

曲面状弾性フィンガの固着・滑り分布推定に基づく把持力の制御

前野 隆司^{*1} 広光慎一^{*2} 河合 隆志^{*3}

Control of Grasping Force by Estimating Stick/Slip Distribution at the Contact Interface of an Elastic Finger Having Curved Surface

Takashi Maeno^{*1}, Shinichi Hiromitsu^{*2} and Takashi Kawai^{*3}

Fingers of human allow an object to be lifted using adequate grasping force and without slippage, even when the weight and friction coefficient of the object are unknown. Grasping force is controlled by detecting complex response of the skin using tactile receptors incorporated in the finger tissue. In this study, we propose a method for controlling the grasping force when objects are grasped by artificial elastic fingers in which many sensors are incorporated. First the relationship between the stick area and internal strain distribution of the finger is calculated in detail by using FE (finite element) analysis. The quantitative relationship between the stick area in the contact surface and the velocity of internal strain distribution is obtained. From these, we propose a method for controlling the grasping force by decreasing the increasing ratio of the tangential force when the stick area is decreasing. Finally, the grasping force is controlled by using the actual elastic finger made of silicon rubber in which strain gages are incorporated. It is confirmed that objects can be grasped using adequate grasping force without complete slippage even when the weight and the friction coefficient of the objects are unknown.

Key Words: Tactile Sensor, Finger, Finite element method, Contact analysis

1. はじめに

ヒトは複数の指を用いて、任意の物体を適切な力で容易に把持し持ち上げることができる。このような把持の問題は二つのフェーズに分けることができる。一つめは、物体の重量や摩擦係数がまったく予測できない場合、例えば視覚が遮断されている場合やまったく初めて見る物体を把持する場合などである。これらの場合、ヒトは、指腹部で検出した触覚フィードバック情報だけしか用いることができないにもかかわらず、物体に適切な把持力 (Fig. 1 参照)。本稿では、把持するための法線方向の力 (以下法線力と呼ぶ) と持ち上げるための接線方向の力 (以下接線力と呼ぶ) の合力を把持力と呼ぶこととする) を加え、物体を滑らせることなく、しかもつぶすことなく持ち上げることができる。ただし、把持動作の速度はやや遅い。二つめは物体の重量または摩擦係数が予測できる場合である。すなわち、既知の物体を視覚によって認識してから把持する場合や、重量・摩擦係数の等しい物体を繰り返し把持する場合である。このよ

うな場合には、脳内に構築されたフィードフォワードモデルに基づいて物体に加える把持力を増加させ、高速に適切な把持力に到達させることによって把持動作を終了させていると考えられる。

後者は脳内神経回路モデルやセンサフュージョンの重要な課題であるが、本研究では前者に着目することとする。なぜなら、より単純なフィードバック制御に関する知見がまず得られるべきであるし、これが得られれば、人工ハンド制御の際にも有効であると考えられるからである。前者の問題は、把持力の到達点 (物体を持ち上げるときの法線力と接線力) の値が不明であるにもかかわらず、把持力がそこへ到達するまでの増加経路が適切に選択されるのは、どのようなフィードバックの結果なの

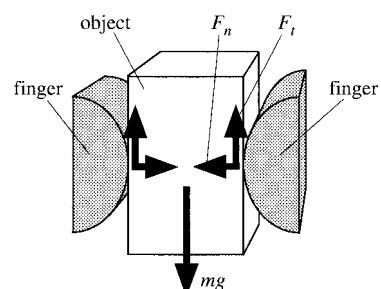


Fig. 1 Normal and tangential force for grasping an object

原稿受付 1999年9月13日

*¹慶應義塾大学理工学部

*²慶應義塾大学大学院

*³慶應義塾大学大学院(現東京医科大学)

*¹Faculty of Science and Engineering, Keio University

*²Graduate School of Science and Engineering, Keio University

*³Graduate School of Science and Engineering, Keio University

か、という問題である。この問題に対し、これまでにいくつかの知見が得られているものの、明快な説明はなされていない。Johansson ら [1] [2] は、様々な条件下で物体を挟み持ち上げる際の接線力・法線力の変化と触覚受容器のインパルス発射状態を詳細に計測し、把持力制御における初期局所滑りの重要性を示した。しかし、把持力制御機構についての具体的な説明は行われていなかった。

一方、ロボットハンドによって重量および摩擦係数が未知の物体を把持するという課題に対して多くの研究が行われている [3] ~ [7]。しかし、それらの多くは物体が滑り始めたときの接触面全体の滑りを検出するものまたは摩擦係数を直接計測して用いるものであった。物体が滑りはじめる際の滑りを検出する手法では、ロボットハンドと物体との相対位置がわずかながら変化してしまい、物体を高精度に位置決めすることができない。また、摩擦係数を直接計測する手法によれば物体が滑りはじめる範囲の適当な把持力を求めることができるものの、装置が複雑になるという欠点がある。また、いずれもヒトの行う把持とは手法が異なっている。このため、物体とフィンガの初期局所滑りに着目した研究も行われている [3] [4] が、多くの研究では、フィンガの形状に起因する局所滑り領域の局在性は考慮されていなかった。Canepa ら [5] のセンサでは、初期局所滑り領域の局在性を考慮しているが、センサの表面が平板状であるので、センサ自体は局所滑り領域を局在させる機構を持たない。一方、筆者ら [6] [7] は、ヒト指の構造と機能に学ぶセンサが人間親和性の高いロボットのためには有効であろうという立場から、表面形状、柔軟性、センサ配置をヒト指腹部に学んだ曲面状弾性フィンガを提案した。そして、曲面状弾性フィンガ表面の局所滑り領域が接触領域の端部から成長する現象に着目し、曲面状弾性フィンガ内部のせん断ひずみ分布パターンを用いれば、把持力を制御できることを示した。しかし、フィードバック制御器の具体的な構成は明らかでなかった。

本研究では、まず、ヒトと曲面状弾性フィンガの把持力制御法に関する従来の研究結果 [1] [2] [6] から、ヒトの把持力制御法を合理的に説明しうる仮説を導く。次に、曲面状弾性フィンガ [7] の有限要素解析によって、上記の仮説が人工のセンサに適用できることを確認する。最後に、曲面状弾性フィンガを用いた実験により、仮説と解析の妥当性を確認し、本手法により重量および摩擦係数が未知の物体を把持しうることを示す。

2. ヒトの把持力制御に関する仮説

2.1 従来の研究

1章で述べた従来の研究結果のうち、本研究に関連する部分について、詳細に述べる。

Johansson ら [1] [2] は、指が物体に接触し始める際、接線力・法線力増加時、あるいは接触部が滑る場合など、様々な条件下で接触反力の変化と触覚受容器のインパルス発射状態を計測した。物体全体が滑り始める際の計測の結果、ステイック・スリップ運動に対応してインパルスが発射されている様子を明らかにしている。この結果は、その後のロボットハンドによる把持の研究において広く注目されている [3] [4]。一方、本研究に関連するには、接触面全体に滑りを生じさせることなく把持を成功させる

際の接触力の変化とインパルス発射の特性である。Johansson らは、ヒトが物体を把持する際のマイスナー小体の発火特性を計測し、ヒトが最終的に物体に加える法線力は、物体の重量・摩擦係数にかかわらず、最小限必要な法線力の 1.2 から 1.5 倍となっていることを示した（マイスナー小体は速順応型の受容器であり、機械刺激の強度が変化するときに発火する、速度または加速度の受容器であることが知られており、一般に FA I または RA I ユニットと呼ばれる [8]）。また、Johansson らは、表面がサンダペーパー、スエード、シルクからなる物体を、親指と人差し指でつかみ滑らせずに持ち上げる際の接線力、法線力、位置およびインパルス発射状態の関係を計測した。そして、まず、指腹部が物体に接触し法線力が加わり始める時刻の直後にインパルス発射頻度が高いことを示した。また、法線力・接線力の増加中にもマイスナー小体のインパルス発射頻度が高いことを示した。特に、インパルス発射頻度と法線力の変動がある程度同期していることを示した。これは、何らかの物理量をインパルス発射という形で検出し、その情報を用いて把持力をフィードバック制御している状態と考えることができる。

以上より、把持開始時あるいは把持力増加時に滑り振動が生じるとマイスナー小体が発火するので、これに応じて法線力を増加させるのではないかという仮説が考えられる。フィンガ全体の滑りを検出する把持力制御法 [3] [5] は、このような仮説に対応している。しかし、ヒトは指全体が滑りはじめる前に把持力を適切な値に制御しているので、ヒトの把持力制御は上記の仮説では説明できない。

一方、筆者ら [9] [10] は、マイスナー小体の発火特性と皮膚の変形または振動特性との関係を示した。この結果、マイスナー小体は、滑りによるスティック・スリップ振動によらなくとも、せん断ひずみエネルギー密度の時間微分がある大きさになれば発火することを示した。

また、筆者ら [6] は、曲面状弾性フィンガと平板との接触する際の接触問題を有限要素法により解析し、曲面状弾性フィンガ内部のせん断ひずみ分布パターンを用いれば、把持力を制御できる可能性を示した。つまり、フィンガ全体が滑るときの固着・滑り (stick/slip) の時刻歴応答を利用するのではなく、フィンガの一部分だけが滑る際の固着・滑りの空間分布パターンに対応する量を利用することによって、物体全体を滑らせることなく、把持力を制御できるということを示した。

以上の結果より、マイスナー小体の発火のように、何らかの量がある閾値を越えると信号が生じるような特性を用いて、固着・滑りの空間分布パターンを認識するアルゴリズムを開発できれば、上記の結果と矛盾なく把持力を制御することができるといえる。

2.2 ヒトの把持力制御仮説

Fig. 2 は、前節の結果を模式的にフローチャートに描いたものである。ヒトが物体を把持する際には、まず法線方向の力 F_{n0} を与える。そして、法線力・接線力を少しづつ（図中、 ΔF_n 、 ΔF_t に相当）増大させていく。ヒトの運動制御は実際には連続時間系で行われているが、ここでは、後で述べる人工物の制御と対応させるために離散時間表記している。もし、物体が持ち上げられていれば把持動作は終了する。そうでない場合には、

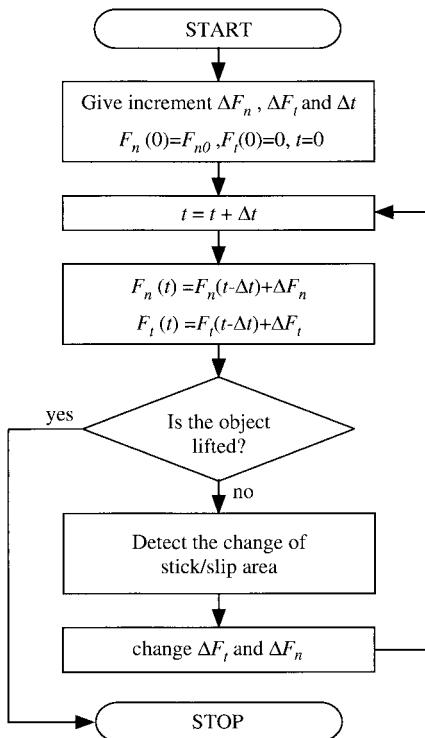


Fig. 2 Flow chart of the expected grasp force control scheme by human being

何らかの方法によって、物体と指との間の固着領域・局所滑り領域の大きさを検出し、両者の大きさに応じて ΔF_n , ΔF_t の大きさを変化させる。例えば、局所滑り領域が増大しているなら、物体を滑り落としてしまう可能性が増大するので、 ΔF_t を減少させるか、 ΔF_n を増大させることによって、相対的に法線力を大きくし、全体の滑りを回避する。固着領域が増大しているなら、法線力が過多である可能性が大きいので、 ΔF_n を減少させるか、 ΔF_t を増大させることによって、相対的に接線力を大きくし、物体を握りつぶしてしまうことを回避する。

重要な点は、いかにして固着領域の減少（あるいは局所滑り領域の増大）をモニタするかである。前節の結果より、せん断ひずみエネルギーなどの何らかの物理量がある閾値を超えていたときにインパルス発射によって情報を出力し、この信号を処理して法線力、接線力の増分 ΔF_n , ΔF_t を与えられればよいことが分かる。この点について検討するために、指で物体を把持する際の指断面の変形の模式図を Fig. 3 に示す。2 本の指で対称形状の物体を把持する場合を想定し、物体の右半分と、右側の指を描いてある。図(a)は、法線力 F_n のみを加えた状態である。指は物体との接触により変形しており、接触領域全面が固着している。このとき、接触部近傍の皮膚断面をいくつかの矩形領域に分割することを考える。図では、変形後の皮膚に 10 個の正方形が描かれている。いま、接線力 F_t を加えると、接触部近傍の皮膚はせん断力を受け、矩形領域は図(b)に示したようにせん断変形する。このとき、ある接觸点における接線反力が最大静止摩擦力よりも小さければ、その点は接線力付加後も固着している。一方、接線反力が最大静止摩擦力を越えた点

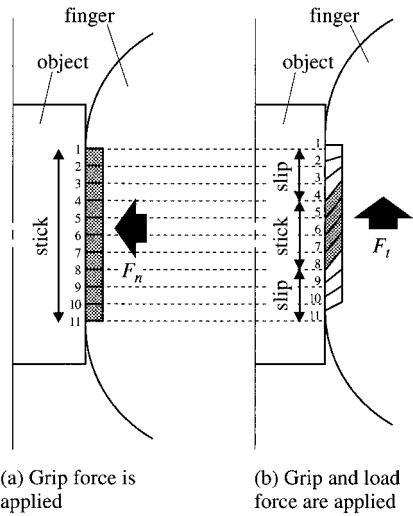


Fig. 3 Schematic view of the stick/slip distribution at the surface of the finger and the strain distribution inside the elastic finger

には滑りが生じる。曲面状弾性体が物体と接しているときには、法線反力は接触領域の中央で最大となるような分布をしているため、最大静止摩擦力は接触の端部で小さくなっている。このため、接触の端部では滑りが生じやすい [6]。図(b)は、仮に節点 1~3, 9~11 が滑った場合を模式的に示している。すなわち、節点 4~8 の近傍の矩形領域は、節点 4~8 が固着しているため平行四辺形状にせん断変形しているが、節点 1~3, 9~11 の近傍の矩形領域は、せん断変形する前に接線力が最大静止摩擦力に達し、固着による拘束が解除されて滑ったために、最大静止摩擦力よりも小さい動摩擦力しか加わらず、せん断変形量が小さくなっている。このため、白抜きの矩形領域は菱形にはなっていない。

以上の結果より、曲面状弾性体内部のせん断ひずみ分布を検出し、微小時刻前（図(a)に相当）と現時点（図(b)に相当）とのせん断ひずみの差を求めれば、せん断ひずみがある値に達している固着領域（図(b)の節点 4~8 に相当）と、せん断ひずみがその値に達していない滑り領域（図(b)の節点 1~3, 9~11 に相当）とを区別できるのではないかと考えられる。

ただし、ヒトがマイスナー小体で検出している量は単位時間あたりのせん断ひずみエネルギーであると考えられる [9]。つまり、上記の値を単位時間で割った値である。このため、この値を直接用いると、制御に速度依存性が生じてしまう。これより、ヒトは速度を別に検出して演算を行っている、あるいは速度が常にほぼ一定となるように制御している、などの可能性が考えられる。この点に関する検討は今後の課題である。

以上の仮説をまとめると以下の通りである。ヒトは摩擦係数・重量が不明であっても、接線力・法線力の増加経路を決めることができる。この制御のために用いることのできるフィードバック情報は、表面の固着・滑り状態の空間分布に対応した量である。その量は、Fig. 3 より、せん断ひずみの変化がある値に達したか否かという情報の空間分布ではないかと考えられる。本仮説は、実際にヒトの皮膚変形と触覚受容の関係の問題として

解明する余地が残されているが、本研究は、仮説を人工のセンサに応用できることを確認することが目的であるので、次章では、センサの有限要素解析によって仮説の有効性を検証する。

3. 分布型触覚センサの有限要素解析

3.1 センサの構造と解析モデル

指腹部内部のせん断ひずみ分布の特徴を利用することによって把持力を制御しているというヒトの把持力制御仮説を人工のセンサに適用するためには、曲面状弾性フィンガ内部のせん断ひずみを検出する必要がある。これまでに、弾性体内部のせん断ひずみを検出できるいくつかのセンサが提案されている。大岡ら[11]は光導波路を用いた触覚センサを開発している。このセンサの形状を変更すれば、本把持力制御に適用できる可能性がある。また、篠田ら[12]は、共鳴型テンソルセルを用いてひずみを検出する手法を開発している。このセンサの基本形状を変更すれば、本把持力制御に適用できる。しかし、本把持力制御では、せん断ひずみの分布のみが得られれば良いのであり、垂直ひずみを検出する必要はない。このため、筆者ら[7]は、従来のセンサよりも容易に製作が可能な、ひずみゲージを用いたセンサの構造を提案した。すなわち、曲面状の表面を持つひずみ分布検出用弾性フィンガを設計・製作した。弾性フィンガの斜視図をFig. 4に示す。本フィンガは、シリコーンゴム内にひずみゲージを貼付したりん青銅薄板を45度に傾けて均一間隔に15枚配置することによって、ひずみゲージの垂直ひずみより、均一弾性体のせん断ひずみに対応する量を検出するものである。シリコーンゴムおよびりん青銅板の縦弾性係数はそれぞれ4.96 [MPa], 1.35×10^5 [MPa], ポアソン比はそれぞれ0.45および0.3である。弾性フィンガの奥行きは、弾性フィンガ全体が持つ剛性と把持対象物体の重量、また製作可能な大きさを考慮し10 [mm]とした。また接触面積を大きくすることで接触面の情報量を多くできると考え、弾性フィンガ表面の曲率半径を763 [mm]とした。この基本設計に基づいて構築された弾性フィンガの有限要素モデルをFig. 5に示す。本モデルは節点数472、要素数430である。なお、本センサは後述のように重量6 [N](質量612 [g])程度の物体を持ち上げることを想定している。寸法を変更することにより、さまざまな重量に対応することが可能と考えている。

3.2 有限要素解析結果に基づく把持力制御法の提案

局所滑り領域の増加に対応したセンサ表面の接線反力分布・法線反力分布、センサ内部のひずみ分布パターンを確認するために、Fig. 6に示したパターンに従って、法線力および接線力を増加させた場合の解析を行った。有限要素解析は、変位を与えて反力を求める方が、力を与えて変位を求めるよりも解析が容易であるので、実際には、剛体平板の-y方向への押し込み量およびx方向への変位量を与える、そのときの反力を求めた。ただし、変位を与えて力を求める問題は逆問題となるので任意の力増加曲線を得ることは困難である。ここでは、ヒト[1][2]と同様な滑らかな力増加曲線となるような変位量を試行錯誤的に決定した。フィンガと剛体平板との接触解析には筆者らが開発した手法[6]を用いた。摩擦係数 μ は0.3とした。解析は、局所滑り領域が増大していく、最終的に全体が滑る(時間ステッ

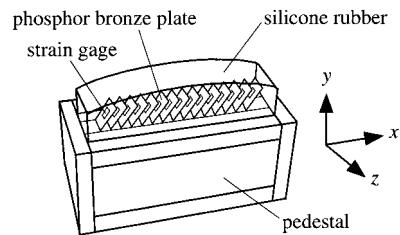


Fig. 4 Top view of finger-shaped sensor

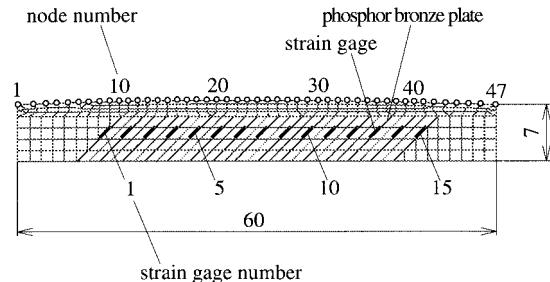


Fig. 5 Finite element model of elastic finger

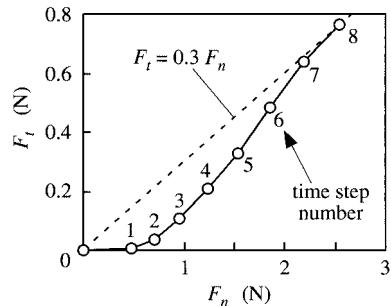


Fig. 6 Normal and tangential force calculated in FE analysis

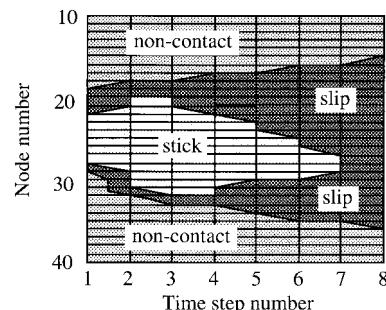


Fig. 7 Calculated contact condition

プ8)まで行った。

Fig. 7に、時間ステップごとの接触状態の変化を示す。図より、法線力 F_n の増加に伴い非接触領域が減少していくこと、接線力 F_t の増加に伴い固着領域が減少していくことが分かる。

Fig. 8に、センサ表面の節点における法線反力分布および接線反力分布、ひずみゲージを貼り付ける部分(Fig. 5参照)のひずみゲージの垂直ひずみ分布の結果を示す。なお、 f_n , f_t はフィンガ表面の節点の法線力、接線力を、 F_n , F_t は法線力、接線力の合力を表す。図(a)より、法線力の増加に伴い、法線反力は上に凸の分布形状を保ちながら増大していくことが分かる。

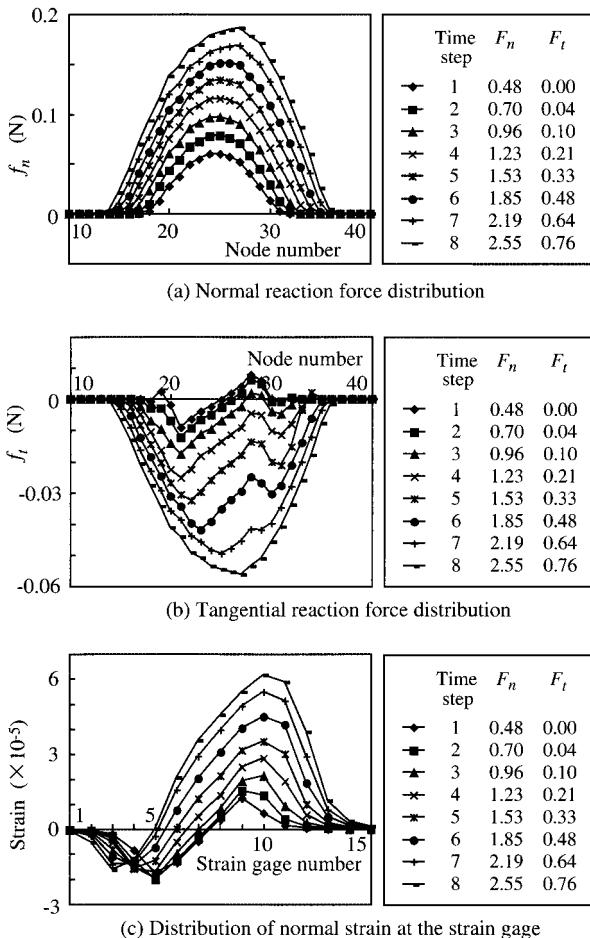


Fig. 8 Calculated reaction force and strain when the finger is in contact with a flat plate

図(b)より、接線力が0のとき接線反力分布は極小値と極大値を持つ分布パターンを呈しているが、把持力の増大に伴い、下に凸の分布パターンに変化していくことが分かる。また、図(c)より、ひずみゲージの部分の垂直ひずみ分布は、最初は極小値と極大値を持つ分布パターンを呈しているが、把持力の増大に伴い、上に凸の分布パターンに変化していくことが分かる。

第2章の議論によれば、フィンガ・物体間の固着領域を知るためにには、弾性体内部のせん断ひずみの増加率の分布がある値を超えるか否かをモニタすればよい。本センサはひずみゲージの垂直ひずみによって、均一弾性体内部のせん断ひずみに対応する量を取得しているので、各ステップごとの垂直ひずみの変化をモニタすればよい。ただし、各時間ステップごとの接線力 F_t の増加量または接線方向変位増加量はまちまちである。そこで、1ステップごとの各ひずみゲージのひずみ増加量 $\Delta\varepsilon_i$ ($i = 1, 15$)を、1ステップごとの接線力 F_t の増加量 ΔF_t で割ることによって、1[N]当たりのひずみの増加率($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$)を求めるこ

とを考える。 ε_i は、センサ内部に分布させたそれぞれのひずみゲージの部分におけるひずみを表す。

以上により定義されたひずみ増加率($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$)を等高線表示したものをFig. 9に示す。ただし、時間ステップ1では、 ΔF_t は0であるから $\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$ の値は無限大となるため、表示

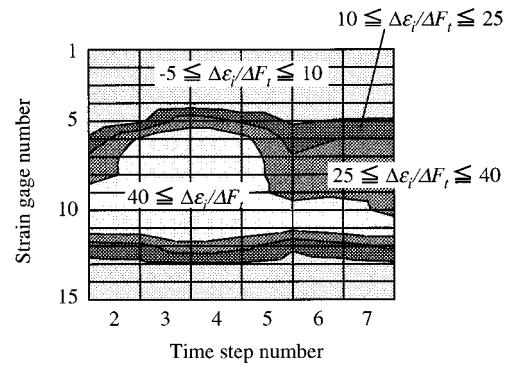


Fig. 9 Change in $\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$

しない。

前述のように、生物の感覚受容器は、ある閾値を超えると発火し、超えていなければ応答しないという特性を有する[8]。同様に、Fig. 9においても、 $\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$ の閾値を設定し、値が閾値よりも大きくなったセンサの数より、固着領域の大きさを推定することができるのではないかと考えられる。

Fig. 9において、閾値を例えば $\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t = 40 \times 10^{-6} N^{-1}$ とすると、時間ステップ数2~4では閾値を超えていた点の範囲が広く、他の時刻では狭くなっている。この傾向は、固着領域の変化とよく対応しており、Fig. 7をみると、固着領域も時間ステップ数2~4のときに広くなり、その後小さくなっていることが分かる。

以上より、ひずみの変化率の分布のうち、閾値を超える点の範囲を固着領域に対応する量と考えてモニタすることにより、接触面の状態を把握することができると考えられる。

また、摩擦係数が異なる場合の解析も行った。この結果、把持対象物体の重量および摩擦係数が異なる場合にも、ひずみ変化率が一定の閾値を超える点の数が固着領域とよく対応していることが分かった。しかも、摩擦係数が異なる場合にも、同じ閾値を用いて固着領域の変化をモニタ可能であった。つまり、ひずみ変化率分布の変化から、重量および摩擦係数が未知の物体の固着領域が増加傾向にあるのか、減少傾向にあるのかを把握できることが明らかになった。

以上の知見を利用することにより、接触面の状態を把握しながら、重量および摩擦係数が未知の物体を把持する制御が可能であると考えられる。そこで、固着と考えられる点が減少したら接線力 F_t の増加量 ΔF_t を小さくする(法線力 F_n の増加量 ΔF_n を大きくする)ことによって、接触面全体に滑りを生じさせることなく物体を把持する制御法を提案する。ただし、前述のように、シミュレーション上は力制御よりも位置制御の方が容易である。また、実際の制御においても、位置制御の方が容易である。このため、Fig. 10のように、法線方向および接線方向変位を変化させて、それぞれの時間ステップにおける接線力、法線力を検出することを考える。もちろん、力を与えて変位を求めてても、基本的な現象に変わりはない。また、Fig. 10では、Fig. 2と異なり、固着領域の大きさを知るために計算すべき量($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$)がすでに明記されている。つまり($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$)を計算し、この値がある閾値を超えた点の数から、固着領域の大

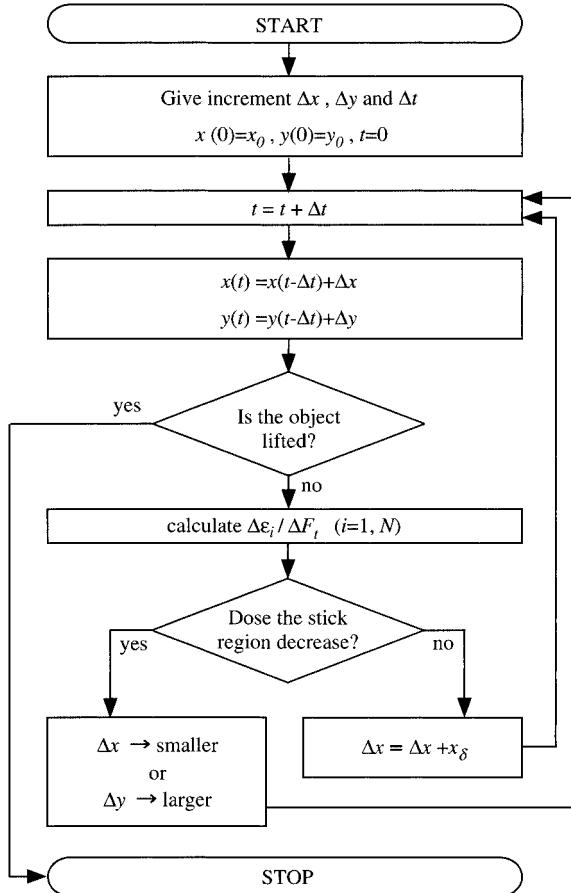


Fig. 10 Flow chart of proposed grasp force control by finger-shaped sensor

きさを推定している。

もしも($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$)が閾値を超えた点の数が減少していたら、言い換えれば、固着領域が減少していたならば、接線変位増加量 Δx を小さくする、または、法線変位増加量 Δy を大きくする、という操作を加えればよい。この方法は様々に考えられるが、本研究では、固着と考えられる点が減少したら Δx を0にした後に再び傾きを徐々に増加させていくこととした。一方、固着領域の大きさが減少していなかったなら、 Δx の値を x_δ だけ大きくすることとした。これにより、 F_t/F_n の傾きは、Fig. 6の場合と同様、二次関数状に徐々に増大していく。

3.3 把持力制御シミュレーション

提案された把持力制御法の妥当性を確認するために、有限要素法による把持力の制御シミュレーションを行った。解析モデルの形状・物性値は3.2節と同じである。筆者らが考案した接触解析手法[6]に基づき有限要素法による準静的時刻歴解析を行えば、変位を与えて接触状態と反力・ひずみ分布を求めることができる。そこで、各時間ステップごとに有限要素モデルに与える変位境界条件を、Fig. 10に示したフローチャートに従って変化させることによって、把持力を制御し物体を持ち上げることが可能か否かをコンピュータシミュレーションによって確認する。 $\Delta x = \Delta y = 0.01$ [mm], $x_0 = 0$, $y_0 = 0.04$ [mm], $x_\delta = 0.01$ [mm]とした。摩擦係数が0.3, 0.6, 0.9の場合につ

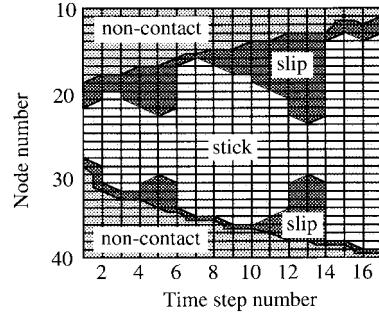


Fig. 11 Calculated contact condition

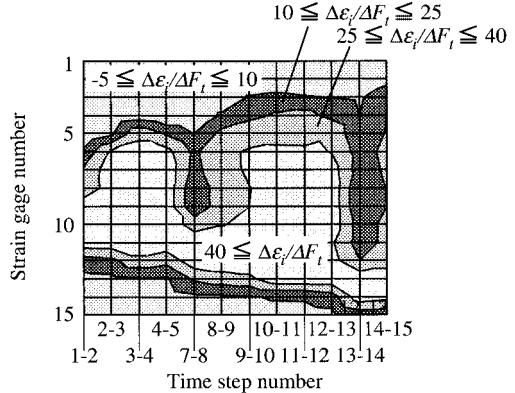


Fig. 12 Change in $\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$

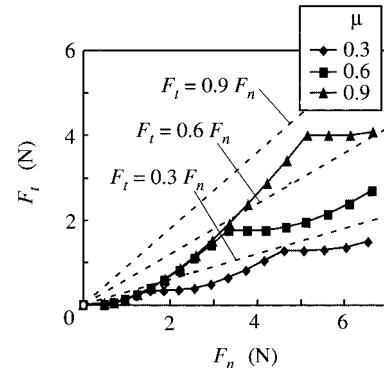


Fig. 13 Normal and tangential force given for FE analysis

いて、

$$F_n \leq 7 \text{ [N]}$$

の範囲で計算を行った。力制御過程において全体が滑らなければ、重量 $2F_t$ までの物体を把持できたこととみなせる。

$\mu = 0.3$ の場合に、提案した条件に基づいて把持力制御シミュレーションを行った際の、接触面の状態の変化を等高線表示したもののがFig. 11に、ひずみ増加率($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$)の等高線表示をFig. 12に示す。Fig. 12では、時間ステップ6および14のときは、 $\Delta F_t = 0$ であるため、 $\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$ が無限大となるので割愛してある。また、 F_n と F_t の履歴をFig. 13に示す。

Fig. 11をみると、時間ステップ2~5または7~13において固着領域が徐々に減少していく様子が分かる。いま($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$)の閾値を $25 [\times 10^{-6} N^{-1}]$ とすると、Fig. 12において、時間ス

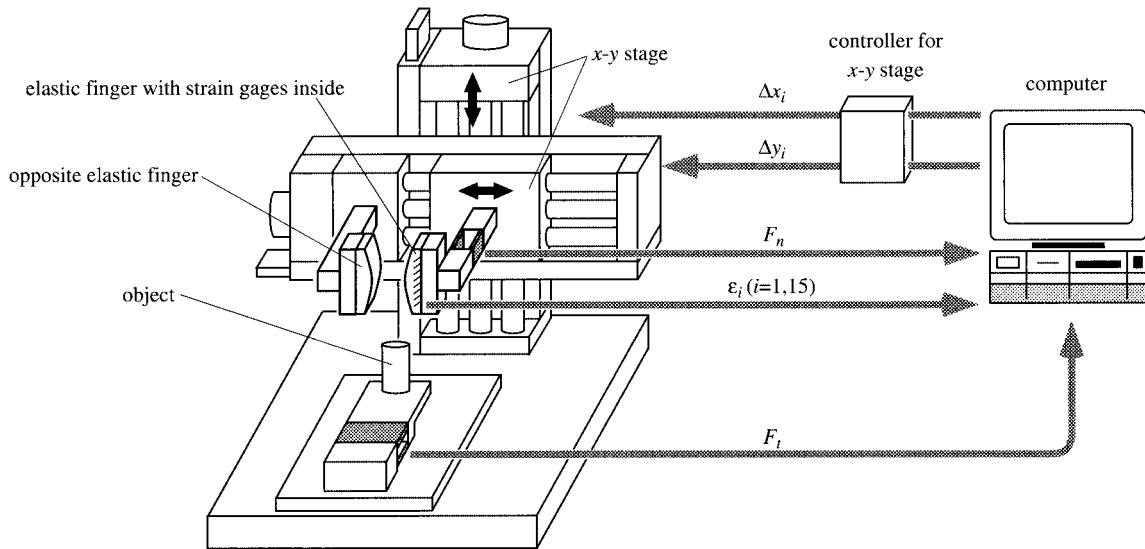


Fig. 14 Measurement system

ステップ 4-5 および 12-13 のときに ($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$) が閾値を超える点の数が減少している。このため、Fig. 13 に示すように、時間ステップ 5 および 13において、 ΔF_t を 0 にした後に再び F_n と F_t を増加させている様子が見てとれる。これに伴い、固着領域の大きさ (Fig. 11) および ($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$) の値 (Fig. 12) も再び増大している。以上のように、本制御法を用いれば、固着領域を把握しながら物体把持を行えることが分かった。

また、摩擦係数 μ が 0.6 および 0.9 の場合にも、同じ値の閾値を用いて、同様に把持力を制御することが可能であった。 $\mu = 0.6, 0.9$ の場合の把持力増加曲線を、 $\mu = 0.3$ の場合とともに Fig. 13 に示す。これより、本把持力制御法を用いれば、任意の重量および摩擦係数の物体を把持できるといえる。なお、本手法では制御系への入力として ($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$) を用いているため、制御特性はフィンガの速度には依存しない。

4. 分布型触覚センサを用いた計測

4.1 計測システム

Fig. 14 に把持力制御システムの構成を示す。曲面状弾性フィンガは、接線方向・法線方向の 2 自由度を持つ $x-y$ ステージに取り付けられている。また、曲面状弾性フィンガに対向して、同じ形状・材質のフィンガが取り付けられており、曲面状弾性フィンガとともに上下に移動する。曲面状弾性フィンガを支える梁にはリン青銅板の板ばねを 2 枚平行に取り付けた平行移動機構が設けられており、リン青銅板に貼られたひずみゲージにより法線力 F_n を検出する。また、物体を置く台にも、接線力 F_t を検出するための平行移動機構が設けられている。現実的には接線力 F_t はロボットハンド側で計測されるべきであるが、本研究では、計測の容易さからこのような構成とした。なお、 $x-y$ ステージは位置制御を行うが、法線力 F_n 、接線力 F_t をモニタするので実質的に力制御と等価である。なお、 ΔF_n の初期値は 0.5 [N] とし、ステージの移動速度は x 方向約 3 [$\mu\text{m}/\text{s}$]、 y 方向約 2 [$\mu\text{m}/\text{s}$] とした。平行移動機構を設けた台の上に置かれた、持ち上げる物体の重量は 6 [N] とする。物体の表面はア

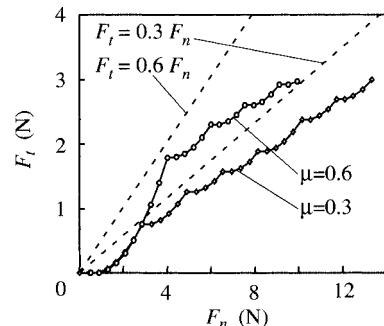


Fig. 15 Change in measured grasp force

ルミニウムとし、物体表面にパウダーを塗布することによって摩擦係数が小さい場合の計測を行った。計測するチャンネル数は、フィンガ部に 1ch、接線力測定装置に 1ch、ひずみ分布センサに 15ch、合計 17ch であり、パソコンにより入出力を行う。

4.2 計測結果

提案した把持力制御法に基づき、 $\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$ が閾値を越えた点の数をモニタし、 ΔF_t を変化させることによって物体把持を行った。センサとの間の摩擦係数 0.3、重量 6 [N] の物体および摩擦係数 0.6、重量 6 [N] の物体に対し、把持力制御実験を行った。閾値はいずれも $100 [\times 10^{-6} \text{ N}^{-1}]$ とした。閾値がシミュレーションと異なるのは、前報[7]でも述べたように、有限要素モデルにおいて、材料非線形および大変形による非線形を考慮していないことや分割が粗いことなどに起因すると考えられる。把持力の増加曲線を Fig. 15 に示す。Fig. 15 より、前報のシミュレーションの場合と同様に、摩擦係数の異なる二つの物体を、全体を滑らせることなく把持できていることが分かる。摩擦係数 0.6 のケースでは、滑りの条件 ($F_t = \mu F_n$) から次第に離れていき、把持力 F_n が過大となる傾向が見られる。これは、4.3 節で述べるように、固着領域が減少すると直ちに ΔF_t の値をゼロリセットするというアルゴリズムに依存していると考えられる。

以上より、固着領域が増加傾向にあるのか、減少傾向にあるのかを把握することにより把持力を制御するという本手法を用いて、重量および摩擦係数が未知の物体を、全体に滑りを生じさせることなく、また、過度な法線力を加えることなく、適切な力で把持し持ち上げられることを確認した。

4.3 考察

本手法によれば、重量および摩擦係数が未知の任意の物体を任意の速度で把持し持ち上げることができる。このような制御法は、ヒトが行っている制御と基本的に類似していると考えられる。

特に、以下の点はよく類似している。すなわち、ヒトは、法線力 F_n の大きさが十分か否かを触覚受容器のインパルス発射によって検出し、フィードバックする結果、法線力 F_n を大きくして、全体の滑りを回避している[1][2]。一方、Fig. 12 および Fig. 13 を見ると、本センサでは、法線力が不足して波線で示した全体が滑る状態に近づくと ($\Delta\varepsilon_i/\Delta F_t$) の値が閾値を超える点の数の変化によって、全体が滑りやすい状態を察知し、相対的に法線力 F_n を増大させることによって全体の滑りを回避している。

ただし、本制御の制御量はかなり簡略化されているので、制御の詳細はヒトとは大きく異なる。すなわち、本手法では、アルゴリズムをなるべく単純化するために、固着領域がある閾値よりも小さくなったときに接線力の増加量をゼロリセットするという手法を取った。このため、Fig. 13 や Fig. 15 の力増加曲線は不連続な曲線をつなぎ合わせた形となっている。一方、ヒトの把持力変化[1][2]は連続曲線である。つまり、現実には法線力、接線力の増加量 ΔF_n , ΔF_t は連続的に変化している。したがって、本把持力制御をさらにヒトの把持力制御に近づけるために、また、制御の安定性を増すためには、固着領域の変化に対する ΔF_n , ΔF_t の変化させ方を検討する余地がある。特に、固着領域が減少したら直ちに曲線の傾きを変えるのではなく、把持力が十分大きいならば傾きを緩やかに変化させるなど、 ΔF_n , ΔF_t の考え方には様々な手法が考えられる。また、本研究では閾値を試行錯誤的に決定したが、この点に関しても検討の余地がある。ヒトは神経インパルスの発射閾値を進化的に獲得しているので、生物に学んだソフトコンピューティング的な手法が有効ではないかと考えている。

また、本研究では十分に遅い動作を想定しているので、慣性力、粘性力は無視した。フィードバックに基づく遅い動作であるとはいえ、実際には慣性・粘性を無視し得ない場合が多いと考えられる。慣性・粘性の考慮は今後の課題である。

なお、本研究では、研究対象を、表面が平らな物体を把持し持ち上げるタスクに限定したが、持っているコップに水を足す場合や任意の外乱が作用する場合への適用も原理的に可能と考えられる。また、対象物が平板でなく連続曲面の場合へも原理的に適用可能であろう。これらのタスクへの展開は今後の課題である。

人工物は生物とは設計原理が異なるので、生物に学ぶ視点は無意味ではないかという指摘もある。特に、ヒトの指腹部のように数 100 [個/cm²] ものセンサをロボットフィンガに埋め込むのは無理であるから、複数のセンサを弾性フィンガ内に埋め

込む考え方は無意味である、との指摘も可能である。しかし、一般に人工のセンサは生物よりも解像度が高い。したがって、摩擦係数が極めて小さい場合、重量が大きい場合など、むしろヒトが日常的に接するタスクよりも困難なタスクへと展開できる可能性があると考えられる。また、レンズと CCD を組み合わせた人工の目は今や光学的精度も解像度も十分生物の目に匹敵する。同様な議論は触覚センサにも適用可能であると考えられる。また、高速・高精度性が要求された産業用ロボットと異なり、運動の複雑性・ロバスト性・自律分散性が要求されるこれからの医療・福祉・家庭・アミューズメント用ロボットにおいては、センサ・アクチュエータの複数化・複合化が必要とされる。本センサの方向性はこの要求とも合致している。また、人と接する場で利用される医療・福祉・家庭・アミューズメント用ロボットは、人間親和性が要求される。ヒトや生物に学ぶ柔軟なセンサという方向性は、人間親和性の要求にも合致していると考えられる。今後は、視覚における CCD のように、高集積化された触覚センサを具現化する必要があろう。

5. おわりに

本研究では、まず、ヒトの物体把持に関する従来の知見を整理し、ヒトの把持力制御に関する仮説、すなわち、物体を安定的に把持している固着領域の大きい状態と、全体が滑ってしまう可能性の高い固着領域の小さい状態とを、内部ひずみ分布の変化から識別しているという仮説を提唱した。次に、曲面状弹性フィンガの有限要素解析を行い、上記の仮説の妥当性を明らかにした。さらに、固着領域が減少すると接線力の増加量を小さくする（法線力の増加量を相対的に大きくする）という把持力制御法を提案し、手法の妥当性をシミュレーションおよび実験により確認した。

本研究の一部は（財）カシオ科学振興財団助成金および（財）守谷育英会助成金の援助を受けて行われた。

参考文献

- [1] S. Johansson and G. Westling: "Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic Control of Precision Grip When Lifting Rougher or More Slippery Objects," *Exp. Brain Res.*, vol.56, pp.550–564, 1984.
- [2] S. Johansson and G. Westling: "Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during the Precision Grip," *Exp. Brain Res.*, vol.66, pp.141–154, 1988.
- [3] 山田: “把持までのセンシング戦略、その2:滑りと静摩擦係数の検出～表面粗さ情報の取得”，日本ロボット学会誌，vol.11, no.7, pp.959–965, 1993.
- [4] 山田: “触覚センシング研究の新しい展開”，機講論，no.96–2, B, pp.1505–1508, 1996.
- [5] G. Canepa, D.D. Rossi et al: "Detection of Incipient Object Slippage by Skin-Like Sensing and Neural Network Processing," *IEEE Trans. Systems, Man, Cybernetics–Part B*, vol.28, no.3, pp.348–356, 1998.
- [6] 前野、小林、河合、平野: “曲面状弹性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法”，日本機械学会論文集，64巻 620号，C編，pp.1258–1265, 1998.
- [7] 河合、平野、前野: “把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発”，日本機械学会論文集，64巻 627号，C編，pp.4264–4270, 1998.
- [8] 岩村: “ヒト触覚受容器の構造と特性”，日本ロボット学会誌，vol.2,

- no.5, pp.438-444, 1984.
- [9] 小林, 前野: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第2報, 動的接触解析手法および移動する平面と指の動的接触解析結果)”, 日本機械学会論文集, vol.64, no.628, C編, pp.4798-4805, 1998.
- [10] 小林, 前野: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係(第3報, 凹凸を有する面と指の接触解析結果)”, 日本機械学会論文集, vol.65, no.636, C編, pp.3321-3327, 1999.
- [11] 大岡: “ヒトの指先大触覚センサ”, 日本機械学会講演論文集, No.96-2, B, pp.783-784, 1996.
- [12] 篠田, 松本: “共鳴型テンソルセルによる三次元構造触覚センサ”, 日本機械学会講演論文集, No.96-2, B, pp.785-786, 1996.



前野隆司 (Takashi Maeno)

1962年1月19日生。1986年東京工業大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)入社。1990~1992年カリフォルニア大学バークレー校客員研究員。1995年慶應義塾大学専任講師、現在助教授。工学博士。1995年日本音響学会技術開発賞受賞。1999年日本機械学会賞(論文)受賞。アクチュエータ、センサ、ロボット等の研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、日本音響学会等の会員。(日本ロボット学会正会員)



広光慎一 (Shinichi Hiromitsu)

1975年11月10日生。1999年慶應義塾大学機械工学科卒業。同年慶應義塾大学理工学研究科修士課程入学。現在に至る。触覚センサおよびヒトの触覚受容機構の研究開発に従事。日本機械学会学生会員。(日本ロボット学会学生会員)



河合隆志 (Takashi Kawai)

1975年3月18日生まれ。1997年慶應義塾大学機械工学科卒業。1999年慶應義塾大学理工学研究科修士課程修了。2000年東京医科大学入学、現在に至る。