ロボットハンドによるパワーグラスプの最適化

余 永^{*1} 竹内 賢一^{*2} 吉川 恒夫^{*2}

Optimization of Robot Hand Power Grasps

Yong Yu^{*1}, Kenichi Takeuchi^{*2} and Tsuneo Yoshikawa^{*2}

When an object is grasped by a multifingered hand with power grasp, there are an infinite number of possible power grasp forms, provided by combinations of the hand shape, the contact positions between fingers and the object, and the joint torques of the hand. To plan a power grasp, it is necessary to know, by some prior evaluation, which form is most suitable among these forms. This paper proposes a technique for automatically obtaining optimal power grasp. By analyzing the degree of freedom of the force space caused by frictional contacts between fingers and object, the conditions and mechanical properties of power grasp are described. Also, the region of feasible joint torques for power grasp is derived. Then, an optimal power grasp form is defined and its determination procedure is established. Lastly, numerical examples are performed to verify the effectiveness of the proposed approach.

Key Words: Robot Hand, Power Grasp, Degree of Freedom of Force Space, Optimization, Object Manipulation

1. 緒 言

人間は手を用いて物をつかんだり、つかんだ物の位置や姿勢を変えることができる。このような作業をロボットに行わせる時の手先機構として、シンプルな物としてはグリップがあり、さらに多様な対象物を自在に扱うためには人間の手を模した多関節多指型のロボットハンドが有効であると考えられる。これらに関しては、ロボットハンドによる把持と操りの問題として、ロボットハンドの汎用性を高め、より高度な作業を実現するために様々な研究がなされている [10]。

従来の研究では、指先接触による物体の把持や操りに関するものが多かった。指先接触ではそれぞれの接触点の位置どりの制限が小さく、滑りやころがりによって接触点の移動がしやすいということから、操りには適した把持であると考えられる。しかし人間が手で物体を「つかむ」場合、特にその物体の動きを完全に拘束したいときには、普通、指先のみではなく指の腹や掌も物体に接触させて包み込むようにつかむ。ロボットハンドにおいても同様に多関節指の中間のリンクにも物体を接触させることで、物体をより安定に把持することができると考えられる。このような把持は、Whole-limb Manipulation [1] あるいは Enveloping Grasp などと呼ばれている。

中でも、各関節にあらかじめ適当な関節トルクを与えておけば、把持している物体に有限の大きさの任意の方向の並進および回転の外力が働いたときに初期の関節トルクを変化させることなく接触力の自動的な変化によってその外力に対抗する力を生成してもとの把持状態を維持できるものが存在する。そのような把持はパワーグラスプと呼ばれている [4]~[8]。

指先での把持では一般に対象物に働く外乱がどんなに小さいものであっても、各関節のトルクを制御しなければ把持の平衡を保つことはできないのに対して、パワーグラスプではあらかじめ与えたトルクを制御することなく外乱に対して把持の平衡を保つことができる点が、ロバストな把持として有効であると考えられる。

小俣ら [5] はパワーグラスプであるための条件を対象物と指リンクの間の運動学的な拘束条件によって表し、さらに滑りの方向の拘束から発生可能な接触力の範囲を示している。張ら [6] は対象物が動き出す直前の接触力を計算することにより、対象物が動き始める臨界外力を求め、それをパワーグラスプのロバスト性の評価に用いることを提案している。

ところで、ある物体がパワーグラスプによって把持されているとき、そのパワーグラスプの形態は、把持に用いるロボットハンドの形、ロボットハンドの指リンクと物体との接触位置、ロボットハンドの関節トルクの値の組み合わせにより無数に存在する。実際に把持をするためにはこれら無数に存在するパワーグラスプの形態の中から何らかの評価基準をもって適当なものを選び出す必要がある。そこで本論文では、まず指リンクと物体との接触による力空間の自由度の解析に基づきパワーグ

原稿受付 1998 年 5 月 11 日

^{*1}鹿児島大学工学部

^{*2}京都大学大学院工学研究科

^{*1}Faculty of Engineering, Kagoshima University

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

ラスプの条件と力学特性を考察し、ついで安定把持するための関節トルクの範囲を与える。そして把持する対象物体が与えられたときの最適なパワーグラスプを定義し、その決定法を示す。さらに数値例で検証する。

2. パワーグラスプの条件と力学特性

本章では、どのような把持がパワーグラスプとなるのかを述べる。まず指リンクと物体との接触による力空間の自由度について解析しパワーグラスプの条件を示し、次にパワーグラスプによって抗することのできる外力の空間の相似性、さらに安定把持するための可能な関節トルクを考察する。

Fig. 1 のような系において次の仮定が成立するものとする。

- 対象物は凸な多面体であるとする。
- 指の中間リンク（または指先）は対象物のエッジ（または平面）と摩擦あり点接触しているものとする。
- ベースは対象物の頂点と摩擦あり点接触しているものとする。ただしベースには接触点を持たない場合もある。
- 各指リンクおよびベースにはたかだか一つの接触点があるものとする。

また、ベースに固定された座標系を基準座標系 Σ_R 、対象物に固定された座標系を対象物座標系 Σ_O とする。

さらに次のような記号を定義する。ただし指の本数は K であるととし、添字 i ($= 1, 2, \dots, K$) は i 番目の指を添字 0 はベースをそれぞれ表す。

M_i : i 番目の指の接触点数

M : 全接触点数 ($= \sum_{i=0}^K M_i$)

L_i : i 番目の指の関節数

L : 全関節数 ($= \sum_{i=0}^K L_i$)

C_{ij} : i 番目の指の j 番目の接触点

r_{ij} : 対象物座標系原点から接触点 C_{ij} までのベクトル

n_{ij} : 接触点 C_{ij} における対象物に内向き単位法線ベクトル（指の中間リンクと対象物のエッジの双方に、または指先と接触した対象物の平面に垂直な方向）

ただし L_i については、ある関節から先のリンクに接触点をもたない場合その関節は数には含めない。また本論文において、ベースとの接触点が存在するとき、その接触点における $*_{ij}$ に対応するものは $*_0$ とする。

本論文では、三次元空間内の運動を考える場合において議論を行う。ただし得られた結果は二次元平面内の運動を考える場合にも適用できる。三次元空間内の運動において、三次元並進

力成分と三次元回転力成分を合わせたものを六次元力とし、すべての発生可能な六次元力からなる凸空間を力空間と定義する。これに対応して平面内の運動における力空間は、二次元並進力成分と一次元回転力成分がある三次元力からなる凸空間とする。力空間において正負いずれの側へも力が発生できる互いに独立な方向の数を、力空間の自由度と定義する。一般に、場合によって力空間には力の方向の制限が存在する。方向に制限を有する力空間の自由度はその空間に含まれる線形空間の次元の数と一致している。指リンクと対象物との接触による力空間の自由度を考えると、把持がパワーグラスプであるための条件は以下の定式化により導かれる。

2.1 パワーグラスプの把持形態条件

まず、指リンク i と対象物とが点 C_{ij} で一点接触している場合を考える。接触点 C_{ij} から対象物に働く力を $f_{ij} \in \mathbf{R}^3$ 、 f_{ij} により抵抗可能な、対象物座標系原点に働く並進および回転の外力を $t_e \in \mathbf{R}^6$ とすると、接触力 f_{ij} と外力 t_e との関係は静的な釣り合いがあるとき、次のようになる。

$$W_{ij}^T f_{ij} + t_e = 0 \quad (1)$$

ここで、 $W_{ij} \triangleq [I_3 \ R^T(r_{ij})] \in \mathbf{R}^{3 \times 6}$ である。ただし $R(r_{ij})$ は $R(r_{ij})f_{ij} \triangleq r_{ij} \times f_{ij}$ で定義される歪対称行列であり、 I_* は $*$ 次元単位行列である。

一方、指リンク側の関節トルクベクトルを $\tau_i \in \mathbf{R}^{L_i}$ とすると、 τ_i と各関節トルクにより発生する接触力 f_{ij} との関係は次のようになる。

$$J_{ij}^T f_{ij} = \tau_i \quad (2)$$

ここで、 $J_{ij} \in \mathbf{R}^{3 \times L_i}$ は接触点 C_{ij} と各関節角度とのヤコビ行列である。

K 本の指と対象物とが指リンクや指先で M 点接触している場合を考えると、関節トルクベクトル τ 、接触力ベクトル f 、外力 t_e の三者間の関係が、関係式 (1) と (2) により、次のようにまとめられる。

$$W^T f = -t_e \quad (3)$$

$$J^T f = \tau \quad (4)$$

ここで、

$$f \triangleq [(f_0^T) f_{11}^T \cdots f_{1M_1}^T \cdots f_{K1}^T \cdots f_{KM_K}^T]^T \in \mathbf{R}^{3M} \quad (5)$$

$$\tau \triangleq [\tau_1^T \cdots \tau_K^T]^T \in \mathbf{R}^L \quad (6)$$

である。また、

$$W \triangleq [(W_0^T) W_{11}^T \cdots W_{1M_1}^T \cdots W_{K1}^T \cdots W_{KM_K}^T]^T \in \mathbf{R}^{3M \times 6} \quad (7)$$

$$J \triangleq \begin{bmatrix} (0) & J_{11}^T & \cdots & J_{1M_1}^T & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & \cdots & 0 & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & 0 \\ (0) & 0 & \cdots & 0 & \cdots & J_{K1}^T & \cdots & J_{KM_K}^T \end{bmatrix}^T \in \mathbf{R}^{3M \times L} \quad (8)$$

Fig. 1 Object and robot hand

である。ただし本論文では、ベースとの接触点が存在しないときにはブロック行列中の () でくくった成分は除く。

式 (4) を $\mathbf{f}$ について解くと

$$\mathbf{f} = (\mathbf{J}^+)^T \boldsymbol{\tau} + (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+) \mathbf{k}_1 \quad (9)$$

となる。ここで、 $\mathbf{J}^+ \in \mathbf{R}^{L \times 3M}$ は $\mathbf{J}$ の疑似逆行列を表し、 $\mathbf{k}_1$ は $3M$ 次元任意ベクトルである。適当な関節トルク $\boldsymbol{\tau}_c$ (その存在範囲は 2.4 節で述べる) を取ると、関節トルク $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_c = \text{constant}$ のとき式 (9) は次式のようになる。

$$\mathbf{f} = (\mathbf{J}^+)^T \boldsymbol{\tau}_c + (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+) \mathbf{k}_1 \quad (10)$$

上式で与えられる $\mathbf{f}$ は各関節にあらかじめ一定のトルクを与えたときの接触力の候補となり得るもの (候補接触力) である。この式右辺の第二項目は、接触力空間において関節トルクに影響を及ぼさない各指リンク間の内力の空間を表わすものである。候補接触力は、この内力の空間において存在または変化するとき関節トルクに影響を与えないと考えられる。

同様に、候補接触力空間と式 (3) によって、

$$\mathbf{t}_e = -[\mathbf{W}^T (\mathbf{J}^+)^T \boldsymbol{\tau}_c + \mathbf{W}^T (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+) \mathbf{k}_1] \quad (11)$$

が得られ、これは各関節にあらかじめ一定のトルクを与えたときに候補接触力により抵抗可能な外力となり得るもの (候補外力) である。上式右辺の第一項目は対象物に作用する関節トルク $\boldsymbol{\tau}_c$ からの合力である。後の 2.4 節に述べるように安定把持を維持するために、この合力は第二項目で表される力空間内に存在すべきである。よって、すべての候補外力からなる力空間の自由度は、線形空間である第二項目により $\text{rank} \mathbf{W}^T (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+)$ となっている。

1 章で述べたように、パワーグラスプとは、各関節にあらかじめ適当なトルクを与えておけば、把持している物体に大きさの有限な任意方向の外力が働いたときに関節トルクを変化させず接触力の自動変化によって対抗力を生成して現把持状態を維持できる把持である。これにより、候補外力空間が六次元の自由度、すなわち

$$\text{rank} \mathbf{W}^T (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+) = 6 \quad (12)$$

を有すれば、パワーグラスプが実現可能である。この空間の任意方向の力が実際に存在し抵抗可能な外力となる保証がないため、上式はパワーグラスプの必要条件となり、ここではパワーグラスプの把持形態条件と呼ぶことにする。仮想的にロボットハンド、対象物の運動を二次元平面内のみとした把持の場合、式 (12) は

$$\text{rank} \mathbf{W}^T (\mathbf{I}_{2M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+) = 3 \quad (13)$$

となる。ただしこの場合 $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{2M \times 3}$ 、 $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{2M \times 3}$ となる。

$\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{3M \times 6}$ と $\text{rank} (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+) = 3M - R_L$ のことから、パワーグラスプの把持形態条件を満たすためには

$$\text{rank} \mathbf{W} = 6 \quad (14)$$

$$3M - R_L \geq 6 \quad (15)$$

Fig. 2 Examples for grasp form condition of power grasp

Fig. 3 Examples about rank $\mathbf{W}$

(二次元平面内の運動では $\text{rank} \mathbf{W} = 3, 2M - R_L \geq 3$) でなくてはならない。ただし $R_L = \text{rank} \mathbf{J}$ である。一般に、ある指のある接触点に対して冗長な関節がないことがすべての指に成立する場合、 $R_L = L$ となる (Fig. 2 参照)。また、 $\text{rank} \mathbf{W} = 6$ は 3 点以上の接触点が同一直線上にない (二次元平面内の運動では $\text{rank} \mathbf{W} = 3$ は 2 点以上の接触点がある) ときに成立することを意味している (Fig. 3 参照)。

このように式 (12) と (13) は必要十分条件ではないが、その把持がパワーグラスプになり得るかどうかの判別が容易にできるため、実際にパワーグラスプでの把持を計画するときには有効な条件であるといえる。Fig. 2 がこのためのいくつかの二次元平面内の運動の例を示している。その中で、Fig. 2 (b) を除いて Fig. 2 (a), (c), (d) に示された把持はパワーグラスプの必要条件を満たして、パワーグラスプが実現可能となっている。また、Fig. 2 (d) のような把持は、6 リンクをもつ指の根元からの 2 本のリンクと 1 リンクをもつ指との把持によりパワーグラスプが実現可能となるので、本質的には Fig. 2 (a) の把持と変わらない。

2.2 パワーグラスプの必要十分条件

指リンクと対象物との接触力の方向は接触点での静止摩擦条件である次式を満足しなければならない。

$$\mathbf{n}_{ij}^T \mathbf{f}_{ij} \geq \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_{ij}^2}} \|\mathbf{f}_{ij}\| \quad (16)$$

すなわち、候補の接触力はこの式を満たさなければ許容な接触力にはならない。同様に、候補の外力も許容接触力により抵抗可能な外力にはならない。ここで μ_{ij} は接触点 C_{ij} における最大静止摩擦係数である。

M 個の接触点に対し式 (16) を満たす $\mathbf{f}_{ij}$ からなる空間は

$$\mathbf{F}_f = \{\mathbf{f} \mid \mathbf{N}^T \mathbf{f} \geq \bar{\boldsymbol{\mu}} \bar{\mathbf{f}}\} \quad (17)$$

$$\mathbf{N} \triangleq \text{diag}[(\mathbf{n}_0), \mathbf{n}_{11}, \dots, \mathbf{n}_{1M_1}, \dots, \mathbf{n}_{K1}, \dots, \mathbf{n}_{KM_K}] \in \mathbf{R}^{3M \times M} \quad (18)$$

$$\bar{\boldsymbol{\mu}} \triangleq \text{diag}\left[\left((1 + \mu_0^2)^{-\frac{1}{2}}\right), (1 + \mu_{11}^2)^{-\frac{1}{2}}, \dots, (1 + \mu_{1M_1}^2)^{-\frac{1}{2}}, \dots, (1 + \mu_{K1}^2)^{-\frac{1}{2}}, \dots, (1 + \mu_{KM_K}^2)^{-\frac{1}{2}}\right] \in \mathbf{R}^{M \times M} \quad (19)$$

$$\bar{\mathbf{f}} \triangleq [(\|\mathbf{f}_0\|) \|\mathbf{f}_{11}\| \dots \|\mathbf{f}_{1M_1}\| \dots \|\mathbf{f}_{K1}\| \dots \|\mathbf{f}_{KM_K}\|]^T \in \mathbf{R}^M \quad (20)$$

のように表され、凸錐となっている [7]。一方、式 (10) を満たす候補接触力の集合は

$$\mathbf{F}_J = \{\mathbf{f} \mid \mathbf{f} = (\mathbf{J}^+)^T \hat{\boldsymbol{\tau}}_c k_c + (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{J}\mathbf{J}^+) \mathbf{k}_1, k_c > 0\} \quad (21)$$

となり、ここで $\hat{\boldsymbol{\tau}}_c (= \boldsymbol{\tau}_c / \|\boldsymbol{\tau}_c\|)$ と $k_c (= \|\boldsymbol{\tau}_c\| > 0)$ は $\boldsymbol{\tau}_c$ の方向と大きさを表す。したがって、許容接触力の集合 $\mathbf{F}_{Jf}$ は

$$\mathbf{F}_{Jf} = \mathbf{F}_J \cap \mathbf{F}_f \quad (22)$$

で与えられる。式 (21) より $\hat{\boldsymbol{\tau}}_c$ が一定のとき $\mathbf{F}_J$ は凸多面錐となるので、共通集合 $\mathbf{F}_{Jf}$ は凸錐となる。さらに、式 (22) を満たす $\mathbf{f}$ を式 (3) に代入することで得られる $\mathbf{t}_e$ は $\hat{\boldsymbol{\tau}}_c$ を変化させることなく抗することのできる外力である。この抵抗可能な外力 $\mathbf{t}_e$ のすべてからなる力空間

$$\mathbf{T}_{Jf} = \{\mathbf{t}_e \mid \mathbf{t}_e = -\mathbf{W}^T \mathbf{f}, \mathbf{f} \in \mathbf{F}_{Jf}\} \quad (23)$$

も凸錐となる。この凸錐 $\mathbf{T}_{Jf}$ に含まれる線形空間が

$$\mathbf{T}_{Jf} \cap (-\mathbf{T}_{Jf}) \quad (24)$$

となるので、力空間 $\mathbf{T}_{Jf}$ の自由度がこの線形空間の次元の数となっている。パワーグラスプの定義により、抵抗可能な外力空間 $\mathbf{T}_{Jf}$ が六次元の自由度を有すれば、パワーグラスプの任意方向への抵抗力が生成できる。これはパワーグラスプの必要十分条件である。

ここでは、力空間 $\mathbf{T}_f$ の自由度を具体的に求める方法を述べる。この方法は、二次元平面内運動の場合に対しては厳密性を有するが三次元空間内運動の場合に対しては近似性をもっている。一つの静止摩擦円錐が、平面内運動の場合には厳密的に ($h = 2$)、三次元空間内運動の場合には近似的に ($h > 2$) 円錐と内接した h 稜線の正凸多面錐で表現できる [14]。これにより接触点 C_{ij} において、静止摩擦条件を満たす接触力は次式のように表される。

$$\mathbf{f}_{ij} = \sum_{l=1}^h k_{ijl} \mathbf{v}_{ijl}, \quad k_{ijl} \geq 0, l = 1, 2, \dots, h \quad (25)$$

ここに、 $\mathbf{v}_{ijl}$ は接触点における摩擦多面錐の稜線をそった対象物内部に向く単位ベクトルであり、 k_{ijl} は $\mathbf{v}_{ijl}$ 方向の接触力

Fig. 4 Examples about rank $\mathbf{D}$

の成分を表し、また h は摩擦多面錐稜線の数である。式 (25) と (3) より、 M 点接触している場合において式 (25) を満たす $\mathbf{f}$ からなる空間 $\mathbf{F}_f$ は次のような凸多面錐で表される。

$$\mathbf{F}_f = \{\mathbf{f} \mid \mathbf{f} = \mathbf{V} \mathbf{k}_v, \mathbf{k}_v \geq \mathbf{0}\} \quad (26)$$

$$\mathbf{V} \triangleq \text{diag}[(\mathbf{v}_{01} \dots \mathbf{v}_{0h}), \dots, (\mathbf{v}_{KM_K 1} \dots \mathbf{v}_{KM_K h})] \in \mathbf{R}^{3M \times hM} \quad (27)$$

$$\mathbf{k}_v \triangleq [(k_{01}^v \dots k_{0h}^v) \dots (k_{KM_K 1}^v \dots k_{KM_K h}^v)]^T \in \mathbf{R}^{hM} \quad (28)$$

凸多面錐どうしの共通集合がまた凸多面錐になるから、式 (22) と式 (23) より $\mathbf{F}_{Jf}$ とその線形写像 $\mathbf{T}_{Jf}$ は凸多面錐となる。このとき、力空間 $\mathbf{T}_{Jf}$ は、

$$\mathbf{T}_{Jf} \cap (-\mathbf{T}_{Jf}) = \{\mathbf{D} \mathbf{k}_d \mid \mathbf{k}_d \geq \mathbf{0}\} \quad (29)$$

のような凸多面錐で表される線形空間をもつので、rank $\mathbf{D}$ 次元の自由度を有する。パワーグラスプの定義により、この抵抗可能な外力空間が六次元の自由度を有すればパワーグラスプが実現される。したがって、適当な $\boldsymbol{\tau}_c$ を与えた把持がパワーグラスプであるための必要十分条件はこの抵抗可能な外力空間が

$$\text{rank} \mathbf{D} = 6 \quad (30)$$

次元 (平面内の運動では rank $\mathbf{D} = 3$ 次元) の自由度をもつということである。Fig. 4 に示された例のうち、Fig. 4 (a) の $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ の場合では、rank $\mathbf{D}_{a1} = 3$ より抵抗可能な外力空間が三次元自由度を有するのでパワーグラスプの必要十分条件を満たすが、その他の場合では rank $\mathbf{D} < 3$ よりパワーグラスプの必要十分条件を満たさない。

2.3 限界外力空間の相似性

以上の議論では、抵抗可能な外力空間の自由度を求めるために各空間の要素の方向のみについて考察すればよかった。しかし

抵抗可能外力空間の相似性を検討するときには、 τ_c の方向でなくその大きさへの考察も必要となる。

τ_c の方向だけでなくその大きさも一定に与えられたとき、その大きさに対応して、対象物に作用する τ_c からの合力の大きさは一定値となり、また、指リングと対象物間の各接触力の大きさはそれぞれの一定値以上にはならない。これらの制約より、一部の方向には抵抗可能な外力 t_e の大きさが制限される。正凸多面錐で静止摩擦円錐を近似すると、このような t_e のすべてからなる抵抗可能外力空間は $\text{rank } D$ 次元自由度をもつ多面凸集合となる。このような集合を張らは限界外力空間と呼んでいる [7]。本節ではこの限界外力空間の相似性について述べる。

与えられた同方向であるが大きさの異なる二つの τ_c に対する抵抗可能外力空間は相似となる。式 (3) と式 (4) をまとめて、

$$\begin{bmatrix} W^T \\ J^T \end{bmatrix} f = \begin{bmatrix} -t_e \\ \tau \end{bmatrix} \quad (31)$$

が得られる。そして、式 (31) の両辺を q 倍すると

$$\begin{bmatrix} W^T \\ J^T \end{bmatrix} qf = \begin{bmatrix} -qt_e \\ q\tau \end{bmatrix} \quad (32)$$

が得られる。 $\tau = \tau_c = \text{constant}$ としたときに、式 (31) と式 (25) を満足する f が存在するようなすべての t_e からなる限界外力空間が存在し、この凸空間のすべての頂点 (g 個) の集合は $T_A = \{t_{e1}, t_{e2}, \dots, t_{eg}\}$ のように記述できる。これに対して、式 (25) で与えられる摩擦条件は f の方向のみに依存し大きさに依存しないから、式 (25) と式 (32) を共に満足する f が存在するようなすべての t_e からなる限界外力空間のすべての頂点の集合は $T'_A = \{qt_{e1}, qt_{e2}, \dots, qt_{eg}\}$ となる。

すなわち $[W \ J]$ が等しいパワーグラスブでは相似比 q で相似な 2 種類の関節トルクベクトルによって与えられる限界外力空間は相似であり、その相似比は q であることが分かる。

さらに、元の関節トルクベクトルによって与えられる n 次元の限界外力空間 T_e が原点を含む (つまり n 次元の自由度を有する) 場合は $q (> 1)$ 倍の関節トルクベクトルによって与えら

れる限界外力空間 T'_e と T_e の間の関係は $T_e \subset T'_e$ であるが (概念図 Fig. 5 (a) 参照)、 T_e が原点を含まない (つまり n 次元の自由度を有しない) 場合は T'_e は T_e をすべてを含むことはない (概念図 Fig. 5 (b) 参照)。

2.4 安定把持のための可能な関節トルクベクトル

前述したように、ロボットハンドが指と対象物の相対変位をさせず安定的に対象物を把持するためには、適当な一定の関節トルクをあらかじめ与える必要がある。一組の接触点の位置と把持姿勢を定めると、それに対応する安定把持のための可能な関節トルクベクトルの空間が存在する。この節ではこのような空間を求める方法について述べる。

式 (11) より、対象物に外力が作用していないとき、安定把持を維持するために、対象物に作用する一定の関節トルク τ_c からの合力 $W^T(J^+)^T \tau_c$ がゼロになるか、あるいは内力の合力からなる空間 $\{W^T(I_{3M} - JJ^+)k_1\}$ によって吸収されなければならない。同様に、外力が作用しているときも、一定の関節トルクからの合力を用いて不確実性をもつ外力を直接的に抵抗することが不可能であるので、安定把持のためにこの合力も力空間 $\{W^T(I_{3M} - JJ^+)k_1\}$ 内に存在すべきである。すなわち、関節トルクからの合力と内力の合力空間との間は

$$W^T(J^+)^T \tau_c + W^T(I_{3M} - JJ^+)k_1 = 0 \quad (33)$$

が成り立つ必要がある。言い換えると、安定把持を維持するために、力空間 $\{W^T(I_{3M} - JJ^+)k_1\}$ が外力 t_e だけでなく、関節トルクからの合力も吸収すべきである。そうでないと、方向と大きさが不定な外力に対して対象物とハンドとの間で動きが生じる。したがって式 (33) によって、各接触点の位置と把持姿勢を与えたときに安定把持のための可能な関節トルクベクトル τ_c の存在空間は次のように得られる。

$$S_J = \{\tau_c \mid \tau_c = -[W(J^+W)^+]^T(I_{3M} - JJ^+)k_1 + (I_L - J^+W(J^+W)^+)k_s\} \quad (34)$$

ただし k_s は L 次元任意ベクトルである。また、 $k_1 = k_{11} - k_{12}$ 、 $k_s = k_{s1} - k_{s2}$ ($k_{11}, k_{12}, k_{s1}, k_{s2} \geq 0$) のように書き換えることができるから、集合 S_J が凸多面錐であることが分かる。

もし $\{W^T(J^+)^T \tau_c\} \perp \{W^T(I_{3M} - JJ^+)k_1\}$ が成立するとすれば、 $[W(J^+W)^+]^T(I_{3M} - JJ^+)k_1 = 0$ より

$$S_J = \{\tau_c \mid \tau_c = (I_L - J^+W(J^+W)^+)k_s\} \quad (35)$$

となり、可能な関節トルクからの合力はゼロとしかならない。これは、力空間 $\{W^T(I_{3M} - JJ^+)k_1\}$ が全空間まで張っていないことを意味している。したがって、2.1 節のパワーグラスブの把持形態条件より、この場合の把持はパワーグラスブになり得ないことが分かる。Fig. 4 (d) はこの場合の一つの例を示している。

また、 $L < 6$ (二次元平面内の運動では $L < 3$) かつ $\text{rank } J^+W = L$ の場合 (例えば Fig. 4 (a), (b), (c) の場合)、 $J^+W \in R^{L \times 6}$ より集合 S_J が次のように求められる。

$$S_J = \{\tau_c \mid \tau_c = -[W(J^+W)^+]^T(I_{3M} - JJ^+)k_1\} \quad (36)$$

Fig. 5 Similarity of critical external force spaces

さらに, $\{W^T(J^+)^T \tau_c\} \perp \{W^T(I_{3M} - JJ^+)k_1\}$ と $L < 6$ かつ $\text{rank } J^+W = L$ を共に満たす場合, 式 (35) (36) により $S_J = \mathbf{o}$ が得られる. この場合, 安定把持するための関節トルクが存在しないので対象物の把持も不可能になる. Fig. 4 (e) はこの場合の一つの例を示している.

式 (34) は安定把持するための条件としてはまだ不十分である. リンクと対象物との実際の接触力は片側拘束であり静止摩擦条件の範囲内にしか存在できない. したがって, 式 (25) と式 (4) (5) により, 関節トルクベクトル τ_c はさらに次のような凸多面錐空間内に存在すべきである.

$$S_f = \{ \tau_c \mid \tau_c = J^T V k_v, \quad k_v \geq \mathbf{o} \} \quad (37)$$

式 (34) (37) より, 安定把持するための可能な関節トルクベクトル τ_c の空間 $\hat{S}$ が次式により得られる.

$$\hat{S} = S_J \cap S_f = \{ H k_h \mid k_h \geq \mathbf{o} \} \quad (38)$$

例えば, Fig. 4 (a), Fig. 4 (c) と Fig. 4 (d) において $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ の場合, 可能な関節トルクベクトルの空間 $\hat{S}$ がそれぞれ次のように求められる.

$$S_{Ja1} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} k_{1a1} \mid k_{1a1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (39)$$

$$S_{fa1} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} k_{va1} \mid k_{va1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (40)$$

$$\hat{S}_{a1} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} k_{ha1} \mid k_{ha1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (41)$$

$$S_{Jc1} = \left\{ \begin{bmatrix} 0.7 & -0.7 \\ 0.7 & -0.7 \end{bmatrix} k_{1c1} \mid k_{1c1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (42)$$

$$S_{fc1} = \left\{ \begin{bmatrix} 0.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.6 \end{bmatrix} k_{vc1} \mid k_{vc1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (43)$$

$$\hat{S}_{c1} = \left\{ \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.7 \end{bmatrix} k_{hc1} \mid k_{hc1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (44)$$

$$S_{Jd1} = \left\{ \begin{bmatrix} -0.7 & 0.7 \\ 0.7 & -0.7 \end{bmatrix} k_{sd1} \mid k_{sd1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (45)$$

$$S_{fd1} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} k_{vd1} \mid k_{vd1} \geq \mathbf{o} \right\}, \quad (46)$$

$$\hat{S}_{d1} = \left\{ \begin{bmatrix} 0.7 \\ -0.7 \end{bmatrix} k_{hd1} \mid k_{hd1} \geq \mathbf{o} \right\} \quad (47)$$

式 (38) は安定把持するための関節トルクベクトル方向の可能な範囲を示している. 各関節から出せるトルクが制限されるので, これらの関節トルクベクトルの大きさも制限されている. ここで, 安定把持するための関節トルクベクトルの大きさの最大値の求め方を考える. まず, 与えられた各関節の正負両側の制限値 $\tau_{Pmaxik}, \tau_{Mmaxik}$ ($i = 1, 2, \dots, K, k = 1, 2, \dots, L_i$) に対して, 決められた一つの関節トルクベクトル τ_c^D から求められた各関節のトルク値で, それぞれに対応する τ_{Pmaxik} と τ_{Mmaxik} を割る. そして, 得られたいくつかの商の中で正の一番小さな値を k_{max}^D とすると, この関節トルクベクトル τ_c^D の最大限 $\tau_c^{\max}$ は

$$\tau_c^{\max} = \tau_c^D k_{max}^D \quad (48)$$

によって求められる. $\tau_c^{\max}$ と同方向の τ_c で $\|\tau_c\| \leq \|\tau_c^{\max}\|$ のように対象物を把持すれば, 各指の関節では, $\tau_{Mmaxik} \leq \tau_{ik} \leq \tau_{Pmaxik}$ となるように関節トルク τ_{ik} が発生される.

3. 最適なパワーグラスプの決定法

3.1 最適なパワーグラスプの定義

ある物体をロボットハンドを用いたパワーグラスプによって把持するとき, 以下に挙げる要因の組み合わせによってパワーグラスプの形態は無数に存在する.

- (1) ロボットハンドの形状 (指の本数, 各指の関節数, 各指リンクの長さ, ベースの形状)
- (2) ロボットハンドと対象物の接触状態 (接触点数, ロボットハンド側, 対象物側それぞれからみた各接触点の位置, 各接触点における最大静止摩擦係数)
- (3) ロボットハンドの各関節トルクの値

実際に把持をするときには無数のパワーグラスプの形態の中から何らかの評価基準によって適当なものを選ぶ必要がある. そのためにまず, 要求外力仕様というものを定義する. 実現しようとするパワーグラスプの限界外力空間が最低限含まなければならない外力の集合を要求外力仕様とする. 要求外力仕様は六次元 (平面内の運動では三次元) 自由度をもつ多面凸空間とし, そのすべての頂点の集合によって表すものとする. 一般にロボットハンドの関節を駆動するモータのトルクには上限値が存在するため, 大きいトルクを必要とするときにはモータも大きいものを使わなければならない. 同じ大きさの外力に抗するときには関節トルクはなるべく小さい方が適当であると考え, ここでは最適なパワーグラスプを以下のように定義する.

最適なパワーグラスプ 要求外力仕様をその限界外力空間に含むパワーグラスプのうち関節トルクが最大となる関節の関節トルクが最小となるもの

上記の定義は次のように表現できる. i 番目の指の k 番目の関節の関節トルクを τ_{ik} とし, 次の評価関数 Φ を定義する.

$$\Phi \triangleq_{i,k}^{\max} |\tau_{ik}| \quad (49)$$

要求外力仕様をその限界外力空間に含むパワーグラスプを実現する $[W \ J]$ と τ の中で Φ を最小化するものが最適なパワーグラスプを実現する $[W \ J], \tau$ となる.

さらに, 各関節の発生可能な最大トルクの大きさが異なりそれを考慮に入れる場合, 次のような評価関数 Φ' を最小化するものを最適なパワーグラスプと定義する.

$$\Phi' \triangleq_{i,k}^{\max} \frac{|\tau_{ik}|}{\tau_{ikmax}} \quad (50)$$

ここで, $\tau_{ikmax} (> 0)$ は i 番目の指の k 番目の関節の発生可能な最大トルクの大きさである.

3.2 最適なパワーグラスプの決定法

前節で定義した最適なパワーグラスプを求める方法を以下に示す. ただしパワーグラスプの形態を決める要因の 1 番目であるロボットハンドの形と要因の 2 番目の中の接触点数はあらかじめ決まっているものとする. また, 各関節の発生可能な最大トルク

は同一であるとする。式 (31) は $\mathbf{A} \triangleq [\mathbf{W} \quad \mathbf{J}] \in \mathbf{R}^{3M \times (6+L)}$ を用いて次式でまとめられる。

$$\mathbf{A}^T \mathbf{f} = \begin{bmatrix} -\mathbf{t}_e \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \quad (51)$$

式 (51) を $\mathbf{f}$ について解くと次式を得る。

$$\mathbf{f} = (\mathbf{A}^+)^T \begin{bmatrix} -\mathbf{t}_e \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + (\mathbf{I}_{3M} - \mathbf{A}\mathbf{A}^+) \mathbf{k}_2 \quad (52)$$

となる。ここで、 $\mathbf{A}^+ \in \mathbf{R}^{(6+L) \times 3M}$ は $\mathbf{A}$ の疑似逆行列を表し、 $\mathbf{I}_{3M}$ は $3M$ 次元単位行列、 $\mathbf{k}_2$ は $3M$ 次元任意ベクトルである。式 (52) と接触点における摩擦条件である式 (16) を用いて全探索的に最適なパワーグラスプを求める。

手順 1

要求外力仕様の頂点の集合を準備しこれを $\mathbf{T}$ とする。また、頂点の数が n_1 であるとする。ただし要求外力仕様は六次元自由度を有するからその空間内に原点を含むように設定する。

手順 2

パワーグラスプの形態を決める要因の 2 番目の接触状態の各接触点位置を決定することにより $\mathbf{A}$ が定まる。数値計算上の刻みにより、考えられるすべての各接触点の位置が n_2 組あるとする。このうちの一つを式 (52) の $\mathbf{A}$ および $\mathbf{A}^+$ に代入する。

手順 3

関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ (全関節数は L) の i 番目の成分 τ_i が最大となる場合を考える。相似な関節トルクベクトルに対してはその臨界外力空間は相似なことから最大トルクを $|\tau_i| = 1$ として他の成分の絶対値は 0 から 1 までを n_3 分割する刻みで全探索するものとする。このとき $\boldsymbol{\tau}$ は n_3^L 通りとなる。

手順 4

手順 3 で与えた n_3^L 通りの $\boldsymbol{\tau}$ の一つが式 (38) を満たすかどうかを確認し、満たせばこの $\boldsymbol{\tau}$ を式 (52) に代入する。そして、式 (52) の $\mathbf{t}_e$ に $\mathbf{T}$ のすべての成分を実数 p 倍したものをそれぞれ代入することで n_1 個の式を得る。 p は 0 から刻み Δp で大きくしていくものとする。

手順 5

手順 4 で用意した n_1 個の式によって与えられる $\mathbf{f}$ は式 (52) の右辺第 2 項に自由度をもつためそれぞれの $\mathbf{k}_2$ を変化させることで n_1 個の $\mathbf{f}$ すべてが摩擦条件である式 (16) を満足する最大の $p = p_{\max 1}$ を求める。このとき手順 4 で選んだ $\boldsymbol{\tau}$ と相似な関節トルクベクトルのうち最適なパワーグラスプとなるものの最大の関節トルクの大きさは $1/p_{\max 1}$ となる。

手順 6

手順 4, 手順 5 を n_3^L 通り計算をし、求まった $p_{\max 1}$ のうち最大のものを $p_{\max 2}$ とする。

手順 7

手順 3 から手順 6 を L 通り計算をし、求まった $p_{\max 2}$ のうち最大のものを $p_{\max 3}$ とする。ここで $1/p_{\max 3}$ は $\mathbf{A}$ を固定した場合の Φ の最小値である。

手順 8

手順 2 から手順 7 を n_2 通り計算をし、求まった $p_{\max 3}$ のうち最大のものを $p_{\max 4}$ とする。この $p_{\max 4}$ を与える $\mathbf{A}, \boldsymbol{\tau}$ によって表現される把持が最適なパワーグラスプとなり、そのとき、最大の関節トルクの大きさは $1/p_{\max 4}$ となる。この $1/p_{\max 4}$ は $\mathbf{A}, \boldsymbol{\tau}$ を探索したときの Φ の最小値である。

4. 数 値 例

Fig. 6 および Fig. 10 に示すような、ロボットハンドによって長方形の対象物を平面内把持する場合について、前章の方法により最適なパワーグラスプを求める。

4.1 対象物とロボットハンドの接触状態を固定した場合

まず、本節の場合 (A) と (B) では Fig. 6, 場合 (C) では Fig. 10 のように接触状態をあらかじめ固定した場合について計算をする。このとき行列 $\mathbf{A}$ は固定されるため、前章の手順 7 の $p_{\max 3}$ を与える関節トルクを求める問題となる。

(A) 摩擦係数が異なる場合

平面把持のため限界外力空間は並進力二次元、モーメント一次元の三次元空間となる。この空間内で要求外力仕様が Fig. 7 のような $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ を頂点とする立方体で与えられるものとする。各接触点での最大静止摩擦係数がすべて等しく μ であるとし、 $\mu = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5$ の場合について計算を行った。なおロボットハンド、対象物の姿勢と要求外力の対称性から、 $\tau_{11} = -\tau_{21}, \tau_{12} = -\tau_{22}$ であるとした。Fig. 8 にそれぞれの場合の $p_{\max 1}$ の値を示す。また、最適なパワーグラスプを与える関節トルクは Table 1 のようになった。

Table 1 から接触点での最大静止摩擦係数が大きいほど、 $\Phi(=i, k | \tau_{ik})$ は小さくて済み、かつ $\frac{|\tau_{12}|}{|\tau_{11}|}$ の値が大きくなること分かる。また、 $\mu = 1.5$ の場合、実際の接触においてこのように大きな摩擦係数が存在するかは別として、Fig. 8 (b)

Fig. 6 Robot hand and object (I)

Fig. 7 Desired external force measure

(a) Case when $\tau_{11} = -1$ (b) Case when $\tau_{12} = -1$ **Fig. 8** $p_{\max 1}$ of 4.1 (A)**Table 1** Joint torques for optimal power grasp of 4.1 (A)

μ	$p_{\max 3}$	$ \tau_{11} $	$ \tau_{12} $
0.1	0.037	27.03	14.32
0.3	0.109	9.17	4.86
0.5	0.154	6.49	3.77
1.0	0.317	3.15	2.62
1.5	0.549	1.80	1.82

を見れば、 $|\tau_{11}| = 0$ のときもパワーグリップとなることが分かる。

(B) 要求外力仕様が異なる場合

ここでは重力が一定の方向に働くような場合に対応させて、あらかじめ要求外力仕様にオフセットを与える場合を考える。要求外力仕様は Fig. 7 で表したものと、それを t_{e2} 方向に ± 1 ずらしたもの（これらは Fig. 6 の上下方向に重力が働く場合に相当する）の 3 種類を比較する。 $\mu = 0.3$ とした。 Fig. 9 にそれぞれの場合の $p_{\max 1}$ の値を示す。また、最適なパワーグリップを与える関節トルクは Table 2 のようになった。

Table 2 から最適なパワーグリップを与える $|\tau_{11}|$ の値は、三つのケースで変わらないが、 $|\tau_{12}|$ の値は、要求外力仕様のオフセットが正から負になるにつれて小さくなることが分かる。このことから Fig. 6 の把持姿勢は図中で下向きの力に強いことがいえる。また Fig. 9 を見ると、三つのケースで $p_{\max 1}$ の最大値を与える τ_{12} の値はそれぞれ異なるが、 $p_{\max 1} = 0$ から $p_{\max 1} \neq 0$ に移行するときの τ_{12} の値は等しいことが分かる。

(C) 指の中間リングと指先を共に用いる場合

Fig. 10 に示すように指の中間リングと指先を共に用い

Case when $\tau_{11} = -1$ **Fig. 9** $p_{\max 1}$ of 4.1 (B)**Table 2** Joint torques for optimal power grasp of 4.1 (B)

t_{e2} 's offset	$p_{\max 3}$	$ \tau_{11} $	$ \tau_{12} $
+1	0.109	9.17	5.41
0	0.109	9.17	4.86
-1	0.109	9.17	4.49

Fig. 10 Robot hand and object (II)

る場合について考える。ここで要求外力仕様も Fig. 7 のような $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ を頂点とする立方体とする。各接触点での最大静止摩擦係数がすべて等しく μ であるとし、 $\mu = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5$ の場合について計算を行った。なおロボットハンド、対象物の姿勢と要求外力の対称性から、 $\tau_{11} = -\tau_{21}, \tau_{12} = -\tau_{22}$ であるとした。 Fig. 11 にそれぞれの場合の $p_{\max 1}$ の値を示す。また、最適なパワーグリップを与える関節トルクは Table 3 のようになった。

Table 3 から場合 (A) と比べると、要求外力仕様が同様であるパワーグリップを実現するために、一部の中間リング接触の代わりとした指先接触を用いる場合にはより大きな関節トルクおよび静止摩擦が必要となることが分かる。

4.2 対象物とロボットハンドの接触状態を変化させる場合

次に、Fig. 6 に示したような対象物とロボットハンドの接触状態を変化させることで、最適なパワーグリップを探索する。

(A) ケース 1

Fig. 6 において対象物をロボットハンドに対して上下に動かして探索する。対象物の下側の辺とロボットハンドのベースとの距離を y とし、 y を 0 から 0.05 刻みで上方に動かすものとする。 $\mu = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5$ の場合について計算した。

Fig. 11 $p_{\max 1}$ of 4.1 (C)

Table 3 Joint torques for optimal power grasp of 4.1 (C)

μ	$p_{\max 3}$	τ_{11}	τ_{12}
0.1	0.000	∞	∞
0.3	0.011	90.91	53.64
0.5	0.026	38.46	23.46
1.0	0.058	17.24	11.03
1.5	0.087	11.49	7.93

Fig. 12 $p_{\max 3}$ of 4.2 (A)

Table 4 Joint torques for optimal power grasp of 4.2 (A)

μ	y	$p_{\max 4}$	τ_{11}	τ_{12}
0.1	0.40	0.069	14.49	14.49
0.3	0.40	0.208	4.81	4.81
0.5	0.45	0.283	3.53	3.53
1.0	0.60	0.411	2.31	2.43
1.5	0.60	0.568	1.72	1.76

Fig. 12 にそれぞれの場合の $p_{\max 3}$ の値を示す。また、最適なパワーグリップを与える関節トルクおよび y の値は Table 4 のようになった。このときの把持姿勢は Fig. 13 のようになった。

Table 4, Fig. 13 より、最適なパワーグリップを与える把持姿勢は前節で固定した対象物の位置 ($y = 0.71$) より下で把持する場合であることが分かる。また、最大静止摩擦係数が大きいほど $\Phi(=i, k | \tau_{ik})$ は小さくて済むことが分かる。

(B) ケース 2

要求外力仕様が Fig. 7 の前後方向に非対称場合において、対象物を上下 (y 方向) のみでなく左右 (x 方向) にも動かして探索することを考える。ただし Fig. 6 の対象物の位置を $x = 0$

Fig. 13 Optimal power grasps of 4.2 (A)

Table 5 $p_{\max 3}$ of 4.2 (B) with t_{e1} 's offset

		x				
		-0.14	-0.07	0	0.07	0.14
y	0	0.071	0.074	0.071	0.067	0.063
	0.20	0.112	0.116	0.120	0.118	0.116
	0.40	0.131	0.156	0.172	*0.180	0.162
	0.60	0.102	0.111	0.113	0.124	0.125
	0.80	0.063	0.068	0.073	0.068	0.060
	1.00	0.031	0.033	0.036	0.032	0.030
	1.20	0.013	0.014	0.015	0.014	0.013

Table 6 $p_{\max 3}$ of 4.2 (B) without offset

		x				
		-0.14	-0.07	0	0.07	0.14
y	0	0.068	0.071	0.100	0.071	0.068
	0.20	0.120	0.132	0.166	0.132	0.120
	0.40	0.143	0.171	*0.208	0.171	0.143
	0.60	0.109	0.112	0.140	0.112	0.109
	0.80	0.061	0.072	0.083	0.072	0.061
	1.00	0.028	0.035	0.039	0.035	0.028
	1.20	0.013	0.015	0.016	0.015	0.013

Table 7 Joint torques for optimal power grasp of 4.2 (B)

t_{e1} 's offset	x	y	$p_{\max 4}$	τ_{11}	τ_{12}	τ_{21}	τ_{22}
-1	0.07	0.40	0.180	-5.56	-5.22	5.11	5.56
0	0.00	0.40	0.208	-4.81	-4.81	4.81	4.81

Fig. 14 Optimal power grasps of 4.2 (B)

とし右向きを正に変位 x で探索する。ここでは要求外力仕様が Fig. 7 のものと、それを t_{e1} 方向に -1 オフセットしたものとを計算した。 $\mu = 0.3$ とした。 x は刻み 0.07 で -0.14 から 0.14 まで、 y は刻み 0.05 で 0 から 1.20 までを探索した。 Table 5 にオフセットありの場合、 Table 6 にオフセットなしの場合の $p_{\max 3}$ の値を示す。その中で * を付けたものが $p_{\max 3}$ の最大値、すなわち $p_{\max 4}$ である。また、最適なパワーグリップを与える関節トルクおよび x, y の値は Table 7 のようになった。

そのときの姿勢を Fig. 14 に示す. 最適なパワーグラスプは, オフセットなしの場合には $x = 0$ のとき与えられるのに対して, オフセットありの場合には $x = 0.07$ という対象物がやや右よりの位置にくる把持姿勢で与えられた.

5. 結 言

本論文では, 指リンクと物体との接触による力空間の自由度に関する解析に基づいて, ロボットハンドの中間リンクも物体に接触させることで実現するパワーグラスプの条件および力学特性について考察した. ついで安定把持するための可能な関節トルクの存在範囲を与えた. さらに, 同じ物体を把持する場合でも様々な要因からいくつもの形態が存在するパワーグラスプの中で最適なパワーグラスプを定義し, その決定方法を提案した. その方法に基づいて数値例によって最適なパワーグラスプを計算した. パワーグラスプの条件の中に摩擦条件が含まれることから明らかなようにパワーグラスプでは接触点での最大摩擦係数に対する依存度が大きいことが顕著であった.

本手法では, 対象物を三次元空間内運動において上下左右前後に(または二次元平面内運動において上下左右に)動かして全探索するような場合には, 刻みを小さくすると計算量が大変多くなり実用的とはいえない. そのため実際にパワーグラスプの計画を行うときには, まず大きな刻みによる計算もしくは人間の直感的な判断によってある程度探索範囲を限定してから本手法を適用するなどの工夫が必要であると考えられる.

参 考 文 献

- [1] A. Bicchi: "On the Problem of Decomposing Grasp and Manip-

ulation Forces in Multiple Whole-limb Manipulation," Robotics and Autonomous Systems, vol.13, pp.127-147, 1994.

- [2] K. Mirza and D.E. Orin: "General Formulation for Force Distribution in Power Grasp," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, Apr. 1994, pp.880-887.
- [3] M.R. Cutkosky: "On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.3, pp.269-279, 1989.
- [4] Y. Zhang and W.A. Gruver: "Definition and Force Distribution of Power Grasps," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, Apr. 1995, pp.1373-1378.
- [5] 小俣, 永田: "多指ハンドによるパワーグラスプの力学的特性", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.4, pp.525-531, 1995.
- [6] 中村, 張, 吉本: "パワーグラスプとそのロバスト性の評価法", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.6, pp.866-874, 1995.
- [7] 張, 中村, 吉本: "不完全な接触をもつ把持の力学的多面凸解析", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.105-113, 1997.
- [8] 張, 中村, 吉本: "パワーグラスプ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.
- [9] 布川, 中山, 谷野: 線形代数と凸解析. pp.125-187, コロナ社, 1991.
- [10] 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.
- [11] 余, 横小路, 中須, 吉川: "複数のロボット指による環境と接触している物体の準動的操作", 日本ロボット学会誌, vol.13, no.6, pp.875-885, 1995.
- [12] Y.Yu and T. Yoshikawa: "Evaluation of Contact Stability between Objects," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, Apr. 1997, pp.695-702.
- [13] Y. Yu, K. Takeuchi and T. Yoshikawa: "Optimization of Robot Hand Power Grasps," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.4, May 1998, pp.3341-3347.
- [14] J. Kerr and B. Roth: "Analysis of Multifingered Hands," Int. Jour. of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.

余 永 (Yong Yu)

1957年1月29日生. 1991年京都大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 1995年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了. 鹿児島大学工学部機械工学科講師を経て, 1999年同助教となり現在に至る. ロボットによる組立作業の自動計画, 複数ロボット機構の協調, アクティブセンシングなどに興味を持つ. 博士(工学). システム制御情報学会, 米国 IEEE 学会などの会員.
(日本ロボット学会正会員)

竹内賢一 (Kenichi Takeuchi)

1972年4月21日生. 1995年京都大学工学部機械工学科卒業, 1997年同大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了. 同年(株)トヨタ自動車入社. 在学中, ロボットハンドによる把持と操りに興味を持つ.

吉川恒夫 (Tsuneo Yoshikawa)

1941年12月19日生. 1964年京都大学工学部精密工学科卒業, 1969年同大学大学院工学研究科博士課程修了, 同大学工学部助手, 1970年同助教, 1986年同教授(オートメーション研究施設, 1989~1991年応用システム科学教室, 1991年より機械工学教室). 1994年組織変更により, 同大学大学院工学研究科教授(機械工学専攻)となり現在に至る. その間1973~1975年米国 NASA マーシャル宇宙飛行センター NRC 準研究員. ロボット工学, メカトロニクス, 制御工学の研究に従事. 工学博士. システム制御情報学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 米国 IEEE 学会などの会員.
(日本ロボット学会正会員)