

把持力制御のための曲面状ひずみ分布センサの開発 *

河合隆志^{*1}，平野雄一^{*2}，前野隆司^{*3}

Development of Strain Distribution Sensor Having Curved Surface for Grip Force Control

Takashi KAWAI, Yuuichi HIRANO and Takashi MAENO

In this study we develop a strain distribution sensor to lift a object by fingers without producing whole slip or applying excessive force even when the weight and the friction coefficient of the object are unknown. Strain gages bonded on thin plates are arranged at even intervals inside an elastic finger having curved surface made of silicone rubber. Geometry of the elastic finger is designed by calculating the contact condition between the finger and a plate with/without tangential load using a FE (finite element) analysis. We also measured the characteristics of the strain distribution sensor. Results show that the grip force can be controlled using the designed strain distribution sensor.

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

1. 緒 言

ヒトは重量および摩擦係数が未知の物体を容易に把持し持ち上げることができる。一般に、これには視覚と触覚の協調が深く関わっていると考えられている。しかし、視覚を遮断して触覚センシングのみを用いても、ヒトは形状が同一で重量の異なる物体を瞬時に把持し持ち上げることができる。しかも、過度な力の付加により物体に大変形を生じさせることはない。また、従来開発されてきた人工のセンサ^{(1),(2)}とは異なり、物体全体に生じさせた滑りや物体表面の摩擦係数を計測する必要はない。このため、ヒトの物体把持手法を明らかにし、模倣すれば、全体滑りや摩擦係数計測の不要な新たな触覚センサを製作することが可能となる。

ヒトの触覚受容機構を明らかにするために、Johanssonら^{(3),(4)}は、把持力と触覚受容器の応答の関係を計測し、把持力制御には皮膚と対象物の間の局所すべりが重要な役割を担っていることを明らかにした。

しかし、物体が指に接触した際の皮膚の変形と触覚受容の関係は明らかにされていなかった。このため、筆者ら⁽⁵⁾はヒト指腹部構造を有限要素法を用いて詳細にモデル化し、指と平板との接触解析を行った。この結果、ヒトの指腹部では、複数のセンサが皮下に整然と配置されることにより、センサ単体では得られない「分布」情報が得られることを明らかにした。また、平板と指との固着・滑り状態の解析⁽⁶⁾を行い、触覚受容器で皮下のせん断ひずみ分布の変化を検出できれば、物体との接触状態の変化に基づく指表面の局所滑り分布の変化を把握し、把持力の制御を行い得ることを明らかにした。また、均一材料物性を有する曲面状弾性体モデルに対する解析も行い、接線力・法線力と局所滑り状態、内部せん断ひずみ分布の変化の関係を詳細に明らかにした。しかし、上述のモデルは弾性体内の物理量の基本的な分布を確認するとともに把持力制御法を提案するためのモデルに過ぎず、解析したモデルをそのまま用いて実際のハードウェアを構築することはできない。このため、本研究では、上述のヒトを模倣した把持力制御を実現するための曲面状弾性体の内部構造を提案し、その基本特性を明らかにする。まず第2章ではセンサの設計・製作を行う。第3章ではセンサの基本特性の評価を行う。

* 原稿受付 平成9年11月19日

*1 学生員，慶応義塾大学院（223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1）

*2 トヨタ自動車(株)

*3 正員，慶応義塾大学理工学部

2. センサの設計・製作

2.1 センサ構造の提案と有限要素モデルの構築

重量および摩擦係数が未知の物体を指で把持し持ち上げるといった問題は、図1(b)に白抜き矢印で示した力増加曲線とで示した力の到達点を求める問題に帰着できる。ここで、 F_n は法線力（把持力）、 F_t は接線力（摩擦力）、 mg は物体の重量、 μ は摩擦係数、 F_{lift} は物体を持ち上げるときの把持力である。図1(b)の斜線の範囲は F_n と F_t の存在可能領域である。筆者ら⁽⁶⁾は、一様な弾性係数を有する曲面状弾性体と平板との接触解析に基づき、上述の問題の解法を示した。すなわち、対象物体の重量および摩擦係数が異なっても、 F_n 、 F_t の変化に伴う接触力の変化パターン、初期局所滑り領域の増大パターン、内部のせん断ひずみ分布の変化パターンの関係は常に同じ傾向を有している。したがって、せん断ひずみ分布の変化パターンを利用すれば、重量および摩擦係数が未知の物体の把持力を制御することができる。

しかし、上述の解析ではせん断ひずみを検出するためのセンサの構造を検討しておらず、そのまま実際の人工物を製作することはできない。このため、曲面状弾性体内部のせん断ひずみ分布を検出する方法を考案する必要がある。言い換えれば、把持力の制御をハードウェアとして実現し得る曲面状弾性体の内部構造を提案する必要がある。

大岡ら⁽⁷⁾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⁽⁸⁾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、本研究では、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する。

いま、接触面に平行な方向を x 方向、垂直な方向を y 方向とする。平面ひずみ場において、弾性体が x 方向のせん断力を受けるとき、弾性体にはせん断変形およびせん断ひずみ ϵ_{xy} が生じ、垂直ひずみ ϵ_x 、 ϵ_y は 0 となる。つまり、主ひずみの方向は x 軸に対し45度傾く。これより、曲面状弾性体と剛体平板が接触する場合（図2参照）にも、ひずみゲージを x 軸に対し45度傾けて配置し、この方向の垂直ひずみを検出すれば、せん断ひずみ ϵ_{xy} に対応した量を検出し得ると考

えられる。そこで、曲面状弾性体として、皮膚と縦弾性係数が近いシリコンゴムを用いるセンサを提案する。大変形の生じるシリコンゴム内に一般のひずみゲージを直接埋め込むのは困難であるため、図2に有限要素モデルを示したような、シリコンゴム内部にひずみゲージを貼付したリン青銅製の薄板を均一間隔に15枚配置する構造とする。リン青銅製薄板は一端が固定されており、 x 軸に対し45度傾けて取り付けられている。ひずみゲージはリン青銅板の向かって左側に取り付ける。シリコンゴム、リン青銅板の縦弾性係数はそれぞれ4.96MPa、 1.35×10^5 MPa、ポアソン比はそれぞれ0.45および0.3とする。要素には奥行き10mmの平面ひずみ要素を用いる。本構造は、シリコンゴムとリン青銅板の材料特性が大きく異なること、リン青銅板の端部が剛体に固定されていること、曲率を大きくして接触面積を大きくするために支持面が円弧の中心を通る線よりも上にあることなど、前報⁽⁶⁾で解析した半円状一様弾性体の場合とは弾性体の構造が異なる。したがって、内部ひずみの分布パターンも、均一弾性体の場合とは異なると考えられる。このため、本センサにおいても、 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せん断ひずみ分布の変化パターンが常に同じ傾向を有しているか、このパターンを利用して把持力を制御し得るかを確認する必要がある。

2.2節では有限要素法により曲面状弾性体と平板とが接触する際のひずみ分布を解析し、提案した構造の妥当性を確認する。2.3節ではセンサの製作手順について述べる。

2.2 センサ特性の有限要素解析 図2に示したメッシュモデルに対し、平板を $-y$ 方向へ押し込んだ後に x 方向に移動させた場合の解析を行った。接触解析には筆者らが開発した手法^{(6),(9)}を用いた。簡単のため、材料非線形および大変形による非線形は無視した。表1に、計算した3つの場合の平板の $-y$ 方向移動量 y_{max} 、全体が滑り始めたときの x 方向移動量 x_{slip} および摩擦係数 μ を示す。3つの場合の F_n と F_t の変化を図3に示す。なお、条件1と条件2は重さが等しく静止摩擦係数が異なる場合、条件3と条件4は静止摩擦係数が等しく重さが異なる場合の比較を行うための条件である。

図4に、それぞれの場合におけるひずみゲージ長手方向の垂直ひずみの変化を示す。ひずみゲージ長手方向の垂直ひずみは、図2に黒丸で示した、それぞれのりん青銅板上の2つの節点間の距離変化を2つの節点間の距離で割って求めた。表2には図4における ϵ_x および ϵ_y の値を示す。いずれの場合も、 ϵ_y のみを増加させてゆ

くと、ひずみゲージ6では圧縮ひずみが、ひずみゲージ8では引張りひずみが増大してゆく。つまり、ひずみの分布は極小値と極大値を1つずつ有するパターンを呈している。一方、平板の平行移動量 x を増大させてゆくと、下に凸の分布を呈する圧縮ひずみが減少してゆく。最終的に全体滑りが生じるときにはすべてのひずみゲージでのひずみが正となり、極大値を1つだけ有する分布となる。

前報⁽⁶⁾で示した半円筒状均一弾性体と平板の接触の場合には、せん断ひずみ ϵ_{xy} は、 x が0のときは $x < 0$ の部分では下に凸、 $x > 0$ の部分では上に凸の分布を呈した。一方、 F_t が増加するとせん断ひずみ ϵ_{xy} は増大し、最終的に全体滑りが生じるときには極大値を1つ持つ分布となっていた。つまり、接線力 F_t の増加に対応して、内部節点のせん断ひずみ ϵ_{xy} の分布が変化していた。

両者を比較すると、本解析で得られたひずみゲージの部分の垂直ひずみ分布の変化パターンは、前報⁽⁶⁾のせん断ひずみ ϵ_{xy} の分布の変化パターンとよく一致しているといえる。異なる点は、本モデルでは x が0のときには中央の点を境に点対称な分布とはなっていない点である。これは以下のように説明できる。曲面状弾性体が y 方向に圧縮され、左右に押し開かれるように変形すると、りん青銅製の片持ち梁は $x < 0$ の部分では下に凸、 $x > 0$ の部分では上に凸の曲げ変形を受ける結果、ひずみゲージには $x < 0$ の部分では圧縮ひずみが、 $x > 0$ の部分では引張りひずみが生じる。この効果のみによれば、ひずみ分布は前報と同様、中央の点を境に点対称な分布となるはずである。しかし、 y 方向の圧縮力により、りん青銅製の片持ち梁全体が上に凸の曲げ変形を受ける効果も無視し得ない。このように、曲面状弾性体のせん断変形と圧縮変形が重畳されるために、ひずみゲージのひずみは、中央を境に対象な分布とはならないのである。それでも、ひずみゲージの垂直ひずみの分布プロファイルは、前報におけるせん断ひずみ ϵ_{xy} の分布プロファイルとよく似ている。このため、分布の形を利用することによって把持力を制御するためには、本報で提案したセンサ構造の考え方は有効であるといえる。

2・3 センサの製作 2.1節で設計し、2.2節で基本特性を解析したセンサを実際に製作した。全体図を図5に、三面図を図6に示す。基本的な寸法は2.1節(図2)に示した通りである。

製作法は以下の通りである。まず、ひずみゲージ(共和電業製: KFC-1-C1-11 L15)を厚さ0.1mm、

幅10mm、有効長さ(片持ち梁部長さ)8mmのりん青銅板に接着する。このとき、ひずみゲージのベース部(金属抵抗線)の位置を、りん青銅板の上部から3mmの位置に一致させる。次に、アルミニウム製のセンサ支持台に、りん青銅板15枚を2mm間隔で45度傾けて固定する。その上に、内面が所定の曲率の円筒面になるようにアルミニウムを加工した、シリコンゴムの型どり用部材を固定し、シリコンゴム(信越化学工業製: KE12, ヤング率4.96MPa)を流し込む。シリコンゴムが固まってから型どり部材を取り除けば、曲面状のひずみ分布センサが完成する。

りん青銅板の幅は10mmであるのに対し、曲面状シリコンゴムの奥行きは12mmである。このため、本センサの形状は、奥行き方向に均一であると仮定し平面ひずみ要素を用いて構築した有限要素モデルとは異なる。このため、次節では、本センサの基本的な特性が有限要素解析結果と一致することを確認する。

3. センサの基本特性の評価

3・1 計測系 図7に示した計測系を用いて、対象物体を把持する場合と同様な力がシリコンゴム製の曲面状弾性体に加わったときのひずみ分布を計測し、センサの特性を評価する。平板の上に重りを載せることにより、把持力に相当する力を与える。また、滑車につるした重りにより、物体を持ち上げるときの摩擦力に相当する力を加える。2種類の重りの重量を変えて計測を行うことにより、物体把持時に法線力(把持力)・接線力(摩擦力)が変化した場合のセンサの基本特性を計測する。摩擦係数の変化の影響を見るために数種の表面粗さを有する平板を用意し、平板とシリコンゴム製曲面状弾性体表面の間の静止摩擦係数の値は予め測定しておく。15個のひずみゲージのひずみの値は、スキャナ(共和電業製: USB-50A)、高速デジタル計測装置(共和電業製: UCAM10A)、GP-IBボードを介して計算機に取り込む。ひずみの値は、精度向上のため、3度ずつ計測した値を平均して求める。

具体的な測定条件は以下の通りである。荷重増加曲線は、図3に示した計算値 \sim と一致させる。まず把持力に相当する力(載せる重りの重量)を0.196Nずつ増加させ、その都度ひずみ分布のデータを取得する。次に、持ち上げる力(つるす重りの重量)を0.196Nずつ増加させ、ひずみ分布のデータを取得する。そして、把持対象物体が滑り始めるまで、つるす重りの重量を増す。

3・2 計測結果と考察 図8(a)に2節の計算結果

を，図8(b)に測定結果を示す．図8の(1)～(3)は，それぞれ，(1)把持力のみを加えた場合，(2)持ち上げる力を増加する時，(3)全体滑りが生じる直前，のひずみ分布である．

計算結果(a)と測定結果(b)を比較すると，両者の分布全体のパターンは良く一致していることがわかる．特に，(1)と(2)では，条件～のどの場合にも，ひずみゲージ6のひずみの値がその左右のひずみの値よりも小さくなっているのに対し，(3)ではひずみゲージ5のひずみの値よりも大きくなっている．これより，本センサによれば，摩擦力を変えたときの固着・滑り領域の変化に伴う内部のひずみ分布の検出を行い得るといえる．

ただし，実験結果をみると，持ち上げる力を加えてゆくとひずみ分布の極大点の位置が右にシフトしている．この理由は，持ち上げる力(つるした重り)の増加に伴い板が傾いてしまったためであると考えられる．これは現実の物体把持時に容易に発生しうる現象である．しかし，本把持力制御手法は，それぞれのひずみゲージのひずみの値そのものに依らず，全体のひずみパターンを利用しようとするものであるため，分布の極大値が移動しても問題はないと考えてよい．また，この結果は，本センサのどの部分が対象物に接触しても同様なひずみ分布が得られることを示しており，様々な形状を持つ物体把持への曲面形状センサの適用可能性をも示していると考えられる．

また，計算結果と測定結果ではひずみの大きさがやや異なる．この原因はいくつか考えられる．まず，有限要素モデルの分割が粗く，特にりん青銅板の部分にアスペクト比が約20:1の要素を用いているために，りん青銅板の曲げ剛性が大きめになってしまい，ひずみの計算結果が小さくなったことが挙げられる．また，実際には非線形性の大きいゴムの弾性を線形とおいたこと，大変形による非線形性を無視したこと，実際には非圧縮性を有するゴムのポアソン比を0.45と置いたことも挙げられる．さらに，平面ひずみ要素を用いた2次元の解析モデルと実際のセンサでは奥行き方向の構造が異なることも原因と考えられる．また，計測の際に奥行き方向にも板が傾いてしまった可能性や，センサ表面の製造誤差により奥行き方向の変位が不均一になってしまったことも考えられる．このため，本センサの設計法確立のためには，有限要素モデルの3次元化，メッシュの細分化，材料非線形および大変形による非線形の考慮など，解析精度を向上する余地がある．同時に，加工精度の向上も不可欠である．実際

の指のように奥行き方向にもセンサを分布させ，センサを球面状にすることも考えられる．しかし，注目すべきは，計算と測定のひずみの分布プロファイルがよく一致している点である．前述のように，本把持力制御手法は，それぞれのひずみゲージのひずみの値そのものに依らず，全体のひずみパターンを利用しようとするものであるため，ひずみの大きさが変化しても差し支えない．むしろ，様々な要因によりひずみの大きさが設計値と異なっても，表面の固着・滑り状態の変化をモニタし把持力制御を行いうることが重要であり，本結果はこの性能を確認できたものといえる．

以上のように，本センサのひずみ分布パターンが計算値と良く一致することを確認できた．このため，本研究で提案した構造のセンサを用い，ひずみ分布パターンの特徴を利用して，重量および摩擦係数が未知の物体を持ち上げる際の把持力を制御することが可能である．具体的には，例えば，ある位置のひずみの値がその周辺のひずみの値よりも小さくなっている状態を保ちつつ，把持力と摩擦力を増大させて行けば，持ち上げる対象となる物体が滑り始める前に適切な力で把持することができよう．

今後は，本センサを用いてひずみ分布パターンから加えるべき法線力(把持力)，接線力(摩擦力)を算出する制御手法を構築する必要がある．また，例えば把持したコップに液体を注いでいく場合のような荷重条件の変化にも対応できることを確認する必要がある．さらに，物体の表面に水や油が付着して摩擦係数が大きく変化した場合にも対応できる必要がある．現時点では，ひずみの値を読み込むのに多少時間がかかるため，リアルタイム制御が行えるよう高速化を図る必要もある．また，本稿で提案したせん断ひずみ分布センサは，こりやしこりなどの生体内部構造の検出や，対象物のテクスチャの検出など，ヒトが行っている複合情報の検出を行うセンサへと発展させることも可能であると考えられる．

以上のように，ヒトの触覚受容機構と同様な情報処理を行う分布型センサを実用化するには多くの課題を残しているものの，本研究では，その第1ステップとして，曲面状のセンサによれば物体把持時の接触力の変化をひずみ分布パターン情報として実際に検出できることを確認することができた．

4. 結 論

せん断ひずみ分布の変化パターンの検出に基づき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手

法を実現するためのセンサの構造を提案した。すなわち、曲面状のシリコンゴム内部にひずみゲージを貼付した薄板を均一間隔に複数枚配置する構造を考案し、有限要素法を用いて基本特性を確認した。また、製作したセンサでひずみ分布を測定した結果、本センサによれば接触部の局所滑り領域の変化に伴う内部ひずみパターンの変化を検出し得ることを明らかにした。

謝辞 本研究の一部は神奈川科学技術アカデミーおよびカシオ科学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.
- (6) 前野, 小林, 河合, 平野, 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, 機論64-620, C (1998), 1258.
- (7) 大岡, ヒトの指先大触覚センサ, 機講論No.96-2, B, (1996), 783.
- (8) 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), 785.
- (9) 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.