

# 包み込み把握の遷移安定性

金子 真\* 東森 充\* 辻 敏夫\*

## Transition Stability of Enveloping Grasps

Makoto Kaneko\*, Mitsuru Higashimori\* and Toshio Tsuji\*

While there have been a number of works on enveloping grasp, most of them have discussed the robustness of grasp, analysis of contact forces, and localization of contact points, under the assumption that robot fingers already grasps the object. This paper relaxes the assumption and treats an issue on planning torque commands for lifting up the object on the table till it makes contact with the palm. We first define a concept of transition stability during lifting motion and introduce the force-flow-diagram which is a convenient tool for evaluating the global moving direction of object. We show a couple of simulation results for both 2D and 3D objects.

**Key Words:** Enveloping Grasp, Constant Torque Control, Grasp Stability, Grasp Transition, Lifting Motion

### 1. はじめに

#### 1.1 多指ロボットハンドによる包み込み把握

ロボットハンドとして最も単純なものに、グリッパ型ロボットハンドがある。これは自由度が少なく制御が簡単である反面、器用さが要求されるような環境には適さない。これに対し、人の手のように多くの指と関節を備えた多指ロボットハンドは、その自由度を巧みに利用して、複雑な作業を実現する潜在的能力を備えている。

多指ロボットハンド（以下、単にハンドと略記）に関する研究は数多く存在する[1]~[4]が、そのほとんどはリンク途中で対象物と接触しない指先把握が前提である。これに対し、包み込み把握（またはパワーグラスプ）は多くの接触点に負荷を分散させることで、外力、外モーメントに対して強いロバスト性を有するのが特徴である。これまでの包み込み把握に関する研究の多くは、接触力解析や接触点検出、把握のロバスト性などが議論の中心となり、すでにハンド内に対象物がしっかりと包まれていることが前提となっていた。これに対して筆者らは、元々拘束されていない対象物に多指ロボットハンドがアプローチし、最終的に包み込み把握を完成する一連の把握プロセスに興味を持ち、研究を進めている[5]~[7]。例えば、Fig. 1で示されているようなハンドが、テーブルに置かれた円柱物体に対して包み込み把握を実現する場合を考えてみよう。この場合、各指がテーブル上の対象物にアプローチし、接触するまでのアプローチ相（Approach phase）、対象物の下部に指を挿入して対

象物を持ち上げる持ち上げ相（Lifting phase）、最終的に対象物を包み込んでしっかりと把握する把握相（Grasping phase）の三相に分けて考えることができる。

本研究では、このうち特に持ち上げ相に着目する。従来研究の多くが、対象物をいかに頑丈に包み込むかという問題を取り扱っていたのに対し、本論文では、包み込み把握でよく用いられる一定トルク指令により、ハンド内にある対象物への拘束をゆるめて、重力に逆らって対象物をバーム方向に安定に滑らせ、最終的に平衡状態に落ち着かせる問題を取り扱う。

ハンドで対象物を操る場合、対象物の移動経路を指定し、その経路に沿って対象物を厳密に操る方法と、グローバルな方向のみを指定する方法が考えられる。包み込み把握の場合、特に

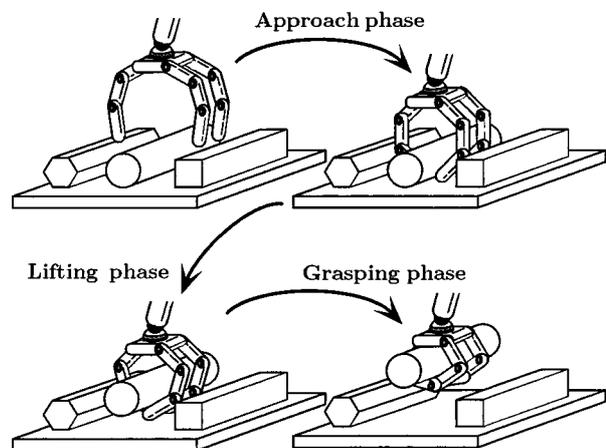


Fig. 1 An example of enveloping grasp

原稿受付 1997年8月25日

\*広島大学工学部

\*Hiroshima University

重要なことは対象物の厳密な操りというよりも、対象物を重力に抗してパーム側に安定に誘導できるかという点にある。このような観点から、本論文では、はじめに遷移過程における把握の安定性を広い概念で定義する。すなわち、ハンドの動作空間内に任意の空間  $S_G$  を定義し、ハンドが対象物を  $S_G$  からはみ出さないように移動させることができるとき、その移動は広い意味で安定であると見なす。この安定性の概念をうまく利用するため、フォースフロー (Force-flow) という考え方を新たに導入する。これは、与えられたトルク指令のもとで、対象物が少なくとも規定された方向に動くことができるかどうかを判定するものであり、運動方程式を解かなくても対象物の大まかな挙動を把握できるという特徴を有している。このフォースフローをいろいろな重心位置に対して求めたフォースフロー線図 (Force-flow-diagram) を使って、遷移過程の安定性を吟味する。この線図を用いると、包み込み把握中の外力に対するロバスト性についても従来と違った視点で論じることが可能となる。従来、包み込み把握のロバスト性は外力 (外モーメント) を増加させていった場合、対象物がどこまで滑らずにいられるかということによって評価されていた [8]~[10]。ところが包み込み把握中に対象物が外乱によってたとえ滑ってしまったとしても、外乱が除かれた時点で対象物が再び初期方向に戻ろうとするならば、グローバルな意味で包み込み把握は、少なくとも安定であるとみなすことができる。本研究では、このように把握の安定論を包み込み動作中の遷移過程まで拡張することを試みる。

本論文では、はじめに包み込み把握の定式化を行う。次に遷移過程における把握の安定性、フォースフロー線図の基本概念について定義する。次に正多角柱物体と球状物体に対して行ったシミュレーションにより、遷移過程の安定性に関する基本的考察を行う。また、 $S_G$  内に同時に複数個の平衡点が存在するといった興味深い結果についても言及する。

## 1.2 関連研究

アプローチ相: Jeannerod [11] は人の把握動作を観察し、人が対象物の形状に応じて pre-shaping していることを示している。Bard and Troccaz [12] は簡単な画像情報をもとにした pre-shaping 動作を、2 本指多関節ロボットに対して実現している。Kaneko and Honkawa [13] はリンクの途中で接触する把握形態に対して、アクティブセンシングを用いて局所的な接触点検出を行っている。

持ち上げ相: Trinkle and Paul [14][15] は摩擦なし、平面对象物の持ち上げ可能条件について考察している。

包み込み把握、パワーグラスプ: Mirza and Orin [8] はパワーグラスプの力分布を線形計画法を用いて解き、包み込み把握が維持できる最大荷重を求めている。Trinkle [16] は摩擦なしで包み込み把握を実現する場合の把握計画問題を解いている。Salisbury [17][18] は多点接触を許して対象物を操る Whole-Arm Manipulation (WAM) に関する基本概念について提案している。Bicchi [19] はパワーグラスプにおける内力が能動的成分と受動的成分に分類できることを示している。Omata and Nagata [20] はパワーグラスプにおける接触点の滑り方向が限定されていることに着目し、実現可能な接触力について考察している。Zhang ら [10] はパワーグラスプされた対象物に仮想変

位を与え、そのときの仮想仕事率を用いて把握のロバスト性を評価している。Kumar [21] は WAM を例にとって最小化原理を使って摩擦を考慮した多点接触システムを解析している。その他: Rimon and Blake [22] は一つのパラメータで開き動作がコントロールできる 2 本指ロボットのアプローチ動作を、把握相まで含めて force-closure を実現する条件について考察している。Kleinmann ら [23] は指先把握からパワーグラスプへ遷移する 5 種類のアプローチ法を示している。また、筆者らは対象物の形状が同じであっても、人はその大きさに応じた把握戦略を選んでいることを示している [5]。

## 2. 定式化

### 2.1 仮定

定式化に伴い、以下の仮定をおく。

仮定 1: ロボットは  $m$  本指  $n$  関節の回転関節型ハンドとし、パームは絶対系に固定されているものとする。

仮定 2: 対象物は有限の質量を有し重力を受けるが、リンクは質量を持たないものとする。

仮定 3: リンクと対象物の接触は点接触とし、摩擦係数  $\mu$  で規定されるクーロン摩擦力が発生するものとする。簡単のため静摩擦と動摩擦は区別しない。

仮定 4: ハンドと対象物との接触点、および対象物の重心位置は既知とする。

仮定 5: ハンドの各関節には、トルクセンサが備わっているものとする。

仮定 6: 指同士の干渉は考えない。

### 2.2 関節トルクの定式化

ハンドの第  $i$  番目の指について考える (Fig. 2)。第  $i$  指の第  $j$  番目の接触点の位置ベクトルを  $p_{ij} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$ 、接触力ベクトルを  $f_{ij} \in \mathcal{R}^{3 \times 1}$  とし、第  $i$  指の関節トルクベクトルを  $\tau_i \in \mathcal{R}^{n \times 1}$  とする。

$\tau_i^j$  を接触力  $f_{ij}$  のみによって発生する関節トルクベクトルとすると、

$$\tau_i^j = J_{ij}^T f_{ij} \quad (1)$$

である。ただし、 $J_{ij}^T$  は、接触力  $f_{ij}$  をそれが生成する関節トルクベクトルに変換するヤコビアンである。トルクの重ね合わせ

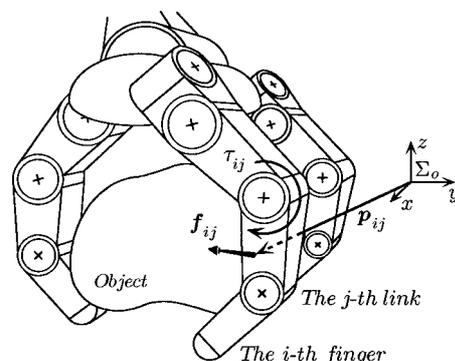


Fig. 2 3D model of the robot hand

せの原理より,

$$\boldsymbol{\tau}_i = \sum_{j=1}^{k_i} \boldsymbol{\tau}_i^j \quad (2)$$

$$= \sum_{j=1}^{k_i} \mathbf{J}_{ij}^T \mathbf{f}_{ij} \quad (3)$$

を得る. ただし,  $k_i$  は第  $i$  指の接触点の数である. これを行列で表すと,

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^T \mathbf{f}_i \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_i^T = [\mathbf{J}_{i1}^T, \dots, \mathbf{J}_{ik_i}^T] \in \mathcal{R}^{n \times 3k_i} \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_i = [\mathbf{f}_{i1}^T, \dots, \mathbf{f}_{ik_i}^T]^T \in \mathcal{R}^{3k_i \times 1} \quad (6)$$

となる. Fig. 3 (a) のように接触力は法線方向から摩擦角  $\alpha$  ( $= \tan^{-1} \mu$ ) 程離れた方向まで発生可能であるので, 接触点を頂点とする摩擦円錐内に存在する. この摩擦円錐を,  $L$  面正凸多面錐で近似する [9]. Fig. 3 (b) のように稜線方向単位ベクトル  $\mathbf{v}_{ij}^l$  を定義すると, 接触力ベクトル  $\mathbf{f}_{ij}$  は

$$\mathbf{f}_{ij} = \sum_{l=1}^L \lambda_{ij}^l \mathbf{v}_{ij}^l \quad (\lambda_{ij}^l \geq 0) \quad (7)$$

のように線形結合で表せる. これを同様に行列で表すと,

$$\mathbf{f}_{ij} = \mathbf{V}_{ij} \boldsymbol{\lambda}_{ij} \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_{ij} = [\mathbf{v}_{ij}^1, \dots, \mathbf{v}_{ij}^L] \in \mathcal{R}^{3 \times L} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{ij} = [\lambda_{ij}^1, \dots, \lambda_{ij}^L]^T \in \mathcal{R}^{L \times 1} \quad (10)$$

である.

式(4)(8)を  $m$  本の指すべてまとめると次の式が得られる.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f} \quad (11)$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{V} \boldsymbol{\lambda} \quad (12)$$

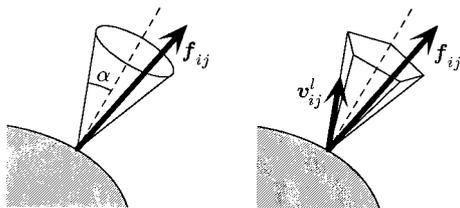
$$\boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0} \quad (13)$$

ただし,

$$\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_1^T, \dots, \boldsymbol{\tau}_m^T]^T \in \mathcal{R}^{mn \times 1} \quad (14)$$

$$\mathbf{J}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1^T & \mathbf{0} \\ & \ddots \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_m^T \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{nm \times 3\Sigma k_i} \quad (15)$$

$$\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1^T, \dots, \mathbf{f}_m^T]^T \in \mathcal{R}^{3\Sigma k_i \times 1} \quad (16)$$



(a) friction cone (b) polyhedral convex cone

Fig. 3 Friction cone model

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 & \mathbf{0} \\ & \ddots \\ \mathbf{0} & \mathbf{V}_m \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{3\Sigma k_i \times L\Sigma k_i} \quad (17)$$

$$\mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{i1} & \mathbf{0} \\ & \ddots \\ \mathbf{0} & \mathbf{V}_{ik_i} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{3k_i \times Lk_i} \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\lambda} = [\boldsymbol{\lambda}_1^T, \dots, \boldsymbol{\lambda}_m^T]^T \in \mathcal{R}^{L\Sigma k_i \times 1} \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\lambda}_i = [\boldsymbol{\lambda}_{i1}^T, \dots, \boldsymbol{\lambda}_{ik_i}^T]^T \in \mathcal{R}^{Lk_i \times 1} \quad (20)$$

である. ここで, 式(11)と式(12)より  $\mathbf{f}$  を消去すると,

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{V} \boldsymbol{\lambda} \quad (21)$$

を得る.

### 2.3 一定トルク制御

持ち上げ相, 把握相において, 一定トルク制御を用いれば, 各リンクの姿勢は対象物の重力や幾何学的な形状, また各関節に与えたトルク指令値などによって決定されるので, ハンドの複雑な軌道生成等を考えなくても, 自動的に対象物を含み込むような把握を完成させることができる利点を有する.

式(21)のうち,  $\mathbf{J}^T, \mathbf{V}$  を定数であるとする, この式は接触力の正凸多面錐の稜線方向成分と関節トルクの関係を示した式となる. しかし, この式は式の数が  $mn$  個で, 変数の数が  $L\Sigma_{i=1}^m k_i$  個であるので, 接触状態やリンク姿勢によっては, 式(13)を満たす  $\boldsymbol{\lambda}$  が存在し得なくなる. つまり, 任意のトルク指令値  $\boldsymbol{\tau}$  に対して, 必ず摩擦多面錐内に接触力が存在するとは限らない. 以降の議論では, 式(21)(13)を満足する  $\boldsymbol{\lambda}$  が存在する場合について考える.

### 2.4 合力・合モーメント空間 $\Phi$

これまでの議論は, ロボット側から目標トルク指令値と接触トルクの関係について考えてきたが, 次にその接触力を受けた対象物側から考える. 対象物には先の接触力と重力が作用するので, それぞれが作る合力  $\mathbf{f}_o$ , 合モーメント  $\mathbf{m}_o$  は,

$$\mathbf{u}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_o \\ \mathbf{m}_o \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} \mathbf{f}_{ij} + M\mathbf{g} \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} \{(\mathbf{p}_{ij} - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{f}_{ij}\} \end{bmatrix} \quad (23)$$

である. ただし,  $\mathbf{u}_o$  は, 合力, 合モーメントを合わせた六次元ベクトル,  $M, \mathbf{r}_G$  は対象物の質量と重心の位置ベクトル,  $\mathbf{g}$  は重力加速度ベクトルである. この合力, 合モーメントベクトル  $\mathbf{u}_o$  は,  $\boldsymbol{\lambda}$  が複数存在する場合には, それに応じて合力・合モーメント空間  $\Phi$  を生成する. この  $\Phi$  が原点を含む場合 (Fig. 4 (a)), 目標トルク指令値に釣り合い, なおかつ対象物の合力, 合モーメントも釣り合うような接触力の組が発生可能であるので, 系全体を静止させることが可能である. すなわち, force-closure grasp [24] となる. このとき, 対象物に外力, 外モーメント  $\mathbf{u}_{ext}$  が発生したとしても,

$$\mathbf{u}_o + \mathbf{u}_{ext} = \mathbf{0} \quad (24)$$

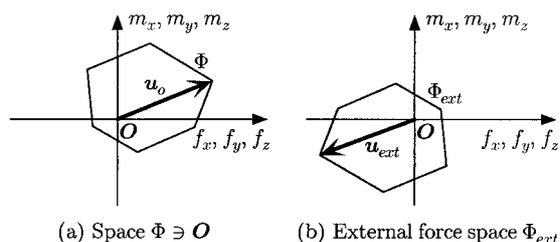


Fig. 4 Total force and total moment area  $\Phi$

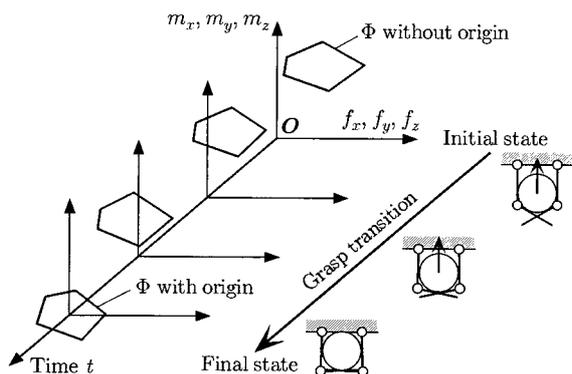


Fig. 5 Grasp transition with  $\Phi$

を満たす範囲ならば、トルクを変化させなくても摩擦円錐内で接触力が変化し対象物を静止させ続けることができる。つまり、耐え得る外力、外モーメント空間  $\Phi_{ext}$  は、 $\Phi$  の符号を反転させた空間となる (Fig. 4 (b))。この領域  $\Phi_{ext}$  が大きくかつ原点から境界までが離れているほどしっかりした把握が実現できることになる。 $\Phi_{ext}$  は、限界外力空間と呼ばれ一般に凸多面体となる。中村らはこの多面体を用いて把握のロバスト性を評価している [25]。それに対して、本研究は対象物の持ち上げ動作に着目しているため、 $\Phi$  が原点を含まないような目標トルク指令値を決定する問題を取り扱うことになる。このイメージ図を Fig. 5 に示す。 $\Phi$  が原点を含まない場合は、対象物はいつれかの方向に移動している。その方向は目標トルク指令値によって変化するが、もし常に上向きに移動しているのであれば、対象物はパームに接触するまで移動し続け、最終的にパームからの抗力によって静止する。ひとたび対象物が静止してしまえば、 $\Phi$  は原点を含む把握相に移行し、従来から議論されていた包み込み把握の理論に帰着する。

### 3. 包み込み把握の遷移安定性

はじめに、包み込み把握の遷移安定性について、持ち上げ相に限定しない一般的な定義を与える。Fig. 6 のように、ハンドが対象物を  $\Sigma_s$  系の  $z_s$  方向に向けて移動させている状態を考える。いま、対象物をどのような姿勢にしたとしても各リンク最低 1 点以上接触することができるような対象物の重心位置を  $\Sigma_o$  に対し  $p_G^o = (x_G, y_G, z_G)^T$  とし、 $p_G^o$  が作る空間を  $U_G$  とする。ここで、凸閉空間  $S_G \subset U_G$  を定義する。このとき、遷移安定性を以下のように定義する。ただし、指姿勢の任意性を排除するため、各指の横振り自由度 (Fig. 2 の第 1 関節) は

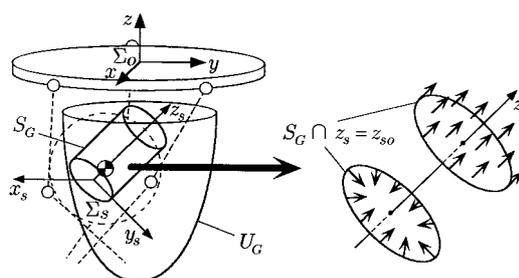


Fig. 6 Manipulation space  $S_G$

固定されているものとする。

#### 【定義 1】(遷移安定性)

$S_G$  内に Fig. 6 のように任意の座標系  $\Sigma_s (o - x_s y_s z_s)$  を考える。このとき、下記 (i) (ii) の条件が  $z_{ss} \leq z_{so} \leq z_{sf}$  において成立するとき、対象物は  $S_G$  内の  $z_{ss}$  から  $z_{sf}$  まで遷移安定性が保証されると定義する。

- (i) 空間  $S_G$  の  $z_s = z_{so}$  断面の境界で

$$n^T f_o > 0 \quad (25)$$

ただし、 $n$  は境界での内向き断面内法線ベクトル。

- (ii) 空間  $S_G$  の  $z_s = z_{so}$  断面内で

$$t^T f_o > 0 \quad (26)$$

ただし、 $t$  は  $z_s$  軸方向単位ベクトル。

この遷移安定性が成り立つ場合、質量ゼロ ( $M = 0$ ) の対象物であれば、対象物の厳密な運動は規定できないものの、対象物重心は  $S_G$  からはみ出ることなく  $z_s$  軸の正方向へ進んでいくことが保証される。質量がゼロでない ( $M \neq 0$ ) 対象物については、厳密な意味で重心が  $S_G$  からはみ出さないとは言えないが、対象物の挙動を考察する上での一つの指標にはなり得るものと筆者らは考えている。

これは、遷移安定性に関する一般的な定義であるが、これを包み込み把握の持ち上げ相に対応させるためには、 $z_s$  を  $z$  と一致するように選び  $z_{sf} = z_{spalm}$  とすればよい。ただし、 $z_{spalm}$  は対象物がパームに接触するときの重心位置という理解が自然であるが、対象物の姿勢によって一意に決まらない場合があるため、より強い条件としてパーム位置を与えても構わない。結局、 $z_{ss} \leq z_{so} \leq z_{spalm}$  に対して

$$n^T f_o > 0 \cap t^T f_o > 0 \quad (27)$$

が成立すれば、対象物がどのような姿勢、位置にあるかは分からないが、少なくとも対象物は指から転げ落ちることなく、パームまで持ち上がることが保証される。

対象物が遷移後、停止するためには、基本的にパームに押しつけられた状態が作られなければならない。ただし、パームのない方向に遷移する場合でも、把握に直接使用されていない指リンクを位置制御により固定してしまえば仮想的なパームを作り出すことができ、対象物を停止させることができる。

### 4. フォースフロー線図

対象物の重心が Fig. 7 のように、 $p_G^o = (x_G, y_G, z_G)^T$  にあ

るとしよう．ここで，任意の座標系  $\Sigma_1$  での合力

$$f_o^1 = (f_{x_1}, f_{y_1}, f_{z_1}) \quad (28)$$

$$= (c_{x_1}^T f_o, c_{y_1}^T f_o, c_{z_1}^T f_o) \quad (29)$$

を考える．一般に多点接触の下では Fig. 4 のように，任意のトルク指令に対して  $f_o^1$  は凸多面体となるから， $p_G^o$  における対象物の任意の姿勢に対して

$$f_{x_1}^{\min} \leq f_{x_1} \leq f_{x_1}^{\max} \quad (30)$$

$$f_{y_1}^{\min} \leq f_{y_1} \leq f_{y_1}^{\max} \quad (31)$$

$$f_{z_1}^{\min} \leq f_{z_1} \leq f_{z_1}^{\max} \quad (32)$$

さらに，重心位置を固定して，姿勢の変化まで含めて考えると，一つの  $p_G^o$  に対して

$$\{f_{x_1}^{\min}\}^{\min} \leq f_{x_1} \leq \{f_{x_1}^{\max}\}^{\max} \quad (33)$$

$$\{f_{y_1}^{\min}\}^{\min} \leq f_{y_1} \leq \{f_{y_1}^{\max}\}^{\max} \quad (34)$$

$$\{f_{z_1}^{\min}\}^{\min} \leq f_{z_1} \leq \{f_{z_1}^{\max}\}^{\max} \quad (35)$$

となる．ただし， $\{\cdot\}^{\min}$  および  $\{\cdot\}^{\max}$  はすべての姿勢についての最大値，最小値を表す．このとき，最大値と最小値の符号に注目すれば，対象物の各軸成分に関する移動方向が一意に決定される場合があり，以下の定理が成り立つ．

《定理》

- (i)  $\{f_*^{\min}\}^{\min} \cdot \{f_*^{\max}\}^{\max} > 0$  のとき  
\* 方向について対象物の重心は  $\text{sgn}[\{f_*^{\min}\}^{\min}]$  の方向に必ず移動する．
- (ii)  $\{f_*^{\min}\}^{\min} \cdot \{f_*^{\max}\}^{\max} \leq 0$  のとき  
\* 方向について対象物の重心の移動方向は一意に決まらない．

ただし， $f_* = f_{x_1}$  or  $f_{y_1}$  or  $f_{z_1}$  であり  $\text{sgn}[\cdot]$  は変数の符号を表すものとする．

(証明) 例えば， $x_1$  方向に関して (i) は  $0 < \{f_{x_1}^{\min}\}^{\min} \leq \{f_{x_1}^{\max}\}^{\max}$  と  $\{f_{x_1}^{\min}\}^{\min} \leq \{f_{x_1}^{\max}\}^{\max} < 0$  の 2 通りの場合が存在する． $M$  を対象物の質量， $f_{x_1}$  を実際に対象物に作用する合力の  $x_1$  成分とすると，前者の場合，

$$M\ddot{x}_1 = f_{x_1} \geq \{f_{x_1}^{\min}\}^{\min} > 0 \quad (36)$$

となり， $x_1$  の正方向に加速度が発生し，その方向に必ず重心は移動する．後者の場合，

$$M\ddot{x}_1 = f_{x_1} \leq \{f_{x_1}^{\max}\}^{\max} < 0 \quad (37)$$

となり， $x_1$  の負方向に加速度が発生し，その方向に必ず移動する．ところが (ii) の場合は  $\{f_{x_1}^{\min}\}^{\min} \leq 0 \leq \{f_{x_1}^{\max}\}^{\max}$  であり， $x_1$  方向の重心移動は一意に規定できない．以下， $y_1, z_1$

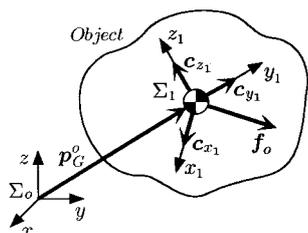


Fig. 7 Coordinate frames

についても同様．

この定理に基づいて，フォースフローおよびフォースフロー線図を以下のように定義する．

【定義 2】(フォースフローおよびフォースフロー線図)

$\{f_*^{\min}\}^{\min} \cdot \{f_*^{\max}\}^{\max} > 0$  のとき  $p_G^o$  に  $\text{sgn}[\{f_*^{\min}\}^{\min}]$  の方向に単位ベクトル， $\{f_*^{\min}\}^{\min} \cdot \{f_*^{\max}\}^{\max} \leq 0$  のとき  $p_G^o$  に  $\ominus$  を記す．このように， $p_G^o$  に与えられた単位ベクトルや  $\ominus$  をフォースフロー (Force-flow) と呼び，それを任意の領域にわたって描いた線図をフォースフロー線図 (Force-flow-diagram) と呼ぶ．

フォースフローは，一定トルク指令値の元で，対象物重心位置が  $p_G^o$  に存在するとき， $\Sigma_1$  系の各軸方向に関してどちらの方向に合力が作用するかを視覚的に表現したものである．フォースフロー線図は，把握領域内の対象物の大まかな挙動が確認できるとともに，遷移安定性の二つの条件が満足されているかどうかを一目で知ることができる強力なツールになる．

## 5. 数 値 例

### 5.1 正 $n$ 角柱

Fig. 8 のように，2 関節 2 本指平面ハンドが正  $n$  角柱に対して包み込み把握動作を実行している場合を想定する．ここに， $R, l$  はそれぞれ正  $n$  角柱の外接円半径およびリンク長であるとする．なお，簡単のため，重心は外接円中心位置に存在するものとし，パーム長はリンク長に等しいとしている．ここで，各リンク一点ずつ接触点を持つとすると，対象物の重心位置が与えられればリンク姿勢は一意に決定され，式 (15) (17) は

$$J^T = \begin{bmatrix} J_{11}^T & J_{12}^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & J_{21}^T & J_{22}^T \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$J_{i1}^T = \begin{bmatrix} -p_{i1y} + e_{i1y} & p_{i1x} - e_{i1x} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$J_{i2}^T = \begin{bmatrix} -p_{i2y} + e_{i2y} & p_{i2x} - e_{i2x} \\ -p_{i2y} + e_{i2y} & p_{i2x} - e_{i2x} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{11} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & V_{12} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{21} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & V_{22} \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_{ij} - \alpha) & -\sin(\theta_{ij} + \alpha) \\ \cos(\theta_{ij} - \alpha) & \cos(\theta_{ij} + \alpha) \end{bmatrix} \quad (42)$$

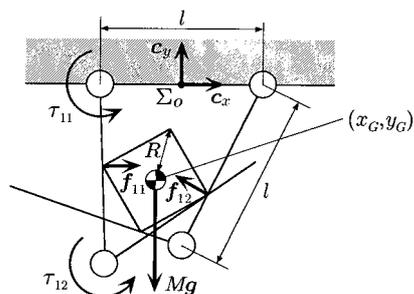
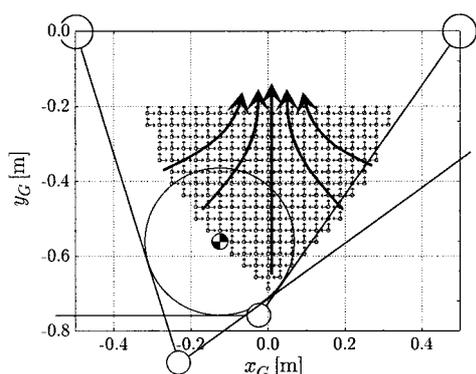
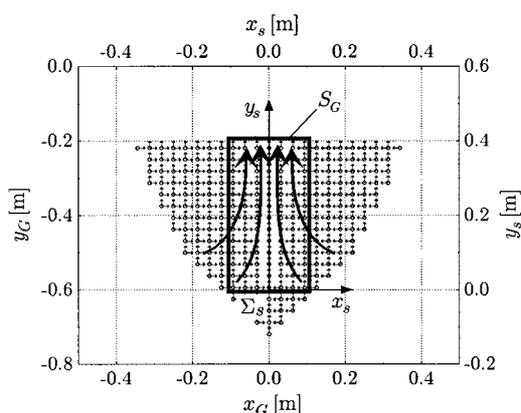


Fig. 8 Definition of notation for 2D simulation model



(a)  $\alpha = 0[\text{rad}]$



(b)  $\alpha = \pi/18[\text{rad}]$

Fig. 9 Force flow diagram for a cylindrical object ( $n = 360$ ,  $l = 1.0$  [m],  $R = 0.2$  [m] and  $Mg = -1$  [N])

ただし,  $\mathbf{p}_{ij} = (p_{ijx}, p_{ijy})^T$ ,  $\mathbf{e}_{ij} = (e_{ijx}, e_{ijy})^T$  はそれぞれ第  $i$  指第  $j$  リンク ( $i = 1, 2, j = 1, 2$ ) における接触点の位置ベクトル, 第  $i$  指第  $j$  関節の位置ベクトルを表し,  $\theta_{ij}$  は第  $i$  指第  $j$  関節の絶対角度を表す. ここで, 合力は

$$\mathbf{f}_o = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} \mathbf{f}_{ij} + Mg \quad (43)$$

$$= [\mathbf{V}_{11}, \dots, \mathbf{V}_{mn}] \boldsymbol{\lambda} + Mg \quad (44)$$

となる. いま  $\Sigma_1$  として  $\Sigma_o$  を選ぶと

$$\mathbf{f}_h = \mathbf{c}_x^T \mathbf{f}_o \quad (45)$$

$$\mathbf{f}_v = \mathbf{c}_y^T \mathbf{f}_o \quad (46)$$

ただし,  $\mathbf{f}_h, \mathbf{f}_v$  は合力の水平方向成分, 鉛直方向成分である. ここで, 以下のような線形計画問題を解くことにより  $\{f_h^{\min}\}^{\min}$ ,  $\{f_h^{\max}\}^{\max}$  等を算出する.

Maximize or Minimize

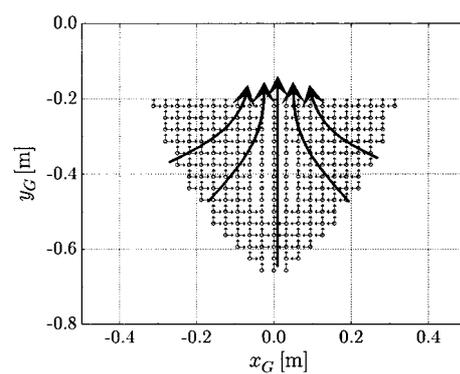
$$\mathbf{f}_h = \mathbf{c}_x^T [\mathbf{V}_{11}, \dots, \mathbf{V}_{mn}] \boldsymbol{\lambda} \quad (47)$$

or

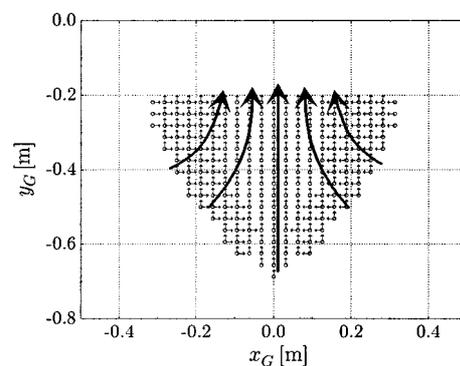
$$\mathbf{f}_v = \mathbf{c}_y^T [\mathbf{V}_{11}, \dots, \mathbf{V}_{mn}] \boldsymbol{\lambda} + Mg \quad (48)$$

Subject to

$$\mathbf{J}^T \mathbf{V} \boldsymbol{\lambda} = \boldsymbol{\tau} \quad (49)$$



(a)  $\alpha = 0[\text{rad}]$



(b)  $\alpha = \pi/18[\text{rad}]$

Fig. 10 Force flow diagram for an  $n$ -column object ( $n = 4$ ,  $l = 1.0$  [m],  $R = 0.2$  [m] and  $Mg = -1$  [N])

$$\lambda_{ij}^l \geq 0 \quad (50)$$

$$(i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, l = 1, \dots, L)$$

Fig. 9, 10 に円柱 (厳密には正 360 角形), 正 4 角形の場合のフォースフロー線図を, 重心が取り得る全範囲に対して示している. ただし,  $\tau_{11} = \tau_{21} = 2$  [Nm],  $\tau_{21} = \tau_{22} = 1$  [Nm] で (a)(b) はそれぞれ摩擦角  $\alpha = 0$  [rad],  $\alpha = \pi/18$  [rad] の場合に対応している. 全体的に対象物には, 水平方向に対しては中心向き, 鉛直方向に対しては上向きの合力が作用しているのが読み取れる. 例えば,  $S_G$  を Fig. 9 (b) (ただし, 定義 1 の  $z_s$  軸は  $y_s$  軸に対応させている) のように選ぶと,  $0.0 \leq y_s \leq 0.4$  [m] の範囲で定義 1 の遷移安定性の条件 (i), (ii) が満足される. ここで,  $y_s = 0.4$  [m] は円柱がパームに接触したときの重心位置に相当する. したがって, Fig. 9 (b) のように  $S_G$  を選ぶと,  $S_G$  内のどこに重心があろうと, 対象物は  $S_G$  から外に出ることなく, パーム側に移動するような合力を絶えず受け続けることが分かる. 最終的に  $y_s = 0.4$  [m] に到達した時点で対象物はパームから拘束を受けることになり,  $y_s$  方向の力はバランスし, 対象物は静止する. 一方, Fig. 10 のように正 4 角形の場合, 円柱の場合と違って対象物の姿勢の影響を受けるため, 移動方向が一意に規定できない領域が広がる. 結果として, Fig. 10 (a)(b) のように遷移安定性の条件 (i), (ii) を満たす領域は横方向に広がり, かつ縦方向に縮まる傾向

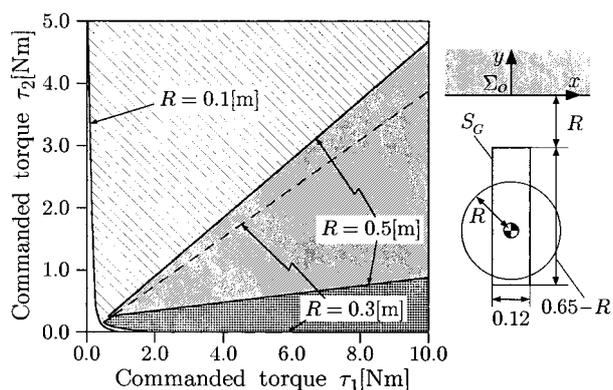


Fig. 11 Commanded torque for lifting up the object to the palm

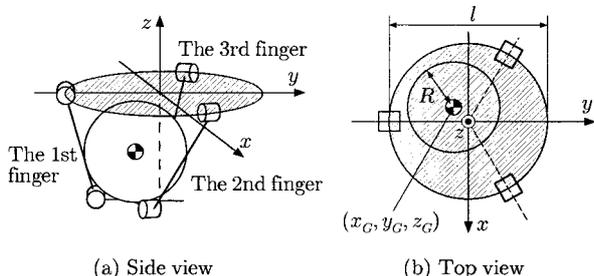


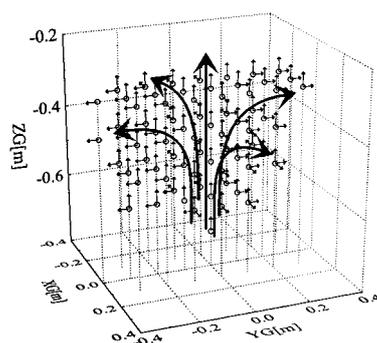
Fig. 12 Simulation model for a sphere object

を示す．いずれにせよ，これらのフォースフロー線図から，正  $n$  角柱に対して一定トルク制御で持ち上げ相を実現することが，安定性の面で極めて効果的であることが分かる．このフォースフロー線図からもう一つ重要な結果が引き出せる．それは，対象物がパームに到達して，把握相 (Grasping phase) になったとき，何らかの外乱が作用して対象物が動いてしまったとしても，対象物をパームの中心方向に持っていきような復元力が作用していることである．包み込み把握の場合，指先把握で定義されていた把握剛性行列の正定性に準拠した安定論 (把握剛性行列が正定の場合は，外乱に比例した復元力が作用するので常に元の状態に戻り得る) と基本的に異なり，滑りを介して対象物が移動するため，対象物の最終的な位置・姿勢が最初のそれと完全に一致するわけではない．

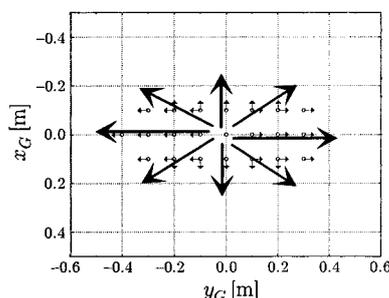
Fig. 11 に，4 点接触状態で存在する円柱物体をパームまで持ち上げることが可能なトルク指令値を示す．これは，Fig. 11 右図のように設定した重心の移動空間  $S_G$  内において，遷移安定条件を満足するトルク指令値を調べたものである．ただし， $\tau_1 = \tau_{11} = \tau_{21}$ ,  $\tau_2 = \tau_{12} = \tau_{22}$  はそれぞれ第 1 関節，第 2 関節のトルク指令値で  $l = 1.0$  [m],  $Mg = -1$  [N],  $\alpha = \pi/60$  [rad] である．Fig. 11 より，対象物の半径にかかわらず，十分広い範囲にわたって  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  の組み合わせが存在していることが分かる．このような傾向は，トルク指令値を選択する上での自由度が大きいことを意味しており，実用上好ましいと言える．

5.2 球物体

Fig. 12 のように， $x$ - $y$ - $z$  軸をとり， $x$ - $y$  平面をベースとして， $2\pi/3$  [rad] 離して各指を配置した 3 本指ロボットハンド



(a) Bird's view



(b) Top view

Fig. 13 Force flow diagram for a sphere ( $l = 1.0$  [m],  $R = 0.2$  [m],  $Mg = -1$  [N] and  $\alpha = \pi/18$  [rad])

の場合について考える．対象物の重心位置 (簡単のため，球の中心位置とする) を変化させ，その位置での合力の方向を示したフォースフロー線図を Fig. 13 に示す．摩擦多面錐の面数  $L = 15$ ，第 1，第 2 関節の目標トルク指令値を 2 [Nm], 1 [Nm]，対象物の半径  $R$  は 0.2 [m] である．Fig. 13 (a) は鳥瞰図，Fig. 13 (b) は真上から見た図である．この結果で興味深いことは，対象物が中心からずれると，ますます中心からずれる合力が作用している点である．この場合，定義 1 の条件 (ii) を満たさないため，遷移安定性は保証されない．このような指配置を持ったハンドが小さな球物体をうまく握めないことは，一定トルク指令という限定された制御方式を取っていることに起因している．

5.3 安定平衡点と不安定平衡点

フォースフロー線図を使って円柱の持ち上げ相の遷移安定性を評価している際に，興味深い結果が得られた．Fig. 14 は  $l = 1.0$  [m],  $R = 0.1$  [m],  $Mg = -7$  [N],  $\alpha = \pi/18$  [rad],  $\tau_1 = 2$  [Nm],  $\tau_2 = 1$  [Nm] に対して得られた結果である．Fig. 14 の  $x_G = 0.0$  付近に注目すると，この場合には  $y_G^1 = -0.2$  [m] と  $y_G^2 = -0.55$  [m] の 2 個所で  $y_G$  成分に関する平衡点が存在していることが分かる．ただし， $y_G^1$  の方はそこから少し上にずれるとパーム側に，また，少し下にずれると下の平衡点に移動する．つまり， $y_G^1$  は不安定平衡点である．これに対して， $y_G^2$  から上下にずれても， $y_G^2$  に戻ろうとする復元力が働くから，この点は安定平衡点である．これは，一

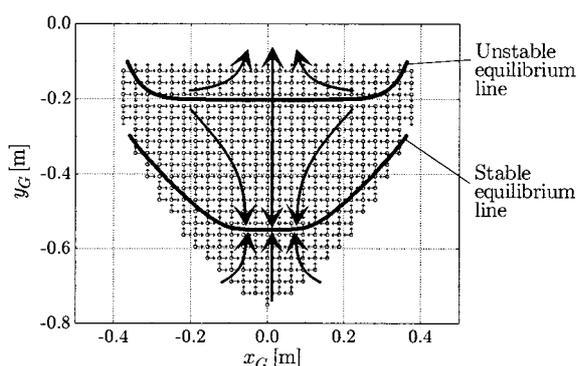


Fig. 14 Force flow diagram for a cylindrical object ( $n = 360$ ,  $l = 1.0$  [m],  $R = 0.1$  [m],  $Mg = -7$  [N] and  $\alpha = 0$  [rad])

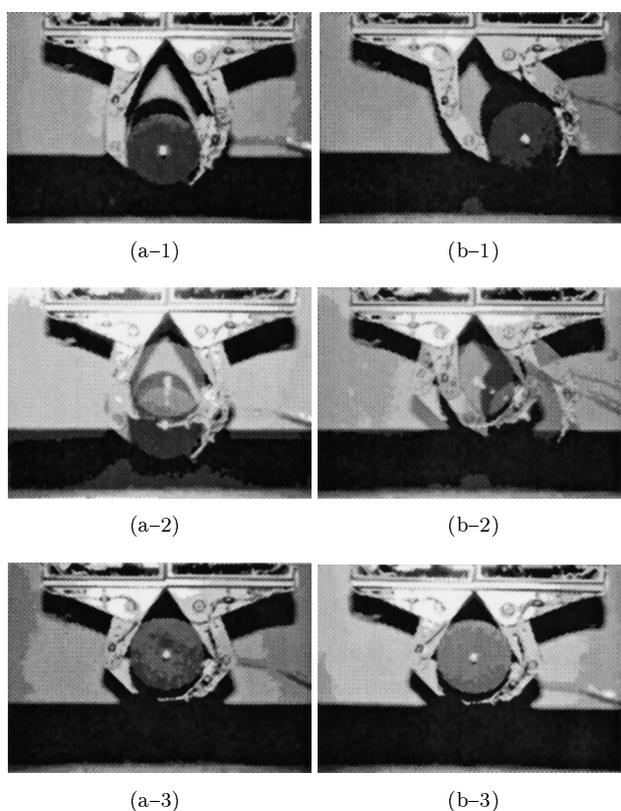


Fig. 15 The behaviour of object after removing a disturbance

定トルク指令が重心位置に応じて変化する接触点と接触力を介して最終的に合力に変換される非線形マッピング過程で作り出された現象であるものと推察される。

### 6. 実験

実験で使用したロボットハンド [6] は 3 本指 3 関節 (合計 9 関節自由度) を有する。各指ユニットの大きさは人の指の大きさとほぼ同じで、リンク長は根元側から順に、40, 25, 25 [mm] である。モータの駆動力はワイヤ、プーリによって各関節に伝達される。また、各関節には関節角度センサとトルクセンサを持つが、触覚に相当するセンサは持っていない。

Fig. 15 は、ハンドの各関節を一定トルク制御にした下で、円柱物体 (半径 55 [mm]) に (a) 鉛直方向 (b) 右斜め下約  $\pi/4$  [rad] 方向の初期位置を与えた状態からの遷移過程を示した写真である (a-1) (a-3) はそれぞれ初期状態と最終状態を表し (a-2) は途中の遷移過程をシャッター開放状態で撮影したものである。対象物中心に装着された LED により対象物中心の軌跡が示されている。この実験より、パーム中心位置へ向かう復元力が作用しているのが観察できる。シミュレーションは 2 リンクモデルで実験用ハンドは 3 リンクを有するため、厳密な意味で比較をすることはできないものの、Fig. 9 のフォースフロー線図から予想される対象物の動きと、実験での動きは定性的に一致していることが分かる。

### 7. 考察

本論文では、各関節に与えるトルク指令値と幾何学的な姿勢から接触力の合力のとり得る範囲を求め、それによってハンド内にある対象物の挙動について考察した。今回は、幾何学的姿勢を決定したのち接触力のシミュレーションを行ったが、フォースフロー線図を観察すると、対象物の挙動を視覚的に得ることができる。この図によると、対象物を包み込むハンドのリンク姿勢にはポテンシャルのようなものが存在し、ある程度の範囲であれば、初期姿勢にかかわらずある定められた位置へ対象物を移動させることができる。例えば、二次元の例では対象物は常に内側へ向けて移動しようとする傾向があり、適当な摩擦力の範囲であればどの姿勢を初期姿勢としても 2 本指の中心へ戻ろうとする (Fig. 9, 10)。

ここで、2 本指のトルク指令値に差を与えると、水平方向の平衡位置は変化する。このように各関節のトルク指令値を変化させることで、対象物を  $S_G$  で定義された閉パイプ内を移動させることも可能となる。つまり、包み込み把握による、ゆるい意味での操りが可能になるものと思われる。

### 8. 結論

多指ロボットハンドによる包み込み把握の持ち上げ相について考察し、以下のことを示した。

- (1) 包み込み把握の持ち上げ相における、遷移安定性に関する基本概念を定義した。
- (2) 包み込み把握における対象物の移動方向を調べるのに便利なツールとして、フォースフローおよびフォースフロー線図を導入した。
- (3) 正多角柱物体、球に対して、持ち上げ相のフォースフロー線図を算出し、遷移安定性について考察した。その結果、柱状物体に対して持ち上げ相の遷移安定性は確保できるが、球の場合は確保しづらいことを示した。
- (4) 一定トルク制御で持ち上げ相を実現する場合に、安定平衡点と不安定平衡点が同時に存在する場合があることを発見した。
- (5) 包み込み把握状態にある円柱物体に対してパーム中心方向に向かう復元力が作用することを実験的に検証し、フォースフロー線図と定性的に一致することを示した。

最後に、本研究は科学研究費補助金重点領域（知能ロボット）の研究の一環として行われているものであることを付記しておく。また、本研究に協力していただいた日野裕氏（現、シャープ（株））に心より感謝の意を表す。

### 参 考 文 献

- [1] S. Sugano, S. Tsuto and I. Kato: "Force control of the robot fingerequipped with a mechanical compliance adjuster," Proc. IEEE/RSJ Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2005-2013, 1992.
- [2] T. Okada: "Computer control of multijointed finger system for precise object-handling," IEEE Trans. on SMC, vol.12, no.3, pp.289-299, 1982.
- [3] 前川, 谷江, 金子, 木村, 今村: "位置・剛性制御形 3 本指ハンドによる持ち替え動作の実現", 日本機械学会口ボメカ '91 講演論文集, pp.253-254, 1991.
- [4] 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.
- [5] M. Kaneko, Y. Tanaka and T. Tsuji: "Scale-dependent grasp," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2131-2136, 1996.
- [6] M. Kaneko, Y. Hino and T. Tsuji: "On Three Phases for Achieving Enveloping Grasps," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.385-390, 1997.
- [7] M. Kaneko, N. Thaiprasert and T. Tsuji: "Experimental Approach on Enveloping Grasp for Column Objects," Preprint of Experimental Robotics, pp.17-27, 1997.
- [8] K. Mirza and D.E. Orin: "Control of force distribution for power grasp in the DIGITS system," Proc. of the IEEE 29th CDC Conf., pp.1960-1965, 1990.
- [9] 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, 1996.
- [10] X-Y. Zhang, Y. Nakamura, K. Goda and K. Yoshimoto: "Robustness of power grasp," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2828-2835, 1994.
- [11] M. Jeannerod: "Attention and performance, chapter Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects," pp.153-168, Erlbaum, Hillsdale, 1981.
- [12] C. Bard and J. Troccaz: "Automatic preshaping for a dexterous hand from a simple description of objects," Proc. of the IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.865-872, 1990.
- [13] M. Kaneko and K. Honkawa: "Contact Point and Force Sensing for Inner Link Based Grasps", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2809-2814, 1994.
- [14] J.C. Trinkle and R.P. Paul: "Planning for dexterous manipulation with sliding contacts," J. of Robotics Research, vol.9, no.3, pp.24-48, 1990.
- [15] J.C. Trinkle and R.P. Paul: "The initial grasp liftability chart," Trans. on Robotics and Automation, vol.5, no.1, pp.47-52, 1989.
- [16] J.C. Trinkle, J.M. Abel and R.P. Paul: "Enveloping, frictionless planar grasping," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1987.
- [17] J.K. Salisbury: "Whole-Arm manipulation," Proc. of the 4th Int. Symp. of Robotics Research, Santa Cruz, CA, 1987. Published by the MIT Press, Cambridge MA.
- [18] J.K. Salisbury, W. Townsend, B. Eberman and D. Dipietro: "Preliminary design of a Whole-Arm Manipulation System (WAMS)," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, p.254, 1988.
- [19] A. Bicchi: "Force distribution in multiple whole-limb manipulation," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.196-201, 1993.
- [20] T. Omata and K. Nagata: "Rigid body analysis of the indeterminate grasp force in power grasps," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1787-1794, 1996.
- [21] W.S. Howard and V. Kumar: "A minimum principle for the dynamic analysis of systems with friction," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.437-441, 1993.
- [22] E. Rimon and A. Blake: "Caging 2D bodies by 1-parameter two-fingered gripping systems," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1458-1464, 1996.
- [23] K.P. Kleinmann, J. Henning, C. Ruhm and T. Tolle: "Object manipulation by a multifingered gripper: On the transition from precision to power grasp," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2761-2766, 1996.
- [24] V.D. Nguyen: "Contracting force-closure grasps," Int. J. of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.3-16, 1988.
- [25] 中村, 来島: "多面凸集合演算を用いたパワーグラスプの限界外力空間の計算", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.5, pp.728-735, 1997.



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生。1981年3月東京大学工学系研究科博士課程卒業。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）



東森 充 (Mitsuru Higashimori)

1974年3月9日生。1996年3月広島大学工学部第二類（電気系）卒業。同年4月広島大学大学院工学研究科（博士課程前期）情報工学専攻入学、現在に至る。ロボットハンド、アクティブセンシングなどの研究に従事。（日本ロボット学会学生会員）



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生。1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手、1994年同助教授、現在に至る。工学博士。人間とロボットの運動制御、ニューラルネット、マン・マシンシステムなどの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、電気学会、電子情報通信学会などの会員。（日本ロボット学会正会員）