

要求加速度・平衡力集合を用いた物体の把持の最適化

渡辺 哲陽^{*1} 吉川 恒夫^{*2}

Optimization of Grasping an Object by Using Required Acceleration and Equilibrium-Force Sets

Tetsuyou Watanabe^{*1} and Tsuneo Yoshikawa^{*2}

In this paper, we deal with an optimization of grasping when we not only resist an external force applied to a grasped object but also generate a desirable acceleration of the object. Based on the concept of required external force set, we define required acceleration and equilibrium-force sets. By using the sets, we define an optimization problem from the viewpoint of decreasing the magnitudes of the joint torques required to generate the acceleration and the equilibrium-force, and show that we can solve the problem by using a branch-and-bound method. We also present numerical examples in order to show the validity of our approach.

Key Words: Manipulation, Optimization, Grasping, Branch-and-bound Method, Required External Force Set

1. はじめに

テーブルの上の物体をロボットハンドにより持ち上げる。ロボットハンドによって望みの方向に物体を動かす。これらの操作は、ロボットハンドと物体との間の接触点を適切にとらずには行えない操作である。このことから、ロボットハンドによる物体の把持において、接触点を物体上のどこに置いたら望みの把持が得られるかの研究が盛んに行われている [1]~[11]。

Nguyen は、force-closure と呼ばれる把持の安定状態の構成法を考察している [1]。この force-closure を保ちながら、接触力ノルム最小化などの評価関数を最適化するような接触点の組あるいはその領域を求める研究が行われている [2]~[9]。また、小俣や Trinkle らは、重力影響下において、テーブルの上の物体を平衡把持するための接触点の領域を求めている [10] [11]。

force-closure は、以下の 2 通りの解釈ができる概念である。“指関節のトルクを作用させることで、物体に任意方向の加速度または角加速度を発生させることができる”。“任意方向の力・モーメントが物体に加わっても、それとバランスするような合力・モーメントが各接触点での接触力によって発生できる”。前者の概念を、吉川は能動拘束と呼んでいる [12]。能動拘束の概念を複数物体の把持に拡張した研究に、原田ら [13] の研究がある。また、後者の概念は、外力に抗する力を構造的に発生でき

る場合、パワーグラスプと呼ばれる。パワーグラスプに関する研究としては、小俣ら [14] の不静定把持力の計算や、張ら [15] の限界外力空間、吉川ら [16] [17] の最適化などの研究がある。

これまでの接触点最適化の研究 [2]~[9] では、物体に加速度を発生させることと、重力などの外力に抵抗する力を物体に作用させることが区別されずに最適化が行われてきた。包み込み把握などのように、一つの指に物体との接触点が複数存在する場合や、物体を把持している指が、指先接触力の次元より小さな数の関節しか持たない場合、ロボットハンドと物体との間に働く接触力は、必ずしも関節駆動力によって発生するとは限らず、(一部) 構造的に発生することもある。このため、ある方向の外力に抗する力を発生できたとしても、その方向に加速度を発生させることができるとは限らない。ゆえに、物体に加速度を発生させることと、外力に抗する力を物体に作用させることを区別することは重要である。そこで本論文では、把持する物体に加わる外力に抗しながら、望みの方向に加速度を発生させたい場合の把持の最適化問題を扱う。

本論文では、要求外力集合 [16] [17] の概念を拡張して使用する。要求外力集合とは、物体に加わる、ロボットハンドによって抗しなければならない外力の集合である。この概念をもとに、物体に発生させたい加速度からなる要求加速度集合と、重力のように、物体の位置姿勢を保つためには補償しなければならない外力に抗する力からなる要求平衡力集合を定義し、これらの集合をもとに最適化を行う。

本論文の構成は以下の通りである。2 章で問題設定を、3 章で問題の定式化を行い、4 章でその問題を解くためのアルゴリズムを示す。最後に、5 章で数値例により本手法の有効性を示す。

原稿受付 2002 年 10 月 30 日

^{*1} 山口大学工学部

^{*2} 京都大学大学院工学研究科

^{*1} Faculty of Engineering, Yamaguchi University

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

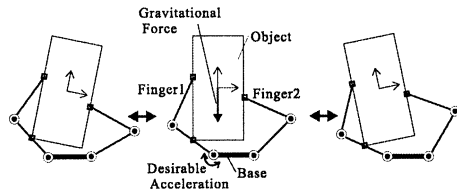


Fig. 1 Target system



(a) Example of manipulation (b) RAS

Fig. 2 Example of RAS (Required Acceleration Set)

2. 問題設定

本章では、本論文で扱う問題を設定する。まず、本研究における対象とする系について述べ、次いで要求加速度・平衡力集合を定義し、これらをもとに解くべき問題を設定する。

2.1 対象とする系

対象とする系を Fig. 1 に示す。本論文では、 N 本指（図中は 2 本指）からなるロボットハンドで、任意形状の剛体対象物を把持する場合を考える。このとき、

- (1) ロボットハンドは対象物と摩擦あり点接触をする。
- (2) 接触点における接触法線方向は一意に定まる。
- (3) ロボットハンドの各指の各リンクには、最高でも一つの接触点しか存在しない。
- (4) ベースと対象物は接触しない。
- (5) 操作中、対象物上（指上）の接触点の位置および数は変化しない（接触点の離脱や接触を伴う操作は考慮しない）。

という仮定をおくことにする。この仮定のもとで、与えられた操作範囲内において、重力のような外力に抵抗しながら、望みの加速度を対象物に発生させることを考える。

2.2 要求加速度・平衡力集合

本節では、要求加速度・平衡力集合を定義する。まず、要求加速度集合を以下のように定義する。

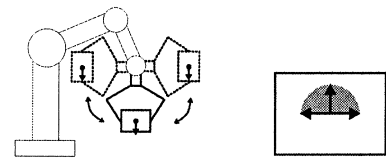
要求加速度集合 実現しようとする把持において、対象物が発生できなければならない、望みの加速度の集合を、要求加速度集合 $\mathcal{A}_R \subset \mathcal{R}^D$ (D は二次元のとき 3, 三次元のとき 6) と呼ぶ。

Fig. 2 (a) に示すような、対象物を様々な方向に並進移動させる場合を考える。この場合、この並進移動のために必要な加速度を考えると、要求加速度集合 \mathcal{A}_R は、Fig. 2 (b) のように設定できる。

次に、要求平衡力集合を以下のように定義する。

要求平衡力集合 実現しようとする把持において、重力のように、対象物の位置姿勢を保つためには補償しなければならない外力に抗する力からなる集合を、要求平衡力集合 $\mathcal{W}_R \subset \mathcal{R}^D$ と呼ぶ。この集合に含まれる力は、必ず対象物に作用させることができなければならない。

Fig. 3 (a) に示すような、ロボットハンドを手先効果器とす



(a) Example of manipulation (b) REFS

Fig. 3 Example of REFS (Required Equilibrium-Force Set)

るロボットアームの操作によって、対象物に加わる重力の方向が、対象物座標系から見て、様々に変わる場合を考える。この場合、紙面向下に重力が加わるとすると、要求平衡力集合 \mathcal{W}_R は、対象物座標系から見て、Fig. 3 (b) のように設定できる。

なお、対象物が発生できる加速度からなる集合を発生可能加速度集合 $\mathcal{A} \subset \mathcal{R}^D$ 、対象物に加えることのできる合力・モーメントからなる集合を発生可能力集合 $\mathcal{W} \subset \mathcal{R}^D$ とおく。

要求加速度集合 \mathcal{A}_R および要求平衡力集合 \mathcal{W}_R が与えられた場合、それぞれの要素 \ddot{r}_d および w_d を用いて、組み合わせ要求集合 \mathcal{W}_c を以下のように定義する。

$$\mathcal{W}_c = \left\{ x = \left(\ddot{r}_d^T \ w_d^T \right)^T \mid \ddot{r}_d \in \mathcal{A}_R, w_d \in \mathcal{W}_R \right\} \quad (1)$$

2.3 解くべき問題

一般に、操作範囲内の各対象物位置姿勢において、要求加速度・平衡力集合をそれぞれ発生可能加速度・力集合に含めることができる指姿勢と接触点の組は無数に存在する。一方で、より小さな関節トルクによって構成される発生可能加速度・力集合に、要求加速度・平衡力集合を含めることができれば、関節トルクの負担は軽減され、関節トルクの偏差による対象物へ加わる合力・モーメントの偏差の影響を軽減でき、より安定な把持ができることが期待される。そこで本論文では、以下に示す問題を考えることにする。

与えられた操作範囲内の各対象物位置姿勢において、要求加速度・平衡力集合に含まれる任意の加速度・平衡力を発生させることができる指姿勢と接触点の組のうち、要求加速度・平衡力集合に含まれる任意の加速度・平衡力を発生させるのに必要な関節トルクの大きさが最大となる関節の、その関節トルクの大きさが最小となる指姿勢と接触点の組を求めよ。

3. 問題の定式化

本章では、先に設定した問題を定式化する。まず、ある姿勢にある指が、ある位置姿勢にある対象物を、ある接触点位置において把持している場合において（指および対象物がある速度を持つ場合）、ある要求加速度・平衡力に対応するための条件について述べ、その後、最適化問題を定式化する。

3.1 要求加速度・平衡力に対応するための条件

今、 N 本からなるロボットハンドの i 番目 ($i = 1, 2, \dots, N$) の指が、ある姿勢 $q_i \in \mathcal{R}^{M_i}$ をとり、重心に固定された対象物座標系（以下対象物重心座標系と呼ぶ）の位置姿勢が $r \in \mathcal{R}^D$ である対象物と、 L_i 個の接触点 $p_{C_{ij}} \in \mathcal{R}^d$ ($j = 1, 2, \dots, L_i$) で接触している場合を考える。ただし、 M_i は i 番目の指の関節の数を、 d は二次元のとき 2, 三次元のとき 3 を表している。また、 N 本の指の姿勢と $L (= \sum_{i=1}^N L_i)$ 個の接触点位置の組み

合わせを C で表す.

3.1.1 運動学的拘束

i 番目の指の j 番目の接触点の速度 $\dot{p}_{C_{ij}}$ と, i 番目の指の関節速度ベクトル \dot{q}_i および対象物の速度ベクトル \dot{r} との関係は

$$\dot{p}_{C_{ij}} = J_{ij}\dot{q}_i, \quad \dot{p}_{C_{ij}} = G_{ij}^T\dot{r}$$

と表される. ただし, $J_{ij} \in \mathcal{R}^{d \times M_i}$ はヤコビ行列, G_{ij} は三次元の場合以下のように表される行列である.

$$G_{ij} = \begin{pmatrix} I \\ [(p_{C_{ij}} - p_o) \times] \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^{D \times d}$$

ただし, I は単位行列, p_o は対象物重心位置, $[a \times]$ は $[a \times]b = a \times b$ となる外積演算と等価な行列を表している. これら,

$$\dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{q}_1^T & \dot{q}_2^T & \cdots & \dot{q}_N^T \end{pmatrix}^T \in \mathcal{R}^M$$

$$J = \text{diag} \left(\begin{pmatrix} J_{11} \\ \vdots \\ J_{1L_1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} J_{21} \\ \vdots \\ J_{2L_2} \end{pmatrix}, \cdots, \begin{pmatrix} J_{N1} \\ \vdots \\ J_{NL_N} \end{pmatrix} \right) \in \mathcal{R}^{Ld \times M}$$

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{NL_N} \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^{D \times Ld}$$

なるベクトルと行列を用いて ($M = \sum_{i=1}^N M_i$, diag はブロック対角行列を表す), L 個の接触点についてまとめると

$$G^T \dot{r} = J \dot{q} \quad (2)$$

の関係を得る. この両辺を時間微分すると, 以下の関係を得る.

$$G^T \ddot{r} + \dot{G}^T \dot{r} = J \ddot{q} + \dot{J} \dot{q} \quad (3)$$

3.1.2 静力学

各接触点での接触力をまとめた接触力ベクトル $f \in \mathcal{R}^{Ld}$ と, これに等価な指の関節トルク $\tau_c \in \mathcal{R}^M$ および f により対象物 (重心座標系) に加わる合力・モーメント $w \in \mathcal{R}^D$ との関係は, 式 (2) と仮想仕事の原理より以下のように表すことができる.

$$\tau_c = J^T f, \quad G f = w \quad (4)$$

3.1.3 摩擦条件

i 番目の指の j 番目の接触点における接触力 f_{ij} に対する摩擦条件について述べる. 三次元の場合, f_{ij} の接触法線方向成分を $n_{f_{ij}}$, 接触接線方向成分を $t_{f_{ij},1}$, $t_{f_{ij},2}$ とおくと, 摩擦条件は

$$\mathcal{F}_{f_{ij}} = \left\{ f_{ij} \mid \sqrt{t_{f_{ij},1}^2 + t_{f_{ij},2}^2} \leq \mu_{ij} n_{f_{ij}}, n_{f_{ij}} \geq 0 \right\} \quad (5)$$

と表される (二次元の場合 $t_{f_{ij},2} = 0$ とすればよい). ただし, μ_{ij} は i 番目の指の j 番目の接触点における最大静止摩擦係数を表している.

3.1.4 運動方程式

対象物とロボットハンドの運動方程式は, 式 (4) の関係を用いて, それぞれ以下のように表すことができる.

$$M_B \ddot{r} + h_B - w_e = G f \quad (6)$$

$$M_r \ddot{q} + h_r + g_r + J^T f = \tau \quad (7)$$

ただし, τ は関節トルク, M_B , M_r は対象物およびロボットハンドの慣性テンソル, h_B , h_r は遠心力やコリオリ力などを表す項, g_r は重力項, w_e は対象物に加わる重力などの外力を表している. なお, w_e を打ち消す力が要求平衡力 w_d である ($w_e + w_d = 0$).

3.1.5 要求加速度・平衡力に対応するための条件

以上の議論をもとに, ある指姿勢と接触点の組 C , ある対象物位置姿勢 r において, (指および対象物がある速度 \dot{q} , \dot{r} を持つ場合,) 要求加速度 \ddot{r}_d (式 (3), (6) の \ddot{r} に対応), 要求平衡力 w_d に対応するための条件について考える. 式 (3), (5)~(7) の関係より,

$$A_1 \tau + A_2 f = G^T \ddot{r}_d + a \quad (8)$$

$$G f = M_B \ddot{r}_d + w_d + h_B \quad (9)$$

$$f_{ij} \in \mathcal{F}_{f_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, L_i) (i = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

を満たすような関節トルク τ が存在すればよい. ただし,

$$A_1 = J M_r^{-1}, \quad A_2 = -J M_r^{-1} J^T$$

$$a = J M_r^{-1} (g_r + h_r) - \dot{J} \dot{q} + \dot{G}^T \dot{r}$$

である.

3.2 最適化問題の定式化

以上の準備をもとに, 本論文において解くべき問題を定式化する. と与えられた操作範囲内において, 対象物位置姿勢を B , そのとり得る位置姿勢の集合を S_B とおく. 操作範囲内において, 対象物位置姿勢が変われば, 指姿勢も変化する. そこで, 最適化の対象となる C を明確にするため, 操作範囲内の代表となる B を B_r , B_r における C を C_r とおく. B_r においてとり得る C の集合, すなわちとり得る C_r の集合を S_C とおく. 今, B_r における C , すなわち C_r が与えられた場合, 各 $B \in S_B$ における各 C が得られるものとする. つまり, すべての $B \in S_B$ に S_C を共有させることで, 各 $B \in S_B$ における各 C が, $C_r \in S_C$ により定まるようにする. すると, C_r は各 $B \in S_B$ における各 C を代表することになる. つまり, C_r を最適化することは, 各 $B \in S_B$ における各 C を最適化することになる. $B \in S_B$ で与えられる組み合わせ要求集合 (1) を \mathcal{W}_{c_B} とおく. i 番目の指の j 番目の関節トルクを τ_{ij} とおく. 各関節トルクのうち, その絶対値が最大となる関節トルクの絶対値を $\phi (= \max_{i,j} |\tau_{ij}|)$ とおく. ϕ と τ_{ij} との関係は以下のように表される.

$$\phi \geq |\tau_{ij}| \quad (j = 1, 2, \dots, M_i) (i = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

このとき, 解くべき問題は以下のように定式化できる. 最適化問題

$$\rho = \min_{C_r \in S_C} \max_{\omega \in \mathcal{W}_{c_B}, B \in S_B} \min_{\tau, f \text{ satisfy (8)-(11)}} \phi \quad (12)$$

なる ρ および ρ を与える C_r^* を求めよ.

各 $B \in S_B$ における各 C は, C_r により定まる. よって, C_r^* が得られた場合, 各 $B \in S_B$ における各 C の最適解 C^* も得られることに注意されたい.

4. アルゴリズム

本章では、最適化問題(12)を解くためのアルゴリズムについて述べる。本論文では、対象物のとり得る位置姿勢、指のとり得る姿勢、接触点のとり得る位置を離散化することで、分枝限定法[18][19]を用いて最適化問題(12)を解く。分枝限定法は、部分問題と呼ばれる、もとの問題を分解した問題を解いて、その解を列挙していくことで、間接的に元の問題を解く方法である。その際、部分問題のさらなる部分問題を解くことで、列挙する必要のない組み合わせを除去していく。この結果、計算時間を短縮する方法である。このため、以下のような仮定をおく。

- (1) とり得る C_r の数を有限の n_c 個とする。 S_C に含まれる C_r を C_{rk} ($k = 1, 2, \dots, n_c$) で表す。
- (2) とり得る B の数を有限の n_b 個とする。 S_B に含まれる B を B_I ($I = 1, 2, \dots, n_b$) で表す。 B_1 は B_r を表すものとする。また、 C_r が C_{rk} である場合、 B_I における C を C_{kI} ($k: C_{rk}$ の $k, I: B_I$ の I) で表す。 C_{kI} は、 C_{rk} および B_I により一意に定まるものとする。
- (3) 各 $B_I \in S_B$ において、系が静止状態にある場合のみを考慮対象とする(拘束条件(8),(9)において速度項は考慮しない)。
- (4) 各 $B_I \in S_B$ において与えられる、要求加速度・平衡力集合 A_{RI}, W_{RI} ($I = 1, 2, \dots, n_b$) は、それぞれ l_a, l_e 面からなる凸多面体で表すことができるものとする(l_a は A_{RI} の面の数、 l_e は W_{RI} の面の数を表す)。
- (5) ある B_I , ある C_{kI} において (k, I : 固定), ロボットハンドの重力項(式(7)の g_r) は、要求平衡力集合 W_{RI} に1対1に対応させることができる l_e 面からなる凸多面体として表すことができるものとする。

ある B_I , ある C_{kI} における (k, I : 固定), 重力項 g_r (および W_{RI}) について補足する。今、 W_{RI} に含まれる力のうち、重力に抗する力だけからなる集合を W_{RIg} , 重力以外の外力に抗する力からなる集合を W_{RIo} とおく。集合 $W_{RI\nu}$ ($\nu = g$ or o) に含まれる要求平衡力が $l_{e\nu}$ ($\leq l_e$) 面からなる凸多面体で $W_{RI\nu} = \{w = \sum_{i=1}^{l_{e\nu}} \lambda_{e\nu i} w_{I\nu i}, \sum_{i=1}^{l_{e\nu}} \lambda_{e\nu i} = 1, \lambda_{e\nu i} \geq 0\}$ のように(近似)表現できるとすると、 W_{RI} は

$$W_{RI} = \{w = \sum_{i=1}^{l_{eg}} \sum_{j=1}^{l_{eo}} \lambda_{eij} (w_{Igi} + w_{Ioj}), \sum_{i=1}^{l_{eg}} \sum_{j=1}^{l_{eo}} \lambda_{eij} = 1, \lambda_{eij} \geq 0\} \quad (13)$$

と表すことができる。さて、重力加速度ベクトル \tilde{g} は、対応する W_{RIg} の要素 w と $-m_b \tilde{g} = w$ の関係にある。ただし、 m_b は対象物の質量である。ゆえに、 \tilde{g} は、 W_{RIg} の各頂点に対応する \tilde{g}_i ($= -w_{Igi}/m_b$) を用いて、凸結合 $\tilde{g} = \sum_{i=1}^{l_{eg}} \lambda_{eg i} \tilde{g}_i, \sum_{i=1}^{l_{eg}} \lambda_{eg i} = 1, \lambda_{eg i} \geq 0$ で(近似)表現できる。指姿勢(と接触点位置)が変化しない場合 (C_{kI} : 固定), ロボットハンドの重力項 g_r は、ある一定の値をとる行列 A と \tilde{g} を用いて、 $g_r = A\tilde{g}$ と表すことができる[20]。ゆえに、重力項 g_r は、 W_{RIg} の各頂点に対応する \tilde{g}_i に対応する重力項 g_{ri} ($= A\tilde{g}_i$) を用いて、 $g_r = \sum_{i=1}^{l_{eg}} \lambda_{eg i} g_{ri} = \sum_{i=1}^{l_{eg}} \sum_{j=1}^{l_{eo}} \lambda_{eij} g_{ri}, \sum_{i=1}^{l_{eg}} \lambda_{eij} = \sum_{i=1}^{l_{eg}} \sum_{j=1}^{l_{eo}} \lambda_{eij} = 1, \lambda_{eij}, \lambda_{eg i} \geq 0$ と表すこと

ができる。よって、 g_r は、式(13)で表される W_{RI} に含まれる要求平衡力に1対1に対応させることができる。

本論文では、最適化問題(12)において、 C_{rk} を一つ選びそれを固定した場合の問題を部分問題1として設定する (k : 固定)。部分問題1では、各 B_I における各 C , すなわち C_{kI} ($I = 1, 2, \dots, n_b$) が、一意に定まることに注意されたい。この部分問題1を各 C_{rk} ($k = 1, 2, \dots, n_c$) に対して解けば、最適化問題(12)の最適解が得られる。 A_{RI} の j 番目の頂点と W_{RI} の ξ 番目の頂点の組み合わせを $x_{Ij\xi} = \begin{pmatrix} \dot{r}_{dIj}^T & w_{dI\xi}^T \end{pmatrix}^T$ で表す。部分問題1において、 B_I を一つ選び、 $x_{Ij\xi}$ を一つ選び、それらを固定した問題を部分問題2として設定する ($(k), I, j, \xi$: 固定)。ある C_{rk} に対する部分問題1の部分問題である、ある B_I およびある $x_{Ij\xi}$ に対する部分問題2を解く場合、 C がその C_{rk}, B_I に対応する C_{kI} であるとして、その部分問題2を解かなければならないことに注意されたい。なお、その部分問題2の解を $\rho_{C_{rk}, Ij\xi}$ とおく。今、 C_r がある C_{rk}, B がある B_I , すなわち C が C_{kI} の場合において、 A_{RI}, W_{RI} に含まれる任意の要求加速度・平衡力に対応するのに必要な関節トルク ϕ (式(11)参照)を考える (k, I : 固定)。部分問題2の制約条件は、凸制約である摩擦条件と線形等式・不等式条件から構成される。よって、その必要な関節トルク ϕ は、 $\rho_{C_{rk}, Ij\xi}$ (k, I : 固定, $j = 1, 2, \dots, l_a, \xi = 1, 2, \dots, l_e$) の凸結合により表現できる。ゆえに、ある C_{rk} に対する部分問題1において、対応するすべての部分問題2の解 $\rho_{C_{rk}, Ij\xi}$ (k : 固定, $I = 1, 2, \dots, n_b, j = 1, 2, \dots, l_a, \xi = 1, 2, \dots, l_e$) が存在する場合、それらすべての解(総数 $n_b l_a l_e = n_b l_a l_e l_{eo}$ 個)の中で、最大となる解がその部分問題1の解となる。つまり、部分問題1は、対応する部分問題2を各 B_I , 各 $x_{Ij\xi}$ に対して解くことで、解くことができる。部分問題2は、摩擦条件を線形近似[21]することで、シンプレックス法を用いて解くことができる。以上の議論をもとに、分枝限定法を適用することにより、最適化問題(12)を解くことができる。

4.1 最適化手順

以上の準備をもとに、以下のようなアルゴリズムで最適な指姿勢と接触点の組を探索する。暫定最適解を $\hat{\rho}$, C_{rk} に対する部分問題1の最適解を $\rho_{C_{rk}}$, その暫定最適解を $\hat{\rho}_{C_{rk}}$ とおく。また、候補となる有効な C_{rk} のリストを LIST で表す。
 ステップ1 ある C_{rk} において、各 $B_I \in S_B$ における各 C (C_{kI}) が、物体と指との干渉、指同士の干渉、指の関節角度制限、といった条件を満たす場合、その C_{rk} を候補 C_{rk} と呼ぶ。候補 C_{rk} となるすべての C_{rk} を LIST に入れる。 $\hat{\rho}$ を適当な下限値に、各 $\rho_{C_{rk}}$ ($\hat{\rho}_{C_{rk}}$) を適当な上(下)限値に設定する。
 ステップ2 LIST から C_{rk} を一つ選び、その C_{rk} に対する部分問題1を解く。具体的にはまず、その部分問題1に対応するすべての部分問題2の解 $\rho_{C_{rk}, Ij\xi}$ (k : 固定, $I = 1, 2, \dots, n_b, j = 1, 2, \dots, l_a, \xi = 1, 2, \dots, l_e$) を求める。解が一つでも存在しなければ、その部分問題1は解なしとなる。すべての解が存在する場合、それらすべての解の中で、最大値をとる解 $\rho_{C_{rk}, Ij\xi}$ がその部分問題1の解となる。
 ステップ3 ステップ2において解が求めれば、その解を $\hat{\rho}$ お

よび $\rho_{C_{rk}} (= \hat{\rho}_{C_{rk}})$ とする. この解 ($\rho_{C_{rk}, \hat{I}_{j\xi}}$) を与える B_I を \hat{B}_I , $x_{I_{j\xi}}$ を $\hat{x}_{I_{j\xi}}$ とする. ステップ 2 において解が存在しなければ, LIST からこの C_{rk} を取り除き, ステップ 2 に戻る. ステップ 4 \hat{B}_I , $\hat{x}_{I_{j\xi}}$ に対する部分問題 2 を, LIST に含まれる各 C_{rk} について解く (I, j, ξ : 固定, k は LIST に含まれる各 C_{rk} の番号). この場合, C は \hat{B}_I および各 C_{rk} に対応する $C_{k\hat{I}}$ であるとして, この問題を解かなければならないことに注意されたい. ある C_{rk} ($C_{k\hat{I}}$) において解が存在しなければ, LIST からその C_{rk} を取り除く. ある C_{rk} ($C_{k\hat{I}}$) において解 $\rho_{C_{rk}, \hat{I}_{j\xi}}$ が存在する場合, $\hat{\rho}_{C_{rk}} = \max\{\hat{\rho}_{C_{rk}}, \rho_{C_{rk}, \hat{I}_{j\xi}}\}$ を求め, $\hat{\rho} < \hat{\rho}_{C_{rk}}$ なら, この C_{rk} を LIST から取り除く. ステップ 5 LIST に含まれる C_{rk} の中で, $\rho_{C_{rk}, \hat{I}_{j\xi}}$ が最小となる組を \hat{C}_{rk} とおく. ステップ 6 \hat{C}_{rk} に対する部分問題 1 を解く. 解が存在するならば, その解を $\rho_{\hat{C}_{rk}} (= \hat{\rho}_{\hat{C}_{rk}})$ とし, この解を与える B_I を \hat{B}_I , $x_{I_{j\xi}}$ を $\hat{x}_{I_{j\xi}}$ とする. さらに, $\hat{\rho} > \rho_{\hat{C}_{rk}}$ なら, $\hat{\rho} = \rho_{\hat{C}_{rk}}$ とする. 解が存在しないか $\hat{\rho} < \rho_{\hat{C}_{rk}}$ ならば, LIST からこの \hat{C}_{rk} を取り除き, ステップ 5 に戻る. ステップ 7 LIST に含まれるすべての C_{rk} において, $|\hat{\rho} - \rho_{C_{rk}}| < \epsilon$ (ϵ は任意の小さな正数) が成立すれば終了, そうでなければステップ 4 に戻る.

5. 数 値 例

本手法の有効性を示すため, 本章では数値例を示す. 対象とする系を Fig. 4(a) に示す. 対象物の幾何学的中心に対象物重心座標系をおいた. なお, Fig. 4(a) 中の目盛数字は基準座標系 (ハンド座標系) のものである. 対象物が Fig. 4(a) に示すような位置姿勢にある場合, 基準座標系と対象物座標系は同じ位置姿勢をとることに注意されたい. ロボットハンドは同じ構成である 2 本指からなる. リンク長さは根本から順に 0.05 [m], 0.05 [m] とした. 各リンクの質量は 0.025 [kg], 関節角度制限は $\pi/2 \leq q_{11} \leq \pi$, $-\pi \leq q_{12} \leq 0$, $0 \leq q_{21} \leq \pi/2$, $0 \leq q_{22} \leq \pi$ とした. ただし, q_{ij} [rad] は i 番目 ($i = 1, 2$) の指の, 根元から j 番目 ($j = 1, 2$) の関節角度を表している. 本数値例では, 指姿勢をベース位置と指先接触点位置により表現することにした. ベースの幾何学的中心の x 成分を b_x [m], y 成分を b_y [m] とおき, 候補となるベース位置の範囲を $-0.05 \leq b_x \leq 0.05$, $-0.155 \leq b_y \leq -0.055$ とした (Fig. 4(b) 参照). 候補となるベース位置の数は, b_x, b_y それぞれについて 0.005 [m], 0.005 [m] の刻み

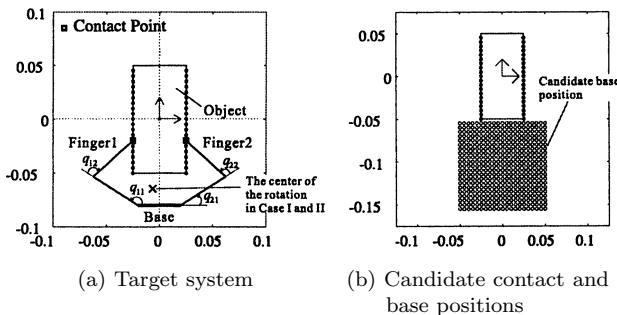


Fig. 4 Target system in numerical examples

幅を与えることにより, 総数 441 個とした. 対象物は 0.1 [m] × 0.05 [m] の四角形で, 重量は 4 [N] とした. 候補接触点位置は, Fig. 4(b) に対象物表面上の点として示している. 候補接触点の総数は 40 個である. 指と対象物との間の摩擦係数は 0.5 とした. なお, 各指の第 1 リンクと対象物 (の頂点) との間の接触は, めり込み量が小さい場合, 点接触として扱った.

まず, Case I として, Fig. 5 に示すようなタスクを考えた. 紙面下向きに加わる重力に抗しながら, 対象物を図中の × 印まわりに回転させるタスクである. × 印は対象物座標系からみて (-0.005, -0.065, 0) にある点を表している (Fig. 5 では, × 印が見にくいので, Fig. 4(a) にも × 印を示している). 図中四角で囲んだ対象物位置姿勢が B_r である (以下の Case II および III でも同じである). B_r (0, 0, 0)^T を基準に, × 印 (-0.005, -0.065, 0) まわりに, -0.2 ~ 0.2 [rad] の範囲で, 0.1 [rad] 刻みに対象物を回転させた対象物位置姿勢を候補位置姿勢とした ($n_b = 5$). 要求加速度集合 (RAS) は, × 印 (-0.005, -0.065, 0) まわりに 0.5 [rad/s²] の大きさの加速度を発生させることを想定して与えた. 要求平衡力集合 (REFS) は下向きの 4 [N] の重力に抗する力として与えた. B_r における RAS · REFS を以下に示す.

$$A_{R1} = \{\ddot{r}_d = \lambda_1 \ddot{r}_{d1} + \lambda_2 \ddot{r}_{d2}, \lambda_1 + \lambda_2 = 1, \lambda_i \geq 0, \\ \ddot{r}_{d1} = (-0.0325, 0.0025, 0.5)^T, \ddot{r}_{d2} = -\ddot{r}_{d1}\} \\ W_{R1} = \{w_d = (0, 4, 0)^T\}$$

得られた最適な指姿勢と接触点の組を Fig. 5 に示す. 最適化問題 (12) の最適解 ρ は 0.080 [Nm] となった. 参考までに, Fig. 4(a) に示す指姿勢と接触点位置の場合, 必要な関節トルク ϕ (この指姿勢と接触点の組に対する部分問題 1 の解) は 0.252 [Nm] であった. 各指につき対象物との接触点を 1 個とする姿勢と比べ, Fig. 5 に示す姿勢が良いという結果を得たのは, 片方の指に対象物との接触点が複数存在するような持ち方をするすることで, 重力に対する抗力を発生させるために, 機構的に発生する接触力を利用できたのと同時に, 望みの加速度を発生させることができたためと考えられる.

次に, Case II として, Fig. 6 に示すようなタスクを考えた. Case I において, 対象物に加わる重力の方向が多方向となった場合のタスクである. このタスクでは, ロボットハンドを手先

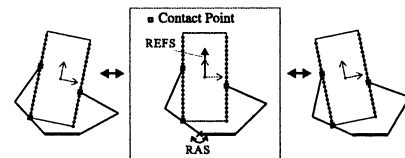


Fig. 5 Target operation with optimal configuration in Case I

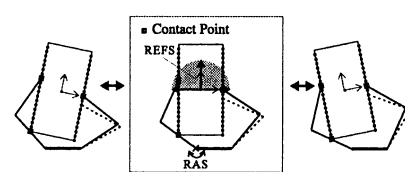


Fig. 6 Target operation with optimal configuration in Case 2 (The dash line is the configuration of Finger 2 in Fig. 5)

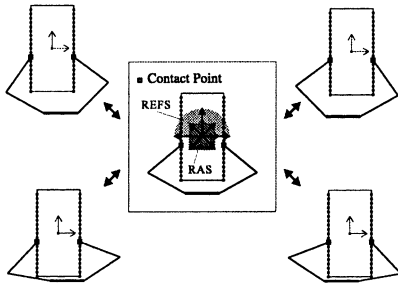


Fig. 7 Target operation with optimal configuration in Case 3

効果器とするロボットアームの操作により、対象物に加わる重力の方向が変化することを想定している。REFSは、半径4[N]の上向き半円を、33面の凸多面体により近似して与えた。 B_r におけるREFSを以下に示す(RASはCase Iと同じである)。

$$\mathcal{W}_{R1} = \{ \mathbf{w}_d | \mathbf{w}_d = \sum_{i=0}^{32} \lambda_i \mathbf{w}_{di}, \sum_{i=0}^{32} \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0, \mathbf{w}_{di} = (4 \cos(i\pi/32), 4 \sin(i\pi/32), 0)^T \}$$

得られた最適な指姿勢と接触点の組をFig. 6に示す。比較のため、Case Iにおける指2の最適姿勢を点線で示す。 ρ は0.270[Nm]であった。参考までに、Fig. 4(a)に示す指姿勢と接触点位置の場合、必要な関節トルク ϕ は0.439[Nm]であった。Case Iと比べて、指2の最適な接触点位置が、より重心に近い位置に位置しているのは、 x 方向(紙面横方向)にも、対象物に重力が加わる場合があったためと考えられる。

最後に、Case IIIとして、Fig. 7に示すようなタスクを考えた。Case IIと同様の想定により、Case IIと同方向に重力が加わる場合において、対象物を並進移動させるタスクである。 $B_r(0, 0, 0)^T$ を基準に、 x 方向 $-0.01 \sim 0.01$ [m]、 y 方向 $-0.01 \sim 0.01$ [m]の範囲で、0.005[m]刻みに並進移動させた対象物位置姿勢を候補位置姿勢とした($n_b = 25$)。RASは、 x, y の各方向に 0.5 [m/s²]の大きさの加速度を発生させることを想定して、4面の凸多面体で与えた。 B_r におけるRASを以下に示す(REFSはCase IIと同じである)。

$$\mathcal{A}_{R1} = \{ \ddot{\mathbf{r}}_d | \ddot{\mathbf{r}}_d = \sum_{i=1}^4 \lambda_i \ddot{\mathbf{r}}_{di}, \sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0, \ddot{\mathbf{r}}_{d1} = (0.5, -0.5, 0)^T, \ddot{\mathbf{r}}_{d2} = (-0.5, -0.5, 0)^T, \ddot{\mathbf{r}}_{d3} = (0.5, 0.5, 0)^T, \ddot{\mathbf{r}}_{d4} = (-0.5, 0.5, 0)^T \}$$

得られた最適な指姿勢と接触点の組をFig. 7に示す。 ρ は0.393[Nm]であった。望みの加速度を発生させるためには、各指につき対象物との接触点を1個としなければならないため、Fig. 7のような結果が得られたと考えられる。

計算時間は、GATEWAY社製SELECT PRO JP 3YEAR/OX KER(CPU:AMD社ATHLON 1.2GHZ搭載)を用いて、Case Iに関しては約10秒、Case IIに関しては約15秒、Case IIIに関しては約3分かかった。

6. おわりに

本論文では、把持する対象物に加わる外力に抗しながら、望

みの方向に加速度を発生させたい場合の把持の最適化問題を扱った。この際、要求外力集合の概念をもとに、前者の外力に抗する力からなる集合を要求平衡力集合、後者の望みの加速度からなる集合を要求加速度集合と定義し、これらをもとに、関節トルクの負担をなるべく減らしたいという観点から、最適化問題を設定した。また、この問題が分枝限定法を用いて解けることを示した。さらに、数値例で本手法の有効性を示した。

参考文献

- [1] V. Nguyen: "Constructing force-closure grasps," The Int. J. of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.3-16, 1988.
- [2] X. Markenscoff and C.H. Papadimitriou: "Optimum grip of a polygon," The Int. J. of Robotics Research, vol.8, no.2, pp.17-29, 1989.
- [3] Y. Chen, I.D. Walker and J.B. Cheatham: "Grasp synthesis for planar and solid objects," J. of Robotic Systems, vol.10, no.2, pp.153-186, 1993.
- [4] I. Chen and J.W. Burdick: "Finding antipodal point grasps on irregularly shaped objects," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.9, no.4, pp.507-512, 1993.
- [5] B. Mirtich and J. Canny: "Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.739-747, 1994.
- [6] L. Mangialardi, G. Mantriota and A. Trentadue: "A three-dimensional criterion for the determination of optimal grip points," Robotics & Computer-integrated Manufacturing, vol.12, no.2, pp.157-167, 1996.
- [7] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat and J. Merlet: "On computing four-finger equilibrium and force-closure grasps of polyhedral objects," The Int. J. of Robotics Research, vol.16, no.1, pp.11-35, 1997.
- [8] M.Y. Wang and D.M. Pelinescu: "Optimizing fixture layout in a point-set domain," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.17, no.3, pp.312-323, 2001.
- [9] D. Ding, Y. Liu and M.Y. Wang: "Automatic selection of fixturing surfaces and fixturing points for polyhedral workpieces," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.17, no.6, pp.833-841, 2001.
- [10] 小侯: "多指ハンドの指先計算アルゴリズム," 計測自動制御学会論文集, vol.26, no.5, pp.550-556, 1990.
- [11] J.C. Trinkle and R.P. Paul: "Planning for dexterous manipulation with sliding contacts," The Int. J. of Robotics Research, vol.9, no.3, pp.24-48, 1990.
- [12] 吉川: "把持と操りの基礎理論 1. 受動拘束と能動拘束," 日本ロボット学会誌, vol.13, no.7, pp.950-957, 1995.
- [13] 原田, 金子, 古寺, 辻: "複数対象物の Active Force Closure," 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1158-1166, 1999.
- [14] 小侯, P. Daengtamai: "パワーグラスブの不静定把持力計算法," 日本ロボット学会誌, vol.19, no.7, pp.874-881, 2001.
- [15] 張, 中村, 吉本: "パワーグラスブを含む一般的な把持とあやつりの力学," 日本ロボット学会誌, vol.15, no.2, pp.207-215, 1997.
- [16] 余, 竹内, 吉川: "ロボットハンドによるパワーグラスブの最適化," 日本ロボット学会誌, vol.17, no.4, pp.557-566, 1999.
- [17] 吉川, 渡辺, 大東: "複数対象物に対するパワーグラスブの最適化," 日本機械学会論文集 C 編, vol.68, no.668, pp.1223-1230, 2002.
- [18] 福島: 数値計画入門. 朝倉書店, 1996.
- [19] L. Stocco, S.E. Salcudean and F. Sassani: "Fast constrained global minimax optimization of robot parameters," Robotica, vol.16, pp.595-605, 1999.
- [20] 吉川: ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.
- [21] J. Kerr and B. Roth: "Analysis of multifingered hands," The Int. J. of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.



渡辺哲陽 (Tetsuyou Watanabe)

1974年4月3日生。2003年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年山口大学工学部助手となり、現在に至る。博士(工学)。ロボットハンドなどの研究に従事。日本機械学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)



吉川恒夫 (Tsuneo Yoshikawa)

1941年12月19日生。1969年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年同大学工学部助手、1986年同教授。1994年同大学工学研究科教授(機械工学専攻)となり、現在に至る。ロボット工学、人工現実感技術、制御工学などの研究に従事。工学博士。日本機械学会および米国IEEE学会のフェロー。計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本バーチャルリアリティ学会などの会員。
(日本ロボット学会正会員)