

光学式マイクロ三軸触覚センサの試作*

大岡 昌博*¹, 東岡 制*²
壁下 寿登*³, 三矢 保永*⁴An Experimental Optical Three-Axis Tactile Sensor
for Micro MachinesMasahiro OHKA*⁵, Isamu HIGASHIOKA,
Hisanori KABESHITA and Yasunaga MITSUYA*⁵ Shizuoka Institute of Science and Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
Toyosawa 2200-2, Fukuroi, Shizuoka, 437-8555 Japan

This paper described a micro optical three-axis tactile sensor capable of sensing not only vertical force but also horizontal force. The vertical force was detected from the integrated gray scale values of bright pixel emitted from the contact area of conical feelers. The conical feelers were formed on the rubber sheet surface keeping contact with an optical waveguide plate. The horizontal force was detected from the horizontal displacement of the conical feelers. In the experiments, a precise multi-axial loading machine was developed to measure sensing characteristics of the present sensor. It was found that the vertical force was specified uniquely under combined force conditions and that the horizontal force was specified by modifying the relationship between the horizontal force and the horizontal displacement on the basis of vertical force. From the experimental results calibration coefficients were identified to transform the integrated of gray scale values into vertical force and to transform the horizontal displacement into the horizontal force.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Sensor, Optical Measurement, Tactile, Three-Axis, Optical Waveguide, Micro Machine, Micro-scope Typed Robot

1. 緒 言

触覚センサは、センサ材料が変形して生じる電気抵抗、静電容量、磁気、電圧および光量などの物理量の変化を計測することによって、センサと接触物体に生じる圧力分布を得ることを原理としている⁽¹⁾。この中で、光量変化を計測する光導波形触覚センサは、光導波路として機能するアクリル板と接触変形材料としてのゴムシートを接触させ、アクリル板の端面から入射された光が接触部で散乱反射することによって得られる接触面画像をCCDカメラで撮像して、接触状態を検知することを原理としている^{(2)~(7)}。このセンサの感度特性は、ゴムシート表面に設けたテクスチャによって調整できる。テクスチャは鋳型表面を転写して製造されるため、鋳型材料としてマイクロ加工可能なものを選定すれば、微細なテクスチャの形成が可能である。したがって、この原理を用いれば高密度・高感度

のマイクロ触覚センサの実現が期待できる。しかし、このままでは検出面に垂直な圧力分布のみが検出可能であるため、光導波形一軸触覚センサとよぶことにする。著者らの研究以外では、このような光導波形一軸触覚センサを研究対象としていた^{(2)~(5)}。

一方マイクロ・スコープは、すでに工業と医療の両分野で幅広く適用されており、今後、検査装置としてのマイクロ・スコープ形ロボットの開発が期待される⁽⁸⁾⁽⁹⁾。マイクロ・スコープ形ロボットは、ヒトの体内や機械の細管へ送り込まれて使用されることが主となるため、環境と接触する機会が頻繁に生じる。マイクロ・スコープ形ロボットに触覚センサを搭載すると、周囲の環境の知覚や対象物体の認識ばかりではなく、マイクロ・スコープ形ロボット自身や周囲を損傷から防止することが可能となる。このため、搭載された触覚センサが物体との間に発生する滑りを計測したり、表面の摩擦係数の分布を検出することが有効となる。このような機能は、センサ表面の垂直力の検出だけでなく、水平方向の力も同時に検出する三軸触覚センサによって実現される。したがって、マイクロ・スコープ形ロボットに搭載されるセンサとして、三軸触覚センサは重要である。

* 原稿受付 1999年10月18日。

*¹ 正員、静岡理科大学(☎437-8555 袋井市豊沢2200-2)。*² 三菱電機(株)名古屋製作所(☎461-8670 名古屋市東区矢田南5-1-14)。*³ (株)日立IEシステム(☎492-8622 稲沢市幸町120-1)。*⁴ 名古屋大学工学部(☎464-8603 名古屋市千種区不老町)。

E-mail: ohka@me.sist.ac.jp

光導波形一軸触覚センサのシリコンゴムシート of の製造において、複雑な形状の鋳型を用いる手法と、硬さの異なるシートを貼せる手法を組合せれば、一軸触覚センサを三軸形に発展できる。著者らは、ゴムシートの検出面側にアレイ状に円柱状の突起(以下、円柱状触子)を、また一つの円柱状触子に対して裏面に 2×2 個の円すい状の突起(以下、円すい状触子)を配列し、4個の円すい状触子の接触面積の大小関係から、三軸力を検出する光導波形三軸触覚センサを考案した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、ゴムシートの構造が複雑であるため、現状ではマイクロ化が困難である。マイクロ触覚センサにはその加工や組立が簡単になるよう単純な構造が望ましい。

著者らは、マイクロ・スコープ形ロボットに搭載可能な三軸触覚センサの開発を目的として、ゴムシートの構造が単純でマイクロ加工が可能な光導波形一軸触覚センサを用い、画像処理によって三軸力検出を実現するための原理を提案し拡大モデルを用いてその原理を確認した⁽¹⁰⁾。本原理では、ゴムシート表面のテクスチャとして円すい状触子のアレイを選定する。センサ面に垂直力・水平力が加わると、円すい状触子が圧縮とせん断の変形を受けてアクリル板に接触する。このとき、接触面画像の輝度値の分布は釣り鐘状となり、その値は接触面に生ずる圧力に比例するため、これを積分することによって、触子に作用する垂直力を検出することができる。また、水平分力によりゴムシートは軸方向ひずみを生じ、接触面は水平方向に移動する。この移動量を輝度値分布の重心の移動量として求めれば、移動は二自由度方向に生じ得るので垂直方向と併せて三軸力の検出が可能となる。

本研究では、上述の三軸力検出原理における触子移動を精密に検討するため、接触面上の摩擦を考慮して有限要素法により組合せ荷重の下での円すい状触子の変形・移動解析を実施した。次に、底面の半径と高さがそれぞれ $150 \mu\text{m}$ と $100 \mu\text{m}$ の円すい状触子を 10×12 個配列したシリコンゴムシート、アクリル板、ボ

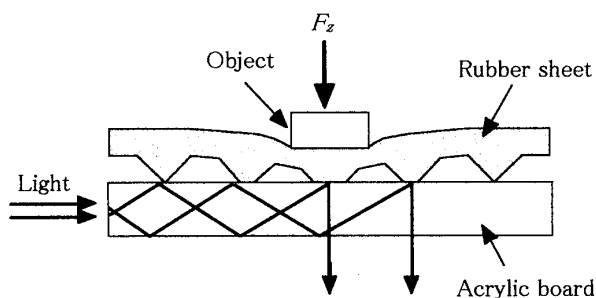


Fig. 1 Principle of an optical uni-axis tactile sensor

ア・スコープ、CCDカメラなどで構成するセンサシステムを開発した。さらに、このセンサに微小な二軸の組合せ荷重を負荷できる荷重試験機を試作し、センサ面に種々の垂直力と水平力の組合せ負荷を与える実験を行い、原理の妥当性を検証するとともにセンサの較正データを得た。

2. 原理

2.1 光導波形一軸触覚センサ 光導波形触覚センサは、図1のように接触変形材料としてのゴムシート、と光導波路として機能する透明な平面アクリル板によって構成される。アクリル板の端面から光を入射すると、アクリルの屈折率は空気より大きいいため、入射した光は全反射を繰り返して、光導波路に封じ込められた状態となる。ここでセンサ表面に圧力が作用すると、ゴムシートが圧縮変形して光導波路に接触し、接触部分では全反射条件が崩れるため、それまでほとんど全反射していた光が光導波路外部に散乱する。この散乱光をCCDカメラによって観測すれば、接触状態を取得できる。さらに、アクリル板に接するゴムシートの表面に円すい形の突起を設ければ、センサ面に作用する垂直力に比例する接触面積が得られるため、その接触画像から接触面積を求めれば、垂直力を測定することが可能になる。

2.2 光導形マイクロ三軸触覚センサ 本センサによる三軸力検出の原理を図2に示す。三軸力の力成分方向を定義するため、図2中には直交デカルト座標系が示されている。本センサの検出面に垂直力・水平力の合成力が加わると、シリコンゴムシートのアクリル板側にアレイ状に配置された円すい状触子は、圧縮とせん断の変形を受けてアクリル板に接触し、光導波

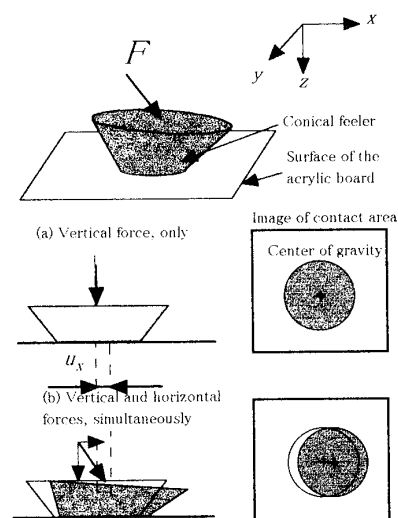


Fig. 2 Principle of an optical three-axis tactile sensor

路を進んできた光はこの接触面で散乱反射する。この接触面を CCD カメラで撮影すると、触子の中心が明るく外側ほど暗い釣り鐘状の輝度分布の画像が得られる。

後述のシミュレーション結果と実験結果から、接触面画像の輝度値 $g(x, y)$ はアクリル板と円すい状触子の間に発生する接触圧力 $p(x, y)$ に比例することがわかった。すなわち、

$$p(x, y) = Cg(x, y) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 C は変換係数であり、 $g(x, y)$ は輝度値の分布である。

アクリル板と触子の接触面積を S とすると、垂直力 F_z は次の積分値で計算できる。

$$F_z = \int_S p(x, y) dS \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)に式(2)を代入すると、

$$F_z = \int_S g(x, y) dS \equiv CG \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、後述の議論で用いるために、 $g(x, y)$ の面積積分を G とした。次に、水平方向分力 F_x および F_y を求める式を導入するため、輝度値 $g(x, y)$ の重心位置 (X_G, Y_G) の計算式を示す。すなわち、

$$X_G = \frac{\int_S g(x, y) x dS}{\int_S g(x, y) dS} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Y_G = \frac{\int_S g(x, y) y dS}{\int_S g(x, y) dS} \quad \dots\dots\dots (5)$$

なお、接触面以外では $p(x, y)$ と $g(x, y)$ はほぼ零となるため、式(2)~(5)の積分範囲は隣接の触子に影響しない範囲で実際の S より大きくとっても差し支えない。シリコンゴムシートはせん断力により軸方向ひずみを生じるから、触子の接触面は水平方向に移動する。この移動量の x と y 方向成分を、それぞれ u_x と u_y とすると、これらは前述の X_G と Y_G の変化量として求めることができる。

$$u_x = X_G^{(t)} - X_G^{(t-1)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

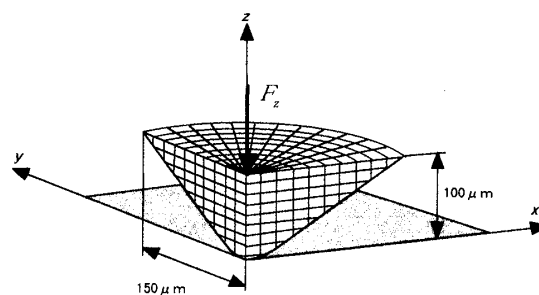
$$u_y = Y_G^{(t)} - Y_G^{(t-1)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 (t) と $(t-1)$ はそれぞれ現在ステップと1ステップ前の状態を表す。

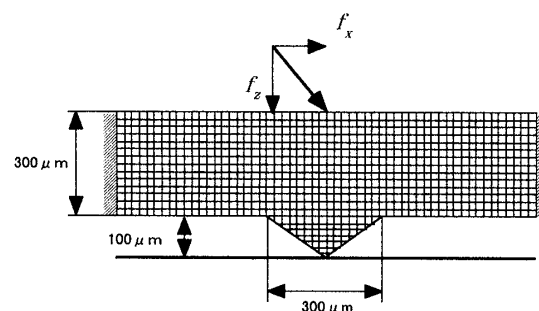
シリコンゴムシートとアクリル板間の摩擦が無視できる場合には、センサ面に作用している x と y 方向の力 F_x と F_y は、それぞれシリコンゴムシートのバネ定数 K_x と K_y に比例する。したがって、 F_x と F_y は次式で計算できる。

$$F_x = K_x u_x \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$F_y = K_y u_y \quad \dots\dots\dots (9)$$



(a) 3 D model



(b) 2 D model

Fig. 3 Models for FEM analysis

3. 有限要素法による接触変形解析

3・1 垂直力による円すい状触子の接触変形解析

前述した垂直力の検出原理の有効性を確認するため、円すい状触子とアクリル板との接触面画像における輝度値と、接触面に生じる接触圧力の関係を調べる。このため、有限要素法ソフトウェア ABAQUS を用いて、触子とアクリル板の接触変形解析を行った。後述の実験と同条件でシミュレーションを行うため、後述のシリコンゴムシートの製作に用いた鋳型の形状をレーザ顕微鏡 [レーザテック(株), ILM 21 W] を用いて測定した。その形状データに基づいて作成した円すい状触子のシミュレーションモデルを図 3(a) に示す。図 3 からわかるように触子は完全な円すい形となっていない。この触子の半径と高さを、それぞれ $150 \mu\text{m}$ と $100 \mu\text{m}$ とした。

次に、本センサのシリコンゴムシートのヤング率 E として 0.476 MPa を採用した。ポアソン比 ν については、ゴムの解析に用いられる非圧縮の仮定が十分成立する値として 0.499 を採用した。円すいの対称性を考慮して XZ, YZ 平面で $1/4$ に切断し、切断面においてゴムシートの法線方向の変位を拘束した。またアクリル板は完全拘束された剛体平面とした。

以上のモデルについて、触子の上面に均一な垂直力を負荷させるシミュレーションを行った。このシミュレーション結果については、後述の実験結果と合せて検討する。

3.2 水平力による触子移動メカニズム 前述した水平力の検出原理では、摩擦を無視して式(8)と(9)を導いた。ここでは円すい状触子とアクリル板間の摩擦を考慮して式(8)と(9)を修正するため、摩擦を考慮した触子移動解析を行った。垂直力と水平力の合成力に対する触子の変形・移動のメカニズムを定性的に調べるため、図3(b)に示すモデルを用いて平面ひずみ解析を行った。

触子の高さと同幅は、それぞれ前述の三次元モデルと同じ値の100 μmと300 μmとした。ゴムシートの厚さは、300 μmとし両端の変位を拘束した。また、ヤング率とポアソン比については、前述の三次元モデルと同一の値を採用した。アクリル板は完全拘束された剛体平面とした。触子とアクリル板との摩擦係数には、一般的なゴムと金属の摩擦係数である1.0を用いた。また、滑りが生じる限界せん断力 τ_{max} として0.098 MPaを仮定した。

このモデルを用いて、垂直力と水平力の合成力を触子の上部の面に均一に負荷する解析を行った。垂直線荷重 f_z (奥行き方向長さあたりの荷重で、モデルの厚さを掛けると、垂直荷重 F_z になる) を一定にした状態で、水平分力 f_x (同、水平荷重 F_x になる) の値を段階的に増加させたときの触子の移動量 u_x を式(4)を用いて求めた。実験では、触子の移動量を輝度値分布の重心の移動量として計算するため、ここでは、触子の移動量を触子とアクリル板の接触面に生じる圧力分布の重心の移動量として算出した。垂直力の影響を調べるため、垂直方向線荷重 $f_z=9.8, 14.7, 19.6, 24.5, 29.4$ mN/mmの5条件について計算した。

接触圧力分布の重心移動量 u_x と、水平方向線荷重 f_x との関係を図4に示す。横軸と縦軸は、それぞれ水平方向線荷重 f_x と接触圧力分布の重心の移動量 u_x である。図4からわかるように、 u_x-f_x には低荷重領域では傾きが小さく、高荷重領域になるとあるしきい

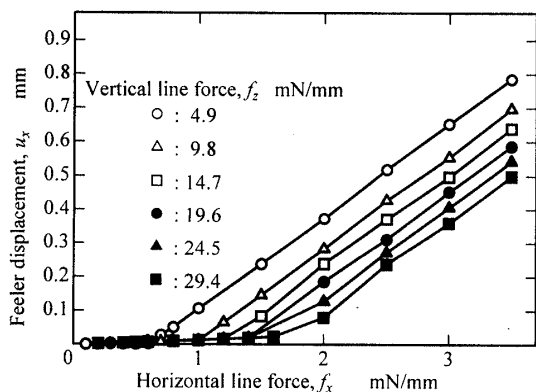


Fig. 4 Relationship between horizontal feeler movement and horizontal force

値を境に傾きが大きくなるといった二直線関係がある。また、この二直線関係は垂直線荷重の大きさに依存し、線荷重が大きくなるほど高荷重領域のほうへ平行移動している。

この二直線関係は、静止摩擦力を超えると動摩擦の状態になるというクーロン摩擦の法則と横荷重を受ける触子の弾性変形から説明できる。すなわち、アクリル板と触子の間に生じる滑りは接触面に発生するせん断力が限界値以下では、触子はアクリル板に固着した状態でせん断変形を受ける。このため、触子の接触面の形状が円形から洋梨状に変形し結果として接触面の重心が移動する。この移動量はごくわずかであるため、低荷重領域では u_x-f_x 関係の傾きが小さい。さらに大きな水平分力が作用して、接触面に作用するせん断応力が限界せん断応力 τ_{max} を越えると、動摩擦状態に移行し接触面に滑りを生じ触子は大きく移動する。

以上の変形特性を考慮して、式(8)と(9)を修正する。まず滑りが開始する遷移点での重心移動量を u_{x1} とすると、 $u_x=u_{x1}$ をしきい値として u_x-F_x の関係は次の二直線で表すことができる。

$$F_x = \beta_x u_x \quad (u_x < u_{x1}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$F_x = K_x(u_x - u_{x1}) + \beta_x u_{x1} \quad (u_x \geq u_{x1}) \quad \dots (11)$$

ここで β_x はせん断力による円すい状触子のばね定数である。

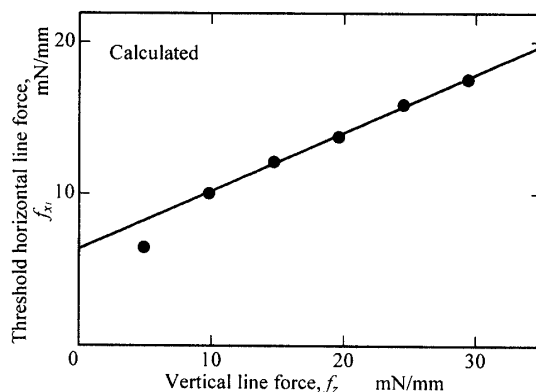


Fig. 5 Relationship between threshold of horizontal force and vertical force

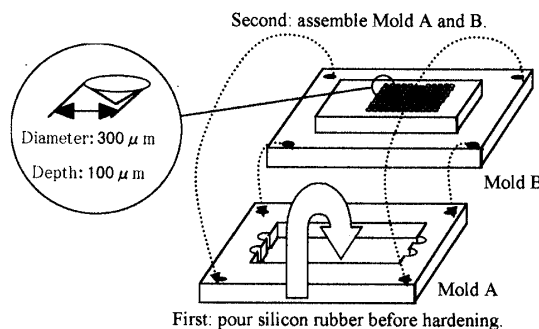


Fig. 6 A mold for the rubber sheet

次に、屈曲点の水平線荷重 f_{x1} と垂直線荷重 f_z の関係を図5に示す。図5からわかるように、 $f_z=10$ mN/mm を超える領域では $f_{x1}-f_z$ 関係はほぼ線形である。ここでは、図5中の直線で近似できるとする。 u_{x1} に対応する水平荷重を F_{x1} で表すと、 F_{x1} は次の関係式で表される。

$$F_{x1} = \alpha_x F_z + \gamma_x \dots\dots\dots (12)$$

ここで α_x と γ_x は F_z-F_{x1} 関係から決定される定数である。

式(10)~(12)をまとめるとともに、 y 方向にも同様な式が成立すると仮定して式(8)と(9)に代る式を求めると、

$$F_x = \begin{cases} \beta_x u_x & (u_x < u_{x1}) \\ K_x u_x + (1 - K_x/\beta_x)(\alpha_x F_z + \gamma_x) & (u_x \geq u_{x1}) \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

$$F_y = \begin{cases} \beta_y u_y & (u_y < u_{y1}) \\ K_y u_y + (1 - K_y/\beta_y)(\alpha_y F_z + \gamma_y) & (u_y \geq u_{y1}) \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

となる。

4. 実験装置および実験条件

4.1 ゴムシート マイクロ放電加工機 [松下技研(株), MG-ED 07-200] を用いて、図6に示す鋳型を製作した⁽¹⁰⁾。触子を形成する半径と深さがそれぞれ 150 μ m と 100 μ m の穴は、ピッチ 600 μ m で 10×12 個配列されている。ゴムシートの材料としてシリコンゴム [信越化学工業(株), KE-1404] を使用し、この鋳型を転写して、底面の半径と高さが、それぞれ 150 μ m と 100 μ m の円すい状触子が 10×12 個配列されたシリコンゴムシートを製作した。

4.2 マイクロ三軸触覚センサシステム 図7に示すように、本センサシステムは上述のシリコンゴム

シート、アクリル板、ボア・スコープ(OLIMPUS, C 040-032-090-50)、キセノン光源装置(OLIMPUS, ILV-2)、モノクロチルド CCD カメラ(浜松ホトニクス, C 5985)、フレームメモリボード [サイバーテック(株), CT-9800 B]、コンピュータ(NEC, PC-9801 RA)から構成される。ボア・スコープとは、細管内の観察などに利用される光源を備えたマイクロ・スコープである。このボア・スコープの光源からの光は、光ファイバを通じて光導波路として機能するアクリル板の側面に照射する。ゴムシートの円すい状触子とアクリル板との接触によって観測される明るいスポットの分布は、ボア・スコープを通して CCD カメラによって撮影し、フレームメモリに記憶される。センサに作用する垂直力は、電子天秤により計測し RS 232 C を通じてコンピュータに取込んだ(最小分解能: 0.1 mN)。また水平力は、リン青銅の平行板ばねにひずみゲージを4枚添付したロードセルを自作し、ひずみアンプと A/D コンバータボードを介してコンピュータに取込んだ(最小分解能: 0.1 mN)。触覚センサ、ボア・スコープおよび CCD カメラを一体として精密 X-Z ステージに設置し、ステージの送りねじを手動で調節して二軸の荷重をセンサ面に作用させた。

4.3 実験条件 三軸力検出の原理の妥当性を確認するため、上述のセンサシステムを用いて実験を行った。自作の力覚センサの先端に取付けた円柱状プローブの接触面内に 3×3 個の触子が入るように配置し、垂直荷重および垂直荷重と水平荷重の合成荷重を負荷した。垂直力の検出実験では、垂直荷重のみを段階的に加え、各触子について接触面画像の輝度値分布の重心を中心とする一辺の長さが 460 μ m の正方形領域内の輝度値分布を計測して、その領域内の積分値を求めた。また、水平力の検出実験では、垂直荷重として $F_z = 2.2, 4.4, 6.5, 8.7, 10.9$ mN の5種類を加えたのちに、垂直力を一定に保ちながら F_x を零から 10 mN ま

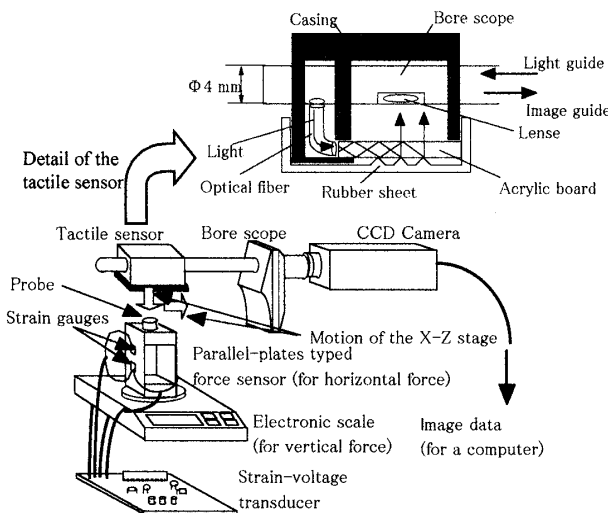


Fig. 7 A micro three-axis tactile sensor system

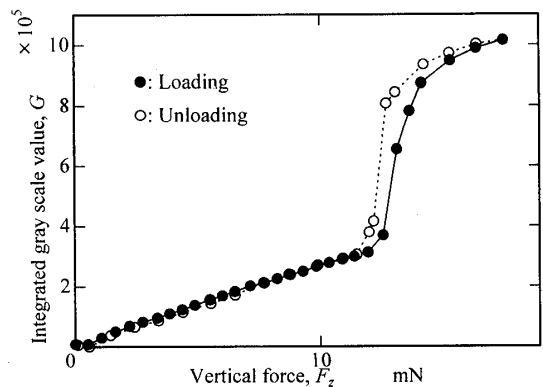


Fig. 8 Relationship between integrated gray scale value and vertical force

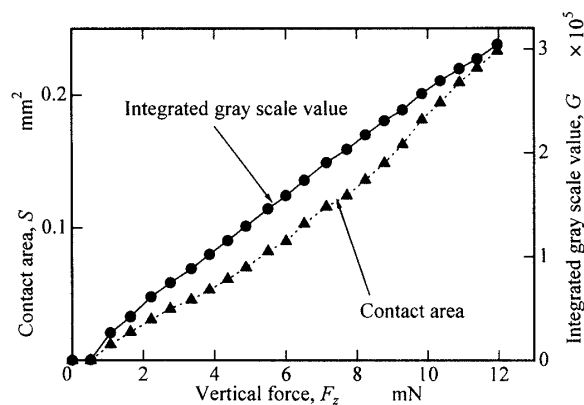


Fig. 9 Comparison between contact area and integrated gray scale value for estimation of vertical force

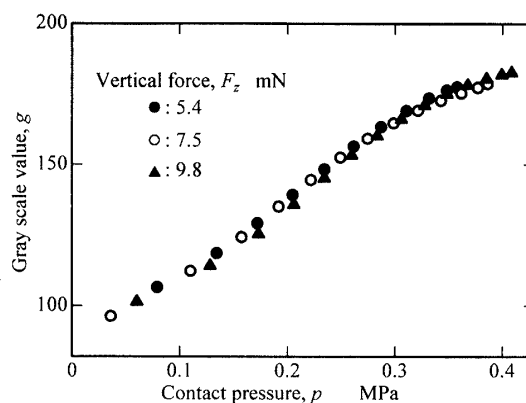


Fig. 11 Relationship between contact pressure and gray scale value

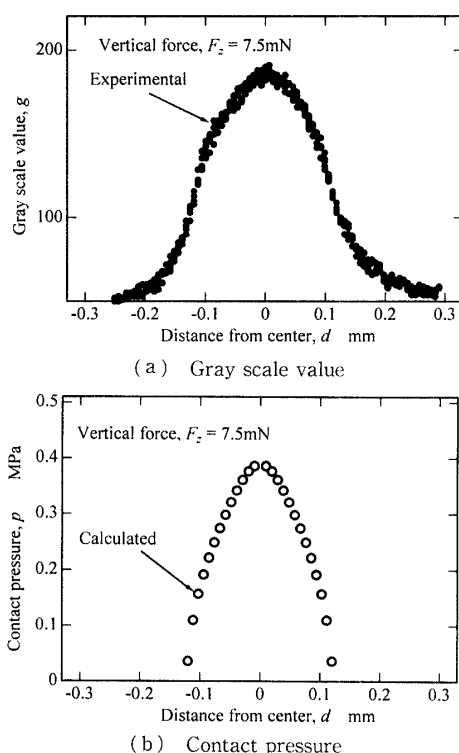


Fig. 10 Spatial distribution of gray scale value and contact pressure

で段階的に増加させ、矩形領域内にある各画素の輝度値分布を計測して、その領域内の重心の移動量を求めた。

5. 実験結果と考察

5.1 垂直力検出実験 垂直力の検出方法の妥当性を確認するため、垂直荷重が 0 mN の状態から実験を開始し、段階的に荷重を上昇させ最大荷重に達した後、0 mN になるまで荷重を減少させたときの結果を図 8 に示す。一つの触子について評価するため、横軸と縦軸は、それぞれ一つの触子に作用する垂直力 F_z と、一つの矩形領域内の輝度値の積分値 G であ

る。また、図 8 中の黒丸と白丸はそれぞれ荷重負荷時と除荷時の結果である。

図 8 からわかるように、垂直力が 12 mN までは、 G は直線的に増加している。しかし、垂直力が 12 mN 以上になると、 G が急激に増加している。これは、垂直力が 12 mN 以上になると円すい状触子が完全に圧縮され、触子以外のゴムシート部で接触が生じるためである。したがって、本センサでは一つの触子あたり最大 12 mN までの垂直力を検出することができる。

接触面積から作用力を求める従来法と本手法を比較するため、垂直力印加実験の結果を、縦軸と横軸にそれぞれ接触面積 S と垂直力 F_z をとって図 9 に示す。また、図 9 中には前述の G - F_z 関係も示されている。図 9 より明らかに、輝度値の積分値から垂直力を求める本手法のほうが、接触面積による処理より線形性がよくなるのがわかる。

5.2 輝度値と接触圧力の関係 F_z を同定するために G を用いたほうが線形性が向上する理由を明らかにするため、ここでは輝度値と接触圧力の関係を調べる。まず、垂直力のみを印加する実験で得られた接触面画像の輝度値の分布を求める。図 10(a) は接触面の中軸上の輝度値分布である。一方、接触圧力の分布は実測できないため、3.1 節で述べたシミュレーションから求め、その結果を図 10(b) に示す。これらはいずれも、円すい状触子に 7.5 mN の垂直力が作用した場合の結果である。図 10(a) と (b) を比較すると、両者はともに釣鐘状の分布をしているのがわかる。これらの結果から、接触圧力と輝度値の関係を求めた結果を図 11 に示す。この図からわかるように、接触圧力 $p(x, y)$ と輝度値 $g(x, y)$ の関係はほぼ線形である。

一方、表面粗さの凹凸の高さ分布にガウス分布を仮定して理論解析すると、真実接触面積は接触圧力に比例することが明らかにされている⁽¹¹⁾。ゴム表面には

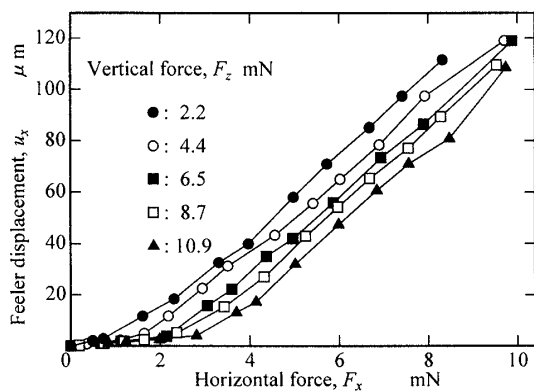


Fig. 12 Relationship between horizontal displacement of the conical feeler and horizontal force

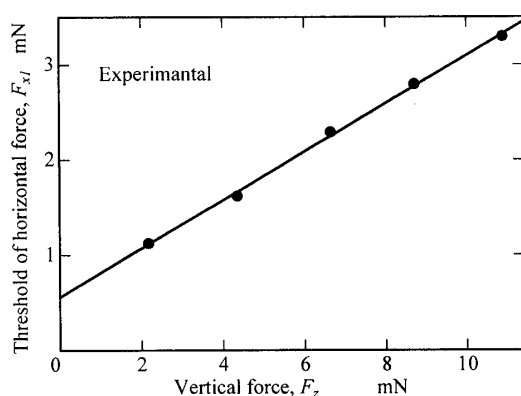


Fig. 13 Dependence of vertical force on slippage initiation caused by horizontal force

型の面粗さを転写してできた細かな凹凸があり、それらの凹凸の先端の接触面を画素の範囲で合計して求められる真実接触面積は、画素ごとに計測される輝度値に正比例すると考えられる。したがって、図11の実験結果は、接触圧力が真実接触面積の大きさに比例することを示した上述の理論を実験的に検証したものと見える。

本研究のように触子が完全な円すい状でない場合には、垂直力と接触面積の関係は線形ではなくなる。しかし、以上の議論により接触力と真実接触面積の関係は線形であるため、真実接触面積を表す輝度値の積分値から垂直力を同定する方が、広い範囲にわたって線形性の高い計測が可能となる。特に、円すい状触子が小さくなると先端の形状を正確に円すい形にすることが困難になることに加えて、形状に対する表面粗さの影響が大きくなるため、マイクロ触覚センサの検出原理として輝度値を用いる手法は有効である。

5.3 垂直力と水平力の合成力負荷実験 前述の式(10)~(12)の妥当性を検討するため、荷重負荷装置を用いて本センサに垂直力を印加した後に、垂直力を一定に保ちながら水平力を印加する実験を行った。前

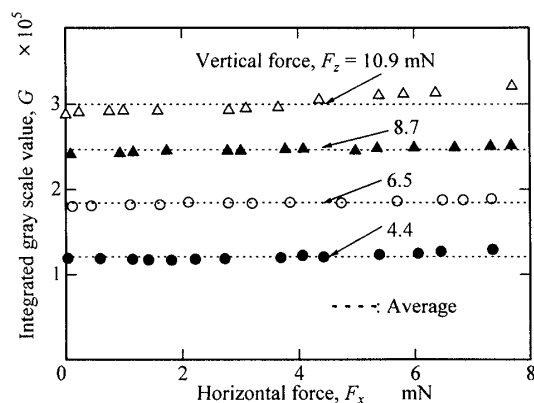


Fig. 14 Variation in integrated gray scale value under applying horizontal force

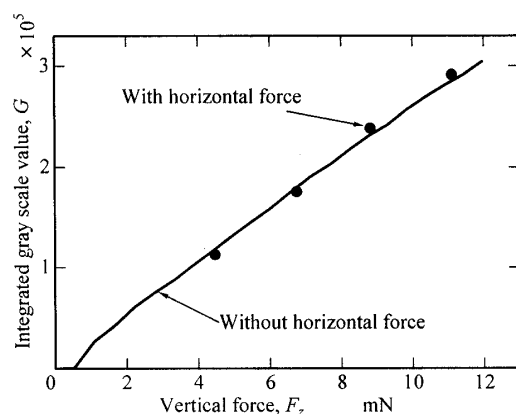


Fig. 15 Relationship between vertical force and integrated gray scale value

述の矩形内画素の輝度値分布の重心位置を計測し、触子の移動量を重心位置の移動距離 u_x として算出した。 $F_z=2.2, 4.4, 6.5, 8.7, 10.9$ mN の5種類の垂直力について、水平力 F_x をそれぞれ0 mNから約10 mNまで段階的に印加した。横軸と縦軸に、それぞれ触子一つについての水平力 F_x と、触子の輝度値分布の重心の移動距離 u_x をとって、図12に示す。

図12を検討すると、3.2節のシミュレーション結果と同様に2本の直線で表される関係が得られている。また、垂直荷重が大きいほど折れ曲がり点の水平力 F_{x1} が増加していることもわかる。 F_{x1} を越える荷重領域での傾きを調べると、 F_z が変化してもほぼ一定であることもわかる。そこで、式(11)に含まれるばね定数 K_x を求めると、 $K_x=0.067$ mN/ μ m となった。また、折れ曲がり点以前の u_x-F_x 関係を調べ、低荷重領域での感度を示す式(10)中の β_x を求めると、 $\beta_x=1.7$ mN/ μ m となった。

次に、各垂直応力ごとに、滑りが発生する前後で実験値を2本の直線に近似し、その2直線の交点から、触子の滑りが開始する水平力 F_{x1} を算出した結果を図13に示す。図13からわかるように、垂直応力 F_z

と滑りが開始する水平力 F_{x1} はほぼ比例している。図 13 から式(12)中の α_x と β_x を求めたところ、それぞれ $\alpha_x=0.25$ と $\beta_x=0.56$ mN となった。

さらに、水平力が作用しても、垂直力 F_z と輝度値の積分値 G の関係は影響を受けないことを確認するため、垂直力 F_z を一定に保ち水平力 F_x のみ段階的に増加させた場合の G の変化を図 14 に示す。この図からわかるように、段階的に水平力が増加しても G の値はほぼ一定である。また、このときの垂直力 F_z と G の関係を図 15 に示す。図 15 中黒丸は、 F_x が作用していない場合の G の変化である。この図からわかるように、水平力が作用した場合と作用しない場合の G - F_z 関係はほぼ一致している。このように、水平力は G - F_z 関係に影響を与えないため、水平力と垂直力は独立に検出可能である。

以上の議論から、 u_x - F_x 関係は式(10)~(12)で表し得ることがわかった。特にそれぞれ低荷重領域と高荷重領域の感度を表す β_x と K_x を比較すると、 β_x のほうが 25 倍も大きい。これは、低荷重領域では超高感度のセンサとして機能することを意味している。

6. 結 言

本研究では、マイクロスコープ搭載用三軸触覚センサを開発する目的から、微小化に有利な単純構造の光導波形一軸触覚センサの出力から、画像処理により三軸力を検出する方式を開発した。本研究で得られた結果を以下に要約する。

(1) 底面の半径と高さがそれぞれ $150\ \mu\text{m}$ と $100\ \mu\text{m}$ の円すい状触子を 10×12 個配列したシリコンゴムシート、アクリル板、ボア・スコープ、CCD カメラなどで構成するセンサシステムとともに、このセンサに微小な 2 軸の組合せ荷重を負荷できる荷重試験機を試作した。

(2) センシング面に垂直力のみが作用する場合について、シミュレーションによって求めた触子の接触部の圧力分布と、実験から得られた画像の輝度値分布の関係を調べたところ、両者はよく一致した。これより画素ごとの輝度値が、画素に対応する局所接触面積の圧力に対応していることがわかった。この特性を用いて、垂直力の求め方として、接触面積の代わりに、接触部の圧力分布の積分値を用いる新しい方法を提案した。また、本手法により広い範囲にわたって線形性の高い測定が可能であることを確認した。

(3) 垂直力が一定の条件の下で、水平力のみ増加

させた場合、初期には接触面の重心の微小な移動があり、ついで大きく移動し、それぞれの特性は 2 本の直線で近似できること、および折れ曲がり点では滑りが発生し、この点の水平力の大きさは垂直力の大きさにほぼ比例することなどを明らかにした。

(4) 水平力の有無によって、輝度値の分布形状には差が生じるが、積分した値はほぼ一定であるため、垂直力と重心の移動量は独立して検出できること、および垂直力から上述の折れ曲がり点が決定されるため、重心の移動量から水平力を同定できることなどを確認した。

なお、本研究は文部省科学技術研究費基盤研究 A (07555057) と財団法人マイクロマシンセンタからの助成金を利用したことを付記し謝意を表する。

文 献

- (1) Nicholls, H. R., *Advanced Tactile Sensing for Robotics*, World Scientific, (1992), 1-47.
- (2) Mott, D. H., Lee, M. H. and Nicholls, H. R., An Experimental Very High Resolution Tactile Sensor Array, *Proc. 4th Int. Conf. Robot Vision Sensory Controls*, (1984), 241-250.
- (3) Tanie, K., Komoriya, K., Kaneko, M., Tachi, S. and Fujikawa, A., A High Resolution Tactile Sensor, *Robot Sensors Vol. 2: Tactile and Non-Vision*, (1986), 189-198, Kempston, UK: IFS (Pubs).
- (4) Nicholls, H. R., Henderson, T. C. (編), *Tactile Sensing Using an Optical Transduction Method, Traditional and Non-Traditional Robot Sensors*, (1990), 83-99, Springer-Verlage.
- (5) 中尾直樹・金子真・鈴木夏夫・谷江和雄, 接触位置および法線の検知機能を有する半球面光導波形指先触覚センサ, *機論*, **57**-575, C(1991), 805-812.
- (6) 大岡昌博・三矢保永・竹内修一・亀川修, 有限要素法による接触変形解析に基づく光導波形三軸触覚センサの設計, *機論*, **61**-585, C(1995), 1949-1954.
- (7) 大岡昌博・三矢保永・服部和敏・東岡制, ピラミッドアレイ状光導波形触覚センサの試作, *機論*, **65**-636, C(1999), 3210-3217.
- (8) 竜江義孝, 通産省科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術」研究開発の概要, *日本ロボット学会誌*, **12**-4(1994), 508-513.
- (9) Guo, S., Fukuda, T., Kosuge, K., Arai, F., Oguro, K. and Negoro, M., Micro Ctherer System with Active Guide Wire, *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1995), 79-84.
- (10) Ohka, M., Higashioka, I. and Mitsuya, Y., A Micro Optical Three-Axis Tactile Sensor (Validation of Sensing Principle Using Models), *Advance in Information Storage Systems*, Vol.10(1999), 313-325, World Scientific Publishing.
- (11) ホーリング, J.(松永正久監訳), *トライボロジー*, (1984), 39-64, 近代科学社.