

要求外力集合を用いた把持の最適化

渡辺 哲陽* 吉川 恒夫*

Optimization of Grasping by Using a Required External Force Set

Tetsuyou Watanabe* and Tsuneo Yoshikawa*

In this paper, we consider an optimization of grasping by using a required external force set. By using the set, we can not only deal with whatever a desired grasp is, such as force-closure or equilibrium grasp, but also evaluate the magnitude of resultant force which we can apply to the object. By using the set, we define an optimization problem from the viewpoint of decreasing the work of contact forces, and show that we can solve the problem by using a branch-and-bound method. Lastly we present some numerical simulations for verifying our approach.

Key Words: Robot Hands, Optimization, Grasping, Branch-and-Bound Method

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ことを考える。この場合、物体とロボットハンドとの間の接触点を適切にとらないと、ロボットハンドからの接触力によってその物体の重力を補償できない。つまり、その物体を持ち上げることができない。また、ロボットハンドによって把持している物体に外乱力が加わったり、その物体をある方向に動かそうとしたりする場合、接触点の取り方によっては、その外乱力に抵抗する力や物体を動かすための力を発生できないこともある。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、接触点を対象物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]~[17]。

この研究をおおまかに分けると以下の2通りになる。(1) 対象物の重力を補償する合力を、各接触点における接触力によって発生できるような接触点の組あるいはその領域を求める研究(以下平衡把持の研究と呼ぶ)[1]~[3]と、(2) force-closure [4]と呼ばれる把持の安定状態を保つような接触点の組あるいはその領域を求める研究 [4]~[17]である。ここで、force-closureとは、任意の方向の外力・モーメントが対象物に加わっても、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状態のことをいう。

後者の研究の中でも特に対象物に加えることのできる合力・モーメントの大きさを考慮した研究として、Liら [11]、Markenscoffら [12]、Mirtichら [13]、MangialardiとMantriotaら [14] [15]、Teichmannら [16]、Wangら [17]の研究があげられる。

Liら [11]は、対象物に加えることのできる合力・モーメントの集合に含むことのできる最大の楕円体(楕円体の形状は行いたい作業に応じて定められる)の体積を、評価指標として提案している。しかしながら、最適な接触点の組を求めるための具体的なアルゴリズムは考察されていない。

Markenscoffら [12]は、任意方向に加わる大きさ1以下の外力に抗するのに必要な接触力を最小化する接触点の組を探索している。しかしながら、図式的手法を用いているために、適用できる指の本数に制限があったり、各接触点の摩擦条件が摩擦なしに限定されたりしている。

Mirtichら [13]は、任意方向の大きさ1以下の外力に抗するのに必要な接触力を最小化する接触点の組のうち、大きさ1以下の外モーメントに抗するのに必要な接触力を最小化する接触点の組を探索している。しかしながら、図式的手法を用いているために、適用できる指の本数に制限がある。

MangialardiとMantriotaら [14] [15]は、大きさ1以下の外力と外モーメントが互いに独立に働く場合、その外力・モーメントに抗するのに必要な接触力(または接触点の摩擦係数)を最小化するような接触点の組を求めている。しかしながらこの手法では、外力と外モーメントが同時に働くなどの場合、対象物に加えることのできる合力・モーメントの大きさを正当に評価できない。また、接触点が置かれる対象物の表面を一つの連続関数で表しているため、多面体などを把持する場合、あらかじめ各接触点を置く面を定めておく必要がある。

Teichmannら [16]は、対象物に加わる、抗しなくてはならない外力の集合(原点を内点に含む)に属する外力・モーメントに抗するのに必要な接触点の数を、最小化する接触点の組を求める手法について考察している。ただし、各接触点において発生可能な接触力の大きさを1としている。しかし、各接触点の

原稿受付 2002年3月22日

*京都大学大学院工学研究科

*Graduated School of Engineering, Kyoto University

摩擦条件は摩擦なしに限定されている．また，数値例などによるこの手法の有効性については示されていない．

Wang ら [17] は，接触力を受動的にのみ発生可能な locator 数個と能動的に発生可能な clamp 一つにより対象物を固定する際，大きさ 1 以下の外力・モーメントに抗するのに必要な接触力を最小化する接触点の組を探索している．しかし，各接触点の摩擦条件は摩擦なしに限定されている．

先に筆者ら [18] [19] は，パワーグラスプの最適化の研究にて，要求外力集合の概念を提案した．この集合は，対象物に加わる，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．要求外力集合の大きさは，抵抗したい外力の大きさに相当するため，対象物に加えることのできる合力・モーメントの大きさを評価することができる．また，この集合の内点に原点を含む場合には，その目標とする把持が force-closure を実現することを意味し，この集合の次元が 1 である場合には，その目標とする把持が平衡把持を実現することを意味する．すなわち，この概念を用いれば，force-closure 把持も平衡把持も含めた一般の望みの把持状態を扱うことができる．

そこで本研究では，対象物を把持する際，接触点における摩擦を考慮しつつ，要求外力集合に属するすべての外力・モーメントに抗する合力・モーメントを発生できるような最適な接触点の組を求める問題について考察することにする．

本論文の構成は以下の通りである．2 章にて問題設定を行い，3 章にてそれを解くためのアルゴリズムを示す．最後に，4 章にて数値例により本手法の有効性を示す．

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，次いで問題の拘束条件となる，接触力と対象物へ加わる合力・モーメントとの関係，摩擦条件について述べる．さらに，要求外力集合を定義し，これらをもとに最適化すべき問題を設定する．

2.1 対象とする系

本論文では， m 本指からなるロボットハンドで，任意形状の対象物を把持することを考える．このとき，

- ロボットハンドは対象物と摩擦あり点接触をする．
- 接触点における接触法線方向が定まる．

という仮定を置くことにする．

2.2 拘束条件

まず，接触力と対象物へ加わる合力・モーメントとの関係について述べる．候補接触点の集合を \mathcal{C} で表し，この中から m 個の接触点を選んだ場合の接触点の組を

$$\mathcal{N} = \{p_{C_{N_i}} (i = 1, 2, \dots, m) | p_{C_{N_i}} \in \mathcal{C}\} \quad (1)$$

と表すことにする．ただし， $p_{C_{N_i}} \in \mathcal{R}^d$ (d は二次元のとき 2，三次元のとき 3) は，選ばれた m 個の接触点のうち， i 番目の接触点の位置を表している．このとき， i 番目の接触点におけるロボットハンドから対象物へと加えられる接触力を $f_{N_i} \in \mathcal{R}^d$ と表すと，各接触力によって対象物（に固定された座標系）に加わる合力・モーメント $w \in \mathcal{R}^D$ (D は二次元のとき 3，三次

元のとき 6) は

$$\sum_{i=1}^m G_{N_i} f_{N_i} = w \quad (2)$$

と表される．ただし， G_{N_i} は三次元の場合

$$G_{N_i} = \begin{pmatrix} I \\ [(p_{C_{N_i}} - p_o) \times] \end{pmatrix} \in \mathcal{R}^{D \times d} \quad (3)$$

と表される行列であり， I は単位行列， $[a \times]$ 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．また， p_o は対象物に固定された座標系の原点位置を表している．

一方で， i 番目 ($i = 1, 2, \dots, m$) の接触点における摩擦条件は，三次元の場合，接触力 f_{N_i} の接触法線方向成分を $n_{f_{N_i}}$ ，接触接線方向成分を $t_{f_{N_i,1}}, t_{f_{N_i,2}}$ と置くと，

$$\mathcal{F}_{f_{N_i}} = \{f_{N_i} | \sqrt{t_{f_{N_i,1}}^2 + t_{f_{N_i,2}}^2} \leq \mu_{N_i} n_{f_{N_i}}, n_{f_{N_i}} \geq 0\} (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

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

2.3 要求外力集合

要求外力集合 [18] [19] を以下のように定義する．

要求外力集合 実現しようとする把持において，対象物に加えることのできる合力・モーメントの集合を発生可能能力集合 $\mathcal{W} \subset \mathcal{R}^D$ とおく．また，その要素を正負反転させた集合を $\mathcal{W}^- = \{-w | w \in \mathcal{W}\}$ とおく．要求外力集合とは，集合 \mathcal{W}^- に最低限含まれなければならない外力の集合 $\mathcal{W}_R \subset \mathcal{R}^D$ のことをいう．

2.4 最適化問題

以上の準備をもとに，本論文にて扱う問題を設定することにする．一般に，要求外力集合を \mathcal{W}^- に含めることができる接触点の組は無数に存在し得る．一方で，より小さな接触力によって構成される \mathcal{W}^- に，要求外力集合を含めることができれば，接触力による対象物の変形や破壊防止になり，接触力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，以下で示す問題を考えることにする．

最適化問題

$$\min_{\mathcal{N} \in \mathcal{S}} \max_{-w \in \mathcal{W}_R} \min_{(2), (4)} \max_i \phi = \sqrt{f_{N_i}^T f_{N_i}} \quad (5)$$

なる接触点の組 \mathcal{N}^* を求めよ．ただし， \mathcal{S} は候補となる接触点の組の集合を表している．

この問題は，平衡条件 (2) および摩擦条件 (4) を満たしつつ， \mathcal{W}^- に要求外力集合を含めることができる接触点の組のうち， \mathcal{W}^- を構成する接触力のユークリッドノルムが最大となる接触点のそのノルムが最小となる接触点の組を求める問題である．

3. アルゴリズム

本章では，前章で設定した問題を解くためのアルゴリズムについて述べる．この問題を解くため，二つの仮定を置くことにする．一つめの仮定は，対象物表面上，ロボットハンドと接触

する可能性を持つ候補接触点の数を、有限の n 個とすることである。すなわち、 $C(n, m)$ (n 個の中から m 個を選び組み合わせの数) 個の組み合わせが、候補となる接触点の組となる。二つめの仮定は、要求外力集合 \mathcal{W}_R が、 l 個の頂点からなる凸多面体 [20] で表されるとすることである。もし要求外力集合 \mathcal{W}_R が凸多面体でない場合は、それを含む凸多面体で新たに \mathcal{W}_R を定義すれば問題はない。この場合要求外力集合 \mathcal{W}_R は、

$$\mathcal{W}_R = \{w = \sum_{j=1}^l \lambda_j w_{vj}, \sum_{j=1}^l \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, l)\} \quad (6)$$

と表すことができる。ただし、 w_{vj} は要求外力集合 \mathcal{W}_R の頂点を表すベクトルである。

これらの仮定をおくことで、有限個の要素から最適な要素を見つける問題に対してよく適用される分枝限定法 [21] [22] を用いることができる。分枝限定法は、有効解を列挙することで、最適解を求める手法である。その際、緩和問題と呼ばれる、もとの問題において拘束条件を緩和した問題を解くことで、列挙する必要のない組み合わせを除去していく。これにより、計算時間を短縮する方法である。そこでまず、本論文で扱う問題の緩和問題をいくつか設定し、その後で具体的な手順について述べることにする。

3.1 緩和問題の設定

まず、 $C(n, m)$ 個の組み合わせから、接触点の組 \mathcal{N}_k を一つ選びそれを固定した場合について考える。この場合、以下の緩和問題が得られる。

緩和問題 1

$$\max_{-w \in \mathcal{W}_R} \min_{(2), (4)} \max_i \phi = \sqrt{f_{\mathcal{N}_k}^T f_{\mathcal{N}_k}} \quad (7)$$

この問題を、各接触点の組 $\mathcal{N}_k (k = 1, 2, \dots, C(n, m))$ について解けば、最適化問題 (5) の解が得られる。

この緩和問題 1 を解くため、接触点の組 \mathcal{N}_k を一つ選びそれを固定するだけでなく、さらに要求外力集合 \mathcal{W}_R に含まれる一つの頂点 w_{vj} を選びそれを固定した場合を考える。この場合、以下のような緩和問題 1 の緩和問題が得られる。

緩和問題 2

$$\begin{aligned} \min & \phi \\ \text{subject to} & \sqrt{f_{\mathcal{N}_k}^T f_{\mathcal{N}_k}} \leq \phi \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ & \sum_{i=1}^m G_{\mathcal{N}_k} f_{\mathcal{N}_k} = -w_{vj} \\ & f_{\mathcal{N}_k} \in \mathcal{F}_{f_{\mathcal{N}_k}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (8)$$

今、各頂点 $w_{vj} (j = 1, 2, \dots, l)$ に関して、緩和問題 2 の最適解 $\phi_{\mathcal{N}_k, vj}$ が得られた場合を考える。各頂点 w_{vj} に関して緩和問題 2 の最適値 $\phi_{\mathcal{N}_k, vj}$ を与える接触力 $f_{\mathcal{N}_k, i, j}^* (i = 1, 2, \dots, m)$ を頂点とする、接触力に関する凸多面体は以下のように表される。

$$\mathcal{F}_{\mathcal{N}_k} = \{f = \sum_{j=1}^l \lambda_j f_{\mathcal{N}_k, j}^*, f_{\mathcal{N}_k, j}^* = ((f_{\mathcal{N}_k, 1, j}^*)^T \dots (f_{\mathcal{N}_k, m, j}^*)^T)^T \mid \sum_{j=1}^l \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, l)\} \quad (9)$$

緩和問題 2 の制約条件は凸集合であるから、この集合 $\mathcal{F}_{\mathcal{N}_k}$ に含まれる接触力を用いて、要求外力集合 \mathcal{W}_R に含まれるす

べての外力・モーメントに抗することが可能となる。ゆえに、 $\phi_{\mathcal{N}_k, vj} (j = 1, 2, \dots, l)$ の中で、最大の値をとる $\phi_{\mathcal{N}_k, vj}$ が緩和問題 1 の最適解となる。つまり、緩和問題 1 の最適解は、緩和問題 2 を要求外力集合 \mathcal{W}_R の各頂点 w_{vj} に関して解くことで求められる。

緩和問題 2 の制約条件のうち、不等式条件は、Buss ら [23] の定式化をもとに

$$\begin{aligned} F_{\mathcal{N}_k} &= \begin{pmatrix} \phi I & f_{\mathcal{N}_k} \\ f_{\mathcal{N}_k}^T & \phi \end{pmatrix} \succeq O \\ P_{\mathcal{N}_k} &= \begin{pmatrix} \mu_{\mathcal{N}_k} n_{f_{\mathcal{N}_k}} & 0 & t_{f_{\mathcal{N}_k}, 1} \\ 0 & \mu_{\mathcal{N}_k} n_{f_{\mathcal{N}_k}} & t_{f_{\mathcal{N}_k}, 2} \\ t_{f_{\mathcal{N}_k}, 1} & t_{f_{\mathcal{N}_k}, 2} & \mu_{\mathcal{N}_k} n_{f_{\mathcal{N}_k}} \end{pmatrix} \succeq O \quad (10) \end{aligned}$$

のように、変数の線形関数として表される対称行列 $F_{\mathcal{N}_k}$ および $P_{\mathcal{N}_k}$ の準正定性の条件 ($F_{\mathcal{N}_k} \succeq O$ で $F_{\mathcal{N}_k}$ が準正であることを表す) と等価に表すことができる。このことから、緩和問題 2 は半正定値計画問題 [24] [25] を用いて解くことができる [26]。

次に、緩和問題 2 の制約条件を線形条件に緩和した、緩和問題 3 を設定する。緩和問題 3 は、緩和問題 1 を解く必要のない接触点の組を効率よく知るための問題である。緩和問題 1 を解く必要のない接触点の組を知るために、緩和問題 2 を用いてもよいが、一般にシンプレックス法の方が半正定値計画問題よりも少ない計算時間で解くことができるため、本論文では、緩和問題 3 を設定することにする。なお、緩和問題 3 の制約条件は、緩和問題 2 の制約条件を含むことから、緩和問題 3 の最適解は、対応する緩和問題 2 の下限解、すなわち緩和問題 1 の下限解を与えることになる。このことを利用して、緩和問題 1 を解く必要のない接触点の組を知ることができる (次節参照)。

緩和問題 2 の制約条件のうち、摩擦条件 (4) (摩擦円錐) は、内接 [27] ではなく外接する L 面の凸多面錐 (Fig. 1 (a)) で近似する。外接凸多面錐を使うのは、摩擦条件を緩和するためである。 $\sqrt{f_{\mathcal{N}_k}^T f_{\mathcal{N}_k}} \leq \phi$ は、その集合に外接する凸多面体 (Fig. 1 (b)) で近似する。すると、緩和問題 3 を以下のように設定できる。

緩和問題 3

$$\begin{aligned} \min & \phi \\ \text{subject to} & e_{\kappa}^T V_{\mathcal{N}_k} u_{\mathcal{N}_k} \leq \phi \\ & (i = 1, 2, \dots, m) (\kappa = 1, 2, \dots, d) \\ & -e_{\kappa}^T V_{\mathcal{N}_k} u_{\mathcal{N}_k} \leq \phi \\ & (i = 1, 2, \dots, m) (\kappa = 1, 2, \dots, d) \\ & \sum_{i=1}^m G_{\mathcal{N}_k} V_{\mathcal{N}_k} u_{\mathcal{N}_k} = -w_{vj} \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $V_{\mathcal{N}_k} \in \mathcal{R}^{d \times L}$ は摩擦凸多面錐の稜線の方法を表すベクトル $v_{\mathcal{N}_k, i, j}$ を横に並べた行列 ($V_{\mathcal{N}_k} = (v_{\mathcal{N}_k, i_1} \dots v_{\mathcal{N}_k, i_m})$)、 $u_{\mathcal{N}_k} (\geq 0) \in \mathcal{R}^L$ はその各大きさを表すベクトル、 $e_{\kappa} \in \mathcal{R}^d$ は κ 番目の要素が 1 で他は 0 のベクトル (例: $e_1 = (1 \ 0 \ 0)^T$ (三次元の場合)) を表すものとする。緩和問題 3 は線形計画法 (シンプレックス法) を用いて解くことができる。

3.2 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接

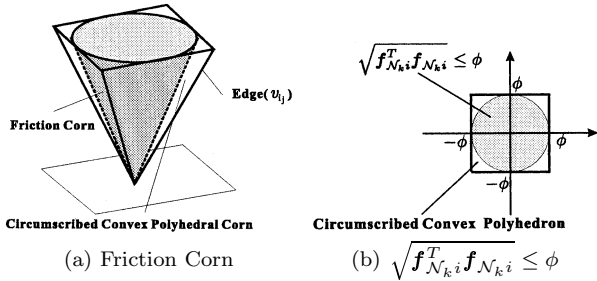


Fig. 1 Convex polyhedral corn and convex polyhedron circumscribing constraints

触点の組を探索する．このとき，暫定最適解を $\hat{\phi}$ ，各接触点の組 \mathcal{N}_k を固定した場合の最適解を $\phi_{\mathcal{N}_k}$ ，その暫定最適解を $\hat{\phi}_{\mathcal{N}_k}$ とおくことにする．また，有効な候補接触点の組のリストを LIST で表すものとする．

ステップ 1 LIST に候補接触点の組 \mathcal{N}_k をすべて入れる．暫定最適解 $\hat{\phi}$ を適当な下限値に，各接触点の組を固定した場合の最適解 $\phi_{\mathcal{N}_k}$ (暫定最適解 $\hat{\phi}_{\mathcal{N}_k}$) を適当な上(下)限値に設定しておく．

ステップ 2 LIST から接触点の組 \mathcal{N}_k を一つ選び，緩和問題 1 を解く．

ステップ 3 ステップ 2 において解が求まれば，その解を暫定解 $\hat{\phi}$ およびこの接触点の組を固定した場合の最適解 (暫定最適解) $\phi_{\mathcal{N}_k} (= \hat{\phi}_{\mathcal{N}_k})$ とする．この解を与える頂点 w_{vj} を \hat{w}_{vj} とする．解が存在しなければ，LIST からこの接触点の組 \mathcal{N}_k を取り除き，ステップ 2 に戻る．

ステップ 4 頂点 \hat{w}_{vj} に対する緩和問題 3 を，LIST に含まれる各接触点の組 \mathcal{N}_k について解く．解が存在しなければ，LIST から対応する組を取り除く．解 $\hat{\phi}_{\mathcal{N}_k, \hat{v}_j}$ が存在する場合， $\hat{\phi}_{\mathcal{N}_k} = \max\{\hat{\phi}_{\mathcal{N}_k}, \hat{\phi}_{\mathcal{N}_k, \hat{v}_j}\}$ を求め， $\hat{\phi} < \hat{\phi}_{\mathcal{N}_k}$ ならこの組を LIST から取り除く．

ステップ 5 LIST に含まれる接触点の組の中で， $\hat{\phi}_{\mathcal{N}_k, \hat{v}_j}$ が最小となる組を $\hat{\mathcal{N}}_k$ とおく．

ステップ 6 $\hat{\mathcal{N}}_k$ に対する緩和問題 1 を解く．解が求まれば，その解をこの接触点を固定した場合の最適解 (暫定最適解) $\phi_{\hat{\mathcal{N}}_k} (= \hat{\phi}_{\hat{\mathcal{N}}_k})$ とする．この解を与える頂点 w_{vj} を \hat{w}_{vj} とする．さらに， $\hat{\phi} > \phi_{\hat{\mathcal{N}}_k}$ なら $\hat{\phi} = \phi_{\hat{\mathcal{N}}_k}$ とする．解が存在しないか $\hat{\phi} < \phi_{\hat{\mathcal{N}}_k}$ ならば，LIST からこの接触点の組 \mathcal{N}_k 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接触点の組において， $|\hat{\phi} - \phi_{\hat{\mathcal{N}}_k}| < \epsilon$ (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．

4. 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．

4.1 二次元空間の例

対象とする物体および候補接触点を Fig. 2 に示す．図中において，対象物表面上の点は候補接触点を示している．候補接触点の数は，Case I において 56 個，Case II において 86 個である．各対象物の幾何学的中心に，対象物に固定した座標系を

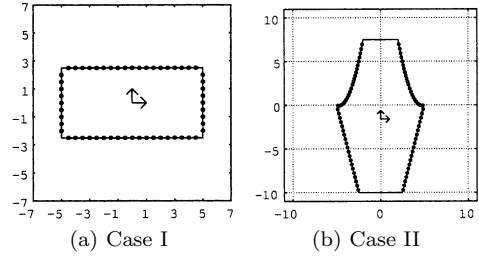


Fig. 2 Target objects and candidate contact points

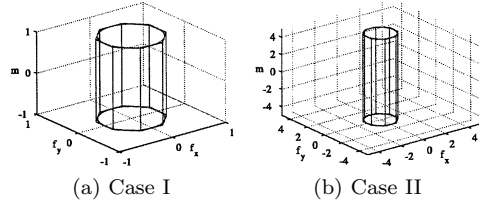


Fig. 3 Required external force sets

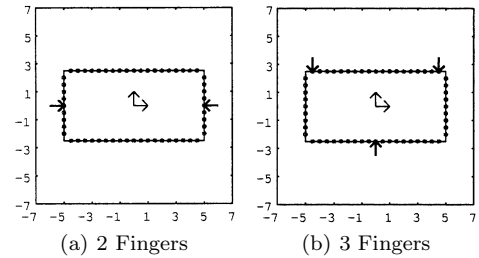


Fig. 4 Optimal contact points in Case I

置いた．本数値例にて用いた要求外力集合は，並進外力を f_x ， f_y ，外モーメントを m として

$$\mathcal{W}_R = \{(f_x, f_y, m)^T | \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq sg, \\ -0.8\gamma sg \leq m \leq 0.8\gamma sg\} \quad (12)$$

で与えた．ただし， s は各対象物の面積を， $g=0.01$ は各対象物の比重を， γ は各対象物の幾何学的中心から最短距離にある頂点までの距離を表している．この集合は，並進力に関しては，各対象物の重力が任意方向から加わることを想定し，モーメントに関しては，並進力(重力)が加わる際，重心位置が，幾何学的中心を中心に，そこから最短距離にある頂点までの距離の 80% の距離を半径とした円内に偏心し，その結果この偏心に応じたモーメントが発生することを想定したものである．式 (12) の要求外力集合は，凸集合であるが凸多面体ではない．そこで実際には，Fig. 3 に示すようなこの集合に外接する 10 面体で与えた．また，把持する指の数は 2 および 3，摩擦係数は 0.1，0.3，0.5 の場合について計算した．なお，最適な接触点の組の配置が対称なものを除き複数存在する場合は，このうち，要求外力に抗するために必要な接触力ノルムが最小のものを，すなわち $\max_{-w \in \mathcal{W}_R(2)} \min \phi' = \sqrt{\sum_{i=1}^m f_{N_i}^T f_{N_i}}$ を第 2 の評価指標として，これが最小となる接触点の組を最適なものとして選んだ．

得られた最適な接触点の組を Fig. 4 および Fig. 5 に示す．その際得られた評価関数 ϕ の最適値を Table 1 に示す．Fig. 4 および Fig. 5 において，(a) は 2 本指把持を，(b) は 3 本指把持

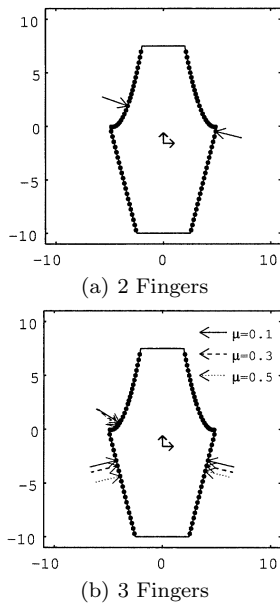


Fig. 5 Optimal contact points in Case II

Table 1 Optimal value of the criterion function

(a) Case I				(b) Case II			
μ	0.1	0.3	0.5	μ	0.1	0.3	0.5
2 fingers	3.71	1.38	0.919	2 fingers	35.1	6.44	3.92
3 fingers	3.13	0.978	0.724	3 fingers	6.21	2.77	2.01

を、矢印は最適な接触点の位置を表している。得られた最適な接触点の組が対称な配置をする 2 組の場合、そのうちのいずれかのみを記載している。また、Case II の 3 本指把持 (Fig. 5 (b)) の場合を除き、摩擦係数の変化による最適な接触点の組の配置の変化はなかったため、おのおの 1 組のみを記載している。

Fig. 5 (b) より、Case II にて 3 本指把持を行う場合、摩擦係数が大きいほど、接触点の配置が幾何学的中心を中心とした対称な配置 (幾何学的中心と各接触点を結ぶ 三つの直線のうち、どの 2 本の直線のなす角も 120° となっていること) に近くなっていくことが分かる。また、Table 1 より、摩擦係数が大きい程、また指の本数が多い程、小さな接触力で要求外力に抗することができる事が分かる。

4.2 三次元空間の例

対象とする物体は、底面が直角二等辺三角形 ($4 \times 4 \times 4\sqrt{2}$) の角柱である (Fig. 6)。候補接触点を Fig. 6 に示す。図中において、対象物表面上の点は候補接触点を示している。ただし、見やすさのため、上面と一つの側面上の接触点のみを示している。下面に対する候補接触点は、上面と同様の方法で与えている。接触点を表示していない側面に対する候補接触点は、接触点を表示している側面と同様の方法で与えている。候補接触点の数は、上面下面それぞれ 36 個、側面 45 個、45 個、55 個、計 217 個とした。対象物の幾何学的中心 (原点) に、対象物に固定した座標系を置いた。緩和問題 3 で用いる摩擦凸多面錘は 16 面とした。本数値例にて用いた要求外力集合は、二次元の場合と同様に、並進力に関しては、対象物の重力が任意方向から加わることを想定し、モーメントに関しては、並進力 (重力) が加

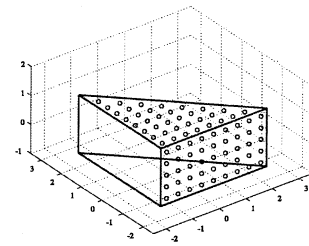


Fig. 6 Target Object and candidate contact points (in 3 dimension)

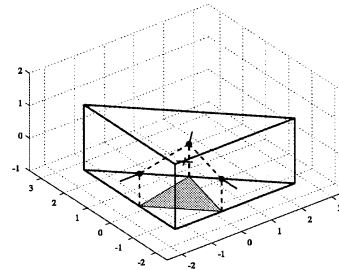


Fig. 7 Optimal contact points (in 3 dimension)

わる際、重心位置が、幾何学的中心を中心にしてそこから最短距離にある面までの距離 γ の 80% の距離を半径とした球内に偏心し、その結果この偏心に応じたモーメントが発生することを想定して、以下のように設定した。

$$\mathcal{W}_R = \{(\mathbf{f}^T, \mathbf{m}^T)^T \mid -sg \leq f_i \leq sg, \\ -0.8\gamma sg \leq m_i \leq 0.8\gamma sg (i = 1, 2, 3)\}$$

ただし、 \mathbf{f} 、 \mathbf{m} は並進外力および外モーメントを表し、 f_i および m_i はそれぞれ \mathbf{f} および \mathbf{m} の i 番目の要素を、 s は対象物の体積を表している。他の記号は二次元の場合と同じ設定である。

把持する指の数は 3 本、摩擦係数は 0.3 の場合について計算した。得られた最適な接触点の組を Fig. 7 に示す。Fig. 7 において、先が黒球の矢印は、最適な接触点の位置を表している。また、原点位置に X 印を表示し、最適な接触点の位置を結んだ三角形の下面への投影図を、灰色に塗り潰した三角形で表示している。最適な接触点位置は $(2/9, -4/3, 0)^T$ 、 $(2/3, 2/3, 0)^T$ 、 $(-4/3, 2/9, 0)^T$ であった。得られた評価関数 ϕ の最適値は 0.669 であった。

Fig. 7 より、原点から各側面へ下ろした垂線の足付近に最適な接触点位置が存在することが分かる。確認のため、各垂線の足を候補接触点として計算したら、評価関数 ϕ は 0.669 より大きい 0.718 であった。この結果、上下面の斜辺に相当する側面上の最適な接触点は垂線の足に位置し、それ以外の側面上の最適な接触点は、垂線の足より斜辺側に多少ずれて位置することが分かる。

最後に、計算量に関して述べる。数値例は、GATEWAY 社製 SELECT PRO JP 3YEAR /OX KER (CPU: AMD 社 ATHLON 1.2GHZ 搭載) を用いて計算した。二次元空間の例の場合 (摩擦係数 0.3)、Case I では、2 本指把持の場合約 5 秒、3 本指把持の場合約 8 分、Case II では、2 本指把持の場合約 7 秒、3 本指把持の場合約 3 分の計算時間がかかった。三次元空

間の例の場合(摩擦係数 0.3), 約 25 分の計算時間がかかった。本手法では, 候補となる接触点の組は $C(n, m)$ 個ゆえ, 一般に指の数や候補接触点の数が増えるほど計算量が増加する。もし, 計算時間が実用的でないほど長ければ, まず, 候補接触点の数を減らして探索し, その後, 最適な接触点付近の接触点を候補接触点として探索すれば, 厳密ではないが, 計算時間を減らして近似的な最適解を得ることができる。

5. おわりに

本論文では, force-closure 把持も平衡把持も含めた一般の望みの把持状態を扱うことができ, また, 対象物に加えることのできる合力・モーメントの大きさを評価できる要求外力集合という概念を用いて, 物体の把持を行う場合の最適な接触点の位置を求めた。この際, 要求外力に抗するために必要な接触力のユークリッドノルムが最大となる接触点のそのノルムが最小となる接触点の組を最適ととらえ, 分枝限定法をもとにしたアルゴリズムを用いて最適な接触点の組を求めた。また, 数値例により, 本手法の有効性を示した。本論文では, 各接触点の摩擦条件を摩擦あり点接触としたが, ソフトフィンガー型接触の場合でも, Buss ら [23] によって式 (10) に相当するような等価な準正定性の条件の表現方法が提案されているため, 本論文の手法をそのまま用いることができる。これは今後の課題としたい。

参考文献

- [1] J. C. Trinkle and R. P. Paul : "Planning for dexterous manipulation with sliding contacts," The International Journal of Robotics Research, vol.9, no.3, pp.24-48, 1990.
- [2] 小俣 : "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.
- [3] 小俣 : "多指ハンドによる三次元つりあい把持のための指先計算アルゴリズム", 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.10, pp.1152-1158, 1991.
- [4] V. Nguyen : "Constructing force-closure grasps," The International Journal of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.3-16, 1988.
- [5] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat and J. Merlet : "On computing four-finger equilibrium and force-closure grasps of polyhedral objects," The International Journal of Robotics Research, vol.16, no.1, pp.11-35, 1997.
- [6] M. Y. Wang : "An optimum design for 3-D fixture synthesis in a point set domain," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.16, no.6, pp.839-846, 2000.
- [7] D. Ding, Y. Liu and M. Y. Wang : "Automatic selection of fixturing surfaces and fixturing points for polyhedral workpieces," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.17, no.6, pp.833-841, 2001.
- [8] D. Ding, Y. Liu, J. Zhang and A. Knoll : "Computation of fingertip positions for a form-closure grasp," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2217-2222, 2001.

- [9] Y. Chen, I. D. Walker and J. B. Cheatham : "Grasp synthesis for planar and solid objects," Journal of Robotic Systems, vol.10, no.2, pp.153-186, 1993.
- [10] D. Ding, Y. Liu and S. Wang : "The synthesis of 3-D form-closure grasps," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3579-3584, 2000.
- [11] Z. Li and S. S. Sastry : "Task-oriented optimal grasping by multifingered robot hands," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.4, no.1, pp.32-44, Feb. 1988.
- [12] X. Markenscoff and C. H. Papadimitriou : "Optimum grip of a polygon," The International Journal of Robotics Research, vol.8, no.2, pp.17-29, 1989.
- [13] B. Mirtich and J. Canny : "Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.739-747, 1994.
- [14] 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.
- [15] G. Mantriota : "Communication on optimal grip points for contact stability," The International Journal of Robotics Research, vol.18, no.5, pp.502-513, 1999.
- [16] M. Teichmann and B. Mishra : "Probabilistic algorithms for efficient grasping and fixturing," Algorithmica, vol.26, pp.345-363, 2000.
- [17] M. Y. Wang and D. M. Pelinescu : "Optimizing fixture layout in a point-set domain," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.17, no.3, pp.312-323, 2001.
- [18] 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.
- [19] T. Yoshikawa, T. Watanabe and M. Daito : "Optimization of power grasps for multiple objects," Pro. of IEEE int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1786-1791, 2001.
- [20] 今野 : 線形計画法. 日科技連出版社, 1987.
- [21] 福島 : 数値計画入門. 朝倉書店, 1996.
- [22] L. Stocco, S. E. Salcudean and F. Sassani : "Fast constrained global minimax optimization of robot parameters," Robotica, vol.16, pp.595-605, 1999.
- [23] M. Buss, H. Hashimoto and J. B. Moore : "Dexterous hand grasping force optimization," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.12, no.3, pp.406-418, 1996.
- [24] 土谷 : "最適化アルゴリズムの新展開 —内点法とその周辺—iii —半正定値計画問題 i—", システム/制御/情報, vol.42, no.8, pp.460-469, 1998.
- [25] 土谷 : "最適化アルゴリズムの新展開 —内点法とその周辺—iv —半正定値計画問題 ii—", システム/制御/情報, vol.42, no.10, pp.550-559, 1998.
- [26] L. Han, J. C. Trinkle and Z. X. Li : "Grasp analysis as linear matrix inequality problems," IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.16, no.6, pp.663-674, 2000.
- [27] J. Kerr and B. Roth : "Analysis of multifingered hands," International Journal of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.



渡辺哲陽 (Tetsuyou Watanabe)

1974年4月3日生。1999年, 京都大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年同大学院工学研究科博士課程に進学, 現在に至る。非ホロノミックな拘束をもつロボットシステムやロボットハンドなどに興味を持つ。(日本ロボット学会学生会員)



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。1970年同大学工学部助教授。1986年同大学工学部教授(オートメーション研究施設)。1994年組織変更により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, 制御工学の研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, 日本機械学会, システム制御情報学会, IEEEなどの会員。米国IEEE学会の Fellow。

(日本ロボット学会正会員)