

曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づく把持力制御法

前野隆司*1, 小林一三*2
河合隆志*3, 平野雄一*3

Grip Force Control by Detecting the Internal Strain Distribution Inside the Elastic Finger Having Curved Surface

Takashi MAENO, Kazumi KOBAYASHI,
Takashi KAWAI and Yuuichi HIRANO

In this study we propose a method for controlling contact force when object is lifted by fingers having curved surface without producing whole slip or applying excessive force even when the weight and the friction coefficient of the object are unknown. The deformation of the elastic finger when the finger is in contact with the object with/without tangential load is calculated by using a FE (finite element) analysis. It is found that the partial incipient slip region at the contact surface changes due to the change of the tangential force. It is also found that the internal shear strain distribution is in relation with the partial incipient slip at the contact surface during the precision grip. From this, we can conclude that we can obtain the tangential force change from the shear strain distribution inside the elastic body.

Key Words: Tactile Sensor, Contact Problem, Tribology, Friction, Biomechanics, Finite Element Method

1. 緒 言

ヒトは物体を、必要最小限の力で把持し持ち上げることができる。これは一見簡単な制御のようであるが、実際の制御系は複雑である。すなわち、指先に配置された多数の触覚受容器により皮膚の複雑な応答を検出し、これを末端及び中枢神経系で処理して対象物に応じた適当な把持力を求めた後に、筋に指令値を与える制御を行っていると考えられる。

ロボットハンドに把持動作を行わせる場合にも、同様に把持力を制御する必要がある。重量や形状が既知で剛性の大きい物体を取り扱うことの多い工業用ロボットにおいては、物体を握りつぶす可能性は小さいため、把持力はある一定値以上であればよく、簡単な圧力センサで把持力を検出すれば十分な場合が多い。これに対し、近年必要性の高まっている医療用サージェリーロボットや介護ロボット、家事ロボットのような、生体などの形状が複雑で柔軟な物体をハンドリングするロボットのハンドでは、物体を握りつぶさないように把持力を高精度に制御する必要がある。また、工業用ロボットで多種の部品を取り扱う場合や、重量が変化する物体を把持

する場合にも、把持力を高精度に制御する必要がある。これらの要求に鑑み、これまでに様々な物体把持手法が提案されている。その多くは物体が滑り始める際の滑りを検出するもの、または摩擦係数を検出するものである^{(1),(2)}。しかし、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、摩擦係数を検出する手法によれば物体が滑りはじめない範囲の適当な把持力を求めることができるが、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。一方、ヒトの把持力制御には指表面の初期局所滑りが重要な役割を担っていることが指摘されている^{(3),(4)}ので、初期局所滑りを物体の把持力制御に用いる研究も行われている^{(1),(2)}。しかし、形態と物理量の関係、すなわち、センサ表面の形状と、これに伴う初期局所滑り状態および接触力や内部ひずみ分布の関係は十分に明らかにされていない。特に、指腹部のような曲面状の弾性体の初期局所滑りに着目した研究は行われていない。

他方、ロボットハンドに触覚を検出させるために、弾性体内に複数のセンサを分布させる、曲面状の弾性体内にセンサを配する、といった試みも盛んに行われている^{(1),(2),(5)~(8)}。これらの研究で着目する形態はヒトの触覚受容機構のそ

* 原稿受付 平成9年3月21日

*1 正員, 慶応義塾大学理工学部 (223 横浜市港北区日吉3-14-1)

*2 学生員, 慶応義塾大学院

*3 慶応義塾大学

れと類似しており興味深いですが、いずれの研究も、把持力を制御する目的で行われたものではない。

本研究では、初期局所滑りの検出、曲面状弾性体、分布型センサ、といったヒトの触覚受容機構の特徴に着目し、曲面状弾性体の内部ひずみ分布検出に基づいて重量および摩擦係数が未知の物体を物体が滑り始めずかつつぶれない最小限の力で把持する手法を提案する。まず、皮下の複数のセンサで内部ひずみ分布を読み取ることによって全体滑りが生じない範囲で把持力を増加させる把持力制御法について述べる。次に、半円状有限要素モデルを用いて、本把持力制御法を検証する。さらに、ヒトの指のモデルに対し同様な計算を行い、ヒトの触覚受容機構に関する考察も行う。

2. 把持力制御法の提案

図1に、円筒状の弾性体（指）で物体を把持し持ち上げるときに弾性体に加わる法線力（把持力） F_n と接線力（摩擦力） F_t の関係を示す。摩擦力はクーロンの法則に従うものとし、簡単のため、動摩擦係数と静止摩擦係数は等しい値 μ であると仮定した。全体が滑る条件は、

$$F_t = \mu F_n \dots\dots\dots (1)$$

である。また、自重 mg の物体を持ち上げる条件は、

$$F_t = mg / 2 \dots\dots\dots (2)$$

である。したがって、法線力 F_n と接線力 F_t は、図1の斜線の範囲内に存在する。物体を把持し持ち上げる際には、法線力 F_n と接線力 F_t は白抜き矢印のように増加し、

で示した点に到達すると考えられる。なお、 F_n が大きすぎると、物体をつぶしたり損傷を与える可能性があるので、力の到達点における把持力

$$F_n = F_{lift} \dots\dots\dots (3)$$

は、式(1)と式(2)の交点

$$F_n = mg / 2\mu \dots\dots\dots (4)$$

に十分近くなければならない。

物体を把持するためには、何らかの手段で F_n, F_t の増大曲線と到達点を把握する必要がある。従来開発されてきた触覚センサ^{(1),(2)}では、物体の微小な滑りを許容し、滑り始めた状態($F_t > \mu F_n$)を検出する、あるいは摩擦係数 μ を検出することによって力の到達点を求めていた。

一方、ヒトが指腹部で物体を把持する場合には、摩擦係数 μ および物体の重量 mg が変化しても、式(3)と式(4)の比 $2\mu F_{lift} / mg$ が、

$$2\mu F_{lift} / mg \quad 1.2 \sim 1.5 \dots\dots\dots (5)$$

のようにほぼ一定値となるような把持力 F_{lift} が加えられる⁽³⁾。つまり、ヒトは、重量 mg および摩擦係数 μ が未知の物体を、常に適当な力で把持し持ち上げることができる。ここでは、従来の触覚センサの制御法のように重

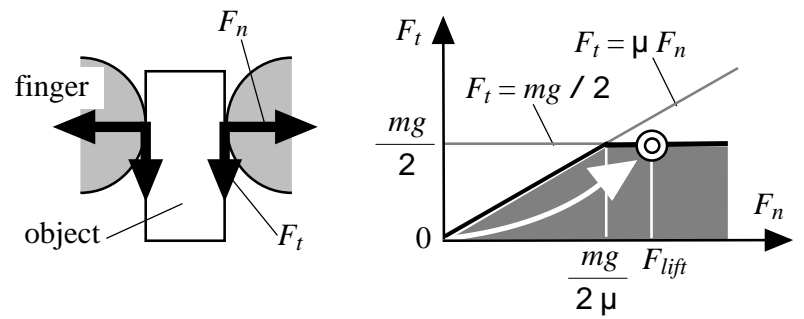


Fig. 1 Relationship between normal force (grip force) F_n and tangential force (friction force) F_t

量 mg および摩擦係数 μ が検出されるのではなく、指表面の初期局所滑りが利用されていると言われている^{(1) (4)}が、その詳細は明らかにされていない。このため、筆者らは、弾性接触理論⁽⁹⁾に基づく以下の考察によってヒトの触覚受容機構を模倣した把持力制御手法を提案し、次章の数値解析によって提案した手法の検証を行う。

円筒状弾性体が平板と接触し、接線方向の負荷を受けて接線力が生じるとき、接触領域の端部から初期局所滑り領域が成長してゆき、最終的には全体に滑りが生じる⁽⁹⁾。これより、ヒトは指皮下の触覚受容器で何らかの物理量を検出することによって表面の初期局所滑り領域の増大を観測し、全体滑り状態に到達しないように把持力を変化させていると考えられる。

いま、摩擦係数 μ および物体の重量 mg が変化すると式(1)および式(2)の値が変化するため、式(5)に基づき力の到達点は変化する。しかし、摩擦係数 μ および物体の重量 mg が変化しても、 F_{lift} と $mg / 2\mu$ の比が常に1.2~1.5に保たれるように把持力は制御されねばならない。言い換えれば、摩擦係数 μ および物体の重量 mg が変化しても、図1幾何学的パターンがトポロジカルに変換される(図1のパターンが F_t 軸および F_n 軸方向に均一に引き延ばされる、あるいは圧縮される)だけで、式(1)~(5)の関係は常に保たれねばならない。いま、ヒトの触覚受容器で検出している量が応力やひずみの値そのものであったなら、図1の幾何学的パターンのトポロジカルな変化に対応することはできない。一方、ヒトの触覚受容で行われていることが、視覚受容における図形認識のような何らかのパターン認識であるなら、 F_n と F_t の関係を表す図1の幾何学的パターンのトポロジカルな変化に対応し得る。これより、 F_{lift} と $mg / 2\mu$ の比を常に1.2~1.5に保つように物体を把持するためにヒトが触覚受容器で検出している量は、応力やひずみの値そのものではなく、応力やひずみの分布パターンの特徴なのではないかと考えられる。つまり、物体の重量および摩擦係数が変化しても、 F_n, F_t を変えたときの初期局所滑り領域の増大パターンと、それに伴う接触力および内部応力・ひずみ分布の変化パターンが常に同じ傾向を有しており、ヒ

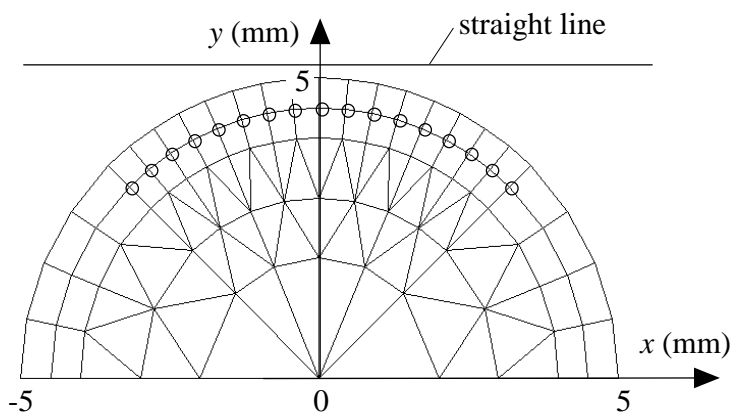


Fig. 2 Finite element model of half cylinder

トは、このパターンを利用して把持力を制御しているのではないかと考えられる。

このようなヒトの把持力制御に関する考察に基づき、以下のような、人工のセンサを用いた把持力制御法を提案する。

- (1) 全体の構造は、ヒト指腹部と同様、表面が曲面状の弾性体の内部に複数のセンサが配置された構造とする。
- (2) 曲面状弾性体に接触する物体の重量および摩擦係数が異なる場合の、初期局所滑り領域の増大パターンと、それに伴う接触力および内部ひずみ分布の変化パターンの関係を明らかにする。
- (3) (2)で求めたひずみ分布固有の特徴的なパターンを検出し、処理することによって、適当な把持力を求め、物体を最小限の力で把持し持ち上げる制御を行う。

上記の(1)は、ヒトの指の構造に対応している。また、(2)はヒトの学習過程に、(3)は学習に基づく実時間制御に相当すると考えられる。

3. 解析手法

本章では、曲面状弾性体に法線力および接線力が作用した場合の、表面の初期局所滑り状態および弾性体内部のひずみ分布固有の特徴を、有限要素法を用いた接触解析によって明らかにする。

図2に有限要素モデルを示す。下面($y=0$)が拘束された半径5mmの半円柱を、平面ひずみ要素を用いてモデル化し、上面に平板(直線)が接触する場合の変形を、有限要素コードMARCを用いて解析する。平板に加わる y 方向の法線力が物体把持力 F_n に、 x 方向の接線力が物体を持ち上げる力 F_t に相当する。縦弾性係数は1MPa、ポアソン比は0.45とした。簡単のため、材料非線形、大変形による非線形は無視した。MARCには固着(stick)・滑り(slip)を考慮した接触解析を行うモジュールがあるが、収束性、解の誤差、取り扱い易さに若干の問題があ

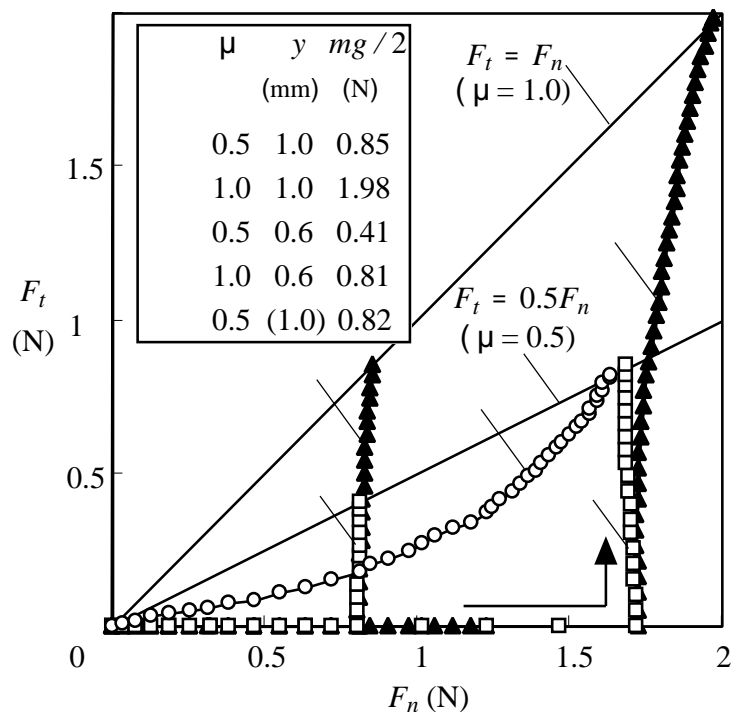


Fig. 3 Calculated normal and tangential force

るため、本研究では、接触する可能性のある節点の接触と非接触、固着と滑りの状態を境界条件として与える収束演算アルゴリズム⁽¹⁰⁾を改良して解析をおこなった。すなわち、まず、ある離散化時刻において、法線方向の接触状態(接触/非接触)を、1ステップ前の接触状態と等しいと仮定する。また、接触している節点は接線方向には固着していると仮定する。この境界条件下で有限要素解析を行った結果において、

- (a) 接触と仮定した節点の法線反力が負ならその節点は非接触とする
- (b) 非接触と仮定した節点がめり込んでいたらその節点は接触とする
- (c) 固着と仮定した節点の接線反力(摩擦力)の絶対値が最大静止摩擦力を越えていたらその節点は滑るので動摩擦力を加える

という境界条件の変更を行い、再び有限要素解析を行う。この操作を繰り返して、

- () 接触点では法線反力が正
- () 非接触点では浮きがある
- () 固着点では接線反力(摩擦力)の絶対値が最大静止摩擦力以下
- () 滑り点では動摩擦力が加わる

という条件を満たす、ある時間ステップにおける収束解を求める。

以上の接触解析における平板の境界条件の与え方には2通りの方法がある。1つは、平板に加わる x 方向および y 方向の力 F_n, F_t を変えて計算を行い、平板の x 方向および y 方向変位を求める方法である。他方は、逆に、平板の x 方向および y 方向変位を与えて、平板に加わる力 F_n, F_t を求める方法である。しかし、本研究の問題では、平板と接触する弾性体の各節点に生じた接触力の総

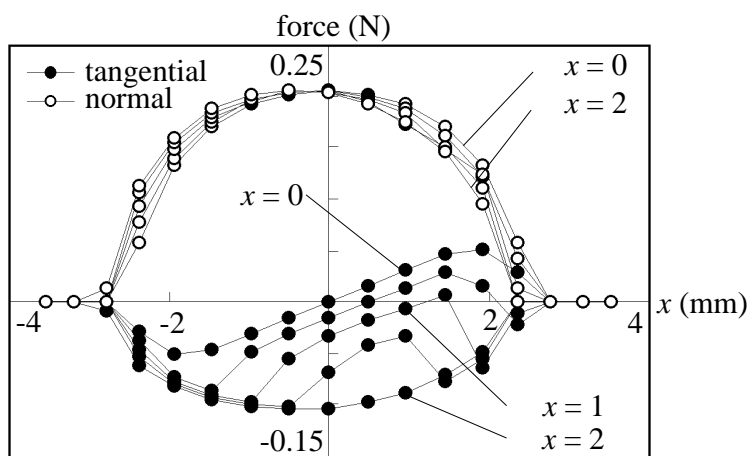


Fig. 4 Normal and tangential force distribution for case

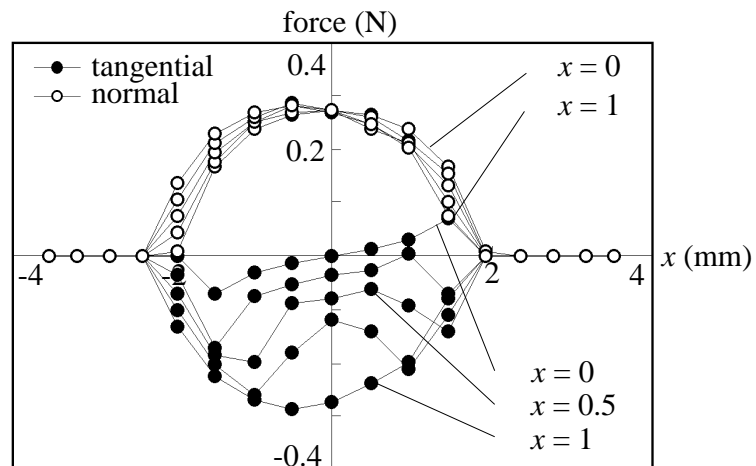


Fig. 8 Strain distribution inside the FE model for case

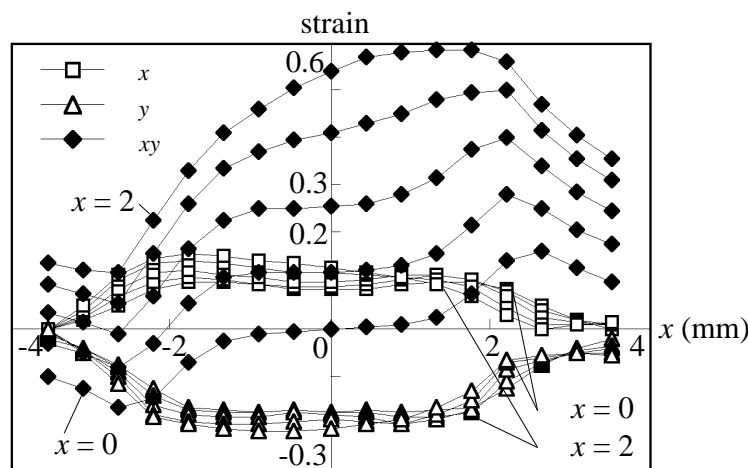


Fig. 5 Strain distribution inside the FE model for case

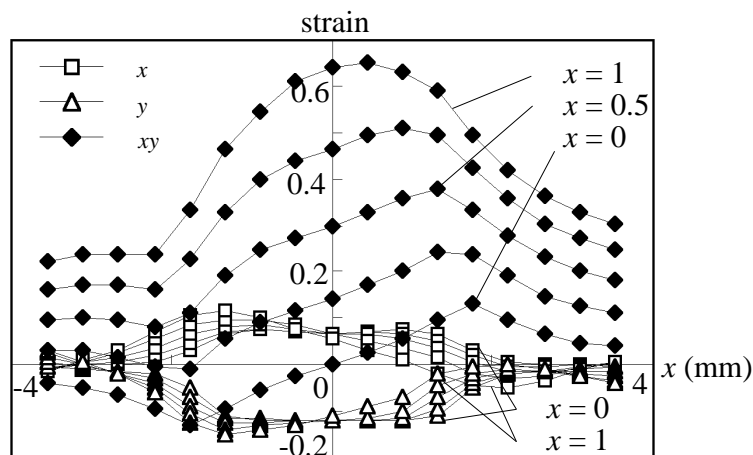


Fig. 9 Strain distribution inside the FE model for case

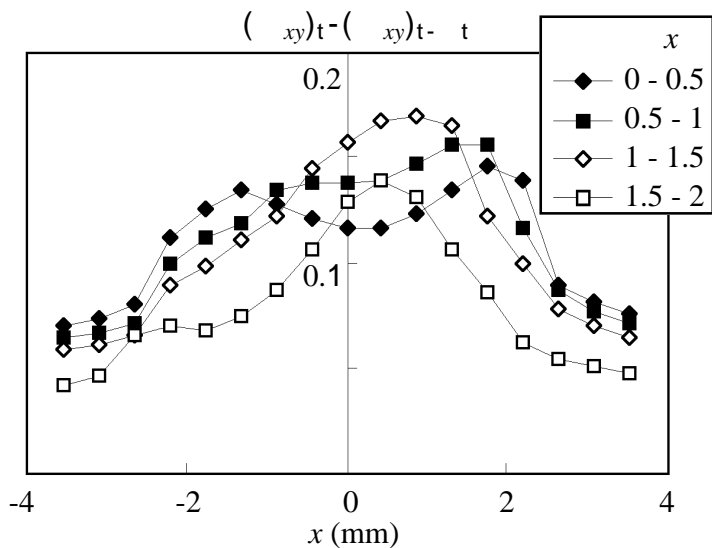


Fig. 6 Distribution of $(xy)_t - (xy)_{t-1}$ inside the FE model for case

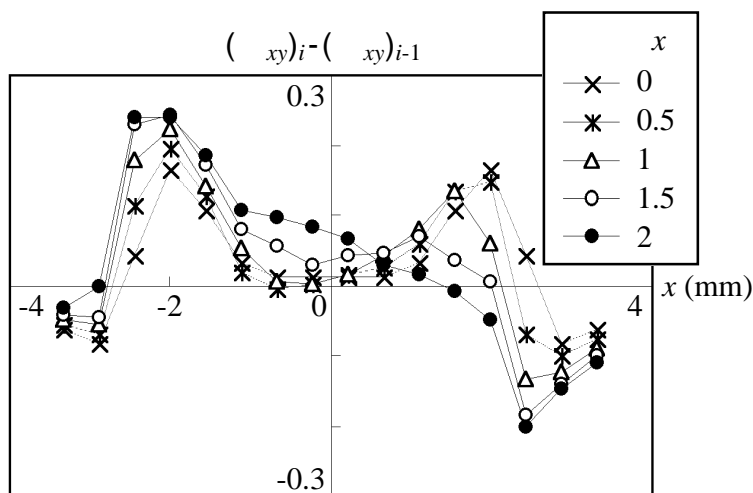


Fig. 7 Distribution of $(xy)_i - (xy)_{i-1}$ inside the FE model for case

和として x 方向および y 方向の合力 F_n, F_t が求まるのであり、合力 F_n, F_t を与えて平板の変位を求めるのは困難である。このため、本研究では後者を採用した。すなわち、平板の x 方向および y 方向変位を変えて各時間ステップごとの計算を行うことによって、接触領域内の固着・滑り状態および垂直反力・法線反力分布、モデル全体の变形および応力・ひずみ分布を求める。

4. 解析結果

4.1 基本モデルの解析結果 まず、平板と円筒面との基本的な接触状態を明らかにするために、摩擦係数 μ を0.5とし、平板の $-y$ 方向への押し込み量 y を1mmとした後に、平板を x 方向に移動させた場合の解析を行った。この条件は実際の把持動作とは異なり、 F_n を増加させた後に F_t を増加させる操作に相当する。 F_n と F_t の関係を図3の に示す。 F_n が1.75Nまで増加した後に F_t が0.85Nまで増加している。

図4に、平板の x 方向への移動量 x を0mmから2mmまで変化(F_t を0Nから0.85Nまで増加)させたときの反力分布の変化を示す。図より、平板を x 方向に移動させても法線反力の分布はほとんど変化しないことがわかる。一方、接線反力分布は変化している。 x が0のときには、曲面状弾性体が左右に押し広げられる左右対称なせ

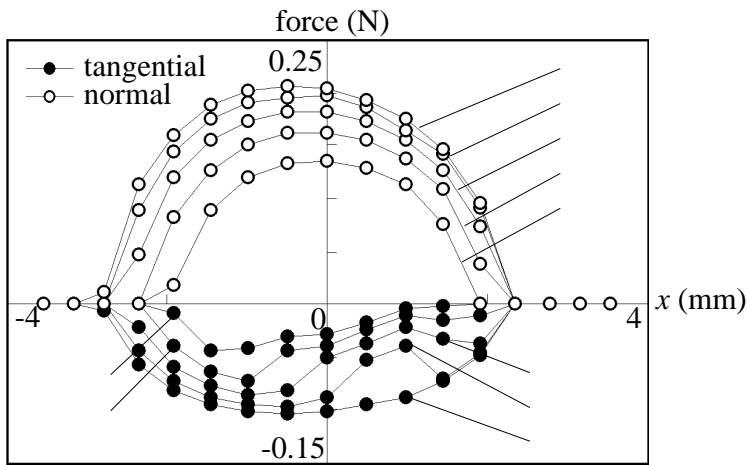


Fig. 10 Normal and tangential force distribution for case

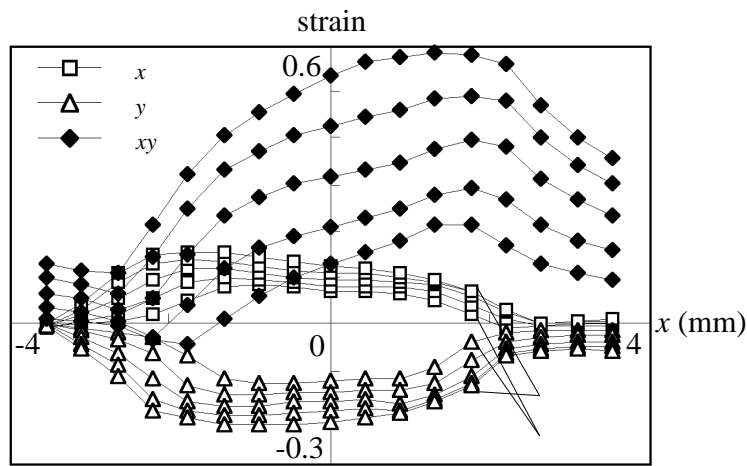


Fig. 11 Strain distribution inside the FE model for case

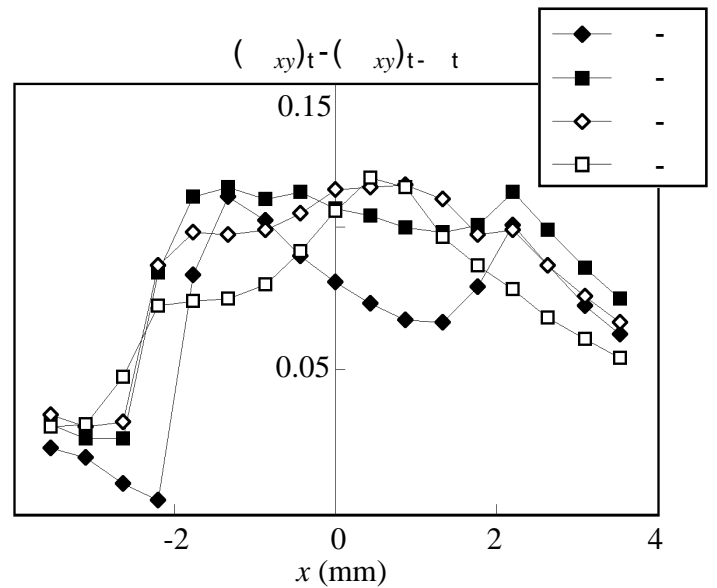


Fig. 12 Distribution of $(xy)_t - (xy)_{t-t}$ inside the FE model for case

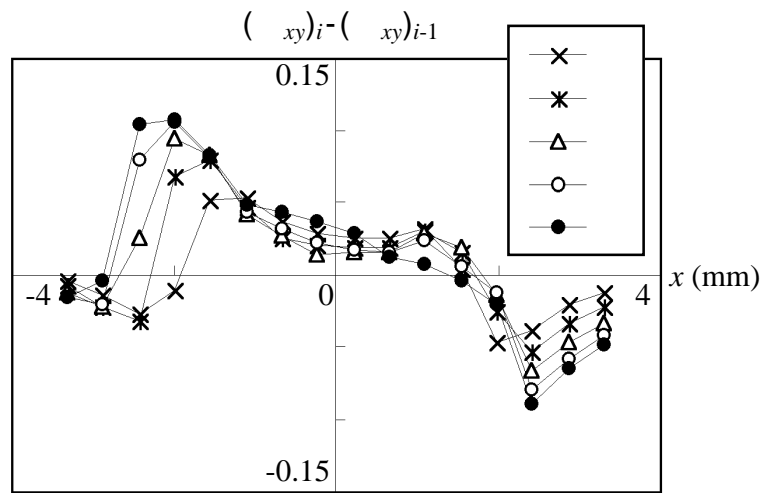


Fig. 13 Distribution of $(xy)_i - (xy)_{i-1}$ inside the FE model for case

せん断変形が表面の節点で拘束されることにより、 $x=0$ を境に点対称に分布する接線反力が生じる。すべての接触する節点は固着している。 x が増大すると、接触部両端から、反力が、

$$(\text{接線反力}) = \mu \cdot (\text{法線反力}) \quad \dots (6)$$

を満たす滑り領域が増大してゆく。 $x=2$ のとき、すべての接触する節点は式(6)を満たす。すなわち、接触する節点全体が滑る。このような接触力の挙動は、従来の知見⁽⁹⁾と定性的に一致した。

図2に示した内部節点のひずみの変化を図5に示す。表面節点の接線力分布が変化しても、垂直ひずみ x 、 y はあまり変化しない。一方、せん断ひずみ xy は、 x が0のときは $x=0$ に対し点対称な分布となっているが、 F_t の増加とともに増大し、 x が2のときには $x=1.5$ 付近に極大値を持つ分布となることわかる。つまり、接線力 F_t の増加に対応して、接線反力および内部節点のせん断ひずみの分布が変化してゆくことがわかった。応力についても同様な議論が成り立つ。

せん断ひずみ分布の変化パターンを詳細に明らかにするために、せん断ひずみの単位時間ステップ当たり変化量 $(xy)_t - (xy)_{t-t}$ を図6に、ある節点 i におけるせん断ひずみと隣接する節点 $i-1$ での値との差 $(xy)_i - (xy)_{i-1}$ を図7に、それぞれ示す。前者はせん断ひずみ速度に、後者は横軸に位置 x を取ったときのせん断ひずみ分布の傾きに、それぞれ比例する量である。なお、ヒトの場合は、触覚受容器の一部の速度受容器(マイスナー小体、メルケル細胞)⁽¹¹⁾で、せん断ひずみなどの変化量を検出していると考えられる。また、ヒトの神経回路では、側抑制によって、ある触覚受容器の応答と隣接する触覚受容器の応答との差を計算しているため、せん断ひずみの傾きに対応する量を検出していると考えられる。図6より、せん断ひずみ変化量の分布は、 x が小さいときには2カ所に極大値を持つ分布となっているが、 x が増大すると極大値が1カ所の分布に変化することがわかる。また、図7より、せん断ひずみの傾きは、 x が小さいときには2カ所に極大値を持つ分布となっているが、 x が大きくなるとは接触領域内で単調減少する分布となることわかる。このように、せん断ひずみ速度およびせん断ひずみの傾きは、接線力の増大に伴う初期局所滑り領域の増大に対応して、固有の分布パターンを呈することがわかった。

せん断ひずみと隣接する節点 $i-1$ での値との差 $(xy)_i - (xy)_{i-1}$ を図7に、それぞれ示す。前者はせん断ひずみ速度に、後者は横軸に位置 x を取ったときのせん断ひずみ分布の傾きに、それぞれ比例する量である。なお、ヒトの場合は、触覚受容器の一部の速度受容器(マイスナー小体、メルケル細胞)⁽¹¹⁾で、せん断ひずみなどの変化量を検出していると考えられる。また、ヒトの神経回路では、側抑制によって、ある触覚受容器の応答と隣接する触覚受容器の応答との差を計算しているため、せん断ひずみの傾きに対応する量を検出していると考えられる。図6より、せん断ひずみ変化量の分布は、 x が小さいときには2カ所に極大値を持つ分布となっているが、 x が増大すると極大値が1カ所の分布に変化することがわかる。また、図7より、せん断ひずみの傾きは、 x が小さいときには2カ所に極大値を持つ分布となっているが、 x が大きくなるとは接触領域内で単調減少する分布となることわかる。このように、せん断ひずみ速度およびせん断ひずみの傾きは、接線力の増大に伴う初期局所滑り領域の増大に対応して、固有の分布パターンを呈することがわかった。

4.2 重量・摩擦係数を変えた場合 把持する物体の重量や摩擦係数が増えたり減っても、初期局所滑り領域の増大に対応したせん断ひずみ固有の分布パターンが変化しないことを確認するために、図3の から のように摩擦係数 μ および物体の重量 mg が異なる場合の解析を行った。一例として、 のように、摩擦係数が1.0、把持対象物体の重量が とほぼ同じ ($mg/2=0.81\text{N}$) の場合の反力分布の変化を図8に、内部節点のひずみの変化を図9に、それぞれ示す。平板のy方向押し込み量 y は0.6mm、x方向移動量 x は1.0mmである。図より、接触幅、表面節点の接線・法線反力および内部節点の垂直・せん断ひずみの値は異なるが、分布の形状は前述の場合とよく似た形となることがわかる。図3の , の場合も同様な分布形状となった。また、いずれの場合も、せん断ひずみ速度およびせん断ひずみの傾きは、図6および図7と同様な分布となった。これらより、把持する物体の重量や摩擦係数が異なる場合にも、接線反力および内部節点のせん断ひずみ分布は、初期局所滑り領域の増大に対応した固有の分布パターンを描きながら変化してゆくことがわかった。

4.3 $F_n \cdot F_t$ が同時に増加する場合 これまでの解析では、基本的な反力、ひずみパターンを調べるために、法線力 F_n を増加させた後に接線力 F_t を増加させた。このような条件は実際の把持動作時の力増加パターンとは異なっている。このため、図3の のように、 F_n と F_t が、ヒトの把持動作時と同様と考えられる力増加曲線上を増加する場合の解析を行った。

図10に反力分布の変化を、図11に内部節点のひずみの変化を、それぞれ示す。図中の(1)~(5)は、括弧内の数字に応じて F_n 、 F_t が増大することを表している。図10を見ると、接線力 F_t と同時に法線力 F_n も増加させているので、時間の経過とともに法線反力分布が変化しているが、法線反力は常に半円状の分布形状を保ったままであることがわかる。一方、接線反力は、図3 ~ の場合と同様に増加している。すなわち、滑り領域が接触部両端から増加してゆき、最終的に全体滑りが生じている。また、図11より、法線反力の増加に伴い垂直ひずみ x 、 y の値も若干変化するが、常に同様な分布形状を保ったままであることがわかる。一方、せん断ひずみ xy は、図3 ~ の場合と同様に増加している。すなわち、 xy は F_t の増加とともに増大し、(5)では $x=1.5$ 付近に極大値を持つ分布となることがわかる。このように、力の増加曲線を変化させても、せん断ひずみは、初期局所滑り領域の増大に対応した固有の分布パターンを呈することがわかった。

また、図12に、せん断ひずみの単位時間ステップ当

たり変化量 $(xy)_t - (xy)_{t-\Delta t}$ を、図13に、ある節点 i におけるせん断ひずみと隣接する節点 $i-1$ での値との差 $(xy)_i - (xy)_{i-1}$ を、それぞれ示す。図12の結果は図6の結果と定性的に一致した。すなわち、図6および図12のせん断ひずみ変化量を見ると、 x が小さいときには2カ所に極大値を持つ分布となっているが、 x が増大すると極大値が1カ所の分布に変化している。また、図13のせん断ひずみの傾き分布を図7の結果と比較すると、いずれも x が小さいときに2カ所の極大値を持つ分布となっているが、 x が大きくなると接触領域内で単調減少する分布となる。ただし、 x が小さいときに生じる両者の極大値の大きさは異なる。これは、図3に示した力増大経路の差異によるものであり、 の力増大経路の方が の経路よりも $F_t = \mu F_n$ (式(1)) に近いため、パターンの特徴があいまいになっているものと考えられる。それでも、 x が小さいときの2カ所の極大値、 x が大きいときの接触領域内での単調減少といった分布パターンの特徴は定性的には一致していると言える。

以上の結果より、 F_n と F_t の増加曲線が異なっても、反力・ひずみの分布は、初期局所滑り領域の増大に対応した固有のパターンを呈することがわかった。特に、せん断ひずみの増分および傾きが特徴的な分布パターンを呈する。したがって、2章で述べたように、重量および摩擦係数が未知の物体を把持するためには、曲面状弾性体内部のせん断ひずみ分布を観測し、ひずみ分布が最終的に全体が滑る場合の固有の分布にならないように F_n と F_t とを増加させることによって、接線反力の変化を把握すればよいことを確認できた。つまり、弾性体内に埋め込まれた複数のセンサから得られた入力に対し把持力を出力する非線形制御系を構築すれば、本手法を用いて把持力を制御し得ることが明らかになった。

ヒトの把持動作において、式(5)の値がなぜ常に1.2~1.5になるかという点に関する定量的な検討は今後の課題

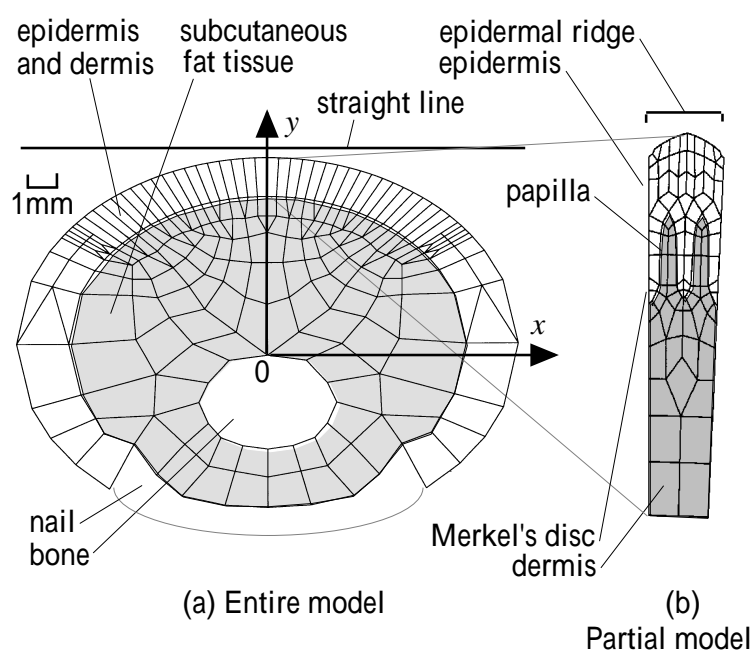


Fig. 14 Finite element model of human finger

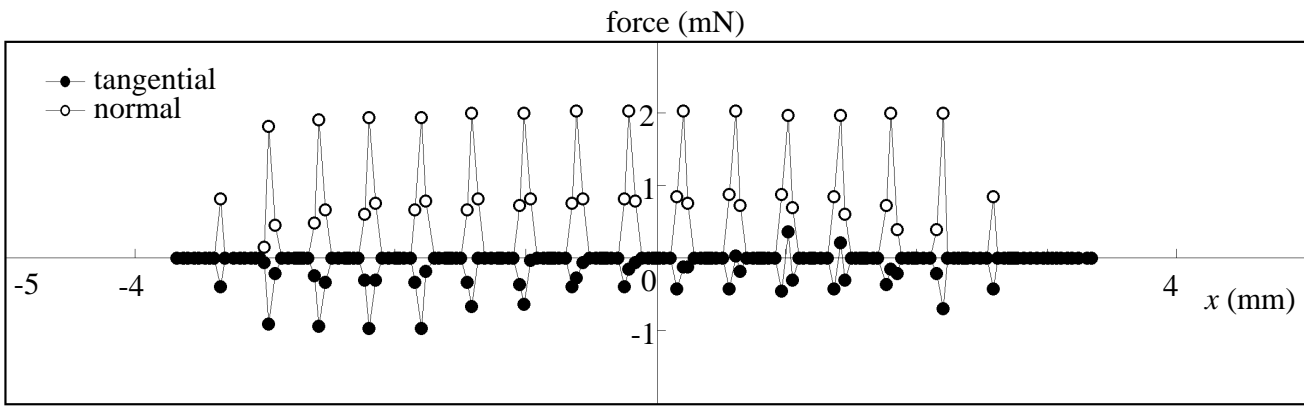


Fig. 15 Normal and tangential force distribution of the human finger ($x=0.8\text{mm}$, $y=1.2\text{mm}$)

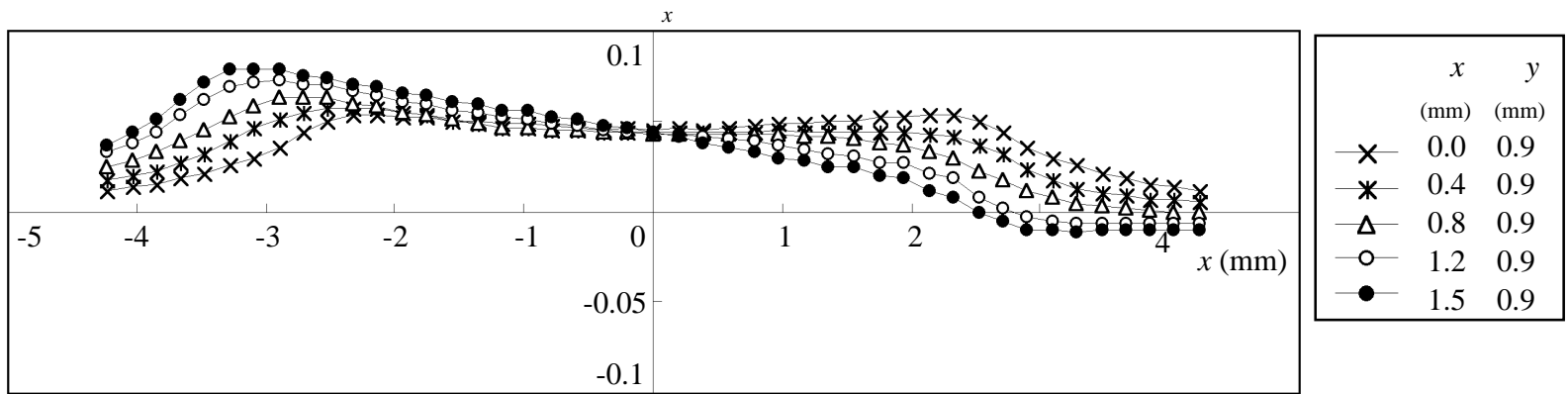


Fig. 16 Distribution of normal strain ϵ_x at Merkel's discs' location

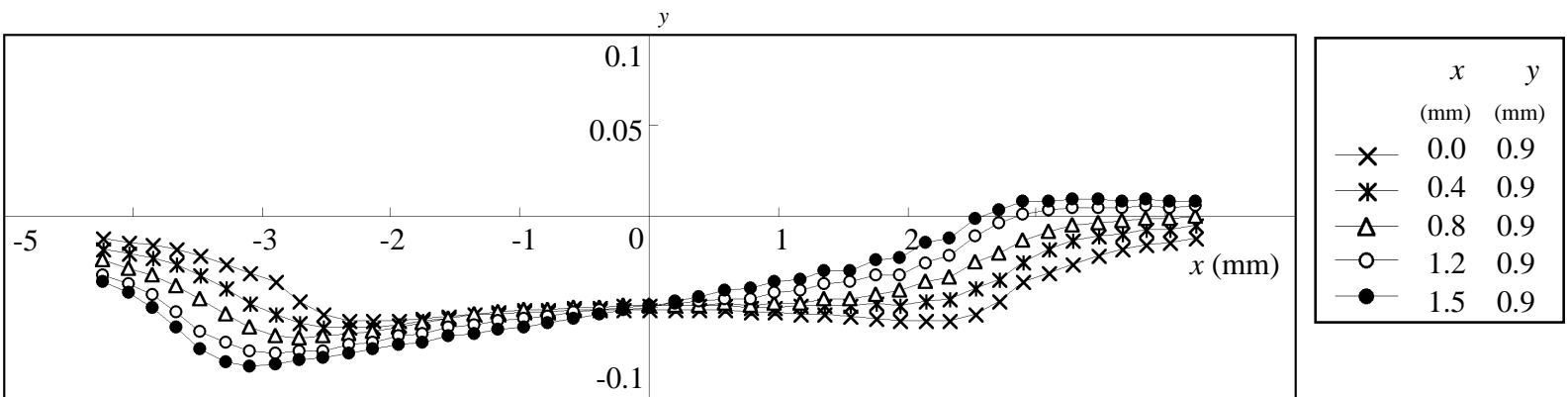


Fig. 17 Distribution of normal strain ϵ_y at Merkel's discs' location

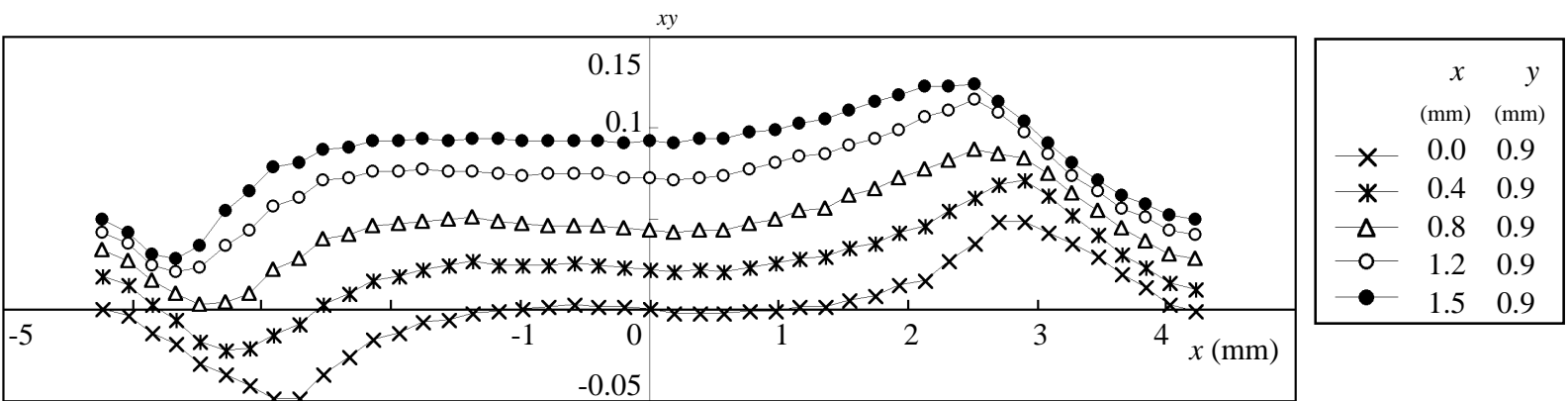


Fig. 18 Distribution of shear strain ϵ_{xy} at Merkel's discs' location

であるが、定性的には以下のように考えられる。すなわち、図13のせん断ひずみの傾き分布の考察で述べたように、力増大経路が $F_t = \mu F_n$ (式(1)) に近づくにつれてせん断ひずみパターンの特徴があいまいになるため、式(5)の1.2~1.5という範囲はパターンの特徴をヒトが認識し得る限度なのではないかと推測される。なお、どのようなせん断ひずみの特徴をパターン認識し、どのような多入力1出力の制御系を構築するか、という制御系設計問題に関する議論は今後の課題である。

本研究では、一様な材質の曲面状弾性体の場合の解析を行い、内部ひずみ分布の検出に基づく把持力制御手法の提案を行った。一方、実際に曲面状弾性体内部に複数のセンサを配し、せん断ひずみ分布を検出するためには、分布させるセンサの方式に対応して構造が変化するので、曲面状弾性体の材質を一様にできない場合も多いと考えられる。例えば、筆者らが検討しているひずみゲージを用いたセンサ⁽¹²⁾の場合には、ひずみゲージを接着した片持ち梁をシリコン製の弾性体内に斜めに複数個

配置し、ひずみゲージの垂直ひずみを、一様弾性体内部のせん断ひずみを代替する量として検出している。このように、本研究で提案した手法を実際のセンサに適用する場合には、センサの構造に応じて内部の構造を考案する必要がある。

4.4 ヒトの指内部のひずみ分布 ヒトが触覚受容器で指表面の初期局所滑り状態を検出する際にも、以上に述べた一様弾性体の場合と同様、表面の初期局所滑りに応じた皮下のせん断ひずみなどの物理量を検出していると考えられる。ただし、実際のヒトの皮下の構造は複雑である。指の表面には指紋があり、皮膚は表皮、真皮、皮下組織から成る。筆者ら⁽¹³⁾が構築した指断面の有限要素モデルを図14に示す。表皮、真皮、皮下組織、および、表皮表面の指紋、表皮と真皮の間の真皮乳頭の構造を、平面ひずみ要素を用いてモデル化している。また、代表的な触覚受容器であるマイスナー小体の位置を示した。本モデルに対し、3章で示した接触解析を行い、ヒトの指に平板が接触し初期局所滑りが生じる際の触覚受容器近傍のひずみ状態を計算した。

図15に、平板を y 方向に0.9mm押し込んだ後に、 x 方向に0.8mm移動させた場合の、指表面の反力分布を示す。摩擦係数は0.5とした。指紋の凹凸の存在により、接触領域は16箇所に分かれている。法線反力と接線反力の大きさを比較すると、接触部両端 ($-3.5 < x < -2$ および $x = 2.6$) において、反力が式(6)を満たす初期局所滑り領域が生じていることがわかる。一方、接触部中央 ($-2 < x < 2.5$) の節点は固着している。このように、指紋の存在により接触領域は分割されるものの、全体としての反力の挙動は、半円柱一様弾性体の場合と同様になることがわかった。なお、平板の x 方向移動量 x を増加させると初期局所滑り領域は増大し、 $x = 1.5\text{mm}$ のときに全体滑りが生じた。

図16から図18に、図14に図示したメルケル小体の位置における垂直ひずみ x , y およびせん断ひずみ xy の分布を示す。ヒトの皮膚は複数の組織の層から成ることや、皮下に真皮乳頭などの構造体が配されていることにより、半円柱一様弾性体の場合とは異なり、 x の増加に伴い、垂直ひずみ分布も若干変化している。しかし、最も顕著に分布形状が変化するのは、半円柱一様弾性体の場合と同様、せん断ひずみの分布であった。図18を見ると、メルケル小体の位置におけるせん断ひずみ分布は、 x の増加に伴い、図5や図9と非常によく似た増加パターンを呈していることがわかる。

以上のように、ヒトが物体を把持する際に、触覚受容器で検出する物理量はせん断ひずみに関係が深いことがわかった。しかし、ヒトの皮膚構造、触覚受容器の構造

および神経回路の構造は複雑であり、その形態と機能の関係を詳細に明らかにすることは今後の課題である。

5. 結 論

有限要素法を用いて曲面状弾性体と平板との接触解析を行った結果、接線力の増加に伴い、接触部両端から初期局所滑り領域が増大した。並行して、内部せん断ひずみの分布も変化した。また、対象物の重量および摩擦係数が異なる場合にも、せん断ひずみ分布の変化パターンは同様の傾向を示した。これより、曲面状弾性体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、重量および摩擦係数が不明の物体を把持し持ち上げる制御を行い得ることを明らかにした。また、ヒト指腹部の触覚受容器においても、初期局所滑り領域の変化に伴い、せん断ひずみ分布が変化することを明らかにした。

今後は、本制御手法の妥当性を確認するとともに、センサの実用化を図るために、曲面状表面を有するセンサを製作する予定である。

謝辞 本研究の一部は神奈川科学技術アカデミーおよび村田学術振興財団の研究助成金により行われた。

文 献

- (1) 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, 11-7, (1993), 959.
- (2) 山田, 触覚センシング研究の新しい展開, 機講論No.96-2, B, (1996), 1505.
- (3) Johansson, S. and Westling, G., Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic Control of Precision Grip When Lifting Rougher or More Slippery Objects, Exp. Brain Res., 56, (1984), 550.
- (4) Johansson, S. and Westling, G., Signals in Tactile Afferents from the Fingers Eliciting Adaptive Motor Responses during the Precision Grip, Exp. Brain Res., 66, (1988) 141.
- (5) 前川, 把持中のセンシング戦略, その1: 安定把持とセンシング-力覚と触覚を中心として-, 日本ロボット学会誌, 11-7, (1993), 966.
- (6) 大岡, ヒトの指先大触覚センサ, 機講論No.96-2, B, (1996), 783.
- (7) 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, 機講論No.96-2, B, (1996), 783.
- (8) 前川, 谷江, 金子, 鈴木, 堀口, 菅原, 半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発, 計測自動制御学会論文集, 30-5, (1994), 499.
- (9) Johnson, K. L., Contact Mechanics, Cambridge Univ. Press (1985).
- (10) 前野, 山崎, 立川, 波動伝播に基づく移動機構の研究(第一報-ミミズの運動測定と接触移動シミュレーション) 機論 62-603, C (1996), 142.
- (11) Shepherd, G. M.ほか, Neurobiology, Oxford Univ. Press, (1988).
- (12) 河合, 平野, 小林, 前野, 把持力制御のための曲面状局所滑りセンサの開発, 機講論97-22, (1997) 763.
- (13) 前野, 小林, 山崎, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, 機論63-607, C (1997), 881.