触による拘束を保つよ

うに動かなければならないので、

$$\dot{z} = \overline{U N_c}^{-1} \dot{q} \quad (21)$$

にて与えられる。仮想仕事の原理より、実現可能な制御入力 τ は

$$\tau = \overline{U N_c}^{-T} v \quad (22)$$

にて与えられる。

多点接触の場合、接触するリンク間で閉ループ拘束が生じる。この場合、接触動力学(18)に影響を与えない関節トルク τ , すなわち、

$$(U N_c)^T \tau = 0 \quad (23)$$

を満足するようなトルクが生じる。このトルクは内力を閉ループ内の内力を制御するために用いられ、 $(U N_c)^T$ の零空間 $I - U N_c \overline{U N_c}^{-1}$ 内に作用する。よって、制御トルクは式(16)の優先順位付き動作 v と内力を調整する項 v_0 により、

$$\tau = \overline{U N_c}^{-T} v + \left\{ I - \overline{U N_c}^{-T} (U N_c)^T \right\} v_0 \quad (24)$$

のように与えられる。 v に含まれる優先順位付き制御として、重心位置や上体姿勢、更には遊脚などの制御が採用される。 v_0 には、各接触点の間の内力の調整を行うためのトラスモデル[18][19]が採用されている。

Righetti ら[20]は、分解加速度法による定式化により劣駆動の伝達行列と重み付きヤコビ行列のQR分解を用いて同様の問題を解いている。彼らは、この手法がSentisら作

業座標系の制御法 [4] を含んだ広いクラスに対応していることを示している. 実際, マニピュレータの手先の位置・力制御において分解加速度法と作業空間での制御法は等価であることが知られており [21], ヒューマノイドでも細かいアルゴリズムの違いを除けば, 等価な変換が見つかるというのは自然な帰結であるといえる.

逆運動学に基づく方法は実装にはリンク慣性などのパラメータ同定が必要であるため, 主にシミュレーションによって検証されてきた. しかしながら, 最近, 実機実験による実証例も報告されている [22]. ここでは, この実現可能な目標接触力の算出に拘束条件付き二次計画問題を解くことでこの接触力を求め, 制御している. ただし, 実装の際には, (7) による近似的なトルク変換を用いるなど, いくつかのアルゴリズムの簡略化を導入している.

6. お わ り に

本稿では, まずマニピュレーションシステムとヒューマノイドとの力学構造の比較からヒューマノイドとマニピュレーションのモデリングにおける相違点と違いを示した. ヒューマノイドロボットの動力学方程式の構造は環境のダイナミクスが使っているが, 接触力に対する考え方や動力学的取り扱いなどに大きな違いがあることを示した. 次に, ヒューマノイドのトルクによる制御方法を紹介した. これらの方法は大きく二つの流れがあり, 一つは受動性に基づく姿勢制御方法であり, これはアルゴリズムが簡潔であるため実機実装が比較的容易であるが, 今のところ姿勢制御などに限定されている. 一方, 全身制御の場合に使われる逆動力学を用いた制御方法は実装している事例は少ないため, 更なる検証が必要となる.

参 考 文 献

- [1] S.H. Hyon, J.G. Hale and G. Cheng: "Full-body compliant human-humanoid interaction: Balancing in the presence of unknown external force," IEEE Trans. on Robot., vol.23, no.5, pp.884–898, 2007.
- [2] J. Kerr and B. Roth: "Analysis of multifingered hands," Inter. J. Robot. Research, vol.4, no.4, pp.3–17, 1986.
- [3] H. Maekawa, K. Tanie and K. Komoriya: "Dynamic grasping force control using tactile feedback for grasp of multifingered hand," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2462–2469, 1996.
- [4] L. Sentis, J. Park and O. Khatib: "Compliant control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots," IEEE Trans. on Robot., vol.26, no.3, pp.483–501, 2010.
- [5] M. Muraoka, S. Nozawa, K. Kaiuchi, Y. Okada and M. Inaba: "Whole-body pushing manipulation with contact posture planning of large and heavy object for humanoid robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp.5682–5689, 2015.
- [6] Y. Nakamura, K. Nagai and T. Yoshikawa: "Dynamics and stability in coordination of multiple robotic mechanisms," Inter. J. Robot. Research, vol.8, no.2, pp.44–61, 1989.

- [7] T. Wimbock, C. Ott, A. Albu-Schaffer and G. Hirzinger: "Comparison of object-level grasp controllers for dynamic dexterous manipulation," Inter. J. Robot. Research, vol.31, no.1, pp.3–23, 2011.
- [8] A. Isidori: Nonlinear Control Systems. Springer, 3 edition, 1995.
- [9] M. Takegaki and S. Arimoto: "A new feedback method for dynamic control of manipulators," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.102, pp.119–125, 1981.
- [10] S. Arimoto: Another language for describing robot motions: A nonlinear position-dependent circuit theory. In Giralt G. and Hirzinger G., editors, The 7th International Symposium Robotics Research, pp.55–66. Springer, 1995.
- [11] P. Tomei: "A simple PD controller for robots with elastic joints," IEEE Trans. Autom. Control, vol.36, no.10, pp.1208–1213, 1991.
- [12] Y. Fujimoto and A. Kawamura: "Simulation of an autonomous biped walking robot including environmental force interaction," IEEE Robot. Automat. Mag., vol.5, no.2, pp.33–41, 1998.
- [13] C. Ott, M.A. Roa and G. Hirzinger: "Posture and balance control for biped robots based on contact force optimization," Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp.26–33, 2011.
- [14] R. Ozawa and J. Ishizaki: "Passivity-based symmetric posture control and the effects of mass distribution and internal impedance on balance," Proc. of IEEE Int. conf. on humanoids, pp.171–176, 2012.
- [15] S.-H. Hyon, R. Osu and Y. Otaka: "Integration of multi-level postural balancing on humanoid robots," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp.1549–1556, 2009.
- [16] Y. Nakamura: Advanced Robotics: Redundancy and Optimization. Addison-Wesley Publishing, 1991.
- [17] L. Sentis and O. Khatib: "Prioritized multi-objective dynamics and control of robots in human environment," Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots, pp. 764–780, 2004.
- [18] D. Williams and O. Khatib: "The virtual linkage: A model for internal forces in multi-grasp manipulation," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., pp.1025–1030, 1993.
- [19] T. Yoshikawa: "Virtual truss model for characterization of internal forces for multiple finger grasps," IEEE Trans. on Robot. Autom., vol.17, no.6, pp.876–886, 1999.
- [20] L. Righetti, J. Buchli, M. Mistry, M. Kalakrishnan and S. Schaal: "Optimal distribution of contact forces with inverse-dynamics control," Inter. J. Robot. Research, vol.32, no.3, pp.280–298, 2013.
- [21] C.H. An, C.G. Atkeson and J.M. Hollerbach: モデルに基づくロボットマニピュレータの制御. 実教出版, 1991.
- [22] B. Henze, M.A. Roa and C. Ott: "Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios," Inter. J. Robot. Research, vol.35, no.12, pp.1522–1543, 2016.

小澤隆太 (Ryuta Ozawa)

2001 年明治大学理工学研究科博士後期課程修了 (博士 (工学)). 同年同大学理工学部助手, 2002 年日本学術振興会特別研究員, 2003 年立命館大学理工学部講師. 現在同大学理工学部教授. 2007 年日本ロボット学会論文賞, 2009 年計測自動制御学会論文賞など受賞. 受動性に基づくロボットの制御, 劣駆動機構, 腱駆動機構, ロボットハンド, 可変弾性機構等の研究に従事. 計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE 等の会員. (日本ロボット学会正会員)