

対象物の引き剥がし支援動作 (DAM) の発見と ロボットハンドへの応用

白井 達也*¹ 金子 真*² 原田 研介*² 辻 敏夫*²

Discovery of a Detaching Assist Motion (DAM) and Application for Robot Hands

Tatsuya Shirai*¹, Makoto Kaneko*², Kensuke Harada*² and Toshio Tsuji*²

Through grasp experiments by human achieving an enveloping grasp for a small cylindrical object placed on a table, we found an interesting grasping motion, where human changes the finger posture from upright to curved ones after each finger makes contact with the object. During this motion, the object is automatically lifted up through either rolling or sliding motion between the finger tip and the object. A series of this motion is called as *Detaching Assist Motion (DAM)*. An advantage of *DAM* is that most of grasping motions can be done on the table instead of in the air. Therefore, we can avoid the worst scenario where the object falls down to the table. We first discuss the basic mechanism of *DAM* by human experiments. We then apply the *DAM* to a grasping motion by a multi-fingered robot hand. We show that the *DAM* can be explained by using *Self-Posture Changing Motion*. We also show some simulation and experimental results to confirm that a small object can be grasped easily by applying the *DAM*.

Key Words: Grasping Strategy, Multi-fingered Robot Hand, Detaching Assist Motion, Self-Posture Changing Motion

1. はじめに

多指ロボットハンド（以下、ロボットハンド）はヒトの手と同様に高い自由度を有するため、単純なグripper式のハンドと異なり、様々な物体を自在に操ることができる可能性を秘めている。一般にロボットハンドとヒトの手は指構成や自由度が異なるものの、ロボットハンドの研究を行う上でヒトの挙動の観察から多くのヒントが得られる [1]–[7]。Cutkosky [1] は、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 とに分類している。Bekey [2] 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 [3] 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。齋藤ら [5] は、対象物の把握形態と操り動作の分類と記述法を提案している。鎌倉 [6] は、作業療法の立場から、作業目的とヒトの手指の形の関係进行分类している。清水ら [7] は、ヒトの把握動作時の把握力分布を計測するセンサグローブを製作し、把握力分布の解

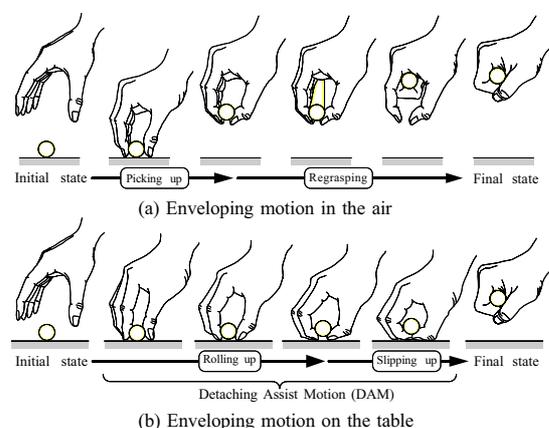


Fig. 1 Two grasp strategies enveloping for an object placed on a table

析による把握形態分類の可能性を示している。これらの研究が最終的な把握形態の分類、あるいは適切な把握姿勢を探索する方法に着目しているのに対し、本研究では、無拘束状態の対象物に対してアプローチし、最終的に包み込み把握を実現するという一連の把握戦略に着目している。この問題のヒントを得るために、テーブルに円柱物体を置き、最終的に包み込み把握を完成させる過程で、ヒトはどのような挙動を示すかを観察したところ、興味深い現象が観察された。ヒトは対象物の幾何学的

原稿受付

*¹ 鈴鹿工業高等専門学校

*² 広島大学大学院工学研究科

*¹ Suzuka National College of Technology

*² Graduate School of Engineering, Hiroshima University

形状が同じであっても、その大きさに応じて、おおよそ3つの把握戦略を使い分けている．筆者らはこれをスケール依存型把握 (*Scale-Dependent Grasp*) と名付けた [8]–[11]．ここで特に、Fig.1のような小さな対象物を把握する動作について観察したところ、大きく二つのパターンが現れた．一つは、Fig.1(a)のように対象物を一旦、テーブルから空中に持ち上げ、その後、指を器用に操って指先把握から包み込み把握に移行するパターンで、もう一つは、Fig.1(b)のように指姿勢を垂直に立てた状態から指姿勢を湾曲させることで対象物を持ち上げるパターンである．一般に、Fig.1(a)の動作をロボットハンドで忠実に再現するのは困難である．なぜならば、多くのロボットハンドはヒトの手指のように沢山の感覚器官を持たないため、空中で複雑な持ち替え動作を行うのは得意ではないからである．したがって、空中に対象物を持ち上げ、持ち替える位相において、対象物を落下させてしまう危険性が高い．これに対して Fig.1(b)の方法は、ロボットハンドが対象物をテーブル面から引き剥がす一連の動作が、すべてテーブル面上で完結しているため、対象物をテーブル面から引き剥がすのに失敗したとしても、対象物を落下させるという最悪のシナリオを避けることができる．本論文では、Fig.1(b)において指が対象物を持ち上げる一連の動作を引き剥がし支援動作 (*Detaching Assist Motion : DAM*) と呼ぶことにする．*DAM*はシンプルな動作を最大の武器とし、しかもテーブル面を積極的に利用して対象物を操るため、ロボットハンドへ応用し易いという利点を有している．この点を踏まえ、本論文では *DAM*をモデルとした把握戦略をロボットハンドで実現することを目的としている．

本論文の構成は以下の通りである．2章では、ヒトによる *DAM* を実験により解析する．そして *DAM*をロボットハンドへ応用する準備として、ヒトによる引き剥がし支援動作の基本動作原理について説明する．3章では、自己姿勢変形動作によって *DAM* と同等の効果が得られることに着目し、自己姿勢変形動作による対象物の持ち上げ条件について考察する．4章では、自己姿勢変形動作を三本指ロボットハンドの包み込み把握戦略に組み込み、実機による実験で効果を検証する．また、*DAM*が小さな対象物だけではなく、様々な大きさ、断面形状、表面摩擦係数の対象物に対しても有効であることを示す．5章で本研究のまとめを行う．

2. ヒトによる引き剥がし支援動作の解析

2.1 引き剥がし支援動作の説明

Fig.2(a)のように指先端の太さよりも対象物が大きな場合、多くのヒトは指先を対象物下部とテーブルとの隙間に強引に押し込むことで対象物をテーブルから引き剥がす．この現象は従来より、くさび効果 (*Wedge-effect*) として知られている．非常に単純な動作のため、ロボットハンドでも容易に実現できる．しかし、Fig.2(b)のように指先端の太さよりも対象物が小さな場合、様々な指姿勢で *Wedge-effect*を試みても、ヒトは対象物底部へ指先を挿入することができない．これは指先力が対象物内部で平衡してしまい、単純に指先を左右から押し込もうとしても、上向きの力が発生しないためである．しかし同じ状況で、Fig.2(c)のように対象物を左右から挟みこみつつ指姿勢を立て

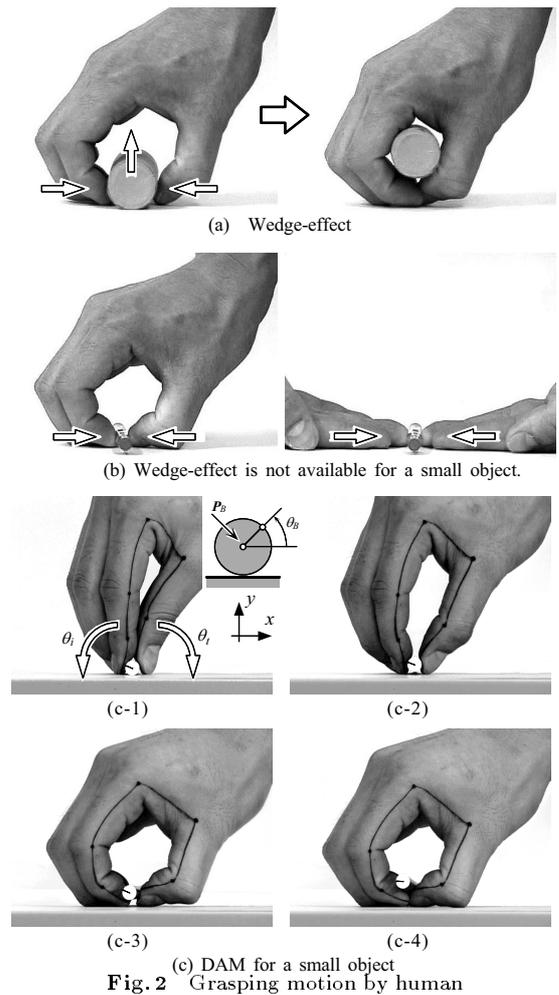


Fig. 2 Grasping motion by human

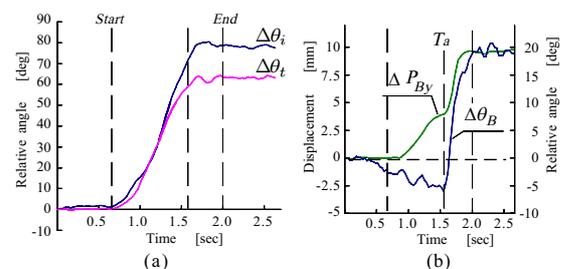


Fig. 3 The finger transformations during *DAM*

た状態から寝かせた状態まで回転させると、いとも簡単にテーブル上から対象物を持ち上げることができる．この一連の動作が *DAM*である．

2.2 指姿勢変化の解析

なぜ *DAM*を用いるとテーブルから対象物を簡単に引き剥がすことができるのか？ その背後にはどのような仕組みが存在するのか？ 本節では、*DAM*の基本動作原理を探るために、ヒトがFig.2(c)のように *DAM*によって対象物をテーブルから引き剥がす際の指姿勢変化と対象物の挙動を解析する．被験者の示指および母指の各関節と対象物側面には、Fig.2(c)のようにマーカーが付けてある．デジタルビデオカメラにより記録された1秒あたり30コマの映像をコンピュータで画像処理してマ

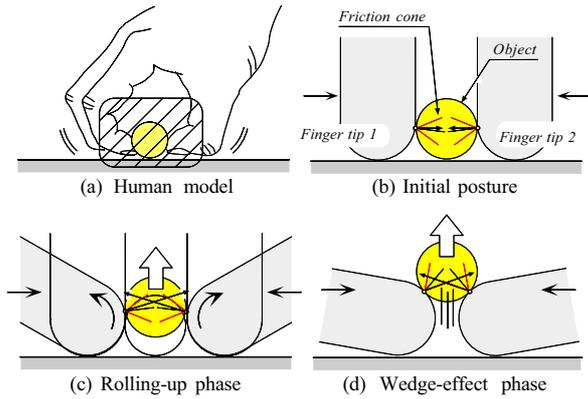


Fig. 4 The basic mechanism of DAM

カーの2次元座標を抽出し、各関節の角度および対象物重心位置と回転角度の変化量を得る。 θ_i, θ_t は、それぞれ示指指先、母指指先の相対角度を表し、CCW方向, CW方向を正とする。 $P_B (= [P_{Bx}, P_{By}]^t)$, θ_B は対象物重心位置および回転角度を表す。ただし θ_B はCCW方向を正とする。また、 $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i0}$, $\Delta\theta_t = \theta_t - \theta_{t0}$, $\Delta P_{By} = P_{By} - P_{By0}$, $\Delta\theta_B = \theta_B - \theta_{B0}$ とする。ただし添え字0は、初期姿勢(0[sec])での値を示す。対象物は直径8[mm]の円柱である。Fig.3(a)(b)は、それぞれ示指と母指の指先リンクの相対角度の時間変化 $\Delta\theta_i, \Delta\theta_t$, 対象物のテーブルからの高さと同転角度の時間変化 $\Delta P_{By}, \Delta\theta_B$ を表したグラフである。Fig.3(a)から、DAMの動作過程中、示指、母指指先共に、時間に対して一様に回転し続けていることが分かる。特徴的な現象は、指先はこのように単調な動きを行っているにも関わらず、対象物の挙動はFig.3(b)のように、 $T_a(1.57[sec])$ を境に大きく変化していることである。 T_a より前の位相では、対象物には多少の回転やふらつきが存在するものの、指先の回転と共にゆっくりと持ち上がっている。しかし T_a から後の位相では、対象物は回転しながら一気に上方向に持ち上がる。 T_a については、具体的な数値は被験者によって多少の個人差があるが、Fig.3(b)の $\Delta P_{By}, \Delta\theta_B$ の傾向は、ほぼ全ての被験者に対して観察された。

2.3 DAMの基本動作原理

DAMの動作過程で、どのような現象が発生しているのか、Fig.4のモデルを用いて考察する。対象物は、Fig.4(a)のように、左右から水平方向に単純に押しただけでは十分な持ち上げ力が発生できないような小さな対象物であると仮定する。ここで指先のモデルをFig.4(b)のように簡略化する。 T_a より前の位相では、対象物と指先とは主に転がり接触を保っていることが、ビデオ映像により確認された。指先が対象物表面を滑らないとすると、指先の回転に伴ない、対象物はFig.4(b)の初期姿勢からFig.4(c)のように指先と転がり接触を保ったまま幾何学的な拘束によりテーブルから徐々に持ち上げられる。転がり接触を保ったまま対象物が持ち上がって行くに従い、指先と対象物の接触点は対象物底部に向けて移動し、同時に摩擦円錐は徐々に上方向に向き始める。最終的に接触力が摩擦円錐から外れると、指先と対象物との間に滑りが生じ、Fig.4(d)のようにWedge-effectが発生する。このように、一旦、Wedge-effectが起こってしま

うと、対象物を水平方向に押し続けるだけで対象物は指表面を滑りながら上方に向かって持ち上がる。ビデオ映像からも、 T_a を境に示指、母指指先で、ほぼ同時に滑りが発生していることが確認された。これが T_a 以降の位相で発生している対象物の上方向への急激な変化である。以上がDAMの基本動作原理である。

3. ロボットハンドへの応用

Scale-Dependent Grasp[8]-[10]を含む一連の研究では、ヒトの把握動作をロボットハンドで忠実に再現するのではなく、その動作目的を抽出してロボットハンドへ応用することに重点を置いている。ヒトによるDAMでは、転がりによって対象物をテーブルから引き剥がしていた。一方、DAMの動作目的は、対象物をテーブルから引き剥がし、指先を対象物下部に挿入してFig.2(c-4)のように対象物をハンド内に入れた状態を実現することにある。したがって、DAMのロボットハンドへの応用においては、対象物がテーブルから持ち上がるかどうか重要であり、その際に転がり接触であるか滑り接触であるかについては特に拘らない。また、DAMの特徴として重要な点は、対象物をテーブルから持ち上げるために器用な操り動作を駆使するのではなく、対象物を挟み込んだまま指先を回転させるという単純な動作の結果として対象物がテーブルから持ち上がることにある。この目的を実現するために、ここでは自己姿勢変形動作 (Self-Posture Changing Motion : SPCM) [12],[13]を利用する。簡単のため、Fig.5(a)のような2次元の例で説明する。第*i*指の第*p_i*関節を位置制御関節、第*s_i*関節をコンプライアント関節、それ以外の関節は相対角度を一定に保った固定関節とする。対象物は絶対系に固定されているものと仮定する。ここで第*p_i*関節に角度変位 $\Delta\theta_{p_i}$ を与えると、幾何学的な接触状態を保ったままコンプライアント関節*s_i*が変位し、リンク姿勢が変形する。この一連のリンク姿勢の変化がSPCMである。従来のSPCMは、Fig.5(a)のように対象物が動かない前提を設けることで、一連のリンク姿勢の変化から未知対象物との近似接触点をセンシングする手法として用いられていた。本研究ではこの前提を取り除き、Fig.5(b)のようにリンクから受けた接触力によって対象物が動くことを認め、SPCMを再定義する。ロボットハンドは*m*関節のシリアルリンクを有する*n*本指とする。 $p_B, p_{F_i}, R_B, R_{F_i}$ は、それぞれ絶対座標系 Σ_R からみた対象物座標系 Σ_B , 指先座標系 Σ_{F_i} への位置ベクトル、回転行列である。 $p_{C_i}, {}^B p_{CB_i}, {}^{F_i} p_{CF_i}$ は、それぞれ $\Sigma_R, \Sigma_B, \Sigma_{F_i}$ からみた指*i*と対象物との接触点の位置ベクトルである。各指の第*s_i*関節($i = 1, \dots, n$)のコンプライアンスを $C_{\theta_i}(i = 1, \dots, n)$, 第*p_i*関節($i = 1, \dots, n$)に $\Delta\theta_{p_i}$ の角度変位を与えるものとし、 $K_\theta = \text{diag}[k_{\theta_1}, \dots, k_{\theta_n}]^t \in R^{n \times n}$, $\Delta\theta_p = [\Delta\theta_{p_1}, \dots, \Delta\theta_{p_n}]^t \in R^{n \times 1}$ と表す。ただし、 $k_{\theta_i} = 1/C_{\theta_i}$ である。 n_{CB_i}, n_{CF_i} は、それぞれ Σ_R からみた対象物および指表面の接触点 ${}^B p_{CB_i}, {}^{F_i} p_{CF_i}$ における外向き方向の単位法線ベクトルとする。 $S_B({}^B p), S_{F_i}({}^{F_i} p)$ は、それぞれ対象物と指先形状を表す関数とする。以上の記号を用いてSPCMを以下のように再定義する。

[自己姿勢変形動作の定義]

m 関節 *n* 本指ロボットハンドにおいて、各指 *i* のリンク $h_i (\geq$

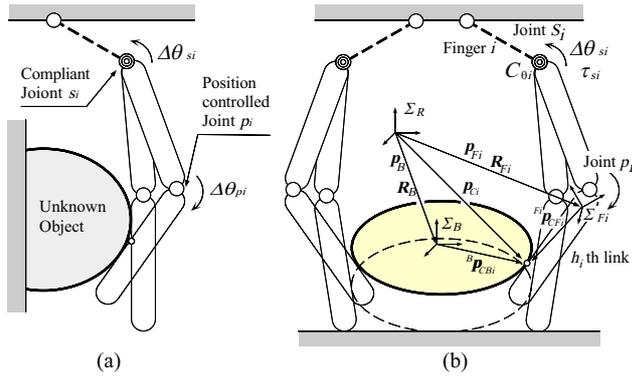


Fig. 5 Self-Posture Changing Motion

2) が対象物と接している状態から、位置制御関節 $p_i (\leq h_i)$ に、

$$|\Delta\theta_{pi}| \neq 0 \quad (1)$$

なる関節変位が与えられているとする。このとき、

$$S_B({}^B p_{CBi}) = 0, S_{Fi}({}^{Fi} p_{CFi}) = 0 \quad (2)$$

$$p_B + R_B {}^B p_{CBi} = p_{Fi} + R_{Fi} {}^{Fi} p_{CFi} = p_{Ci} \quad (3)$$

$$n_{CBi} = -n_{CFi} \quad (4)$$

を満足するベクトル $p_{Ci} \in R^{3 \times 1}$ が存在するとき、指 i は自己姿勢変形性 (Self-Posture Changeability) があるという。そのときの一連の動作を自己姿勢変形動作 (SPCM) と定義し、コンプライアント関節と位置制御関節に、それぞれ設定した剛性行列 K_θ と角度変位 $\Delta\theta_p$ を用いて、

$$SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$$

と表す。

自己姿勢変形動作中、対象物と接するリンク h_i は対象物と接触を保ったまま姿勢が変化する。この挙動は、ヒトによる DAM とほぼ等価である。自己姿勢変形動作は、複雑な指先の軌道計算なしに、各指に少なくとも一つの位置制御関節、コンプライアンス制御関節を設定するだけで実現できる長所がある。

ここでは、DAM 動作中の指姿勢変化によって対象物が持ち上がる条件を SPCM 中の関節コンプライアンスと位置制御関節の関節変位を用いて考察する。質量 m_B の対象物に対して $SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$ を適用する。このとき、接触点に発生する接触力 $f_c = [f_{c1}^t, \dots, f_{cn}^t]^t \in R^{3n \times 1}$ と対象物重心に作用する外力・外モーメント $W_{ext} \in R^{6 \times 1}$ が釣り合っていると式 (5) が成り立つ。

$$W_{ext} = -G^t f_c \quad (5)$$

ここで G^t はグラスブ行列であり、次式で与えられる。

$$G^t = \begin{bmatrix} I_3 & \cdots & I_3 \\ (R_B^B P_{CB1} \times) & \cdots & (R_B^B P_{CBn} \times) \end{bmatrix} \in R^{6 \times 3n}$$

ここで外力 $W_{ext} = [0, 0, -(m_B g + f_{ez}), 0, 0, 0]^t$ とする。 g は重力加速度、 f_{ez} は対象物重心に加える仮想的な重力方向の外力とする。 $f_{ez} = 0$ で式 (5) を満たす接触力 f_c が存在する場合、対象物に働く外力は釣り合い、対象物は落下しない。対象物を上か

ら押さえつける ($f_{ez} > 0$) ことで合力が釣り合う場合、仮想外力 f_{ez} を取り除くと、対象物は上方向に動こうとする。この点を踏まえて、ここでは以下のような問題を取り扱う。

[問題設定]

摩擦円錐内で取り得る全ての接触力 f_c において、 $c_z^t \sum f_{ci} - m_B g > 0$ を満たすような $SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$ を求める。ただし、 c_z は z 軸方向の単位ベクトルとする。

コンプライアント関節に発生するトルク $\tau_s = [\tau_{s1}, \dots, \tau_{sn}]^t \in R^{n \times 1}$ とする。そして $SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$ によって対象物は動かなかったと仮定すると、位置制御関節の角度変位 $\Delta\theta_p$ に応じてコンプライアント関節に角度変位 $\Delta\theta_s$ が生じる。結果として、コンプライアント関節に初期トルク $\tau_{bi0s} = -K_\theta \Delta\theta_s$ が生じる。ただし、 $SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$ 開始前のコンプライアント関節のトルク $\tau_{s0} = 0$ とする。接触力 f_c と τ_s との間には、式 (6) の関係が成り立つ。

$$\tau_s = J^t f_c \quad (6)$$

ただし、 $J^t \in R^{n \times 3n}$ は f_c を τ_s に変換するヤコビ行列である。ここで J^t は正則ではないので、 τ_s から f_c を一意に決定することができない。したがって、ここでは、各接触点における摩擦円錐内で各接触力 f_{ci} が、 $SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$ の条件下で取り得る全ての領域を考慮に入れて持ち上げ条件を考える [15]-[17]。各接触点における摩擦角を α とし、 f_{ci} の取り得る全ての候補に対して、 $f_o = \sum_{i=1}^n f_{ci}$ が式 (7) の不等式を満たすような $SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$ を求めると、対象物が持ち上がることが保証される。ここで対象物およびロボットハンドを剛体と仮定し、以下このモデルを RBM と呼ぶ。

$$c_z^t f_o - m_B g > 0 \quad (7)$$

Fig.6(a) のような三関節三本指ロボットハンドに対してシミュレーションを行った。各指は根元からコンプライアント関節、固定関節、位置制御関節を持ち、各リンクの長さは $40[mm], 25[mm], 25[mm]$ 、各指先の半径 $R = 5[mm]$ である。対象物は質量 $m_B = 0.04[kg]$ 、半径 $10[mm]$ の円柱である。シミュレーションモデルは、4章の検証実験に用いるロボットハンドと、ほぼ同一のパラメータが選定されている。ここでは簡単のため、 $k_{\theta 1} = k_\theta, k_{\theta 2} = k_{\theta 3} = k_\theta/2$ 、 $\Delta\theta_{p1} = \Delta\theta_{p2} = \Delta\theta_{p3} = \Delta\theta_p$ とする。Fig.6(b) は、 $SPCM\{K_\theta, \Delta\theta_p\}$ を適用した際に、対象物が持ち上がる $K_\theta, \Delta\theta_p$ の領域を調べたものである。横軸は強制変位角度 $\Delta\theta_p$ 、縦軸はコンプライアント関節の剛性 k_θ である。グラフ中の実線で区切られた領域は、DAM を行った結果、対象物が必ずテーブルから持ち上がるパラメータの領域である。対象物とロボットハンドの間の摩擦角 α が変化すると対象物を持ち上げ可能なパラメータの領域も変化し、摩擦角 $\alpha > 5[deg]$ では、Fig.6 のレンジ内では解が得られない。これは、摩擦角が広がるに従い、摩擦円錐下側稜線が下方向に広がって行き、対象物を持ち上げるのに必要な大きさの上向き成分を持たない接触力 f_{ci} の候補に含まれてしまうためである。なお、参考のために、Bicchi [20][21] が用いているように、対象物表面の剛性を考慮に入れた接触剛性モデル (以下、CSM) によるシミュレーション結果を点線で示す。CSM で

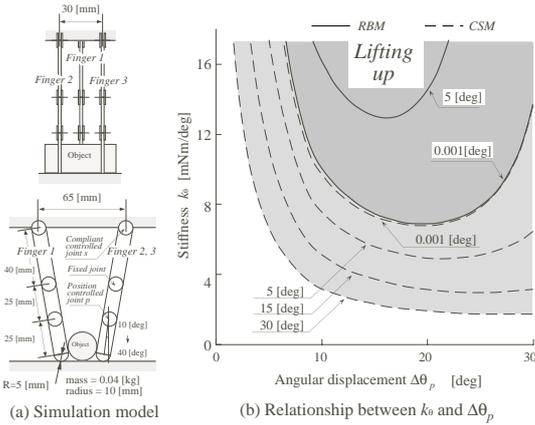


Fig. 6 Simulation result

は、対象物表面にバネ $K_P = \text{diag}[K_{P1}, \dots, K_{Pn}] \in R^{3n \times 3n}$, $K_{Pi} = \text{diag}[100, 100, 100] ([N/mm])$ を設けることで条件式を増やし、接触力ベクトル f_c を一意に決定する. CSM の定式化に関しては付録を参照されたい. 双方のモデルで摩擦角 α を小さく ($\alpha = 0.001 [deg]$) すると, RBM と CSM のシミュレーション結果がほぼ一致した. 限られた条件下ではあるが, これより両モデルの妥当性が示された. CSM の場合, 摩擦角が大きくなるに従い, 対象物を持ち上げ可能な領域が広がる.

4. 実験結果

$SPCM$ の検証実験に用いたロボットハンドは, 1 指あたり 3 関節を有する同一の指ユニットを 3 つ用いた三関節三本指ロボットハンドである. 指リンクの長さは根元から $40 [mm]$, $25 [mm]$, $25 [mm]$, 各指先の直径は $D_{tip} = 10 [mm]$ である. 指リンクはワイヤによって駆動され, 各関節にはトルクセンサが内蔵されている. 角度センサとしてロータリーエンコーダを用いる. 本ロボットハンドに関する詳細は筆者らの論文を参照されたい [18] [19].

Fig.7(a)(b) は, それぞれテーブル上に置かれた直径 $18 [mm]$, 質量 $0.04 [kg]$ の円柱に対して $Wedge-effect$ を期待した押し付け動作と $SPCM$ を行った実験結果である. 対象物表面は摩擦係数を増やすためにゴムシート ($\alpha = 30 [deg]$) で覆われている. $Wedge-effect$ を用いただけでは Fig.7(a) のように対象物を持ち上げることはできない. 次に $SPCM$ を用いる. 第一から第三関節は, それぞれコンプライアンス制御, 固定, 位置制御関節である. Fig.7(b-1) の初期姿勢から, 第三リンクを $80 [deg]$ 回転させる. 第三リンクを回転させると同時に $SPCM$ が発生し, Fig.7(b-2) のように対象物はテーブルから持ち上がり, ついには Fig.7(b-3) のように指先と対象物表面の間に滑りが発生する. 全ての指先リンクが $80 [deg]$ 回転し終えたところで各関節に一定トルク指令値を与えると, Fig.7(b-4) のように包み込み把握が完成する. Fig.8 はコンプライアント関節の関節剛性 k_θ と位置制御関節の強制変位角度 $\Delta\theta_p$ の関係を調べた実験結果である. グラフ中の記号 \times , \triangle , \circ は, それぞれ与えられたパラメータで DAM を実行した結果, 対象物をテーブルから持ち上げられない, 持ち上げられるが包み込み把握は成功しない, 包み込み把握が成功したことを表す. 対象物は直径 $18 [mm]$ の円柱対象物, 摩擦角 $\alpha = 5 [deg]$ である.

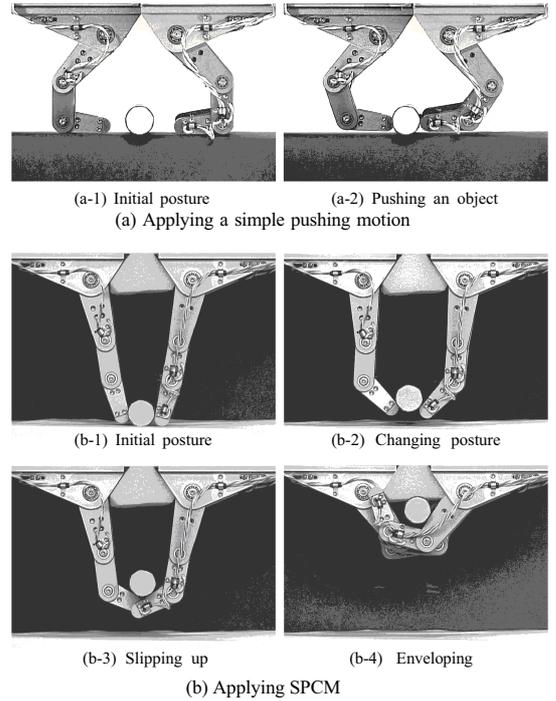


Fig. 7 Experimental results by robot hand

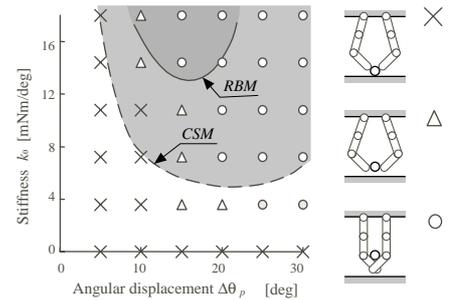


Fig. 8 Experimental results ($k_\theta - \Delta\theta_p$ map)

グラフ中の実線と点線で囲まれた領域はシミュレーション結果で, それぞれ RBM , $CSM (K_{Pi} = \text{diag}[100, 100, 100] ([N/mm]))$ より得られた対象物持ち上げ可能な領域である. シミュレーションにより得られる領域は, 実験実験における \times に対応する. このグラフより, RBM の領域に含まれるパラメータで対象物が持ち上げ可能であること, 人工的なバネ剛性を仮定した CSM により得られる領域はそれよりも広いが, 現実的なオーダーであることが分かる.

Fig.9(a)(b) は, それぞれ表面摩擦係数を変えるために対象物表面を画用紙とゴムシートで覆った柱状物体を DAM で把握した結果である. 横軸は対象物断面形状, 縦軸は対象物の高さ H_B をロボットハンドの指先直径 D_{tip} で正規化した無次元数 $d_{obj} = H_B/D_{tip}$ である. d_{obj} が 1.0 の時, 対象物の高さと同様に指先の太さは等しく, 対象物が大きいくほど d_{obj} は大きくなる. 対象物の断面形状は, 真円, 正六角形, 正四角形, 正三角形の四種類である. 把握に成功した場合は \triangle を失敗した場合は \times をプロットしてある. 円柱は $d_{obj} = 0.7$, 六角柱は $d_{obj} = 0.9$ 程度の対象物まで把握可能であった. 四角柱は $d_{obj} = 1.2$ の対象物まで

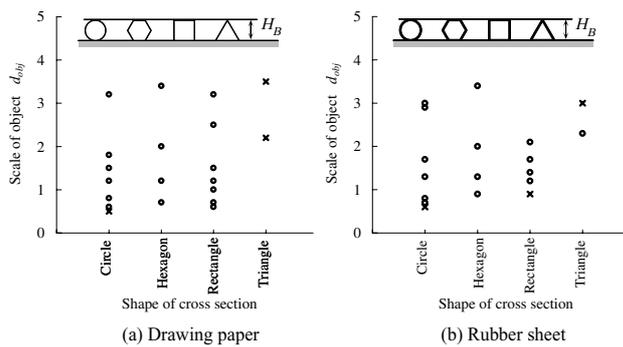


Fig. 9 Experimental results for various column objects

把握可能である．四角柱の場合，指先の接触点が対象物のエッジに到達した瞬間に *Wedge-effect* が発生する．その際に対象物が大きく回転するため，動作は不安定であるものの，包み込み把握は完成する．表面摩擦係数の小さな三角柱はテーブルから持ち上げることができない．三角柱対象物の表面は，テーブルに対して $60[deg]$ の傾きを持つため，摩擦角 α が $30[deg]$ 以下の場合，ロボットハンドは対象物に対して水平面より上向きの接触力を発生することができない．したがってコンプライアンス関節のコンプライアンスの大小に関係なく，対象物をテーブルから持ち上げることができない．一方，表面摩擦係数の大きな三角柱はテーブルより持ち上げることができたとしても，ほとんどの場合，包み込み把握は失敗してしまう．これは，四角柱対象物の場合と同様に，三角柱対象物の場合も *Wedge-effect* が発生した際に対象物が大きく回転するが，四角柱対象物に比べてロボットハンドの指姿勢変化が大きく，多くのケースで左右の指姿勢が非対称になってしまうのが原因である．したがって三角柱体対象物であってもサイズが小さい場合には，*Wedge-effect* の発生による指姿勢の変化が小さいため，包み込み把握に成功する．本実験で興味深い点は，*DAM* は小さな対象物だけでなく，例えば $d_{obj} = 3.0$ 程度の円柱など，比較的大きな対象物に対しても適用可能である点である．従来，これらの対象物は *Wedge-effect* を利用した把握動作を用いて把握していたが，*DAM* を用いることで，これらの対象物の領域までもカバーすることができるようになる．その上，*Wedge-effect* のみでは把握することができなかった四角柱に対しても，*DAM* を適用することで把握可能となる．このように *DAM* は，きわめて単純な動作であるにも関わらず，様々な大きさ，断面形状，表面摩擦係数の対象物を把握できる可能性を秘めている．

5. まとめ

本論文では，ヒトによる把握動作の観察を通して，ロボットハンドに容易に適用可能な引き剥がし支援動作，*DAM* を発見した．*DAM* の仕組みを解明するために，*DAM* 実行中のヒトの指姿勢を実験により解析した．実験結果をもとにして *DAM* の基本動作原理を説明し，ロボットハンドにおいて同等な動作が期待できる *SPCM* を使って力学的な条件について考察した．さらに *SPCM* を実際の多指ロボットハンドに実装し，その効果を実験により検証すると同時に，様々な大きさ及び形状の柱状物

体に対して適用可能であることを示した．

なお，本研究は科学技術振興財団の「CREST(脳を創る)」の支援によって行われたものであることを付記しておく．

参考文献

- [1] 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, JUNE, pp. 269-279, 1989.
- [2] 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, DECEMBER, pp. 709-722, 1993.
- [3] 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, AUGUST, pp. 432-443, 1993.
- [4] 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.
- [5] 齋藤, 永田: "面機能による把握と操作の解釈論", 第4回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 113-120, 1999.
- [6] 鎌倉: "手のかたち手のうごき", 医歯薬出版, 1989.
- [7] 清水, 下条, 佐藤, 関: "接触情報によるヒトの把握状態計測の一手法", 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 305-306, 1997.
- [8] M. Kaneko, Y. Tanaka and T. Tsuji: "Scale-dependent Grasp," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2131-2136, 1996.
- [9] T. Shirai, M. Kaneko, K. Harada and T. Tsuji: "Scale-Dependent Grasps," *Proc. of the Int. Conf. on Advanced Mechatronics*, pp. 197-202, 1998.
- [10] 白井, 金子, 辻: "スケール依存型把握", 日本ロボット学会誌, vol. 17, no. 4, pp. 111-120, 1999.
- [11] M. Kaneko and T. Tsuji: "Realization of Enveloping Grasp," *1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (Video Proceeding)*, 1997.
- [12] 金子, 谷江: "自己姿勢変形性を利用した多指ロボットハンドと未知対象物との接触点検出", 日本ロボット学会誌, vol. 8, no. 6, pp. 12-21, 1990.
- [13] M. Kaneko and K. Tanie: "Contact Point Detection for Grasping an Unknown Object Using Self-Posture Changeability," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 10, no. 3, pp. 355-367, 1994.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Y. Yu, K. Takeuchi and T. Yoshikawa: "Optimization of Robot Hand Power Grasps," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3341-3347, 1998.
- [17] 金子, 東森, 辻: "包み込み把握の遷移安定性", 日本ロボット学会誌, vol. 16, no. 5, pp. 136-144, 1998.
- [18] 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. 41-43, 1998.
- [19] N. Imamura, M. Kaneko and T. Tsuji: "Development of Three-Fingered Robot Hand with a New Design Concept," *Proc. of the 6th IASTED Int. Conf. on Robotics and Manufacturing*, pp. 44-49, 1998.
- [20] A. Bicchi: "Analysis and Control of Power Grasping," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'91*, pp. 691-697, 1991.
- [21] A. Bicchi: "Force Distribution in Multiple Whole-Limb Manipulation," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and*

Automation, pp. 196-201, 1993.

付録 A. 接触剛性によるモデル化

Fig.10のように, 対象物上の接触点 P_{CBi} , リンク上の接触点 P_{CFi} の間にバネ $K_P = \text{diag}[K_{P1}, \dots, K_{Pn}] \in R^{3n \times 3n}$, $K_{Pi} = \text{diag}[k_{Pxi}, k_{Pyi}, k_{Pzi}] \in R^{3 \times 3}$ を設けることで条件式を増やし, 接触力ベクトル f_c を一意に決定する. 対象物に外力 W_{ext} を加えることで, 対象物重心およびコンプライアント関節に変位 $\delta x \in R^{6 \times 1}$, $\delta \theta_s \in R^{n \times 1}$ が生じる. 各接触点におけるリンク表面上の接触点 P_{CFi} から対象物上の接触点 P_{CBi} に向かう変位ベクトルを $\delta P_i \in R^{3 \times 1}$ とすると, 変位ベクトル $\delta P \in R^{3n \times 1}$ は,

$$\delta P = G \delta x - J \delta \theta_s \quad (8)$$

となる. ここで $\delta P = [\delta P_1^t, \dots, \delta P_n^t]^t$ である. リンクに減り込んだ対象物をリンクが押し出す力が接触力 f_c となる. したがって, f_c と変位 δP の間には,

$$f_c = -K_P \delta P \quad (9)$$

の関係が成り立つ. ただし, バネ K_P は $\tau_{bias} = 0$ かつ $\delta x = 0$ のとき, $P_{CBi} = P_{CFi}$ となり, 中立するものとする. またコンプライアント関節の変位 $\delta \theta_s$ と関節トルク τ_s の間には,

$$\tau_s = \tau_{bias} - K_\theta \delta \theta_s \quad (10)$$

の関係が成り立つ. 式(5), 式(6), 式(8), 式(9), 式(10)より,

$$f_c = -K_{Pe} G (G^t K_{Pe} G)^{-1} (W_{ext} + G^t f_{bias}) + f_{bias} \quad (11)$$

を得る. ただし, $K_{Pe} = K_P \{I - JK_{\theta e}^{-1} J^t K_P\}$, $K_{\theta e} = K_\theta + J^t K_P J$, $f_{bias} = K_P J K_{\theta e}^{-1} \tau_{bias}$ である.

しかし, 式(11)で求まる接触力 f_c は摩擦円錐の制限が入っていないため, 全ての接触力 f_{ci} が摩擦円錐内に発生するとは限らない. ここで, 式(11)で求めた接触力 f_{ci} が摩擦円錐から外れていたとしよう. この場合, f_{ci} は最も近い摩擦円錐境界上の単位ベクトル e_{ci} 方向に現れると仮定し, 以後, f_{ci} の発生可能な方向を e_{ci} 方向に制限する.

$$e_{ci} = \cos \alpha n_{CFi} + \sin \alpha \frac{f_{ti}}{\|f_{ti}\|} \quad (12)$$

ただし, $f_{ti} = f_{ci} - (n_{CFi}^t f_{ci}) n_{CFi}$ である. ここでバネ K_{Pi} による復元力 $-K_{Pi} \delta P_i$ を e_{ci} 方向に制限するために, 一次変換行列 $L_i = e_{ci} e_{ci}^t \in R^{3 \times 3}$ を導入する. それに対して, 摩擦円錐内に発生する接触力 f_{cj} には制限を加えず, $L_j = \text{diag}[1, 1, 1]$ とする. したがって, 式(9)に相当する式は, 式(13)となる.

$$\hat{f}_c = -L K_P \delta P \quad (13)$$

ここで $L = \text{diag}[L_1, \dots, L_n] \in R^{3n \times 3n}$ である. この摩擦円錐の制限を加えた式(13)と, 式(5), 式(6)に相当する以下の二式,

$$W_{ext} = -G^t \hat{f}_c \quad (14)$$

$$\tau_s = J^t \hat{f}_c \quad (15)$$

および式(8), 式(10)より, 摩擦円錐の条件を加えた接触力 \hat{f}_c

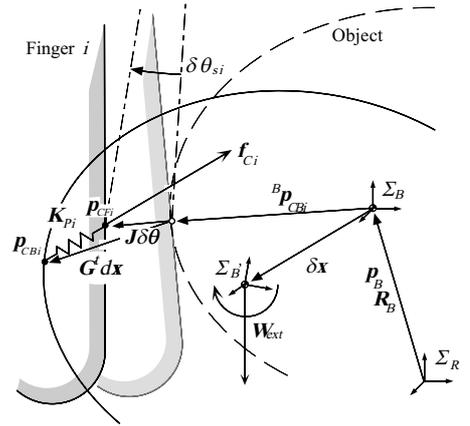


Fig. 10 Notation of parameters

は,

$$\hat{f}_c = -\hat{K}_{Pe} G (G^t \hat{K}_{Pe} G)^{-1} (W_{ext} + G^t \hat{f}_{bias}) + \hat{f}_{bias} \quad (16)$$

となる. ここで, $\hat{K}_{Pe} = L K_P (I - J \hat{K}_{\theta e}^{-1} J^t L K_P)$, $\hat{K}_{\theta e} = K_\theta + J^t L K_P J$, $\hat{f}_{bias} = L K_P J \hat{K}_{\theta e}^{-1} \tau_{bias}$ である.

白井 達也 (Tatsuya Shirai)
1968年7月12日生. 1993年4月ソニー(株)入社, 1997年3月同退社. 2001年3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修了. 工学博士. 同年4月鈴鹿工業高等専門学校助手. 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. 日本機械学会の会員.
(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, 2001年同大学大学院工学研究科教授, 現在に至る. ロボットハンド, 力覚センサ, 触覚ベースト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)

原田 研介 (Kensuke Harada)
1968年9月28日生. 1997年3月京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了. 博士(工学). 同年4月広島大学助手, 2001年同大学大学院工学研究科助手, 現在に至る. ロボットハンド, ロボットマニピュレータの力学と制御に関する研究に興味を持つ. 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)

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, 2001年同大学大学院工学研究科助教授, 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)