人間型ロボット機構の全身マニピュレーションにおける 動作内力解析

原 田 研 介^{*1} 金 子 真^{*2}

Analysis of Internal Force in Whole Body Manipulation by a Human Type Robotic Mechanisms

Kensuke Harada^{*1} and Makoto Kaneko^{*2}

This paper discusses the manipulation of a big and heavy object by a human type robotic mechanisms. When a human type robot pushes an object, slip may occur at the contact point between the hand and the object and at the contact between the leg and the floor. To avoid the slip, we obtain the region of the internal force acting among the contact points. We also obtain the region of the foot position enabling a robot to push an object effectively. To verify the effectiveness of our method, we show simulation results.

Key Words: Humanoid robot, Whole body manipulation, Internal force

1. 緒 言

作業を行うとき、ヒトは対象物を把持し、その対象物を操作する。ここで、扱う対象物のサイズや重量が大きくなると、ヒトは手先だけではなく、全身を巧みに使って対象物を操作すると考えられる。これは、手先だけを使って力を加えるよりも、全身を使った方が対象物に有効に力が加わるからである。

一方、近年ヒトと類似した幾何学的構造を持つロボット機構（ヒューマノイドロボット）に関して研究が行われている。ヒューマノイドロボットは、その構造的特徴を活かしてヒトと同じ環境でヒトの代わりに作業を行うことが期待されている。ヒューマノイドロボットが大きくて重い対象物を操作する場合、ヒトと同様に全身を有効に使うことで作業を効果的に遂行できると考えられる。

従来、対象物のマニピュレーションに関する研究は、Fig. 1 (a)に示すようなロボットハンドに対して重点的に行われてきた。このうち、上側に示す把握形態は指先把握と呼ばれ、ロボットハンドは指先のみで対象物と接触する。それに対して、下側に示す把握形態ではロボットハンドは指先だけではなく、指の内リンクやパームで対象物と接触する。このような把握形態は包み込み把握（Enveloping Grasp）と呼ばれ、包み込み把握での対象物のマニピュレーションは“Whole Arm Manipulation” [1] と

Fig. 1 Several types of grasp and manipulation

呼ばれる。ここで、対象物を操るロボットハンドは環境やアームの先端に固定されていることが特徴的である。

次に Fig. 1 (b) では、ヒューマノイドロボットが手先だけではなく全身を使って対象物を操っている。本論文では、このような体全体を使って対象物を操作することを総称して全身マニピュレーション（“Whole Body Manipulation”）と呼ぶ。全身マニピュレーションは次のような点でロボットハンドによるマニピュレーションと異なっている。

1. 対象物を操るロボットが環境に固定されていない。
2. 各接点での接触力にロボットの運動に対して影響を及ぼさない成分が存在する。

ロボットハンドにおいて対象物の運動に影響を及ぼさない接触力成分は内力と定義されることを考えて、ロボットの運動に影響を及ぼさない接触力成分を動作内力と呼ぶことにする。なお、手先で対象物を押し付けるのに十分な力を発生できる以前に、

原稿受付 2002年4月1日

^{*1}独立行政法人産業技術総合研究所

^{*2}広島大学大学院工学研究科

^{*1}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{*2}Graduate School of Engineering, Hiroshima University

足の接触点で滑りが生じると、ロボットは転倒することになる。つまり、全身マニピュレーションの場合、足先や手先の接触点に存在する摩擦制限や、各関節のトルク制限の下、手先で発生可能な押し付け力を吟味する必要がある。本論文では、この押し付け力を動作内力を導入することで考察する。まず、3章においてヒューマノイドロボットの幾何学や静力学について議論した後、動作内力を定義する。この動作内力を用いて、ロボットが対象物に押し付け力を有効に加えることができる条件を考える。また、押し付け力を有効に加えるために、足をどのような位置に置いたらよいかについて考察する。最後に提案する手法の有効性を数値例によって確認する。

2. 従 来 研 究

ヒューマノイドロボット：

従来より、人間と同様に、手、脚、頭部を持つロボットに関して、研究・開発が行われてきた。加藤ら[2][3]は鍵盤楽器を演奏する人間型ロボットの開発を行った。Inabaら[4][5]は処理系をロボットと別の位置に置くことで、人間型ロボットの小型化を行った。広瀬ら[6][7]の研究グループ、Kagamiら[8][9]、Konnoら[10]はヒューマノイドロボットの開発を行い、歩行などの基本動作を実現させた。このように、従来ヒューマノイドロボットのハードウェアの開発が重点的に行われてきた。また、Inoueら[11][12]はHRP (Humanoid Robotics Project) において、ヒューマノイドロボットを実環境で動作させることを目指している。

一方、近年ヒューマノイドロボットを研究対象として、動作解析や力学解析を行う試みがなされている。高西[13]は上体の運動を用いることで安定な歩行を実現した。中村ら[14][15]は、ヒューマノイドが作業を行う場合に、接触状態と非接触状態が頻繁に変化する特徴に着目した幾何学計算法を示した。Yamaneら[16]、Shillerら[17]はDynamics Filterの概念を提案し、ヒューマノイドロボットの動作計画に適用した。田宮ら[18]はヒューマノイドロボットが片足で立つ場合のバランス制御について議論した。井上ら[19]はヒューマノイドロボットが上体(腕)で作業しながら移動する場合の実時間制御手法について示した。また、ヒューマノイドロボットが作業する場合の姿勢の評価に関する研究[20]~[22]や、脚型ロボットが膝を地面に着いた場合の脚の特異点解析[23]が行われている。ただし、これらの研究において、ヒューマノイドロボットが対象物をマニピュレーションする場合の、対象物に加えられる力特性の解析は行われていない。

マニピュレーション：

従来、ロボットハンドによる対象物のマニピュレーションに関して多くの研究がなされてきた。これらのうち、Coleら[24][25]、Paljugら[26]、Sarkerら[27]等は、各指は先端で任意の接触力を発生できるという仮定の下で、滑り接触や転がり接触を利用して対象物をマニピュレーションする研究を行った。相山ら[28]は指先で任意の接触力を発生できるロボットハンドで、対象物を十分に拘束しない状況下での操りを実現した。それに対して、金子ら[29]はロボットハンドが対象物を包み込み把握した状態での操りを議論した。包み込み把握の場合、ロボット指は各接触点

で望みの接触力を発生できるとは限らず、関節トルクの情報のみでは接触力の値を決定することはできない。一方、ロボット指が対象物を把握する場合、内力が発生する。Yoshikawaら[30][31]は、ロボットハンドが指先で任意の接触力を発生できるという仮定の下で、物理的意味が明確な内力の定義を行った。しかし、ヒューマノイドロボットに見られるように、各接触点で発生する内力は決定できるが、特定の内力成分の取り得る領域が、他の成分の領域や、他の成分が働く位置に影響される点に着目した研究はない。

3. ヒューマノイドロボットのモデル化

3.1 運動学的関係式

Fig. 2に、ヒューマノイドロボットが地面の上に立っており、手先で対象物と接しているモデルを示す。ここで、図中に示されている変数は以下のように定義される。

Σ_R : 基準座標系

Σ_B : ヒューマノイドロボットの胴体に固定された座標系

$\mathbf{p}_B \in R^3$: Σ_R から見た Σ_B の位置ベクトル

$\mathbf{R}_B \in SO(3)$: Σ_R に対する Σ_B の回転行列

${}^B\mathbf{p}_{Hi} \in R^3$: Σ_B から見た手先の位置ベクトル ($i = 1, 2$)

${}^B\mathbf{p}_{Lj} \in R^3$: Σ_B から見た足先の位置ベクトル ($j = 1, 2$)

基準座標系から見た手先の位置ベクトル $\mathbf{p}_{Hi}$ 、また足先の位置ベクトル $\mathbf{p}_{Lj}$ は次のように表すことができる。

$$\mathbf{p}_{Hi} = \mathbf{p}_B + \mathbf{R}_B^B \mathbf{p}_{Hi}, \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

$$\mathbf{p}_{Lj} = \mathbf{p}_B + \mathbf{R}_B^B \mathbf{p}_{Lj}, \quad (j = 1, 2) \quad (2)$$

これらの式の時間微分を行い、まとめることで次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{G}^T \dot{\mathbf{x}}_B + \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{p} = [\mathbf{p}_{H1}^T \mathbf{p}_{H2}^T \mathbf{p}_{L1}^T \mathbf{p}_{L2}^T]^T$$

$$\dot{\mathbf{x}}_B = [\dot{\mathbf{p}}_B^T \boldsymbol{\omega}_B^T]^T$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\theta}_{H1}^T \boldsymbol{\theta}_{H2}^T \boldsymbol{\theta}_{L1}^T \boldsymbol{\theta}_{L2}^T]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 \\ (\mathbf{R}_B^B \mathbf{p}_{H1}) \times & (\mathbf{R}_B^B \mathbf{p}_{H2}) \times \\ \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 \\ (\mathbf{R}_B^B \mathbf{p}_{L1}) \times & (\mathbf{R}_B^B \mathbf{p}_{L2}) \times \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} = \text{block diag}[\mathbf{R}_B^B \mathbf{J}_{H1} \quad \mathbf{R}_B^B \mathbf{J}_{H2} \quad \mathbf{R}_B^B \mathbf{J}_{L1} \quad \mathbf{R}_B^B \mathbf{J}_{L2}]$$

$${}^B\dot{\mathbf{p}}_{Hi} = {}^B\mathbf{J}_{Hi} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{Hi} \quad (i = 1, 2)$$

$${}^B\dot{\mathbf{p}}_{Lj} = {}^B\mathbf{J}_{Lj} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{Lj} \quad (j = 1, 2)$$

であり、 $\boldsymbol{\theta}_{Hi}$ ($i = 1, 2$)、 $\boldsymbol{\theta}_{Lj}$ ($j = 1, 2$) は、それぞれ腕 i 、脚 j の関節変位ベクトルを表し、 $\mathbf{I}_3$ は 3×3 単位行列、 $\times$ は外積と等価な 3×3 歪対象行列を表す。また、簡単のため胴体には関節が存在しないとしている。

Fig. 2 Model of the system

3.2 力学的関係式

式 (3) と双対な力の釣り合いに関する関係式として次式が得られる。

$$t_B = Gf + mg \quad (4)$$

$$\tau = J^T f + hg \quad (5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} t_B &= [f_B^T \ n_B^T]^T \\ \tau &= -[\tau_{H1}^T \ \tau_{H2}^T \ \tau_{L1}^T \ \tau_{L2}^T]^T \\ f &= [f_{H1}^T \ f_{H2}^T \ f_{L1}^T \ f_{L2}^T]^T \\ mg &= \partial P / \partial x_B \\ hg &= \partial P / \partial \theta \end{aligned}$$

であり、 f_B , n_B はそれぞれ Σ_B 原点に働く合力、合モーメントであり、 τ_{Hi} , τ_{Lj} はそれぞれ腕 i , 脚 j の関節駆動トルクベクトル、 f_{Hi} , f_{Lj} はそれぞれ腕 i が対象物に、脚 j が環境に加える接触力ベクトル、 P は位置エネルギーを表している。式 (4), (5) は、それぞれ接触力の胴体座標系原点に及ぼす影響、関節トルクに及ぼす影響を表す関係式である。

4. マニピュレーション

次に、実際にヒューマノイドロボットで床に置かれた大きな対象物を押すことを考える。前章での定式化は三次元空間内のモデルに対して行ったが、以降では説明を簡単にするため、Fig. 3 に示すようなロボットの進行方向を含む鉛直平面 (Sagittal Plane) 内の二次元運動について解析する。

4.1 概要

ヒューマノイドロボットの手先が質量 m_O の対象物に対して接触力 f_H を加えているとする。また、各足先が床に及ぼす接触力をそれぞれ f_{L1} , f_{L2} とする。 f_H の水平方向成分の絶対値

$$f_{Hx} = \|e_x^T f_H\| \quad (6)$$

が f_H の鉛直方向成分に重力 $m_O g$ を加えたものと、対象物と環境との接触に対する静止摩擦係数 μ_O を掛けたものの積を越えたと、つまり、

$$f_{Hx} > \mu_O \|e_y^T f_H - m_O g\| \quad (7)$$

Fig. 3 Friction constraint for contact forces

となるとき、対象物がロボットの押し操作によって移動する。そこで、いかに f_H の水平方向成分を有効に加えるかが重要となる。このため、次節以降ではヒューマノイドロボットに働く内力により f_H を調節して、対象物のマニピュレーションを実現する。

4.2 動作内力の定義

ロボット自身に加わる力は釣り合っていると仮定する。このとき、式 (4) は以下のように書き換えられる。

$$Gf = -mg \quad (8)$$

ここで、本節での二次元モデルでは、接触力ベクトルは $f = [f_H^T \ f_{L1}^T \ f_{L2}^T]^T \in R^6$ と定義される。この式を f について解くことにより、次式が得られる。

$$f = -G^+ mg + Nk \quad (9)$$

ここで、 G^+ は G の擬似逆行列を表す。また、行列 N は行列 G の零空間に属する列ベクトルにより構成される行列である。上式の右辺第2項は合力・合モーメントに影響を及ぼさないため、内力を表す。内力は接触点間で対抗する接触力成分であるため、行列 N は次のように定義できる [30]。

$$N = \begin{bmatrix} e_{01} & e_{02} & 0 \\ -e_{01} & 0 & e_{12} \\ 0 & -e_{02} & -e_{12} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、単位ベクトル $e_{ij} \in R^2$ ($i, j = 0, 1, 2$) の定義は Fig. 4 に示す。

ヒューマノイドロボットの全身マニピュレーションでは、 f_H を効果的に加えることにより対象物のマニピュレーションが実現される。ベクトル f は手先力 f_H を含み、式 (9) より f_H の大きさは内力の大きさに依存する。ロボットハンドにおける内力とは、接触力うち対象物を加速させない成分であると定義されるため [30]、本研究の内力とは定義が異なる。そこで、次のように内力を再定義する。

[定義 1] ヒューマノイドロボットの手先が対象物と接触し、足先が環境と接触しているとする。このとき、対象物が環境と接触することによりロボットの手先と足先の間に生じ、胴体に生じる加速度・角加速度に影響を及ぼさない接触力成分を動作内力と定義する。

Fig. 4 Friction constraint for internal force

次に、接触点での摩擦条件や関節トルク限界を考慮することで、動作内力が取り得る領域を考える。まず、摩擦条件を考慮する。Fig. 3に示すように、接触力に対する摩擦制限は、摩擦領域のエッジを表す単位ベクトルにより次式のように表すことができる。

$$f = V\lambda, \quad \lambda \geq 0 \quad (11)$$

ここで、

$$V = \begin{bmatrix} v_{H1} & v_{H2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_{L11} & v_{L12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_{L21} & v_{L22} \end{bmatrix}$$

$$\lambda = [\lambda_{H1} \ \lambda_{H2} \ \lambda_{L11} \ \lambda_{L12} \ \lambda_{L21} \ \lambda_{L22}]^T$$

である。式 (11) を式 (9) に代入することで、動作内力 Nk には次式のような制限が存在することが分かる。

$$Nk = G^+ mg + V\lambda \quad \lambda \geq 0 \quad (12)$$

つまり、動作内力に対しては、接触力に対する摩擦条件に $G^+ mg$ を加えた拘束が存在する (Fig. 4)。

ヒューマノイドロボットによる全身マニピュレーションの場合、動作内力は Fig. 4 に示した摩擦による制限の下で任意に発生できるわけではない。例えば重い対象物を押す場合に、大きな手先力を発生させたとする。そのとき、手先と足先の間に動作内力が働くために、手先力の反力が足先に伝わり、足先で滑りが生じる場合が存在する。それでは、どのような条件の下で任意に大きな手先力が発生できるのであろうか。これは、以下の定理により記述される。

[定理 1] Fig. 5 に示すように、直線や半直線を定義する。ヒューマノイドロボットが動作内力を発生するのに十分な関節駆動トルクを持つとする。このとき、接触点で滑りを生じることなしに、ロボットが任意に大きな手先力で対象物を押すことができるための必要十分条件は、[1] 直線 l_{01} が半直線 h_{01} , h_{12} と交わらない、[2] 直線 l_{02} が半直線 h_{01} , h_{22} と交わらない、のいずれかが成立することである。

[証明] 定理 1 が成立するとき、対応する内力成分を任意に大き

Fig. 5 Definition of lines and half-lines

くできるため、十分性は明らか。必要性を示すため、定理 1 に含まれる条件 [1], [2] が共に成立しない場合に手先力を任意に大きくできないことを示す。例えば、直線 l_{01} が半直線 h_{12} と交わりを持ち、かつ直線 l_{02} が半直線 h_{22} と交わりを持つ場合を考える。このとき、手先で $-e_{01}$, $-e_{02}$ 方向の内力成分のいずれかを任意に大きくできる必要がある。 $-e_{01}$ 方向の内力成分を大きくすることを考えると、前側の脚の摩擦制限内に動作内力が存在するためには $-e_{12}$ 方向を任意に大きくできる必要がある。 $-e_{12}$ 方向を大きくすると、後側の脚の摩擦制限内に動作内力が存在させることができなくなる。 $-e_{02}$ 方向の成分を大きくする場合も同様な議論が成立する。次に、直線 l_{01} が半直線 h_{01} と交わりを持ち、かつ直線 l_{02} が半直線 h_{22} と交わりを持つ場合を考える。このとき、手先で $-e_{02}$ 方向の内力成分を任意に大きくできる必要がある。後側の脚の摩擦制限内に動作内力が存在するためには $-e_{12}$ 方向を任意に大きくできる必要がある。さらに前側の脚の摩擦制限内に動作内力が存在するためには e_{01} 方向を任意に大きくできる必要がある。このとき、手先で摩擦制限内に動作内力が存在させることができなくなる。他の場合については明らか。 □

以降では、定理 1 が成立しない場合、つまり手先力が脚の摩擦条件により制限される場合を考え、脚の摩擦制限内でどのようにして有効に手先力を発生するかという問題を考える。式 (12) より、摩擦制限の下で動作内力が取り得る空間は以下のような不等式集合として表すことができる。

$$F_F = \{Nk | V^{-1}(-G^+ mg + Nk) \geq 0\} \quad (13)$$

次に、ヒューマノイドロボットの関節駆動トルクによって動作内力を操作することを考える。関節駆動トルクと動作内力の関係は、式 (5) に式 (9) を代入することで、以下のように得られる。

$$\tau = J^T(-G^+ mg + Nk) + hg \quad (14)$$

ここで、動作内力はロボットの関節駆動トルクによって操作可能であるとする。これは、与えられた関節駆動トルクに対して動作内力が一意に決まることと等価である。式 (14) より、これは以下の条件で記述される。

[仮定 1] 全身マニピュレーションにおいて、次式を仮定する。

$$\text{Ker}(\mathbf{J}^T \mathbf{N}) = \emptyset \quad (15)$$

後に、数値例により仮定1はヒューマノイドロボットを単純化した5リンクモデルでも成立することを示す。つまり、これより複雑なリンク構成をしたロボットでは、特異姿勢にない限り仮定1は成立すると考えられる。

ロボットの各関節が発生可能な駆動トルクにも制限が存在する。この制限は次のように表すことができる。

$$\boldsymbol{\tau}_{\min} \leq \boldsymbol{\tau} \leq \boldsymbol{\tau}_{\max} \quad (16)$$

式(14)を用いることにより、関節トルク制限に伴って動作内力が取り得る空間は次式の不等式集合で表すことができる。

$$F_T = \left\{ \mathbf{Nk} \mid \begin{array}{l} \mathbf{J}^T(-\mathbf{G}^+ \mathbf{m} \mathbf{g} + \mathbf{Nk}) + \mathbf{h} \mathbf{g} - \boldsymbol{\tau}_{\min} \geq \mathbf{0} \\ -\mathbf{J}^T(-\mathbf{G}^+ \mathbf{m} \mathbf{g} + \mathbf{Nk}) - \mathbf{h} \mathbf{g} + \boldsymbol{\tau}_{\max} \geq \mathbf{0} \end{array} \right\} \quad (17)$$

最終的に、動作内力が取り得る空間は F_F と F_T の共通集合であり、次式により定義される。

$$F_I = F_F \cap F_T \quad (18)$$

4.3 動作内力の導出

実際に動作内力を表す空間である F_F や F_T を導出することを考える。定理1が成立しない場合、 F_F は半無限空間にはならない。また、仮定1が成立する場合、 F_T も半無限空間にならない。このとき、動作内力を表す空間は、その頂点集合の凸包を求めることにより導出できる。付録に示した方法で、式(13)、(17)を解くことにより、 F_F 、 F_T の頂点集合はそれぞれ以下のように導出することができる。

$$\mathbf{n}_f(H_i, L_{jk}, L_{mn}) = \mathbf{Nk}(\lambda_{Hi}, \lambda_{Ljk}, \lambda_{Lmn} = 0) \quad (19)$$

$$\mathbf{n}_t(i_{\max}, j_{\min}, \dots) = \mathbf{Nk}(\tau_i = \tau_{i\max}, \tau_i = \tau_{j\min}, \dots) \quad (20)$$

ここで、式(19)の添え字は、記述された接触力成分が摩擦制限の限界にあることを表しており、同様に式(19)の添え字は、記述された関節がトルク制限の限界にあることを表している。この頂点候補の凸包を描くことで、動作内力の空間が導出できる。また、頂点集合の中で手先での動作内力の水平方向成分が最大となる頂点を選ぶことで、摩擦制限や関節トルク制限の下で発生できる手先力を見積もることができる。また、この動作内力を表す空間の中から、対象物と環境との摩擦係数に応じて対象物を滑らせることが可能な $\|\mathbf{e}_x^T \mathbf{f}_H\|$ に対応した動作内力を選択することが可能である。

また、ロボットハンドでの把握の定式化では、式(4)の $\mathbf{t}_B$ (胴体に加わる合力・合モーメント)に相当する部分には、対象物重心に働く合力・合モーメントに関する項が入る。このため、ロボットハンドでの動作内力は対象物の合力・合モーメントに影響を及ぼさない接触力成分となる。それに対してヒューマノイドロボットの場合、動作内力とは胴体に加わる合力・合モーメントに影響を及ぼさない接触力成分となる。このとき、必ずしも対象物が静止している必要はない。

5. 足先位置の決定

動作内力に対する足先位置の影響について考察する。本章では簡単のため、ヒューマノイドロボットは任意に大きな関節駆動トルクを発生させることが可能であるとし、 F_T の影響は考慮しない。まず、定理1の直接的な結果として、次のような定理を導くことが可能である。

[定理2] 半直線 h_{01} と h_{12} のなす角 α_1 が $\alpha_1 \leq \pi$ を満足すると仮定する (Fig. 6(a))。このとき、前側の足の先が Fig. 6(b) における幅 q_1 の範囲にあるならば、手先で任意に大きな力を発生させることが可能である。また同様に、半直線 h_{01} と h_{22} のなす角 α_2 が $\alpha_2 \leq \pi$ を満足すると仮定する (Fig. 6(a))。このとき、後側の足の先が Fig. 6(b) における幅 q_2 の範囲にあるならば、手先で任意に大きな力を発生させることが可能である。

[証明] $\alpha_1 \leq \pi$ を満足するとき、前脚の脚先が q_1 の範囲にあるならば、定理1が満足される。また、 α_2 についても同様。□

定理2によると、少なくとも片方の足先の位置が定理2を満足するとき、手先で任意に大きな力を発生できることになる。では、任意に大きな手先力を発生できないとき、つまり、 $\alpha_1 > \pi$ かつ $\alpha_2 > \pi$ のとき、足先をどのような位置に置いたらよいのだろうか。

まず、片足のみが地面と接触する場合を考える (Fig. 7)。このとき、足が手前の方にあり $b_1 < b_2$ が成立する場合を考える。このとき、 b_1, b_2 は共に同じ内力成分を表すため、値の小さな b_1 が適用される。足が後退するに従って b_1 は増加するため、このとき、手先が増えることが可能な動作内力の水平方向成分は増加する。次に、 b_1 が増加した結果、 $b_1 > b_2$ となると、値の小さな b_2 が適用される。足が後退するに従って b_2 は減少するため、このとき、手先が増えることが可能な動作内力の水平方向成分は減少する。したがって、 $b_1 = b_2$ のときに手先が増える動作内力の水平方向成分が最大となることが分かる。

次に、両足共に地面と接触する場合を考える (Fig. 8)。この場合は、片足のみが地面と接触する場合と比較して解析は複雑となるが、以下のような定理を導出できる。

[定理3] 脚の移動に伴い、式(12)の $\mathbf{G}^+ \mathbf{m} \mathbf{g}$ の変化は小さいとする。動作内力の作用線である、直線 l_{01}, l_{02} が共に半直線 h_{01} と交わり、 h_{12}, h_{22} とは交わらない状況を考える。この状態から後脚を後方に移動させる。このとき、Fig. 8(a)において $c_1 = c_2$ が成立するまで、手先が増えることが可能な動作内力の水平方向成分は増加する。

[証明] まず、直線 l_{02} が半直線 h_{22} と交わりを持たない場合を考える (Fig. 8(b))。このとき、直線 l_{01} 内に働く内力成分は、摩擦制限により任意の大きさで発生できるわけではない。特に半直線 h_{11}, h_{12} により構成される摩擦制限により、手先で対象物を引く方向には c_{01} しか発生できない (Fig. 8(b))。つまり、

Fig. 6 Definitions used in Theorem 2

Fig. 7 Whole body internal force with one contact between leg and ground

直線 l_{02} 内に働く動作内力は最大でも c_1 の大きさである。後脚が後方に移動するにつれて、直線 l_{02} は水平に近くなるため、それに伴い c_1 は単調に増加する。

次に、後脚が後方に移動すると、直線 l_{02} が半直線 h_{22} と交わりを持つようになる (Fig. 8(a))。このとき、両脚の間に働く内力成分の影響で、直線 l_{02} 内に働く内力成分の大きさも最大で c_2 に制限される。ただし、 c_1 と c_2 は同じ内力成分であるため、実際には c_1 と c_2 のうち小さい方の値となる。 $c_1 < c_2$ のときは、後脚が後方に移動するにつれて、直線 l_{02} は水平に近くなるため、直線 l_{02} に沿った内力成分は単調に増加する。□

なお、 c_1 が増加した結果 $c_1 > c_2$ となると、直線 l_{02} に沿った内力成分は c_2 となる。ただし、この場合手先が加える動作内力の水平方向成分が単調減少することは一概には言えない。

6. 数 値 例

Fig. 9 に示すように、胴体、腕を一つのリンクとみなした、二次元5リンクのモデルを仮定する。ヒトが大きく重い対象物を扱う場合の、脚力によるマニピュレーションについて考える。胴体や脚リンクの質量、長さは、 $m_B = 30[\text{kg}]$, $l_B = 0.5[\text{m}]$, $m_{11} = m_{21} = 10[\text{kg}]$, $r_{11} = r_{21} = 0.2[\text{kg}]$, $m_{12} = m_{22} = 10[\text{kg}]$, $r_{12} = r_{22} = 0.2[\text{kg}]$ とした。また、各接触点での摩擦角はすべて $\alpha = \pi/6$ とし、関節トルク限界は $\tau_{\max} = [100 \ 70 \ 100 \ 70]^T [\text{Nm}]$, $\tau_{\min} = [-100 \ -70 \ -100 \ -70]^T [\text{Nm}]$ とした。

動作内力を表す空間のうち、摩擦制限によってできる空間 F_F

(a) The case where l_{02} crosses h_{22}

(b) The case where l_{02} does not cross h_{22}

Fig. 8 Definitions used in Theorem 3

を Fig. 10 に示す。図にはすべての頂点が描いてあり、代表的ないくつかの頂点について、その頂点がどの接触点のどの方向の滑りに対応しているかを記述している。図に示されている範囲内で内力を発生させる限り、接触点で滑りを生じることなしに、対象物のマニピュレーションが行えることになる。また、図に太い矢印で記している分だけ、ヒューマノイドロボットは手先で水平方向に動作内力を発生させることが可能である。なお、頂点 $\mathbf{n}_f(H_2, L_{11}, L_{21})$ と $\mathbf{n}_f(H_1, L_{11}, L_{12})$ を見比べると、 $\mathbf{n}_f(H_2, L_{11}, L_{21})$ の方が手先で水平方向に発生する内力が大きい。これは、 $\mathbf{n}_f(H_2, L_{11}, L_{21})$ では、接触点で手先を上側に滑らせようとすることで、脚に伝わる反力の鉛直方向成分を大きくし、脚を滑りにくくしているためであると考えられる。

次に、動作内力を表す空間のうち、関節トルク制限によってできる空間 F_T を Fig. 11 に示す。この図にもすべての頂点が描いてあり、代表的ないくつかの頂点について、その頂点がどの関節のトルク限界に対応しているかを記述している。図に示されている範囲内で内力を発生させる限り、関節トルクで内力を発生させることが可能である。

7. シミュレーション

シミュレーションではソフトウェアとして ADAMS (Mechanical Dynamic, Inc.) を使用した。このソフトは数式モデルを内部に持っており、物体同士の拘束や境界条件を与えること

Fig. 9 Model used in numerical example

Fig. 10 Internal force space FF

Fig. 11 Internal force space FT

によって接触力が求まり、動特性を考慮したシミュレーションが可能となる。ADAMSによりヒューマノイドロボットを前章と同じ二次元5リンクのモデルで表現し、対象物を押す動作をシミュレートする。簡単のため、対象物は固定している。また、各関節は十分に大きなトルクを発生できるとし、 F_T は考慮しない。

F_F の領域を外すことで、接触点で滑りが生じることを確認する。Fig. 12に示すように後側の脚を後ろ方向に滑らせるように動作内力を決定し、ロボットに与えた。その結果をFig. 13に示す。図に示すように、後側の脚が後ろ方向に滑っているこ

Fig. 12 Internal force causing slip

Fig. 13 A simulation result of pushing with sliding contact

とが分かる。

8. 結 言

本論文では、ヒューマノイドロボットが全身の動作により対象物をマニピュレーションすることを考え、床に置かれた大きくて重い対象物を押す作業において手先と足先の間に働く内力（動作内力）について議論した。接触点で滑りを生じることなしに、また関節トルク限界に抵触することなしに、対象物を押すための内力の範囲について議論した。また、提案する手法の有効性を数値例やシミュレーションによって確認した。

なお、ロボットハンドによる把握において、接触力を握力と操作力に分解する問題が研究されている[30]。本研究においても、動作内力に対応した接触力の分解に関する問題は今後の課題として残っている。また、ロボットの姿勢の影響を考慮すること、あるいは、歩行動作を伴うことや、フィードバック制御を行うことも今後の課題である。

最後に、本研究を通じて有意義な議論をいただいた、広島大学大学院工学研究科の辻敏夫教授、ならびに、シミュレーションにおいて協力していただいた、広島大学工学部の学生廣本真志君に感謝します。

参 考 文 献

- [1] J.K. Salisbury: "Whole-arm manipulation," Proc. of the 4th Int. Symp. of Robotics Research (Published by the MIT Press,

- Cambridge MA), Santa Cruz, CA, 1987.
- [2] 加藤 他: “WABOT-1 の開発”, バイオメカニズム 2. 東京大学出版会, 1973.
 - [3] 加藤 他: “鍵盤楽器演奏ロボット “WABOT-2” (WAseda roBOT)”, 日本ロボット学会誌, vol.3, no.4, pp.337-338, 1985.
 - [4] M. Inaba, S. Kagami, and H. Inoue: “Real-time Vision plus Remote-Brained Design opens New World for Experimental Robotics,” *Experimental Robotics IV, Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pp.105-113, Springer, 1997.
 - [5] M. Inaba, S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Hoshino and H. Inoue: “A Platform for Robotics Research Based on the Remote-Brained Robot Approach,” *Int. Journal of Robotics Research*, vol.19, no.10, pp.933-954, 2000.
 - [6] 広瀬, 竹中, 五味, 小澤: “人間型ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.7, pp.983-985, 1997.
 - [7] ASIMO SPECIAL WEB CITE (<http://www.honda.co.jp/-ASIMO>)
 - [8] S. Kagami, A. Konno, R. Kageyama, M. Inaba and H. Inoue: “Development of a Humanoid H4 with Soft and Distributed Tactile Sensor Skin,” Peter Corke and James Trevelyan, editors, *Experimental Robotics VI, Lecture Notes in Control and Information Sciences* 250. pp.499-507, Springer, 1999.
 - [9] S. Kagami, K. Nishiwaki, J.J. Kuffner, T. Sugihara, M. Inaba and H. Inoue: “Design and Implementation of Humanoid H6 and its Application to Remote Operation,” In Daniela Rus and Sanjiv Singh, editor, *Experimental Robotics VII, Lecture Notes in Control and Information Sciences* 271. pp.41-50, Springer, 2001.
 - [10] A. Konno, N. Kato, S. Shirata, T. Furuta and M. Uchiyama: “Development of a Light-Weight Biped Humanoid Robot,” *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1565-1570, 2000.
 - [11] H. Inoue et al.: “HRP: Humanoid Robotics Project of MITI,” *The First IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2000.
 - [12] 井上, 比留川: “人間協調・共存型ロボットシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.8, pp.1089-1092, 2000.
 - [13] 高西: “上体の運動によりモーメントを補償する 2 足歩行ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.348-353, 1993.
 - [14] 中村, 山根, 永嶋: “構造変化を伴うリンク系の動力学計算法とヒューマンフィギュアの運動計算”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.8, pp.1152-1159, 1998.
 - [15] 中村, 山根: “高速条件が不連続に変化するリンク系の動力学—環境と接触しながら運動するヒューマンフィギュアへの応用—”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.435-443, 2000.
 - [16] K. Yamane and Y. Nakamura: “Dynamics Filter—Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures—,” *Proc. of 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.688-694, 2000.
 - [17] Z. Shiller, K. Yamane and Y. Nakamura: “Planning Motion Patterns of Human Figures Using a Multi-layered Grid and the Dynamics Filter,” *Proc. of 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1-8, 2001.
 - [18] 田宮, 稲葉, 井上: “人間型ロボットの片足立脚動作における全身を用いた実時間動バランス補償”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.2, pp.268-274, 1999.
 - [19] 井上, 石井, 大川: “腕で作業をしながら移動する人間型ロボットの实時間制御”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.1, pp.75-86, 2000.
 - [20] 中村, 井上, 新井, 前: “人間型ロボットの作業移動”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.989-990, 2001.
 - [21] 横小路, 野本, 吉川: “手足が環境に拘束された人間型ロボットの姿勢および動作パターンの評価”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.471-472, 2001.
 - [22] 原田, 金子: “人間型ロボットによる作業時の姿勢選択”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.991-992, 2001.
 - [23] 小俣, 塚越, 森: “4 脚作業移動ロボットによる体全体を用いた物体操作”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, pp.269-270, 2001.
 - [24] A.B.A. Cole, J.E. Hauser and S.S. Sastry: “Kinematics and Control of Multifingered Hands with Rolling Contacts,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol.34, no.4, pp.398-404, 1989.
 - [25] A.B.A. Cole, P. Hsu and S.S. Sastry: “Dynamic Control of Sliding by Robot Hands for Regrasping,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.8, no.1, pp.42-52, 1992.
 - [26] E. Paljug, X. Yun and V. Kumar: “Control of Rolling Contacts in Multi-Arm Manipulation,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.10, no.4, pp.441-452, 1994.
 - [27] N. Sarkar, X. Yun and V. Kumar: “Dynamic Control of 3-D Rolling Contacts in Two-Arm Manipulation,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.13, no.3, pp.364-376, 1997.
 - [28] 相山, 稲葉, 井上: “グラスプレス・マニピュレーションの研究: 操作形態の分類とビョット操作の実現”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.114-121, 1996.
 - [29] 金子, 原田, 辻: “Envelope Family 操りの十分条件”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.7, pp.863-873, 2001.
 - [30] T. Yoshikawa and K. Nagai: “Manipulating and Grasping Forces in Manipulation by Multifingered Robot Hands,” *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol.7, no.1, pp.67-77, 1991.
 - [31] 吉川, 横小路, 永山: “3 本指ハンドによる対象物の操りにおける滑り運動の解析”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.3, pp.394-401, 1992.

付録 A. 頂点集合の導出

全身動作内力を表す空間のうち, 摩擦制限に伴う空間 F_F の頂点集合を求める. まず, 式 (13) に含まれる不等式を次のように書き直す.

$$\mathbf{A}\mathbf{k} + \mathbf{b} \geq \mathbf{0} \quad (\text{A.1})$$

ここで, $\mathbf{A} \in R^{6 \times 3}$, $\mathbf{b} \in R^3$ である. 式 (12) より, $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{A}\mathbf{k} + \mathbf{b}$ である. つまり, 式 (A.1) に値が 0 となる行があると, それに対応する内力成分は摩擦制限の限界にあることになる. 例えば 1 行目が 0 の場合, $\lambda_{H1} = 0$ が満足されるため, 手先の内力が上側の摩擦限界 (Fig. 5 における半直線 h_{01} 上) に存在することになる. 次に, 式 (A.1) の頂点集合を導出する. 式 (A.1) の行を並び替えて二つの式に分離する.

$$\mathbf{A}_B\mathbf{k} + \mathbf{b}_B \geq \mathbf{0} \quad (\text{A.2})$$

$$\mathbf{A}_N\mathbf{k} + \mathbf{b}_N \geq \mathbf{0} \quad (\text{A.3})$$

ここで, $\mathbf{A}_B \in R^{3 \times 3}$, $\text{rank}(\mathbf{A}_B) = 3$ となるように行の並び替えを行うとする. このとき, 式 (A.2) の不等号を等号で置き換え, 次のように解く.

$$\mathbf{k} = -\mathbf{A}_B^{-1}\mathbf{b}_B \quad (\text{A.4})$$

この式を式 (A.3) に代入することで,

$$-\mathbf{A}_N\mathbf{A}_B^{-1}\mathbf{b}_B + \mathbf{b}_N \geq \mathbf{0} \quad (\text{A.5})$$

を満足するなら, この $\mathbf{N}\mathbf{k} = -\mathbf{N}\mathbf{A}_B^{-1}\mathbf{b}_B$ が F_F の頂点候補となる. このとき, どの内力成分が摩擦制限の限界にあるのかを示すため, 次のような記法を用いる.

$$\mathbf{n}_f(H_i, L_{jk}, L_{mn}) = \mathbf{N}\mathbf{k}(\lambda_{H_i}, \lambda_{L_{jk}}, \lambda_{L_{mn}} = 0) \quad (\text{A.6})$$

以上のステップを式 (A.1) の行のすべての可能な並び替えについて行うことにより, F_F の頂点集合を導出することができる.

また, F_T の頂点集合も同様な方法で求めることができ

る. F_T の場合, 次のような記法を用いる.

$$\mathbf{n}_t(i_{\max}, j_{\min}, \dots) = \mathbf{N}\mathbf{k}(\tau_i = \tau_{i\max}, \tau_i = \tau_{j\min}, \dots) \quad (\text{A.7})$$

原田研介 (Kensuke Harada)

1968年9月28日生. 1997年3月京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了. 博士(工学). 同年4月広島大学助手, 2002年4月産業技術総合研究所研究員, 現在に至る. ロボットハンド・ロボットマニピュレータの力学と制御に関する研究に興味を持つ. IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会などの会員.

(日本ロボット学会正会員)

金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生. 1976年3月九州工業大学機械工学科卒業. 1981年3月東京大学工学系研究科博士課程修了. 工学博士. 同年4月通産省工業技術院機械技術研究所入所. 1990年4月, 九州工業大学情報工学部助教授. 1993年10月広島大学教授, 現在に至る. ロボットハンド, 力覚センサ, 触覚ベーストアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ. IEEE, 計測自動制御学会, 日本機械学会などの会員. (日本ロボット学会正会員)