

指紋により接触 / 非接触・固着 / 滑り分布を検出する 弾性ロボットフィンガの開発*

山田 大介*1, 前野 隆司*2, 山田 陽滋*3,

Development of Elastic Robot Finger having Ridges which can Detect a Distribution of Contact Condition

Daisuke YAMADA*1, Takashi MAENO*2 and Yoji YAMADA*3

*1 Integrated Design Engineering, Graduate School of Keio University

*2 Mechanical Engineering, Keio University

*3 Intelligent Systems Laboratory, Information-Aided Technology, Graduate School of Toyota Technological Institute

An elastic robot finger has been developed for controlling grasping force when weight and frictional coefficient of grasped object are unknown. First, geometry of the finger is designed. The elastic finger has ridges at the surface to divide the contact area. Geometry of the ridges is trapezoid like human ridges. It also has a pair of tactile sensors embedded per one ridge similar to human fingertips. The surface of the whole finger is curved so that normal reaction force distributes unequally. A Finite Element (FE) model of the elastic finger was made to conduct a dynamic contact analysis using a FE method in order to design the elastic finger in detail. Then the elastic finger was made to confirm the results of FE analyses. As a result, it was confirmed by calculation and experiment that the elastic finger can detect the incipient slippage of the ridge that occurs near the edge of contact area and can deduce the stick area ratio. This result is useful for controlling grasping force when the weight and friction coefficient between the elastic finger and grasping object are unknown.

Key Words : Tactile Sensing, Grasping Force Control, Biomimetics, Finite Element Analysis

1. 緒 論

ヒトは重量および摩擦係数が未知の物体を、握りつぶしたり滑り落としたりすることなく安定に把持し持ち上げることができる。これは、指内部に配置された触覚受容器によって指と把持物体の接触面における接触状態の分布を検出し、それに基づいて適切な把持力を算出し筋を制御するというフィードバック制御を行っているからだと考えられる。ヒト指表面には指紋があり、真皮乳頭先端部にはFA I(Fast Adaptive type I)型受容器が配置されている⁽¹⁾。前野ら⁽²⁾は、これらの特徴が触覚検出のために有効であることを有限要素解析により示した。一方、質量および摩擦係数が未知の物体を把持し持ち上げるという物体把持問題は、ロボット工学の主要課題の一つである。近年、本課題解決法の1つとして、ロボットフィンガと把持物体の接触面に発生する初期局所滑りを用いる手法が注目され

ている⁽³⁾⁽⁴⁾。初期局所滑りとは接触面の一部に初期的に生じる滑りを指す。初期局所滑りを検出すれば、把持物体を完全に滑り落とす直前の状態を検出できるため、本手法は安定な物体把持のために有効である。本手法は、まず、Tremblayら⁽³⁾によって提案された。すなわち、球状のシリコンゴム膜の表面に半球状の突起を分布させ、シリコンゴムと平板状物体との接触面に初期局所滑りが生じた際の突起部の微小振動をフィンガ内部の加速度計によって検出するという手法である。しかし、初期局所滑りを検出するためのセンサをフィンガ端部に1つしか配置していないために、初期局所滑りが生じる場所を特定することができず、全体滑りと初期局所滑りを判別できないという問題があった。De Rossiら⁽⁴⁾は、マトリクス状に配置したPVDF(Polyvinylidene Fluoride, 圧電フィルム)にシリコンゴムを被膜したフィンガを提案した。これはフィンガに様々な形状の物体が接触した際に生じるシリコンゴム内部の垂直応力とせん断応力の分布をPVDFによって検出し、その分布と接触状態をリカレント型ニューラルネットワークに学習させることによって初期局所滑りを検出するという手法である。し

* 原稿受付 2003 年 01 月 20 日

*1 慶應義塾大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻

*2 慶應義塾大学理工学部機械工学科

*3 豊田工業大学大学院工学研究科情報援用工学専攻知能システム研究室

Email: maeno@mech.keio.ac.jp

かし、フィンガ形状の設計とニューラルネットワークの学習が不十分であるために初期局所滑りの検出精度が低いという問題がある。前野ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾は、円筒状の弾性ロボットフィンガによって平板を把持する問題を想定し、物体把持時におけるフィンガ内部のせん断ひずみ分布パターンが接触面内における固着・滑り分布に対応していること、および、初期局所滑りが接触面の端部から生じることを有限要素解析によって示した。また、表面に曲率を持った弾性ロボットフィンガ内部にひずみゲージを多数配置し、フィンガと平板とが接触した際のフィンガ内部のせん断ひずみ分布を検出することによって初期局所滑りを検出できることを示した。しかし、初期局所滑りを検出するためには物体を一定速度で持ち上げねばならず、また、把持動作中に物体の質量が変化した際に物体を持ち続けることができないため、接触状態の分布を高精度に検出することができないという問題がある。

以上のように、従来提案されてきた手法は、初期局所滑りの検出精度が悪い、接触状態の分布を高精度に検出することができないなどの問題がある。このため、本研究では、指紋などのヒト指の構造的特徴を模倣することによって、接触状態分布を精度よく検出できるロボットフィンガを設計するとともに、本フィンガによって接触・非接触、固着・滑りといった接触状態分布を推定するための手法を提案する。

まず、2章ではフィンガ形状の設計について述べる。3章では2章で設計したフィンガを用いた接触状態分布推定法および推定結果について述べる。4章では本研究の結論を述べる。

2. フィンガ形状設計

2.1 ヒト指の特徴を模倣した基本設計 1章で述べたように、本研究ではヒト指の特徴を模倣することによってフィンガの形状を設計する。注目したヒト指の特徴およびその特徴の物体把持のための有効性について以下に考察する。

まず、ヒト指は柔軟な材料から成り、断面は楕円状である。弾性接触理論によると、これらの特徴のために、指と把持物体との接触面に生じる法線反力は、中央部では大きく端部では小さくなる。したがって、接触面に生じる初期局所滑りは、接触面の端部から発生しやすい。次に、ヒト指表面には多数の指紋が分布している。したがって、物体把持時には指紋稜線の凸部と物体とが接触し、両者が固着している場合には指紋凸部にせん断変形が生じる。接触面端部の初期局所滑りが発生しやすい場所に存在する指紋では、接触状態

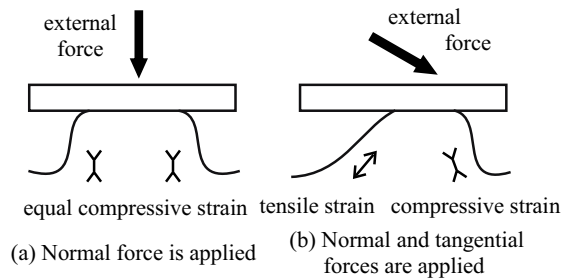


Fig. 1 Relationship between load and deformation

が固着から滑りに変化した際にせん断変形が開放され、その固有振動数から定まる速度で振動を生じると考えられる。さらに、指内部の真皮には1つの指紋内部に2列にFA I型触覚受容器が配置されている。FA I型触覚受容器が配置されている真皮乳頭先端部は、指紋がせん断変形した際に応力集中を受けやすい場所である。したがって、指紋の変形とFA I型触覚受容器の応答には、図1に示すような関係があると推測される。まず、指紋に対して法線方向にのみ力が加えられている場合には、FA I型触覚受容器が配置された2つの場所ではほぼ同じ大きさの圧縮変形が生じる。一方、指紋に対して接線方向にも力が加えられた場合には、一方では引張、他方では圧縮変形が生じる。したがって、2つのFA I型触覚受容器の出力の差は、法線方向にのみ力が加えられている場合にはほぼ0であるのに対し、接線方向にも力が加えられている場合には大きな値を持つ。よって、これより指紋のせん断変形の大きさを推測できると考えられる。また、初期局所滑りが発生して指紋のせん断変形が開放された際には、出力の差の速度成分が急激に減少すると考えられる。最後に、ヒト指の指紋は巨視的に台形形状をしている。このため、各指紋と把持物体との接触面においては法線反力がほぼ均一に分布し、初期局所滑りが生じにくいと考えられる。したがって、指と把持物体との接触面というマクロレベルから見たときの初期局所滑りが生じた時に、滑り領域に存在するそれぞれの指紋と把持物体との接触面というミクロな領域においては、指紋全体に渡る滑りが生じていると考えられる。すなわち、指と把持物体との接触面というマクロな領域の固着/滑り領域の分布を検出しやすいように、それぞれの指紋と物体とのミクロな接触状態は固着か滑りかの二値的な状態しかとれないようになっていると推測できる。

以上の考察より、上記のような特徴を有するロボットフィンガの内部に配置した1対の触覚センサによって、各指紋と把持物体との接触状態を検出すれば、フィンガと把持物体との接触面というマクロな領域にお

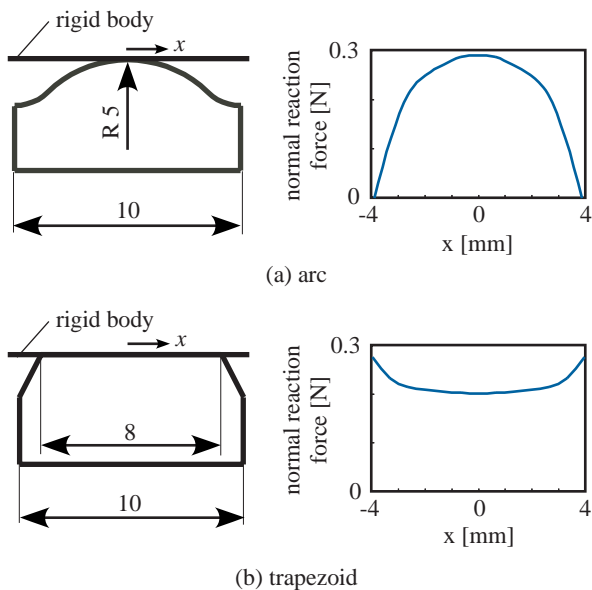


Fig. 2 Distribution of normal reaction force for different geometry

る初期局所滑りを検出できると考えられる。

2.2 有限要素解析を用いた詳細設計 2.1 節で述べた考察に基づいて、フィンガ形状の詳細設計を行った。なお、フィンガ形状を設計するにあたり、設計仕様を以下のように定めた。すなわち、把持する物体は質量 0.5~1.0 kg、フィンガとの接触面における静止摩擦係数は 0.4~1.0 とした。また、摩擦問題をクーロン摩擦と仮定し簡便化するために、フィンガ表面にベビーパウダーを塗布して凝着の影響を軽減した。このため、フィンガ・物体間の静止摩擦係数を比較的小さい値に設定した。また、簡単のため、把持物体はロボットフィンガに比べて十分剛性の高い物体とし、フィンガとの接触面の形状は平面とした。

まず、フィンガを構成する材料を決定した。2.1 節で述べたように、フィンガの弾性変形に基づき法線反力分布を検出するためには、ヤング率の小さい材料を用いる必要がある。このため、フィンガ材料として信越化学性シリコンゴム KE12 を用いることとした。KE12 の物性値は、ヤング率 0.3 MPa、ポアソン比 0.48、密度 1230 kg/m^3 である。

次に、指紋形状の設計を行った。2.1 節で述べたように、それぞれの指紋と把持物体の接触面内において法線反力が均一に分布するように指紋形状を設計する必要がある。このため、まず、図 2 に示す 2 つの形状の指紋と剛体平板が接触した際の法線反力の分布を有限要素法により求めた。なお、指紋に加える法線力は 3 N とした。これは、前述した仕様の物体を把持する際に、中央部の指紋に加わると考えられる法線力と同等

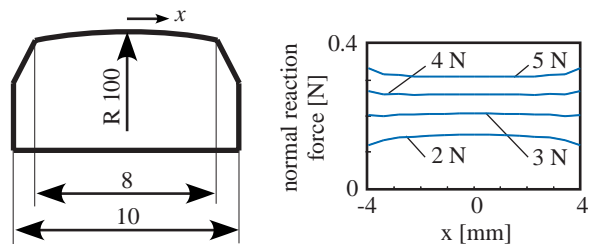


Fig. 3 Geometry of ridge with uniform normal reaction force distribution

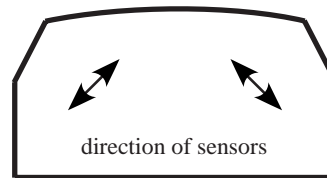


Fig. 4 Location and direction of tactile sensors

の力である。解析には有限要素コード MARC を用いた。図 2(a) のような曲率半径の小さい指紋と把持物体が接触すると、接触面における法線反力は接触面の中央部で大きく端部で小さい分布になる。一方、図 2(b) のような台形状の指紋と把持物体が接触すると、接触面における法線反力は接触面の中央部で小さく端部で大きい分布になる。したがって、法線反力が均一に分布する形状は、図 2(b) の台形上底部にわずかに曲率を持たせた形状であると考えられる。このため、図 2(b) の指紋の上底部の曲率を様々に変化させて、3 N の力を加えた際に法線反力が均一に分布する形状を有限要素法により求めた。結果を図 3 に示す。図より、法線力 2 N~5 N の範囲で接触面内の最大法線反力と最小法線反力の差が $2.0 \times 10^{-3} \text{ N}$ 以下となっており、3 N のときに分布が最も均一となっていることがわかる。以上の結果に基づき、フィンガは図 3 の指紋を 9 つ並列に配置した形状とした。指紋の数を 9 つとしたことによって、接触面端部の数個の指紋において滑りが発生したとしても、接触面中央付近の指紋における固着領域を十分に確保できると考えられる。

さらに、センサ配置位置を決定した。図 1 に示したように、それぞれの指紋内部には 2 つのセンサを配置する必要がある。このとき、図 1(b) のように圧縮と引張という異なる変形を検出するためには、2 つのセンサを指紋内部の応力集中が生じる場所に配置すればよい。このため、図 3 に示した形状の指紋にそれぞれ 2 N ずつの法線力および接線力を加えてせん断変形させた際の、指紋内部の主応力分布を有限要素法により求めた。その結果、指紋がせん断変形した際には指紋内部では圧縮と引張の変形が分布し、また、その主応力方向が指紋底部に対して 45° 程度傾いていることがわ

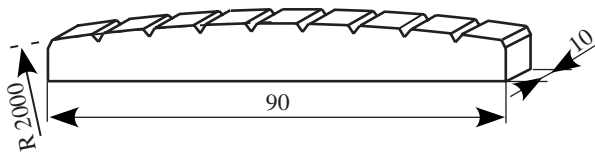


Fig. 5 Geometry of robot finger

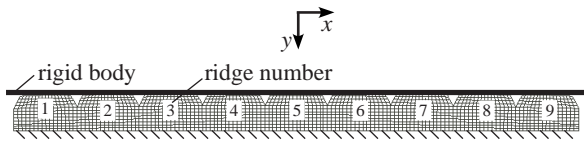


Fig. 6 Finite element model of robot finger

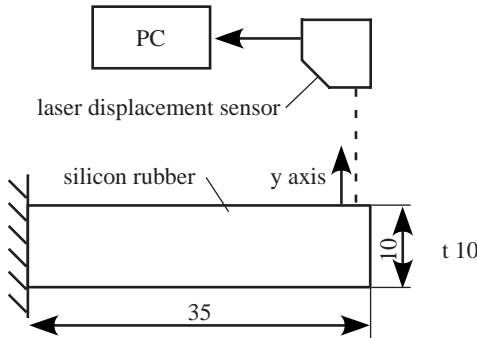


Fig. 7 Condition of experiment for clarifying viscosity coefficient

かった．このため，図 4 に矢印で示した 45° 方向とセンサの受感方向とが一致するようにセンサを配置することとする．

最後にフィンガ曲率の設計を行った．フィンガの曲率半径が大きすぎると，それぞれの指紋と把持物体の間の法線反力が均一化し初期局所滑りが生じにくくなる．一方，フィンガの曲率半径が小さすぎると，物体を把持する際に端部の指紋と把持物体とが接触しにくくなり十分な接触面積を得られなくなる．このため，前述した把持物体の仕様に基づいて，フィンガに $10 \sim 20 \text{ N}$ の法線力を加えた際に 7 つ以上の指紋と把持物体が接触し，かつ，接触面の中央部と端部とで法線反力が著しく異なるような曲率を有限要素解析により求めた．その結果，図 5 に示したように，フィンガの曲率半径が 2000 mm の際に設計条件を満たすことがわかった．

以上の結果より，図 5 に示した形状のフィンガによって，質量 $0.5 \sim 1.0 \text{ kg}$ ，静止摩擦係数 $0.4 \sim 1.0$ の物体を把持する際に初期局所滑りを検出することができると考えられる．

3. 接触状態分布推定法

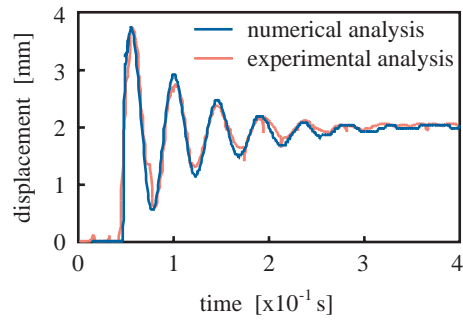


Fig. 8 Result of step response

3.1 フィンガモデルの動的接触解析 2.2 節で設計したフィンガの有限要素モデルに対し，フィンガと剛体平板との動的接触解析を行い，本フィンガを用いれば初期局所滑りが検出できることを確認する．解析の条件を以下に示す．まず，図 6 に示すように，フィンガ有限要素モデル底部の変位を拘束し，指紋のあるフィンガ上部から剛体平板を押し当てた．フィンガモデルの物性値は，ヤング率 0.3 MPa ，ポアソン比 0.48 ，密度 1230 kg/m^3 とした．なお，シリコンゴム KE12 の粘性係数を同定するために，以下に示す予備解析を行った．まず，図 7 に示した KE12 製片持ちはりにステップ荷重を加えた際の，はり先端部の y 軸方向変位をレーザ変位計によって計測した．なお，無負荷時のレーザ変位計からはり先端部までの距離を変位 0 mm と定義した．次に，同じ寸法の KE12 製片持ちはりの有限要素モデルを製作し，同様のステップ荷重を加えた際はり先端部の変位履歴を解析した．この際，シリコンゴムの物性値として入力する構造粘性係数の値を様々に変化させて，実験により得られたステップ応答と数値解析によって得られるステップ応答とが一致するような構造粘性係数の値を求めた．構造粘性係数 $1.7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ の際に数値解析および実験により得られたステップ応答を図 8 に示す．両者の履歴はほぼ一致している．このため，以下の解析ではシリコンゴム KE12 の構造粘性係数を $1.7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ とする．また，フィンガと剛体平板との間の静止摩擦係数および動摩擦係数を 1.0 とした．外力は，まず，剛体平板を法線反力が 12 N となるまで y 軸方向に押し込んだ後に，剛体平板を x 軸方向に 1 mm/s の速度で移動させることによって与えた．

解析結果を以下に示す．図 9 に，指紋 1~4 と剛体平板との固着領域率（固着領域/接触領域）の履歴を示す．ただし，剛体平板を x 軸方向に動かし始めた時刻を 0 s とする．図より，それぞれの指紋は，完全に固着している状態から完全に滑っている状態に 0.1 s 程度で変化していることがわかる．これは，指紋形状が

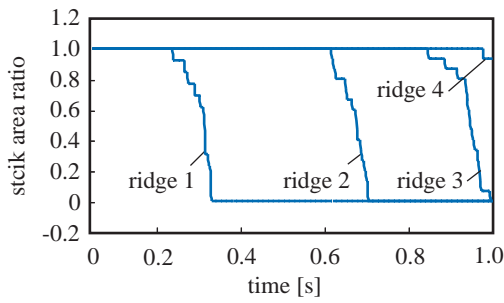


Fig. 9 History of stick area ratio

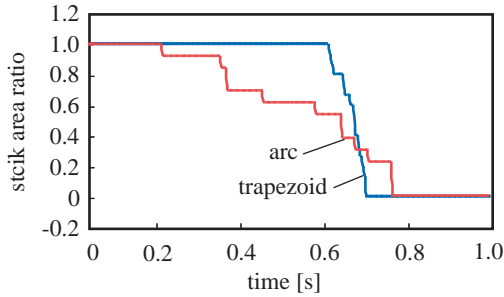


Fig. 10 Comparison of stick area ratio history for 2nd ridge

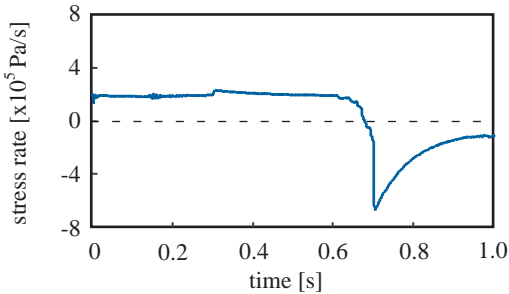


Fig. 11 History of subtracted stress ratio inside 2nd ridge

ほぼ台形となるようにフィンガを設計したために、接触面において法線反力が均一に分布し、それぞれの指紋と剛体平板の接触状態が固着から滑りへ二値的に変化しやすいからである。以上の点を確認するために、設計した指紋（図3）を用いた場合の指紋2における固着領域率の履歴を、図2(a)の円弧状の指紋を用いた場合の結果と比較した（図10）。図より、設計した台形状の指紋では接触状態が急激に変化するのに対し、円弧状の指紋では接触状態が固着から滑りへ緩やかに変化していることがわかる。また、図9より、接触面の端部に存在する指紋から順に初期局所滑りが発生していることがわかる。以上より、本フィンガは、フィンガ・把持物体間の初期局所滑りを検出しやすい構造であるといえる。

Table 1 Method for detecting contact condition

| | stress rate | accumulation value of stress rate |
|-------------|-------------|-----------------------------------|
| contact | stick | positive |
| | slip | negative |
| not contact | zero | zero |

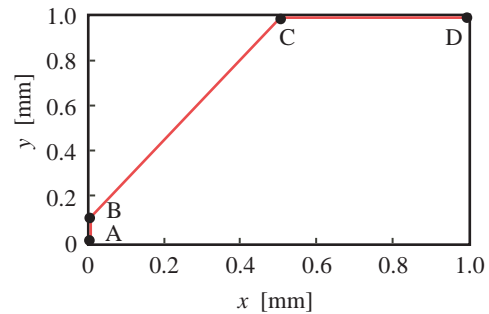


Fig. 12 Position of rigid body

図11に、指紋2内部の2点における応力の差の速度（時間微分）の履歴を示す。この2点は、図4に示した応力集中が生じる場所である。図より、指紋と剛体平板が固着している際には、2点における応力の差の速度の値は正の値を取るのに対し、滑りが生じた際には負の値を取ることがわかる。また、滑りが生じた後に再び接触状態が固着に変化した際には、応力の差の速度の値は正の値となっている。さらに、解析の結果、指紋と剛体平板が接触していないときには、2点における応力の差の速度の値はほぼ0になっていた。

3.2 接触状態推定アルゴリズム 3.1節の結果に基づいて、設計したフィンガと把持物体の接触状態分布を推定するためのアルゴリズムを構築する。

まず、各指紋と物体との接触状態判別法について述べる。各指紋と物体との接触状態は接触と非接触に大別でき、接触領域はさらに固着と滑りに大別できる。3.1節の解析結果によれば、まず、指紋内部の2点における応力の差の速度成分の値は、非接触状態、固着状態、滑り状態の際に、それぞれ、ほぼ0、正、負の値となる。また、応力の差の速度成分の累積値は、非接触状態ではほぼ0であるのに対し、固着および滑り状態では正の値となる。したがって、表1に示したように、各指紋の内部の2点における応力の差の速度成分およびその累積値に着目すれば、各指紋と把持物体との接触状態を固着・滑り・非接触に分類することができる。また、固着および滑り状態の指紋数と全指紋数の比から接触面積率を推定できる。さらに、固着状態にある指紋数と接触している指紋数の比から固着領域率を推定できる。

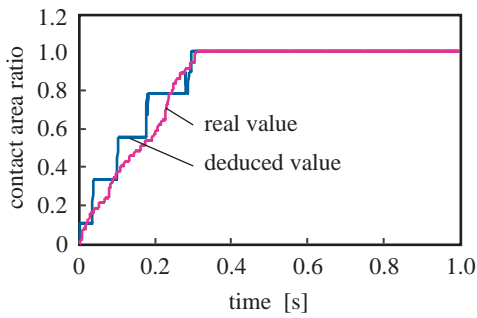


Fig. 13 History of contact area ratio

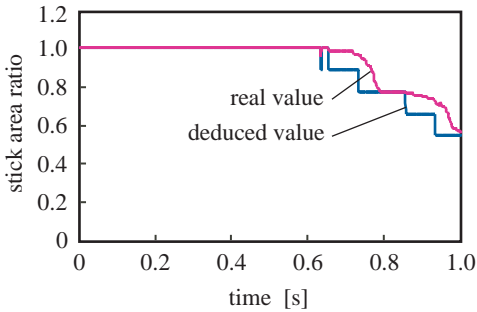


Fig. 14 History of stick area ratio

以上の接触状態推定法を確認するために、以下のよう数値解析を行った。図 6 に示した 2 次元フィンガモデルに対し、剛体平板を図 12 の点 A から点 D の経路で移動させた。剛体平板が点 A にある時刻を 0 s、点 B、点 C および点 D にある時刻を、それぞれ 0.1 s、0.6 s、1.1 s とした。フィンガの物性値は前述した KE12 の値とした。また、フィンガ・剛体平板間の静止摩擦係数および動摩擦係数をともに 1.0 とした。時刻 1.0 s までの実際の接触面積率および固着領域率の履歴を、推定した値とともに、それぞれ図 13 図 14 に示す。剛体平板がフィンガに押しつけられるにつれて接触面積が増大し、剛体平板が x 軸方向に移動するにつれて固着領域割合が徐々に減少していることがわかる。また、構築したアルゴリズムにより推定した接触面積割合および固着領域割合は実際の値とよく一致していることがわかる。

固着領域率の推定値は、質量および摩擦係数が未知の物体を把持する際のフィードバック情報として、非常に有効であると考えられる。なお、本アルゴリズムでは、フィンガに配置する指紋の数が増えるにつれて接触面積率や固着領域率の推定精度が向上する。このため、今後、指紋およびフィンガの小型化を行い精度向上を図る予定である。

3.3 数値解析結果の検証実験 3.1 節で述べた数値解析結果の妥当性を検証するために、設計したフィンガを製作し、解析と同じ条件で荷重を負荷した際のフィンガ内部のセンサ出力を計測する実験を行った。

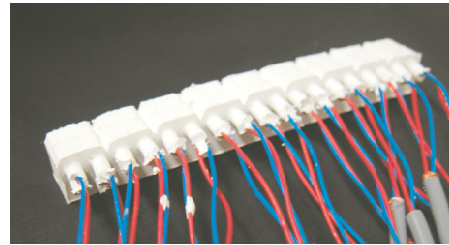


Fig. 15 Manufactured robot finger

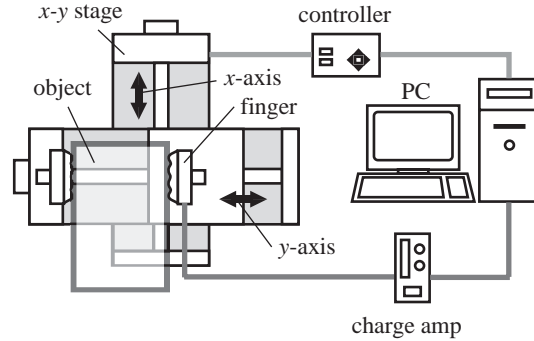


Fig. 16 Experimental setup

製作したフィンガを図 15 に示す。フィンガの形状および寸法は図 5 と同じである。また、フィンガの指紋直下に 2 個ずつ配置するセンサとして、厚さ 80 μm の PVDF フィルムを選択した。Yamada ら⁽⁷⁾は、PVDF フィルムを弾性フィンガ内部に配置した測定を行い、PVDF フィルム表面に生じた応力の速度成分に比例した電圧出力が得られることを確認している。このため、一对の PVDF フィルムからの出力の差を取ることで、指紋内部の応力の速度成分の差を検出することができる。

図 16 に実験装置を示す。図に示したように、製作した 2 つのフィンガを対向させて x-y ステージに取り付け、PC によりステージを駆動してフィンガへの負荷を制御した。実験条件は以下の通りである。まず、ステージを y 軸方向に駆動することによって、フィンガ間に配置した直方体の物体をはさみ、フィンガに 12 N の法線力を加えた。次に、ステージを x 軸方向に 1 mm/s の速度で駆動することによって、フィンガに接線力を増加させた。そして、接線力を加えた際のセンサ出力を、チャージアンプおよび A/D ボードを介して PC に取り込むことによって計測を行った。なお、接触物体の側面にコピー用紙およびサンドペーパーを貼付することによって、フィンガと物体との接触面における静止摩擦係数を 2 種類設定した。計測の結果、コピー用紙およびサンドペーパーを用いた際のフィンガと物体との間の静止摩擦係数は、それぞれ 0.49、0.82 であった。

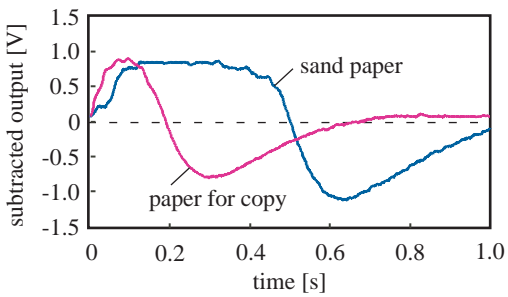


Fig. 17 History of subtracted output of PVDF films in 2nd ridge

指紋 2 内部に配置した 2 つの PVDF フィルムの出力の差の履歴を図 17 に示す。ただし、 x - y ステージの振動等の高周波のノイズの影響を軽減するために、9 点平均法を用いてデータを平滑化した。図より、接線力を増加し始めた際には出力の差は正の値を示しているのに対し、接線力が過剰となり滑りが生じたと推定される際には出力の差は急激に減少して負の値を取っている。また、静止摩擦係数の大きいサンドペーパーを用いた際の結果の方が出力の差の減少が遅れており、静止摩擦係数が高い物体の方が滑りにくい結果となっている。これらの結果は、3.1 節で述べた動的接触解析の結果(図 11)と傾向がよく一致している。以上の結果より、3.1 節で述べた動的接触解析の結果は妥当であるといえる。ただし、数値解析結果では、接線力を増加し始めたときのセンサ出力の差は急激に一定速度に達した後ほぼ一定の正の値を保っているが、実験結果では約 0.1 s の間まで緩やかに増大している。この現象は、 x - y ステージの加速時間の影響であると考えられる。すなわち、数値解析では時刻 0 s から剛体平板が目標速度で移動するという条件を設定したが、実験で用いたステージは設定速度に達するまでに約 0.1 s の時間を要するため、時間遅れが生じたものと考えられる。また、数値解析結果では、滑りが生じた際に応力の速度成分が急激に減少しているが、実験結果では、比較的滑らかに減少している。これは、摩擦問題の定義方法によるものと考えられる。すなわち、本解析では、クーロン摩擦を仮定した。しかし、実際には摩擦力は接触する 2 物体の相対速度の関数となることが知られている。滑りが生じた際には指紋のせん断変形が急激に解放されるために、フィンガと接触物体との相対速度が一時的に著しく増大するが、数値解析は摩擦力一定という条件下で行ったため、滑り時の摩擦減衰の影響を反映できなかったものと考えられる。本研究により基本的な挙動の妥当性を確認することはできたものの、摩擦モデルの改善は今後の課題である。

4. 結 論

まず、指紋やセンサ配置などのヒト指の構造的特徴を模倣することによって、物体把持時に初期局所滑りを検出することのできるロボットフィンガの形状を考案し、有限要素解析を用いて形状設計を行った。また、フィンガと把持物体との間の接触面における初期局所滑りが検出できることを有限要素解析により確認した。さらに、解析結果に基づき、フィンガと把持物体の接触状態分布を推定するアルゴリズムを構築し、その妥当性を数値解析により検証した。最後に、設計したフィンガを製作して、フィンガと平板との接触実験を行うことによって有限要素解析の結果の妥当性を確認した。

今後は、開発したフィンガを用いて質量および摩擦係数が未知の物体を安定に把持するための把持力制御法を確立するとともに、ヒト指と同様にフィンガ表面に同心円上に指紋を配置した 3 次元フィンガに拡張することによって、把持姿勢によらず接触状態分布を検出できる実用的ロボットフィンガの開発を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会基盤研究(B)課題番号 12450168 および日本学術振興会基盤研究(B)課題番号 15360139 により行われた。

文 献

- (1) 大山正, 今井省吾, 和気典二, 新編感覚・知覚・心理学ハンドブック, 誠信書房, (1994), pp. 1178-1179
- (2) 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 63, No. 607, (1997), pp. 881-888
- (3) M. R. Trebbly and M. R. Cutkosky, *Estimation of Friction Using Incipient Slip Sensing During a Manipulation Task*, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automaton, Vol. 1, (1993), pp. 429-434
- (4) G. Canepa, R. Petrigliano, M. Campanella and D. De Rossi, *Detection of Incipient Object Slippage by Skin-Like Sensing and Neural Network Processing*, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics, Vol. 28, No. 3, (1998), pp. 348-356
- (5) 前野隆司, 小林一三, 河合隆志, 平野雄一, 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, 日本機械学会論文集巻号 C 編, Vol. 64, No. 620, (1998), pp. 1258-1265
- (6) 前野隆司, 広光慎一, 河合隆志, 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, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 1, (2000), pp. 91-99
- (7) Yoji Yamada, Takashi Maeno, Isao Fujimoto, Tetsuya Morizono and Yoji Umetani, *Identification of Incipient Slip Phenomena Based on The Circuit Output Signals of PVDF Film Strips Embedded in Artificial Finger Ridge*, SICE Annual Conference 2002 (SICE 2002), (2002),