

# 閉ループ連鎖拘束に基づく 人型ロボットの全身モーション・フォース制御

渋谷 駿志（東京都市大学） 金宮 好和（東京都市大学）

## 1. 緒言

ロボットの作業には手先の正確なモーション・フォース制御が必要とされるものがある．このとき，作業中に外乱が加わった場合でも，手先の制御に影響しないことが必要である．このような問題は多点接触時の全身制御に分類され，いくつかの提案がなされている．

まず，外乱に対するバランス制御では，多点接触での受動性に基づいたコントローラが提案されている [1, 2]．しかしバランス制御に重点を置いており，手先の力と運動の正確な追従の条件は与えられていない．

一方で，Operational Space Formulation [3] を用いたコントローラが提案されている．Sentis ら [4] はバーチャルリンクモデルをバランス制御のレンチ分配のために使用している．しかしこの方法は重心の動きと内力の制御に焦点を当てているため，そのまま手先の力と運動の正確な追従には適応できない．

以上より，多点接触の全身制御における，外乱を受けながらの手先の力と運動の正確な追従の研究が必要であると言える．本稿の目的はそのようなコントローラの提案である．まず，手先の力と運動の追従のためにコントローラを閉ループ拘束 [5] に基づいて設計する．閉ループ拘束は正確なマニピュレータ先端のレンチ制御のために提案され，目標の接触力を直接与えることができる．これは間接的に接触レンチを決定するバーチャルリンケージの手法と比較して優位であるといえる．また，計算時間の短縮の観点から非繰り返しの最適化手法を使用する．

今回この汎用コントローラの効果を確認するために物体マニピュレーションのシミュレーションを行った．物体マニピュレーションは広く研究されている [6] が，動的な運動をするものは少なく，物体との接触は両面拘束を仮定している．今回使用するシミュレーションモデルでは物体と腕部は片面拘束によって閉ループを構成する．また，コントローラでは動的に変化する手先の力と運動に対して有効であることを示す．

## 2. 背景

### 2.1 一般化座標

浮遊ベースロボット的一般化座標は  $q = (\mathcal{X}_M, \theta)$  として表される． $\theta \in \mathbb{R}^n$  は関節角度， $\mathcal{X}_M \in SE(3)$  は重心の位置とベースリンク  $\{B\}$  の姿勢， $n$  は駆動関節の数を示す． $\nu_M = [v_C^T \ \omega_B^T]^T$  はツイストであり  $v_C, \omega_B \in \mathbb{R}^3$  はそれぞれ重心の速度とベースリンクの角速度を表す．このとき一般化速度ベクトルを  $\dot{q}_M = [\nu_M^T \ \dot{\theta}^T]^T$  とする．これは重心の運動が Composite Rigid Body (CRB) の回転運動と関節の運動に非干

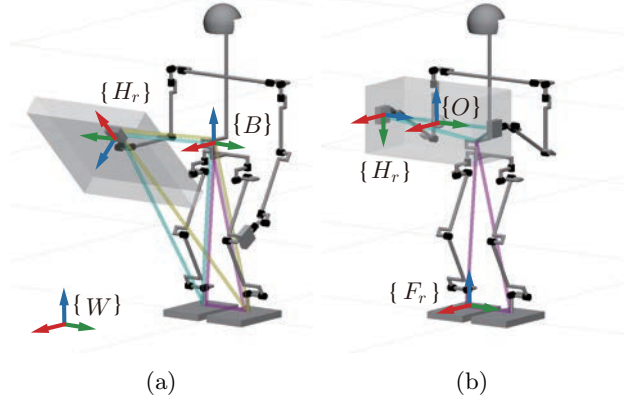


図 1: 閉ループ連鎖拘束: (a) 従属した閉ループ連鎖拘束, (b) 独立した閉ループ連鎖拘束

渉なためバランス制御において優位である．

### 2.2 閉ループ連鎖拘束式

人型ロボットは環境との接触によって幾何学的な閉ループを形成する [5]．例えば，図 1(a) に示す壁面清掃作業では，右腕と右脚，右腕と左脚，右脚と左脚のそれぞれによっての閉ループが生じる．このときそれぞれの閉ループが従属している．他の例では，図 1(b) に示す物体マニピュレーションがあり，このとき両脚と床，両腕と物体でそれぞれ閉ループが形成される．二つの閉ループは独立しているため，それぞれの閉ループで独立した内力の流れを考えることができる．

マニピュレータ先端が  $c$  個の拘束方向と  $\eta$  個の非拘束方向を持つとき，速度次元における拘束方向のロボットの瞬間的な運動は以下で表される．

$$J_c(q)\dot{q}_M = \bar{\nu}^c \quad (1)$$

$$J_m(q)\dot{q}_M = \bar{\nu}^m \quad (2)$$

$J_c = [c_{c_R}^T(q) \ \mathcal{J}_c(q)]$ ， $J_m = [c_{m_R}^T(q) \ \mathcal{J}_m(q)]$  であり， $c_{c_R}(q) \in \mathbb{R}^{6 \times c}$  と  $\mathcal{J}_c(q) \in \mathbb{R}^{c \times n}$  はそれぞれ拘束方向のロボットの変換行列とヤコビを行列を示す． $\bar{\nu}^c \in \mathbb{R}^c$  はマニピュレータ先端のツイストの拘束方向成分である．同様に添字  $m$  は非拘束方向を示す． $\bar{\nu}^c$ ， $\bar{\nu}^m$  は作業に依存する．一般的に， $n > c + \eta$  の場合を仮定すると，ロボットは幾何学的冗長である．

### 2.3 レンチの分配

外力はボディレンチに変換でき，以下で表される．

$$\mathcal{F}_C = c_{c_R}(q)\bar{\mathcal{F}}^c \quad (3)$$

$\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^c$  は接触レンチであり， $\bar{\nu}^c$  の双対である．

$c > 6$  の多点接触の場合、ベースリンクは過拘束となる。よってボディレンチ  $\mathcal{F}_C$  を得るためには、無限の接触レンチの組み合わせが存在する。

$$\bar{\mathcal{F}}^c = \mathcal{C}_{cR}^\#(q)\mathcal{F}_C + N(\mathcal{C}_{cR}(q))\bar{\mathcal{F}}_a^c \quad (4)$$

右辺第二項の  $N(\circ)$  は零空間への射影行列を示す。今回の場合  $N(\mathcal{C}_{cR}) \in \mathbb{R}^{c \times c}$  は拘束方向の変換行列の零空間への射影行列である。これ任意の接触レンチを表し、 $\bar{\mathcal{F}}_a^c \in \mathbb{R}^c$  は内力制御に用いる。また  $(\circ)^\#$  は一般化逆行列を表す。今回の場合は擬似逆行列と Divergent Component of Motion (DCM) 擬似逆行列を用いることができる。後者は以下で与えられる。

$$\mathcal{C}_{cR}^\# \equiv \mathcal{C}_{cR}^{-W_X} = W_X \mathcal{C}_{cR}^T \left( \mathcal{C}_{cR} W_X^{-1} \mathcal{C}_{cR}^T \right)^{-1} \quad (5)$$

式 (5) より、DCM 擬似逆行列は重み行列  $W_X$  を用いた重み付き擬似逆行列である。DCM 擬似逆行列によるレンチの分配は計算上の優位性がある [7]。

## 2.4 運動方程式

人型ロボットの運動方程式は以下で表される [2]。

$$\begin{bmatrix} I_C & I_{M\theta} \\ I_{M\theta}^T & I_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_M \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_M \\ c_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{C}_{cR} \\ \mathcal{J}_c^T \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c \quad (6)$$

$I_C \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  は重心回りの計全体の慣性行列  $I_\theta \in \mathbb{R}^{n \times n}$  はリンクの慣性行列、 $I_{M\theta} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  は干渉慣性行列、 $C_M \in \mathbb{R}^6$  は CRB の非線形項、 $c_\theta \in \mathbb{R}^n$  はリンクの非線形項、 $\tau \in \mathbb{R}^n$  は関節トルク、 $\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^c$  は接触レンチである。重力レンチは  $G_C = \begin{bmatrix} g^T & 0^T \end{bmatrix}$  となり、 $g$  はロボットの重心にかかる重力である。

手先で把持する剛体の運動方程式は以下で表される。

$$I_O \dot{\mathcal{V}}_O + C_O + G_O = \mathcal{F}_O \quad (7)$$

$I_O$  は物体の空間慣性、 $C_O$  は非線形項、 $G_O$  は物体の重心にかかる重力レンチである。

## 3. 汎用コントローラ

全身制御のコントローラは、運動制御、レンチ分配、逆動力学の三つの制御要素によって構成される。図 2 にコントローラのブロック線図を示す。レンチの分配と運動制御は並行して実行できる。

### 3.1 運動制御

バランス制御とマニピュレータ先端の制御を行う。バランス制御は式 (6) の上段によって示される。

$$\dot{\mathcal{L}}_C + G_C = \mathcal{F}_C \quad (8)$$

ここで

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{L}}_C &= I_C \dot{\mathcal{V}}_M + I_{M\theta} \ddot{\theta} + \dot{I}_C \mathcal{V}_M + \dot{I}_{M\theta} \dot{\theta} \\ &= A \dot{q}_M + \dot{A} q_M \end{aligned} \quad (9)$$

はシステムの空間運動量変化率である。 $A$  は Orin ら [8] が提案した重心運動量行列を座標変換したものである。また、 $C_M = \dot{I}_C \mathcal{V}_M + \dot{I}_{M\theta} \dot{\theta}$  である。

以下の CRB の運動制御でバランス制御を行う。

$$\dot{\mathcal{V}}_M^{ref} = \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_C^{des} + K_{v_C} \dot{e}_{p_C} + K_{p_C} e_{p_C} \\ \dot{\omega}_B^{des} + K_{\omega_B} e_{\omega_B} + K_{o_B} e_{o_B} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$e_{p_C}$ ,  $e_{o_B}$ ,  $e_{\omega_B}$  はそれぞれ重心の位置、ベースリンクの姿勢、角速度の誤差を表す。 $K_{(\circ)}$  は非負のフィードバックゲインを示す。目標の空間加速度  $\dot{\mathcal{V}}_M^{ref}$  と CRB の運動量の変化率の目標値の関係式は以下で表される。

$$\dot{\mathcal{L}}_C^{ref} = I_C \dot{\mathcal{V}}_M^{ref} + \dot{I}_C \mathcal{V}_M \quad (11)$$

式 (1)、式 (2)、式 (9) より、以下を得る。

$$\begin{bmatrix} A_M \\ J_c \\ J_m \end{bmatrix} \ddot{q}_M^{ref} + \begin{bmatrix} \dot{A}_M \\ \dot{J}_c \\ \dot{J}_m \end{bmatrix} \dot{q}_M = \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{L}}_C^{ref} \\ (\dot{\mathcal{V}}^c)^{ref} \\ (\dot{\mathcal{V}}^m)^{ref} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M \ddot{q}_M^{ref} + \dot{M} \dot{q}_M = \dot{\mathcal{V}}^{ref}. \quad (13)$$

このとき、目標の目標一般化加速度は以下となる。

$$\ddot{q}_M^{ref} = M^+ \left( \dot{\mathcal{V}}^{ref} - \dot{M} \dot{q}_M \right) + \ddot{q}_N^{ref}. \quad (14)$$

$\ddot{q}_N^{ref}$  は  $M$  の零空間に射影され、関節ダンパに用いる。

$$\ddot{q}_N^{ref} = N(M) \begin{bmatrix} 0 \\ -D_j \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$D_j$  は非負の減衰係数である。

式 (14) と式 (15) は二階層の作業優先度構造を表す。実際には式 (14) はバランス制御制御、拘束方向の制御、非拘束方向の制御の三つのサブタスクによって形成されており、零空間を使用した階層的優先度を設ける手法を用いて、過拘束システムやアルゴリズム的特異点の回避に用いることができる [5]。これにより、必要であれば優先度を変更してサブタスクを分けることができる。優先度の設定は今後検証する必要がある。

### 3.2 レンチ分配および内力制御

作業中は手先の接触レンチの正確さが要求される。閉ループ拘束を用いることで、手先の目標接触レンチを直接制御入力として用いることができる。最初にレンチの分配として式 (4) を以下のように分解する。

$$(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = \begin{bmatrix} (\mathcal{C}_{cR}^{-W_X})_F \\ (\mathcal{C}_{cR}^{-W_X})_H \end{bmatrix} \mathcal{F}_C^{ref} + \begin{bmatrix} N_F \\ N_H \end{bmatrix} \mathcal{F}_a \quad (16)$$

ただし、 $(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = \left[ ((\bar{\mathcal{F}}_F^c)^{ref})^T ((\bar{\mathcal{F}}_H^c)^{ref})^T \right]^T$  である。 $(\circ)_F$  と  $(\circ)_H$  は脚部と腕部の部分行列である。目標の手先の接触レンチ  $(\bar{\mathcal{F}}_H^c)^{ref}$  が既知だった場合、零空間のベクトル  $\mathcal{F}_a$  は式 (16) の下段から得られる。

$$\mathcal{F}_a = N_H^+ \left( (\bar{\mathcal{F}}_H^c)^{ref} - (\mathcal{C}_{cR}^{-W_X})_H \mathcal{F}_C^{ref} \right) \quad (17)$$

式 (17)、式 (16) より、レンチの分配は以下となる。

$$\begin{aligned} (\bar{\mathcal{F}}_F^c)^{ref} &= (\mathcal{C}_{cR}^{-W_X})_F \mathcal{F}_C^{ref} \\ &\quad + N_F N_H^+ \left( (\bar{\mathcal{F}}_H^c)^{ref} - (\mathcal{C}_{cR}^{-W_X})_H \mathcal{F}_C^{ref} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$(\bar{\mathcal{F}}_H^c)^{ref} = (\bar{\mathcal{F}}_H^c)^{ref} \quad (19)$$



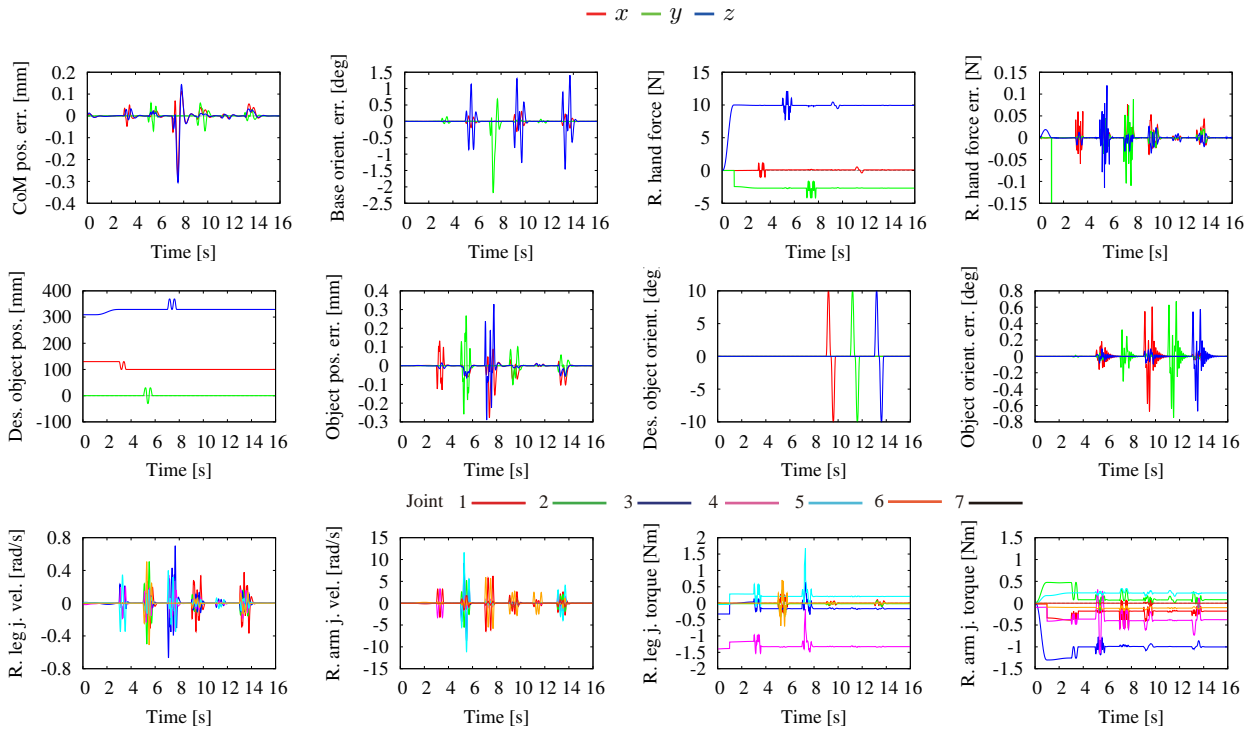


図 3: 物体マニピュレーションのシミュレーション結果

誤差が大きくなるが、動作に比べて十分に小さく、漸近安定であるといえる。また、手先の力のグラフから、10 N の内力が確認できる。

## 6. 結言

このモーション・フォースコントローラの目的は外乱を受ける環境下において、手先の力と運動の正確な追従を可能にすることである。

未知の外乱に対しても接触を維持しながら CRB の運動制御が可能である。DCM 擬似逆行列を用いて非繰り返し計算によるレンチの分配を行った。また、閉ループ連鎖拘束によって内力レンチの分配を行うことで、バーチャルリンケージモデルでは間接的に求めている接触レンチを直接制御入力とすることができる。また、レンチの分配と運動制御が並行して計算できるため、計算時間を更に短縮することが見込まれる。

物体マニピュレーションのシミュレーションによってコントローラの効果を確認した。未知の外乱に対しても小さな誤差で物体を素早く動作させることが可能であり、手先の力と運動の正確な制御が可能であるといえる。また、このコントローラは図 1(a) のような従属した閉ループ連鎖拘束をもつ作業においても同様に使用可能であることを確認している。

同じコントローラを用いて、物体にかかるレンチを考慮することも可能である。物体に外乱が加わる場合や道具の先端部におけるモーション・フォース制御を検証している。また、実験機においてこれらのコントローラの効果を確認したいと考えている。

## 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 forces. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):884–898, oct 2007.
- [2] B. Henze, M. A. Roa, and Ch. Ott. Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios. *The International Journal of Robotics Research*, 35(12):1522–1543, oct 2016.
- [3] O. Khatib. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(1):43–53, feb 1987.
- [4] L. Sentis and O. Khatib. Compliant control of multicontact and center-of-mass behaviors in humanoid robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(3):483–501, jun 2010.
- [5] D. N. Nenchev. Differential Kinematics. In Ambarish Goswami and Prahlad Vadakkepat, editors, *Humanoid Robotics: A Reference*. Springer Netherlands, Dordrecht, 2018.
- [6] Fabrizio Caccavale and Masaru Uchiyama. *Cooperative Manipulators*, pages 701–718. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [7] M. Hosokawa, D. N. Nenchev, and T. Hamano. The DCM generalized inverse: efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control (to be published). *Advanced Robotics*, 2018.
- [8] D. E. Orin, A. Goswami, and S. H. Lee. Centroidal dynamics of a humanoid robot. *Autonomous Robots*, 35(2-3):161–176, 2013.
- [9] 富士通. ”小型ヒューマノイドロボット「HOAP-2」取扱説明書”. 富士通オートメーション株式会社, 07 版, 2004.
- [10] S. Nakaoka. Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework. In *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pages 79–85, dec 2012.