

## スケール依存型把握

白井 達也\* 金子 真\* 辻 敏夫\*

## Scale-Dependent Grasp

Tatsuya Shirai\*, Makoto Kaneko\* and Toshio Tsuji\*

This paper discusses the scale-dependent grasp. Suppose that an object is initially placed on a table without touching by human hand and, then he (or she) finally achieves an enveloping grasp after an appropriate approach phase. Under such initial and final conditions, human unconsciously changes the grasp strategy according to the size of object, even though they have similar geometry. We call the grasp planning the scale-dependent grasp. Focusing on column objects, we first classified the grasp patterns into a couple of grasps and extracted the essential motions so that we can apply the scale-dependent grasp to multi-fingered robot hands. We found that the grasp patterns should be also changed according to the surface friction and the geometry of cross section of object in addition to the scale. The basic strategies were verified by experiments. Finally, we considered how each strategy should be switched from one to another.

**Key Words:** Scale Dependent Grasp, Multi-Fingered Robot Hand, Column Objects

## 1. はじめに

多指ロボットハンド（以下、単にロボットハンドと略記）の研究は数多く行われており、それらは指先把握と包み込み把握に大別できる。指先把握は指先のみで対象物を操作する把握形態で、器用さ、繊細さを追求している [1] ~ [4]。それに対して包み込み把握（またはパワーグラスプ）はリンクと対象物との間に複数の接触を許す把握形態で、頑丈さ、力強さを強調している。本研究では、後者の包み込み把握に着目する。包み込み把握に関するこれまでの研究は、把握状態における接触力解析、接触点センシング、把握のロバスト性を論じたものがほとんどで、無拘束状態の対象物に対して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構築するという一連の把握戦略を統一的に論じた研究はほとんどない。この問題へのヒントを得るため、Fig. 1 のようにテーブル上に置かれた対象物の包み込み把握実験を行ったところ、面白いことが分かってきた。ヒトは幾何学的形状が同じ対象物であっても、対象物の大きさに応じて把握戦略を自然に切り替えている。これはごく当たり前のことかもしれないが、筆者らの知る範囲において、スケール効果を意識したロボットハンドの研究は、これまで行われていないように思われる。この対象物のスケールに依存して把握パターンを切り替えることを本研究では、Scale-Dependent Grasp と呼ぶことにする。

本論文では対象物を柱状物体に限定し、対象物の大きさ、形状、表面摩擦に応じてヒトが選択している把握パターンを分類すると共に、把握パターンを切り替える必然性について考察する。次にロボットハンドへの応用を意識した上で、観察された把握パターンから動作の目的を抽出する。本研究では、マスタースレープ方式で行われるように、ヒトの把握動作の時系列パターンを厳密にロボットハンドで再現しようとしている訳ではない。このようなマスタースレープ方式は、ヒトの手と同じ自由度構成、指本数、指形態をもつロボットハンドでは有効に動作するかもしれないが、設計思想の異なったロボットハンドにヒトの動きをそのまま入力しても、把握が上手く実現できる保証はない。これに対して、ヒトによる把握パターンがどのような目的を達成するために生成されているのかという動作の意

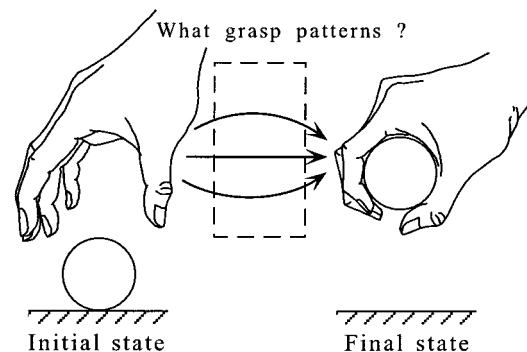


Fig. 1 Enveloping grasp for an object placed on a table

原稿受付 1998年5月12日

\*広島大学工学部

\*Hiroshima University

味を見極めることができれば、自由度構成、指本数、指形態の異なった様々なロボットハンドに対し、共通した思想に基づいて把握戦略を構築することができる。このような視点に立ち、論文の後半部では、ヒトが対象物のスケールに応じて変える把握パターンから動作の目的を整理し、その目的を達成するための把握戦略をロボットハンド用に再構築する。更に各把握戦略間の切り替え方法についても考察する。

## 2. 関連研究

ヒトによる把握の研究：ロボットハンドの研究において、ヒトの挙動を参考にした論文がいくつか発表されている [5]~[8]。Cutkosky [5] は道具を用いた作業におけるヒトの把握動作を指先把握を前提とした precision grasp と包み込み把握を前提とした power grasp とに分類し、ロボットハンドの設計に応用している。Bekey [6] は、把握に関する幾何学的な情報とヒューリスティックなタスク情報を記述した知識ベース GeSAG を構築し、指定された把握作業を実現する手順を自動生成するシステムを提案している。Kang and Ikeuchi [7] は、ロボットハンドへの応用を前提としてヒトによる把握形態の自動分類方法について考察している。

アプローチ相：Jeannerod [9] はヒトの把握動作を観察し、ヒトは対象物の形状に応じてアプローチ相の段階で対象物の形状、大きさに応じた指姿勢を作り出していることを報告している。Bard and Troccaz [10] は、アプローチ相におけるヒトの指姿勢の特徴的な形状を画像処理により抽出し、2本指ロボットハンドへの応用を試みている。Kaneko and Honkawa [11] は位置制御関節とコンプライアント関節とが混在するリンク系に対して、リンクと対象物との接触を維持したままリンク系の姿勢を変える自己姿勢変形動作を使った局所的な接触点検出法を提案している。

持ち上げ相：Trinkle and Paul [12] [13] 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 [14] 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, Abel and Paul [15] 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。Hirose ら [16] は2個のアクチュエータで複数の関節に対して同時に一定トルクが発生できるようなソフトグリップを提案している。Salisbury ら [17] [18] は多点接触を許して対象物を操る Whole-Arm Manipulation (WAM) の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解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制限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 and Nakamura ら [21] はパワーグラスプされた対象物に仮想変位を与え、その時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。Kleinmann ら [22] 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。Kaneko, Higashimori and Tsuji [23] は一定トルク指令を与えたときのロボットハンド内にある対象物の挙動を解析するツールとしてフォースフロー線図を導入している。

以上のようにヒトの把握を参考にした研究はいくつかあるものの、スケール効果を積極的に意識した研究は、これまでにほとんど行われていない。

## 3. ヒトによる把握パターンの観察

ヒトが対象物の大きさ、断面形状、そして摩擦係数に応じて把握戦略をどのように切り替えているのかについて調べるために、Fig. 2 に示す様々な対象物を用意した。断面形状は正三角形、正四角形、正六角形、真円の4種類とした。正三角柱の特徴は、テーブル上に置いたときにテーブルと三角柱斜面の作る角度が90度未満の鋭角となる点である。正四角柱はその角度が鋭角から鈍角になる境界で、正六角柱は円柱と正四角柱との間を埋めるものである。また対象物と指との間の摩擦力の違いによる影響を調べるために、画用紙とゴムシートにより表面を覆われた2種類の対象物を用意した。

対象物の大きさを正規化するために、 $d = L_o / L_h$  を定義する。ただし  $L_o$ ,  $L_h$  は、それぞれ対象物の外周および母指指先から示指指先までの長さである (Fig. 3)。 $d$  は無次元数であるため、被験者ごとに異なる手の大きさの影響を受けない形で結果を整理することができる。例えば同一の大きさの対象物でも、手の大きな被験者より、手の小さな被験者の方が  $d$  は大きな値

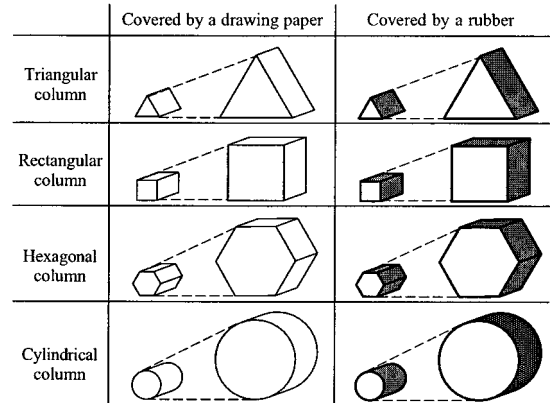


Fig. 2 Column objects used in the experiments

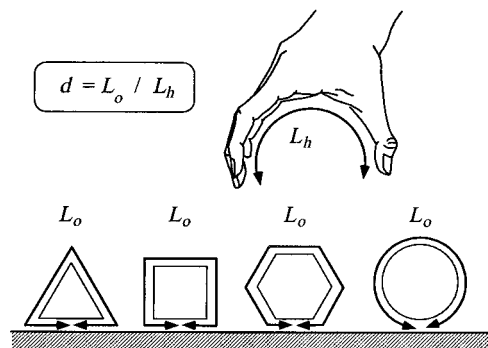


Fig. 3 Explanation of  $L_o$  and  $L_h$

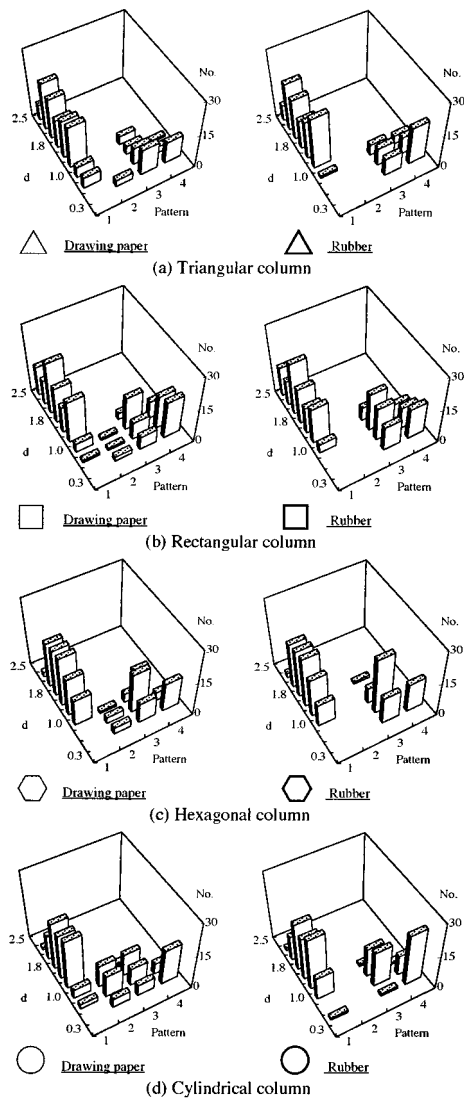


Fig. 4 Grasp pattern classification map

となる．ヒトの把握実験に用いる対象物は  $2.80 \geq d \geq 0.26$  の範囲で段階的に 6 種類用意した．被験者は 25 人である．

Fig. 4 はヒトによる把握実験の結果である．(a) から (d) はそれぞれ断面形状が正三角形，正四角形，正六角形，真円の対象物把握時の実験結果であり，それぞれ左のグラフは画用紙，右はゴムシートで表面が覆われた対象物を用いた場合である．なお，“Pattern” は以下に説明する特徴的な把握パターンの分類番号，“No.” はその把握パターンを選んだ被験者数である．以下に個々の把握パターンをまとめる．

**Pattern-1 (Direct grasp)**：指とテーブルとの間に干渉がないため，何ら複雑な動作を必要とせずに対象物を直接掴むパターン ( Fig. 5 (a) ) ．

**Pattern-2 (Sliding based grasp)**：主に指と対象物との間の滑りを利用した把握パターン．テーブルから対象物を引き離す過程において，指先を対象物とテーブルの間に押し込み，対象物を強制的に浮き上がらせ，一気にパームまで誘導する ( Fig. 5 (b) ) ．

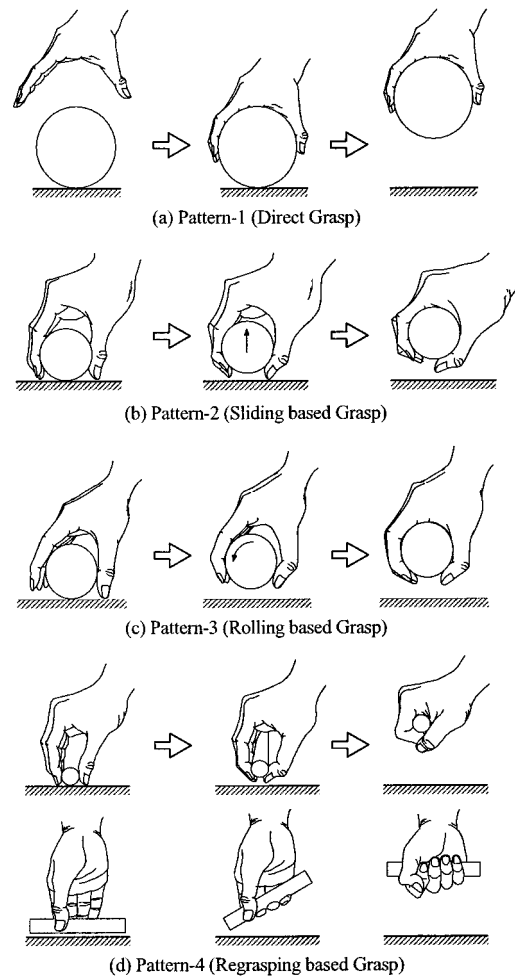


Fig. 5 Grasp patterns

**Pattern-3 (Rolling based grasp)**：テーブル上の対象物を一方の指で他方の指の表面に押し付けて，転がしながらテーブルより引き離す．テーブルから対象物が持ち上がったら，指を巻き付けながらパームまで誘導し，包み込み把握を完成する ( Fig. 5 (c) ) ．

**Pattern-4 (Regrasping based grasp)**：母指と示指 (あるいは中指) の指先で対象物をテーブルから摘み上げる動作と，残りの指で対象物をパームに引き寄せる動作の二段階に分かれているのが特徴である ( Fig. 5 (d) ) ．

大きな対象物 ( $2.8 \geq d > 1.0$ ) に対して，ヒトは断面形状や表面摩擦にかかわらず直接把握 (*Pattern-1*) する．一方，形状，表面摩擦の大小に関係なくすべての場合において， $d = 1.0$  付近で直接把握からそれ以外の把握パターンへと切り替わっているのが分かる． $1.0 \geq d \geq 0.5$  付近の対象物では *Pattern-2/3* が多く発生し，小さな対象物 ( $0.5 > d \geq 0.26$ ) に対しては *Pattern-4* が多く発生している．このような小さな対象物は把握する際にテーブルと指とが干渉するため，一旦，対象物を持ち上げてテーブルとの間の干渉を完全に断ち切ろうとする様子が伺える．滑りを利用した把握パターン (*Pattern-2*) は，特に円柱対象物で多く観察された．ただし表面摩擦が大き

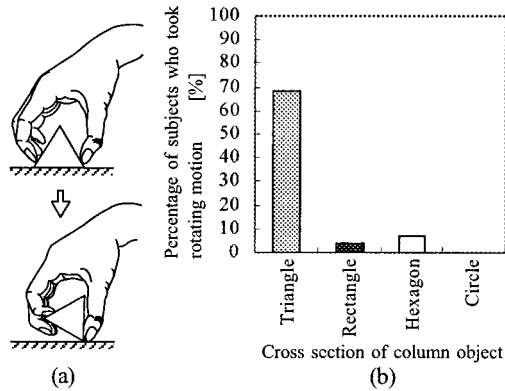


Fig. 6 Initial adjustment motion

な場合には、指と対象物との間に滑りを生じさせるのが困難になるため *Pattern-2* はまったく現れず、その代わりとして *Pattern-3/Pattern-4* が現れてくる。

興味深い点は、三角柱把握時に約 70 % の被験者が Fig. 6 (a) のように対象物を一つのエッジまわりで回転させて姿勢を変えてから、*Pattern-1* から *Pattern-4* の把握動作を行っている点である (Fig. 6 (b))。この初期の回転動作をここでは初期調整動作 (*Initial adjustment motion*) と呼ぶことにする。Fig. 6 より、初期調整動作は三角柱の把握時にのみ多く発生しており、三角柱対象物の把握において非常に重要な役割を担っていることが分かる。

#### 4. ロボットハンドへの応用

ヒトの把握動作を整理したときと同様に、Fig. 7 (a) のように、いくつかのパラメータを定義する。ロボットハンドと対象物のスケールを比較するパラメータを  $d_{robot} = L_o/L_r$  で表す。 $L_o$  はヒトの場合と同じく対象物外周の長さ、 $L_r$  は、ロボットハンドの指を開いたときの最も長い指先間の経路長で、先に定義した  $L_h$  に相当する。また対象物の等価直径を  $D_{object} = L_o/\pi$ 、ロボットハンド指先の直径を  $D_{finger}$  とする。

議論を簡単にするために、以下の仮定をたてる。

- (仮定 1) 対象物は正  $n$  角柱とする。
- (仮定 2) 対象物の大きさは、最大で包み込み把握した状態で対象物外周の 1/2 以上をロボットハンドで覆うことが可能な程度、かつ最小で指先により摘み上げ動作、または回転動作が可能な程度の大きさとする。
- (仮定 3) ロボットハンドはアーム先端に取り付けてあり、上下に移動可能とする。またアーム先端の位置はアームの各関節角度センサにより検出可能とする。
- (仮定 4) 対象物はロボットハンドの可動範囲内に置かれているものとする。
- (仮定 5) パームの長さ  $l_p$  は、Fig. 7 (b) のように各第一関節を可動範囲限界まで閉じた状態で、全第一リンクが最も小さな対象物と接触可能な長さとする。
- (仮定 6) ロボットハンドの各関節にはトルクセンサおよび角度センサが、パームには触覚センサが備わっているものとする。

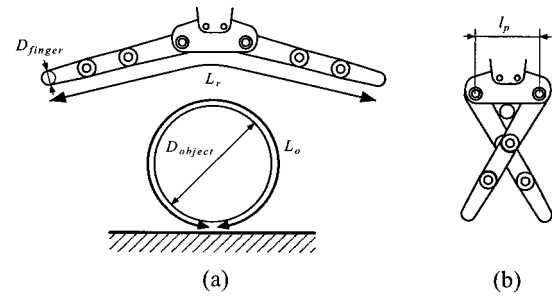


Fig. 7 The relation between the robot hand and the object

(仮定 7) ロボットハンドの各関節は対象物の重さに十分打ち勝つことのできるトルクを発生し得るものとする。

なお、本稿にて実験に用いたロボットハンドは、1 指あたり三つの関節を有する同一の指ユニットを三つ組み合わせた 3 関節 3 本指の構成である。リンク長は、パーム側より  $l_1 = 40$  [mm]、 $l_2 = 25$  [mm]、 $l_3 = 30$  [mm] である。また各関節の回転角度を計測するためのロータリーエンコーダ、関節トルクを計測するトルクセンサ、およびパームには ON/OFF 式の触覚センサが取り付けられている。詳しい構造については参考文献 [28] を参照されたい。

#### 4.1 ヒトの把握動作の解釈とロボットハンドへの応用

はじめに、ロボットハンドへの応用を意識して、ヒトの把握パターンの裏に隠された意味について探る。テーブルに置かれた対象物にヒトがアプローチし、最終的に包み込み把握する一連の動作は複雑であるものの、動作の目的は Direct grasp を除き、以下の二点に集約される。

- (1) 対象物をテーブルから引き離してハンド内に入れること。
- (2) 対象物に拘束を加えて包み込むこと。

(2) の包み込みについてはパワーグラスプの研究でよく用いられている一定トルク制御を利用する。一定トルク制御はロボットハンドの各関節に設置されたトルクセンサ出力が指令トルクになるようにアクチュエータ入力電流を調整することにより実現している。なお、トルク制御の詳細については参考文献 [27] を参照されたい。一定トルク制御を用いると、与えられたトルク指令値に応じて自動的に指リンクと対象物との接触力、リンク姿勢などが決まるという利点を生かすことができる。一方、(1) の対象物をテーブルから引き離してロボットハンド内に入れる動作は、ロボットハンドの機構、自由度にも依存するため、把握アルゴリズムの詳細はロボットハンドごとに対応せざるを得ないが、Direct grasp を除き、基本的には“如何にして対象物の底面に指を入れるか”という問題に帰着する。

次いで、本研究における包み込み把握完成の条件を定義する。

#### [包み込み把握完成の条件]

対象物をテーブルから持ち上げた状態で、全関節が一定トルク制御下であり、かつ対象物とロボットハンドが平衡状態にあるときに、すべての指の第一リンクが対象物に接しているならば、ロボットハンドは対象物を包み込み把握していると判定する。

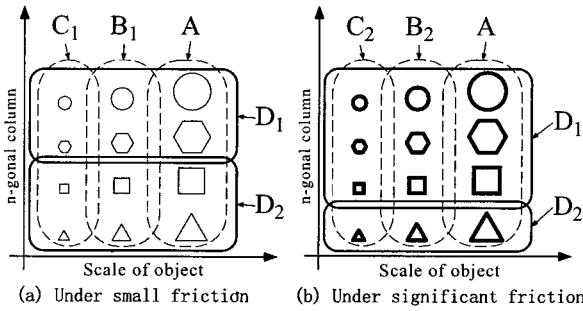


Fig. 8 The map for choosing an appropriate strategy for achieving envelop grasp

Table 1 Groups of grasping strategies

Group	Grasp strategy
A	Direct grasp
B <sub>1</sub>	Sliding based grasp
B <sub>2</sub>	Rolling based grasp
C <sub>1</sub>	Regrasping based grasp
C <sub>2</sub>	Regrasping based grasp with Rolling motion
D <sub>1</sub>	Without Rotating motion
D <sub>2</sub>	With Rotating motion

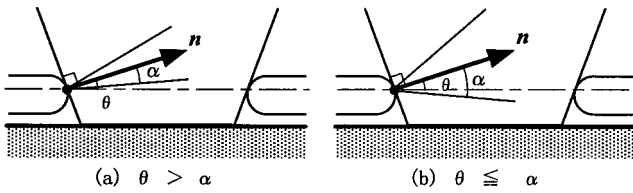
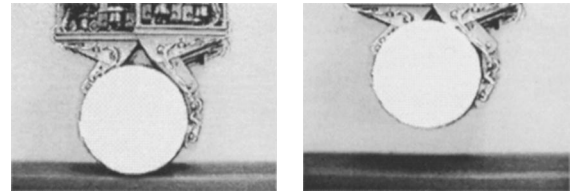


Fig. 9 Two kinds of the contact frictions

Fig. 8 はヒトの把握実験結果を参考にしてまとめた対象物の大きさ、断面形状、摩擦係数に応じて把握戦略を選択するためのガイドラインであり、Table. 1 は図中の各グループ A ~ D の名称である。Fig. 8 (a) は対象物と指との間の摩擦が小さい場合 ( $\theta > \alpha$ )、Fig. 8 (b) は摩擦が大きい場合 ( $\theta \leq \alpha$ ) である。ただし、 $\alpha$  は摩擦角、 $\theta$  は Fig. 9 のように水平方向と接触点における法線方向ベクトル  $n$  のなす角度とする。横軸は対象物の大きさ、縦軸は対象物の断面形状を表している。対象物の大きさ、形状、摩擦係数によって大きく六つのグループに分けることができる。

比較的大きな対象物 ( $d_{robot} > 1.0$ ) は形状によらずグループ A で対応できる。対象物が小さくなるとグループ B<sub>1</sub>/B<sub>2</sub> へ、さらに小さく ( $D_{object} < D_{finger}$ ) になるとグループ C<sub>1</sub>/C<sub>2</sub> へ切り替える必要がある。

表面摩擦が小さいうちはグループ B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub> が適していた対象物であっても、表面摩擦が大きくなるに従い、それぞれグループ B<sub>2</sub>、C<sub>2</sub> へ切り替えなくてはならなくなる。グループ D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub> も表面摩擦の大きさにより領域が変化する。例えば表面摩擦が小さい場合、正三角柱、正四角柱は初期調整動作を行わないと包み込み把握は難しい。しかし表面摩擦が大きい場合は、正三角柱、正四角柱でも対象物を滑らすことなく掴み上げることが



(a) Approaching phase (b) Lifting/Grasping phase

Fig. 10 Direct grasp

でき、初期調整動作は不要になる。Fig. 8 (a) (b) においてグループ D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub> の領域が微妙に異なるのは、この辺を意識してグループ分けしたためである。

正  $n$  角柱を想定した場合、正三角柱 / 正四角柱を除いて、基本的に円柱の把握アルゴリズムでほぼ対応することができる。この点を踏まえて、4.2 節では円柱を例にとってアルゴリズムを説明し、4.3 節では正三角柱 / 正四角柱について説明する。

以下、筆者らの研究で開発された 3 本指口ロボットハンドに対して先の把握動作の目的 (1) および (2) が、どのようにして達成されているのかを個々のグループごとに具体的に説明してみよう。

4.2 初期調整動作が不要な場合: グループ D<sub>1</sub>

グループ A ( $d_{robot} > 1.0$ ): Direct grasp

この条件を満たす対象物は、対象物にロボットハンド全体を巻き付けても、まだ指先とテーブルとの間に隙間が残る。Fig. 10 (a) のようにロボットハンドを対象物に巻き付けるために、各関節に一定トルク指令を与える。確実に対象物を把握した後は Fig. 10 (b) のようにロボットハンドを上昇させて、包み込み把握を完成させる。

- |                   |           |
|-------------------|-----------|
| (1) 対象物底面への指の挿入動作 | : 不要      |
| (2) 包み込み動作        | : 一定トルク指令 |

Direct grasp を行った場合、仮定 2 によりロボットハンド全体で対象物外周の 1/2 以上を覆うことが保証されるため、各指は、指先先端が内側を向く幾何学的に閉じた把握姿勢をとる。よって摩擦係数が 0 でない限り、摩擦係数に関係なく対象物を床より持ち上げることができる。

グループ B<sub>1</sub> ( $d_{robot} < 1.0$  摩擦小)  
: Sliding based grasp

対象物と指との間の滑りを利用して対象物をテーブルから引き離してから、ロボットハンド内へ対象物を誘導する。Fig. 11 (a) のように指を開いた状態から、指先がテーブルに接触するまで指を徐々に下ろす。次に各指先を Fig. 11 (b) のように対象物に接するまでテーブルに沿って移動させる。テーブルと指との接触および指と対象物との接触判定は関節トルクセンサで行う。次のステップとして、各関節に一定トルク指令を与えることで各指先は Fig. 11 (c) のように自動的に対象物下部とテーブルとの間に押し込まれ、対象物はテーブルから持ち上げられる。この現象はくさび効果として知られている。トルク指令値をうまく選定しておく、対象物がテーブルから持ち上がった後、

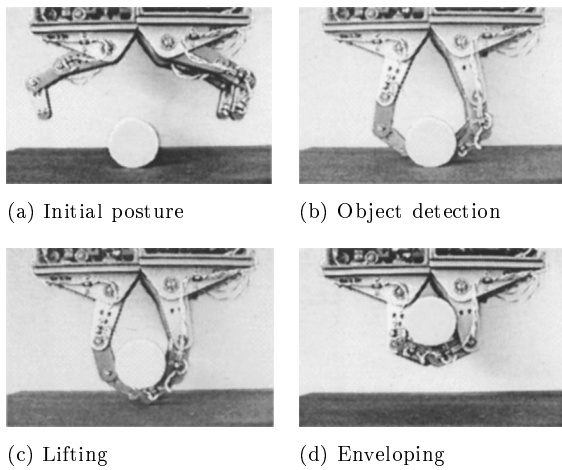


Fig. 11 Sliding based grasp

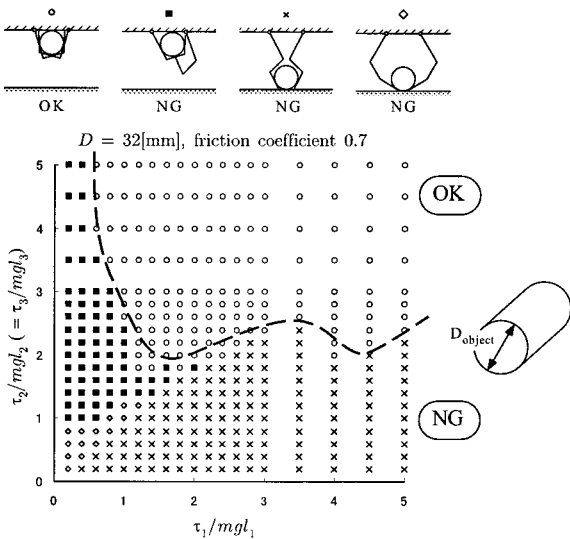


Fig. 12 Success map for a cylindrical object ( $\mu = 0.7$ )

Fig. 11 (d) のように自動的に包み込み把握が完成する .

- (1) 対象物底面への指の挿入動作 : 一定トルク指令
- (2) 包み込み動作 : 一定トルク指令

Fig. 12 は  $D_{object} = 32$  [mm] の円柱対象物に対して、様々なトルク指令のもとで Sliding based grasp を行った実験結果である . 図中の横軸, 縦軸は, それぞれロボットハンドの 3 本の指の第一関節, 第二関節へ与えるトルク指令値の大きさ  $\tau_1, \tau_2$  を対象物の重量  $mg$  と各リンクの長さ  $l_1, l_2$  を使って正規化した無次元数である . 第三関節に与えるトルク指令値は  $\tau_3 = \tau_2(l_3/l_2)$  としている . ロボットハンドと対象物との間の表面摩擦係数は  $\mu = 0.7$  である .  $\circ, \times$  の各記号は, 横軸 / 縦軸に示すすべてのトルク指令値の組み合わせを各関節に与えたときの最終的な指の姿勢を表している .  $\circ$  は包み込み把握が成功したトルク指令値の組み合わせ, それ以外の記号 ( $\times, \bullet$ ) は, それぞれ把握失敗時のトルク指令値の組み合

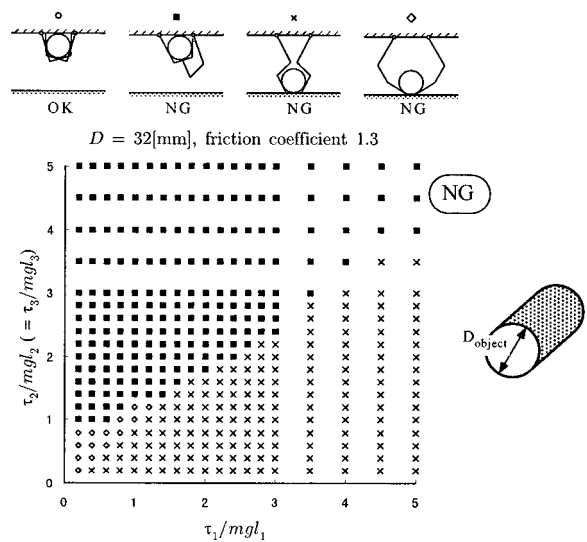


Fig. 13 Success map for a cylindrical object ( $\mu = 1.3$ )

わせである . 摩擦係数  $\mu = 0.7$  程度の表面摩擦以下ならば, 包み込み把握を成功させられるトルクの組み合わせ領域は比較的広い範囲で確保できることが分かる .

グループ B<sub>2</sub> ( $d_{robot} < 1.0$  摩擦大)  
: Rolling based grasp

Fig. 13 は表面摩擦係数  $\mu = 1.3$  の円柱対象物 ( $D_{object} = 32$  [mm]) に対して Sliding based grasp を行った実験結果である . このように摩擦係数が大きくなると Fig. 12 の場合と異なり, 包み込み把握の成功する の領域は存在しなくなる . つまり対象物底面へ指を入れる動作, その対象物を包み込み把握する動作共に, 一定トルク制御では実現できない .

表面摩擦が大きい場合は, ころがり運動を利用した把握戦略を導入する . 対象物を検出した後, Fig. 14 (a) のように左指を使って対象物を右側の指先表面に沿って転がす . 転がすと同時に右指に一定トルク指令を与えることで, 指を対象物に巻き付けながら床から持ち上げていく . Fig. 14 (b) のように左指 (あるいは右指) の可動範囲限界まで到達するか, または対象物がパームに接触したならば, Fig. 14 (c) のように左指を対象物から離す . 次いで, 右指を対象物がパームに接するまで曲げ, 改めて左指を対象物に巻き付け, 一定トルク制御に切り替えれば Fig. 14 (d) のような包み込み把握が完成する . もし左指を離れたことにより対象物が転がり落ちようとするならば, その対象物は Rolling based grasp を適用できない対象物であると判断し, 別の把握戦略に切り替える .

- (1) 対象物底面への指の挿入動作 : ころがり動作
- (2) 包み込み動作: 巻き付け動作後, 一定トルク指令

グループ C<sub>1</sub> ( $D_{object} < D_{finger}$  摩擦小)  
: Regrasping based grasp

このグループの対象物は, 対象物直径が指先先端の大きさに比べて小さいため, くさび効果を利用してロボットハンド内へ

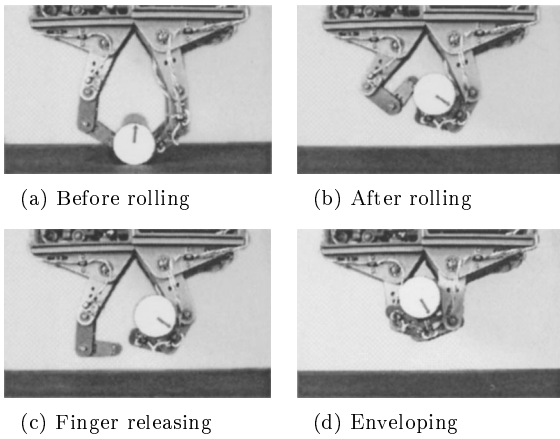


Fig. 14 Rolling based grasp

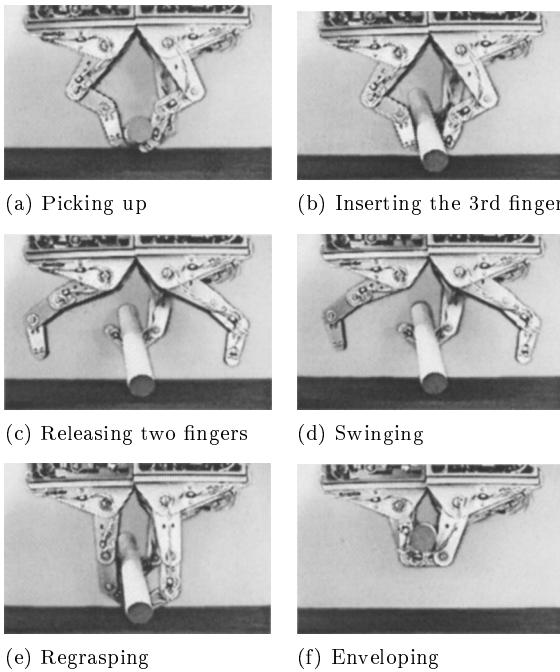


Fig. 15 Regrasping based grasp

対象物を入れることができない．そこで，左右の指先で対象物を挟み込んでテーブルより摘み上げ，その結果生じるテーブルとの隙間に指を挿入することで指先を対象物の底面へ入れる．Fig. 15 (a) のように対象物を保持し，対象物の一端を持ち上げることでテーブルとの間に隙間を作る．次に Fig. 15 (b) のように三本目の指を挿入して支えとし，先に摘み上げに用いた二本の指を Fig. 15 (c) のように離す．次に包み込み把握する際に指同士の干渉を避けるために，左側の指を Fig. 15 (d) のように右側の二本の指の間に入る角度に回転させる．最後に，開いている二本の指に一定トルク指令を与えて Fig. 15 (f) のように包み込み把握を完成する．この一連の動作はヒトが行っている動作とは大きく異なっている．ヒトは一旦，対象物をテーブルから持ち上げて空中で持ち替え動作を行っているが，ロボットハンドの場合は指本数が三本と少なく，空中で持ち替え動作を行うときに対象物を落下させてしまう恐れがあるため，テ-

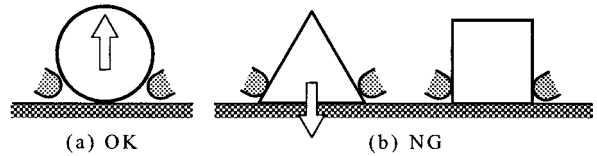


Fig. 16 Examples of objects where the upward force is not expected by a simple pushing motion

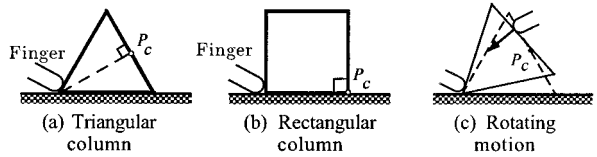


Fig. 17 Pushing point  $P_c$  for triangular and rectangular object

ブル面を積極的に利用して持ち替え動作を行わせている．ただし，強調しておきたいことは，いずれの場合も動作の目的は対象物底面への指の挿入である．

- |                   |           |
|-------------------|-----------|
| (1) 対象物底面への指の挿入動作 | : 持ち替え動作  |
| (2) 包み込み動作        | : 一定トルク指令 |

グループ  $C_2$  ( $D_{object} < D_{finger}$  摩擦大)  
: Regrasping based grasp with Rolling motion

このグループの対象物は，テーブルから対象物を引き離して指先を対象物底面に入れるためにグループ  $C_1$  (Regrasping based grasp) と同じ持ち替え動作を行う．しかし表面摩擦が大きいため，一定トルク指令で対象物をパームまで移動させることができないため，テーブルから持ち上げた後はグループ  $B_2$  (Rolling based grasp) と同じく，ころがり運動によってパームまで対象物を移動させる．

- |                   |                   |
|-------------------|-------------------|
| (1) 対象物底面への指の挿入動作 | : 持ち替え動作          |
| (2) 包み込み動作        | : 巻き付け動作後，一定トルク指令 |

#### 4.3 初期調整動作が必要な場合：グループ $D_2$

Fig. 16 (a) のような断面形状を有する対象物は，左右から対象物下部とテーブルの間に指先を押し込むことで上向きの力を発生させられるが，Fig. 16 (b) のような断面形状の対象物の場合，下向きの力が発生してしまうか，あるいは指先力が物体内でバランスし，たとえ接触力を増やしても持ち上げ力は期待できない．このような対象物を把握する場合，ヒトと同様に，包み込み把握動作の前に初期調整動作を行う必要がある．

対象物に，片側のエッジまわりの回転モーメントを与えるために指先で押す点  $P_c$  を考える．点  $P_c$  は Fig. 17 (a) のように，回転支点から対象物表面へ引かれた直線が直角に交わる点である．この点  $P_c$  より上の位置を対象物表面の垂直方向へ押せば，たとえ摩擦係数がゼロでも指先が滑ることなく対象物に回転モーメントを生成することができる．対象物の幾何学的形状によっては点  $P_c$  が対象物表面に存在しない場合もあるが，正  $n$  角柱を仮定する限り，点  $P_c$  は必ず対象物表面上に存在す

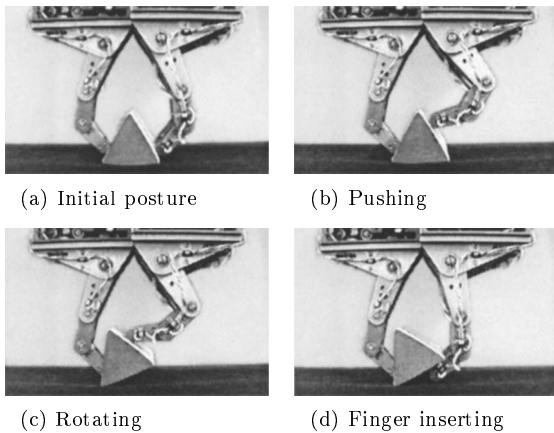


Fig. 18 Initial adjustment motion (Rotating motion)

る．例えば正三角柱の場合は Fig. 17 (a) のように斜面の中点であり，正四角柱の場合は Fig. 17 (b) のように支点のエッジと反対側のエッジに対応する．もしロボットハンドに指先触覚センサが備わっていれば，点  $P_c$  は容易に検出できるが，そのような触覚センサがなくてもコンプライアント関節と位置制御関節を組み合わせると自己姿勢変形動作を行えば，指先の軌道から点  $P_c$  を求めることができる [26] ．

対象物を Fig. 18 (a) のように指先で位置合わせする．次に Fig. 18 (b) のように右指で点  $P_c$  より上部を押し下すことで，左指先端を中心として対象物を Fig. 18 (c) のように回転させる．最後に，回転により生じたテーブルとの間の空間に右指を挿入することで，Fig. 18 (d) のように三角柱の底面に指を挿入することができる．この後の動作は，4.2 節で説明した初期調整動作を必要としない場合の各把握アルゴリズム中の持ち上げ動作以降の手順を実行すればよい．

#### 4.4 把握戦略間の切り替え

今回提案する把握戦略の切り替えアルゴリズムは，Scale-Dependent grasp の考え方に基づき，対象物のスケールに応じて三つの戦略ブロックを切り替える．対象物の上部に位置するロボットハンドを下降させ，パーム（あるいは指）に対象物が接触したときのテーブルからハンドまでの高さより，対象物のスケールは，ほぼ判明する．もし対象物のスケールが二つの戦略ブロックの境界近傍にある場合は，把握動作の簡単なブロックから順に試行する．例えば Sliding based grasp は Regrasping based grasp より圧倒的に簡単であるため，両者の境界では必ず Sliding based grasp を優先的に実行する．同様に，摩擦係数が不明な状態では把握動作の複雑な Rolling based grasp ではなく，単純な Sliding based grasp を優先的に選択する．このように把握動作の簡単な戦略から試みて，把握に失敗した場合，順次複雑な把握戦略へと切り替えていくことは，複数のアルゴリズムを切り替える上では最も自然な方法といえよう．選択した把握戦略が失敗してはじめて，次の把握戦略を選択するのに必要な情報のみを調べるようにすれば，無駄なセンシング動作を実行しなくて済む．

Fig. 19 は把握戦略切り替えの流れを示した図である．二重線で囲まれた把握戦略は初期調整動作を伴わないもの，太線

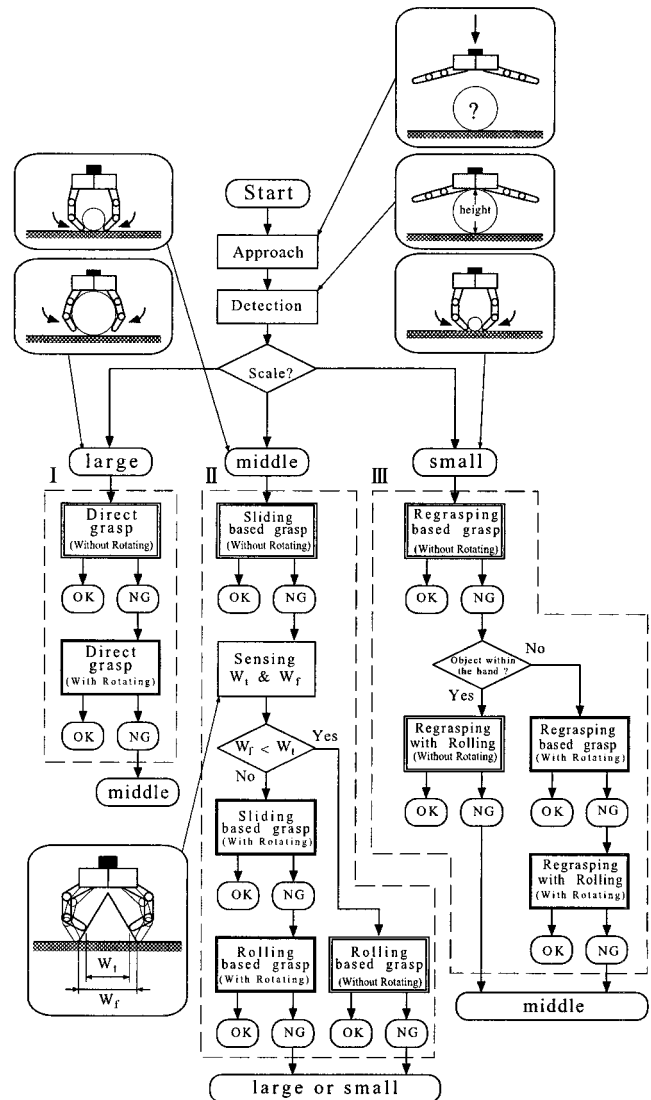


Fig. 19 The strategy flow diagram

枠で囲まれた把握戦略は初期調整動作を伴うものである．戦略ブロック I は Direct grasp を行うブロックである．表面摩擦が極端に大きい場合を除き，正三角柱および正四角柱を回転させずに Direct grasp するのは困難である．このような場合には初期調整動作を伴う Direct grasp を行う．初期調整動作を伴う Direct grasp を試みても把握が失敗する場合は，対象物の大きさが実際には Direct grasp するには小さかったと判断し，戦略ブロック II へ移行する．

戦略ブロック II は Sliding based grasp および Rolling based grasp を行うブロックである．はじめに対象物の表面摩擦が十分に小さいと想定して，把握動作の単純な Sliding based grasp を試みる．Sliding based grasp は対象物表面の摩擦係数が大きいか，または対象物断面形状が正三角形／正四角形の場合，くさび効果が利用できない．いくら指先力を増やしてもロボットハンドの姿勢が変わらなかつたり，大きな力を加えずに回転に対して対象物が不安定になったりして，先に定義した包み込み把握完成の条件を満たさない場合に把握は失敗したと判定



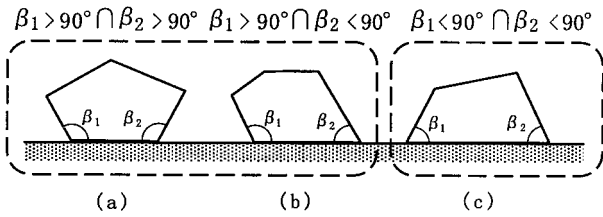


Fig. 20 Grouping of column objects whose cross sections are convex

する。Sliding based grasp/Rolling based grasp 共に、対象物が正三角柱あるいは正四角柱である場合は、初期調整動作が必要なことが多い。対象物形状は、対象物底部の幅  $W_f$  と、それより少し上方の位置での対象物の幅  $W_t$  より予測できる。 $W_f, W_t$  は、対象物に左右のロボットハンド指先を接触させ、両指先の共通接線を引くことで、それぞれ近似的に計測できる。もし  $W_f \geq W_t$  ならば、対象物は正三角柱あるいは正四角柱であり、 $W_f < W_t$  ならば正五角柱以上である。戦略ブロック II により包み込み把握が成功しなかった場合は、対象物のスケールに応じて、戦略ブロック I あるいは戦略ブロック III へ移行する。

戦略ブロック III は Regrasping based grasp を行うブロックである。最初に初期調整動作を必要とせず、かつ摩擦が小さいことを想定して、初期調整動作を伴わない Regrasping based grasp を実行する。把握に失敗した場合は、対象物がどの状態で失敗に至ったかを調べ、もし対象物がロボットハンド内に入った状態で失敗した場合は摩擦が大きくて一定トルク指令による持ち上げ動作ができなかったという推論にたち、Rolling 動作を伴う戦略に切り替える。一方、対象物がテーブルから離れなかった場合には、三角柱/四角柱の可能性を想定し、初期調整動作を伴う戦略に移行する。それでも包み込み把握が成功しないならば、対象物が極端に小さい場合を除き、戦略ブロック II へ移行する。

なお、この切り替え戦略に基づく把握実験は、ビデオプロシージング [29] に含まれているので、興味のある読者は参照されたい。

5. 考 察

本章では、正  $n$  角柱という仮定を外し、より一般的な凸多角柱を想定した場合、4 章でまとめた把握戦略がどこまで成り立つのかといった点について吟味する。

はじめに、対象物を正  $n$  角柱から一般的な凸多角柱に拡張した場合に、4 章で提案した把握戦略が実質的に適用できないケースを考えてみよう。一般的な凸多角柱を Fig. 20 のようにエッジとテーブルとのなす角度  $\beta_1, \beta_2$  によって、(a)  $\beta_1, \beta_2$  共に 90 度より大きい対象物、(b) 片方だけ 90 度より大きい対象物、そして (c)  $\beta_1, \beta_2$  共に 90 度より小さい対象物の三種類に分類する。(a) のような対象物の場合、正四角柱以上の対象物と同じ把握戦略が適用できる。次に (b) のような対象物を考える。くさび効果が発生するための幾何学的な必要条件は、テーブルと対象物斜面とのなす角度が 90 度よりも大きいことである。Fig. 21 (a) のように指先先端を対象物下部とテーブルとの

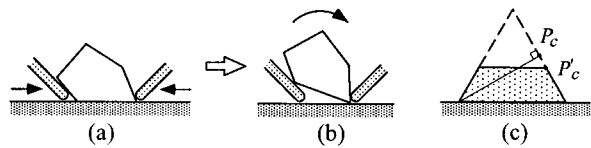


Fig. 21 Two particular examples of column objects

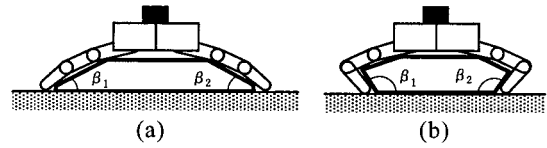


Fig. 22 Two examples whose heights are extremely low

間に押し込むと、右指先端ではくさび効果は発生しないが、左指先端でくさび効果の発生が期待できる。少なくとも一方の指でくさび効果が発生すれば、Fig. 21 (b) のように、対象物底面に指を入れることができ、対象物をテーブルから持ち上げることができる。したがって、(b) のような対象物は実質的には (a) と同じグループに入れることができ、正四角柱以上の対象物と同じ把握戦略を適用できる。最後に、(c) のような対象物は正三角柱対象物と同様に、表面摩擦が極端に大きな場合を除き、初期調整動作が必要である。Fig. 21 (c) のように、摩擦がゼロでも回転モーメントが発生できる点  $P_c$  が対象物表面上に存在しない場合がある。このような場合、対象物表面上の最上部  $P'_c$  を突いてみる。 $P'_c$  を押ししても滑りが発生して回転しない場合は対象物底面に指を入れることができないため、把握動作は打ち切る。また、Fig. 22 (a) のように直接把握できる程度の大きさの対象物であっても、極端に偏平でかつ  $\beta_1, \beta_2$  が共に 90 度より小さい場合には、摩擦が大きくない限り、包み込み把握できない。ただし、Fig. 22 (b) のように対象物が偏平であっても、 $\beta_1 > 90$  度  $\beta_2 > 90$  度の場合には、直接把握が可能になる。

したがって、特別な形状を有する対象物を除き、4 章で提案した把握戦略で十分対応できることが予想される。

6. 結 論

ヒトによる柱状物体の把握実験を通じて、ヒトは対象物の幾何学的形状が同じであっても、スケールに応じて把握戦略を切り替えていること (Scale-Dependent Grasp) を明らかにした。また、対象物のスケールだけでなく、表面摩擦、断面形状に応じて把握戦略を切り替えていることを突き止めた。ヒトが行っている把握戦略は複雑であるものの、基本動作は大きく二つの目的を達成するために行われていることを踏まえて、実際のロボットハンド用の把握戦略を対象物の大きさに応じて構築し、実験的検証を行った。さらに把握戦略間の切り替え方法、一般的な凸対象物に対する拡張性について考察を行った。

謝 辞 最後に、本研究に協力していただいた広島大学工学研究科の Thairasert Nophawit 君、日野裕君、東森充君、田中良幸君、中川一弘君、澤田光史君に、心より感謝いたします。なお、本研究は科学研究費重点領域研究「知能ロボット」において行われたものであることを付記しておく。

## 参考文献

- [1] S. Sugano, S. Tsuto and I. Kato: "Force Control of the Robot Finger Joint equipped 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", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91 講演論文集, vol.A, 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. 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.
- [6] G.A. Bekey, H. Liu, R. Tomovic and W. Karplus: "Knowledge-based control of grasping in robot hands using heuristics from human motor skills," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.9, no.6, pp.709-722, 1993.
- [7] S.B. Kang and K. Ikeuchi: "Toward automatic robot instruction from perception—Recognizing a grasp from observation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.9, no.4, pp.432-443, 1993.
- [8] T. Iberall, J. Jackson, L. Labbe and R. Zampano: "Knowledge-based prehension: Capturing human dexterity," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.82-87, 1988.
- [9] M. Jeannerod: "Attention and performance," chapter Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects, pp.153-168, Erlbaum, Hillsdale, 1981.
- [10] C. Bard and J. Trocraz: "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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] S. Hirose: "The Development of Soft Gripper for Versatile Robot Hand," Mechanism and Machine Theory, Pergamon Press, 13, pp.351-359, 1978.
- [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] 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.
- [22] K.P. Kleinmann, J. Henning, C. Ruhm and H. 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.
- [23] M. Kaneko, M. Higashimori and T. Tsuji: "Transition Stability of Enveloping Grasps," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1998 (to appear).
- [24] M. Kaneko, Y. Tanaka and T. Tsuji: "Scale-dependent grasp," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2131-2136, 1996.
- [25] 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.
- [26] M. Kaneko, N. Thaiprasert and T. Tsuji: "Experimental Approach on Enveloping Grasp for Column Objects," Preprint of Experimental Robotics, pp.17-27, 1997.
- [27] 金子, 横井, 鈴木, 谷江: "プリー・ワイヤ駆動系におけるトルクセンシングとトルク制御—張力差動形トルクセンサの提案とトルクサーボ系への組み込み—", 日本ロボット学会誌, vol.7, no.1, pp.62-70, 1989.
- [28] 金子: "器用な多指ロボットハンドの開発", 日本ロボット学会誌, vol.16, no.5, pp.617-619, 1998.
- [29] M. Kaneko and T. Tsuji: "Realization of Enveloping Grasp," 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (Video Proceeding), 1997.



白井達也 (Tatsuya Shirai)

1968年7月12日生。1993年3月九州工業大学大学院情報工学研究科情報システム専攻修士課程卒業。同年4月ソニー(株)入社, 1997年3月同退社。同年4月広島大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程後期入学, 現在に至る。ロボットハンドの力学と制御に関する研究に興味を持つ。

(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)



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)