

触覚センサ用弾性体における歪み-外力算出モデル

玉城 絵美[†] 星野 聖[†]

[†] 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科
〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: femi@edu.esys.tsukuba.ac.jp, hoshino@esys.tsukuba.ac.jp

あらまし 弾性体を用いた光学式の圧力センサは、使用する材料の性質のため、ヒトの皮膚と同じように薄くて柔らかい圧力センサを構成できる可能性を持っている。しかし、局所の歪みの移動や大きさに関する情報だけでは、正確な水平荷重の算出が十分に行えない。そこで本研究では、水平荷重が作用する方向の歪み分布密度が高くなる性質を利用し、3次元上の外力分布を推定できるアルゴリズムについて検討を行った。すなわち、歪みの分布から、外力の大きさ、接触点、検出面に垂直な分布荷重と水平方向の分布荷重を算出する弾性体の歪-外力モデルを考案した。また、弾性体の位置による歪み量の変化を考慮し、より正確な推定ができるように、弾性体の位置ごとに重みをつけた。

キーワード 弾性体, 歪み, 密度分布, 水平荷重, 光学式触覚センサ, 圧力センサ

A model for strain and external force in elastic tactile sensor

Emi TAMAKI[†] and Kiyoshi HOSHINO[†]

[†] Graduate School of Systems and Information Engineering, Univ. of Tsukuba
〒 305-8573 1-1-1 tennoudai, Tsukuba, Ibaraki

E-mail: femi@edu.esys.tsukuba.ac.jp, hoshino@esys.tsukuba.ac.jp

Abstract An optical pressure sensor with elastic body has the possibility to be a soft and thin pressure sensor as a human skin, owing to the features of the material. But the information of direction and magnitude of the local strain is not enough for the calculation of the accurate horizontal load. In this paper, therefore, the authors theoretically discussed the algorithm to calculate the 3-dimensional loads in the elastic body, using the features where the distribution density of strain increases in the horizontally forced area. We proposed a model for the relation between strain and external force in the elastic body, through which the magnitude of the force, position of the contact, and each of horizontal and vertical load can be calculated from the distribution density of strain. The different weights were given according to the area in the elastic body to increase the accuracy in the estimation.

Key words elastic body, strain, density distribution, horizontal load, vision based tactile sensor, pressure sensor

1. 序 論

近年、ロボットは、産業から家庭用ロボットへと分野を広げつつある。様々な作業が要求されるなかで、特に把持を行う作

業は、高精度で柔軟性のある制御が求められている。物体を把持する制御を行うには、皮膚に受ける外力の接触点や面、検出面に垂直な分布荷重が必要である。さらに、安定把持を行うためには、把持している物体との滑りや物体表面との摩擦係数の

分布を知るために、水平方向の分布荷重の情報が必要となってくる。現在、外力情報検出のために最も用いられている6軸力センサは、特定位置の接触点しか検出できず、硬いために皮膚のセンサとして用いることは出来ない。そこで、ヒトの皮膚と似た性質を持つ弾性体を用いた光学式の圧力センサ(以降、皮膚型センサ)が注目されている。

神山ら [1], [2] は、透明弾性体内部に青と赤の2層のマーカを格子状に配置し、マーカの移動ベクトルから垂直方向の力分布とねじりによる水平方向の力を求める触覚センサを考案した。また、CCDカメラを用いたことにより、小型化の際に多くの分布型触覚センサが持つ配線量の問題を解決している。しかし、垂直方向と水平方向の力が同時にあるときの計測結果や外力の姿勢と入射角度の算出については言及されていない。また、各マーカの移動量については外力算出に用いられているが、作用点からの移動量の分布については考慮されていない。

大岡ら [3]-[6] は、弾性体と円すい状触子とアクリル板の3段構造の検出面をマイクロカメラにより撮影し、3軸の外力を検出する手法を提案した。検出面に水平の荷重を検出する際には、弾性体の歪みがアクリル板上で移動する量から求める。また、3軸力検出原理における触子移動を精密に検討するため、接触面の摩擦を考慮して有限要素法により組み合わせ荷重の下での円すい状触子の変形と移動解析を実施した。しかし、検出面に水平方向の力は移動量のみでしか算出されておらず、水平方向の力が加わっているときでも重心の移動がない場合は、算出不可能になると考えられる。

従来の弾性体みの皮膚型センサは、局所の力の移動ベクトルのみで水平方向の力を求めているために、垂直方向の力が発生しているときの水平方向の分布荷重が得られず、水平方向の分布荷重のみの値算出についても定量的な評価実験も行われていない。また、弾性体を他装置と共に多重構造にすることで力の重心移動量を正確に算出し、水平方向の分布荷重が得られたとしても、外力の垂直成分の荷重が水平成分に移動した際、つまり水平方向の力があるにも関わらず重心の移動が無い場合には算出できない。さらに、弾性体の厚みと密度と形状によって局所ごとにセンサ構造と検出手法を検討しなければならない。弾性体表面の変化から水平方向の分布荷重を算出する場合、局所の歪みや移動量だけでは、作用点から局所に広がった局所ごとの垂直方向の荷重しか知ることができないので、根本的に情報量の限界がある。そこで、外力が加わったときの作用点からの歪み領域内全体の分布の性質を利用して、水平方向の分布荷重を算出する必要がある。

本報告では、弾性体の位置ごとに重みをつけ、作用点からの歪みの領域と、歪みの大きさの分布により、検出面に垂直方向の分布荷重と水平方向の分布荷重、つまり外力の三軸力分布を算出するモデルを提案する。

2. システム構成

2.1 原理

弾性体には、外力が作用する方向の歪み領域が狭く歪みが大きくなり、外力が作用する方向とは逆の歪み領域が広く歪みが小さくなる傾向がある。また、弾性体の張力により歪み領域の大きさは変動する。

まず、外力による弾性体の歪み領域とその分布について説明する。弾性体に加わる外力 F の力成分と歪み分布の例を図1に示す。ただし、接触点を作用点、接触面の場合はその重心点を作用点、検出面に垂直方向の分布荷重を F_z 、水平方向の分布

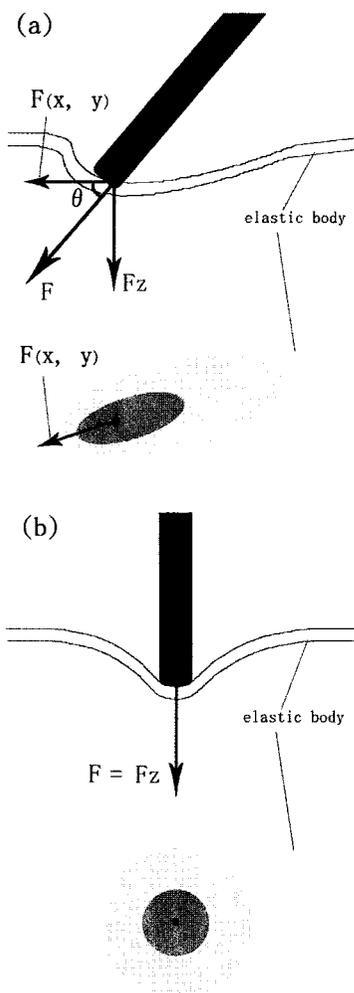


図1 外力 F による弾性体の歪み分布の例。(a) 水平方向の力があるとき、(b) 垂直方向の力のみ。

Fig. 1 An example of distorted distribution in the elastic body by an external pressure F . (a) with, and (b) without the pressure of horizontal direction.

荷重を $F_{(x,y)}$, F と $F_{(x,y)}$ が成す鋭角を θ とし, 各図の下部は外力が加わったときの歪み分布を示し, 歪みが大きいほど色が濃く示されている. 弾性体の方が垂直方向のみに加わっているとき, つまり $F_{(x,y)} = 0$ で $\theta = \pi$ のとき, 弾性体は均等に作用点に向かって引っ張られる (図 1-b). しかし, 水平方向の力が加わったとき, つまり $F_{(x,y)} > 0$ で $\theta < \pi$ のとき, $F_{(x,y)}$ の方向の弾性体は F_z によって垂直方向に引っ張られると同時に, $F_{(x,y)}$ により水平方向に押し出される. また, $F_{(x,y)}$ と逆方向の弾性体は F_z によって垂直方向に引っ張られると同時に, $F_{(x,y)}$ により水平方向に引っ張られる (図 1-a). よって, $F_{(x,y)}$ の向き周辺の弾性体は, 歪み領域が狭く, 歪みが大きくなり, $F_{(x,y)}$ と逆方向の弾性体は, 歪み領域が広く, 歪みが小さくなる.

次に, 弾性体の張力による歪み領域の大きさの変動について説明する. 張力が大きいときは, 水平方向の力成分 $F_{(x,y)}$ による歪み領域の幅の違いが顕著に現れる (図 2-a) が, 張力が小さいときは, 作用点と張力の引き合いが少ないため歪み領域の幅の違いが現れにくい (図 2-b). しかしながら, $F_{(x,y)}$ 方向の弾性体は F_z の歪みが $F_{(x,y)}$ により増大する. つまり, $F_{(x,y)}$ 方向の弾性体の歪みが大きくなり, 逆方向の弾性体の歪みが小さくなる性質は変動しない. したがって, 外力 F の成分を求める際には, $F_{(x,y)}$ 方向の歪み領域が狭く歪みが大きくなり, 逆方向の歪み領域が広く歪みが小さくなる性質を生かしながら, 弾性体の張力により歪み領域の大きさが変動することを考慮しなければならない.

2.2 外力算出モデル

2.1 節での性質を利用し, 弾性体の歪み量とその密度から外力を算出するモデルを作成した.

初めに, 外力の x と y 成分方向を求める. 水平荷重の線分方向だけ求めるので, $F_{(x,y)}$ 方向に歪み領域の楕円が広がる性質を利用する. ただし, 張力が弱い場合を考慮し, 歪み領域の幅だけではなく歪み分布の和を参照する. よって, 作用点 (x', y') と円の外周の任意の 2 点 (x_1, y_1) と (x_2, y_2) を通る線 ℓ 上の歪みの和が最大となる線分を外力 x と y 成分の線分方向とする (図 3).

次に, $F_{(x,y)}$ の進行方向を決定する. 作用点 (x', y') から (x_1, y_1) の成分を \vec{L}_1 , 作用点 (x', y') から (x_2, y_2) の成分を \vec{L}_2 としたとき, それぞれの歪みの密度を L_1, L_2 とする. 次式に L_1, L_2 を求める式を示す.

$$L_1 = \frac{\sum_{(x_1, y_1)}^{(x, y)} N}{|\vec{L}_1|}$$

$$L_2 = \frac{\sum_{(x_2, y_2)}^{(x, y)} N}{|\vec{L}_2|} \quad (1)$$

ただし, N は歪みの大きさを示している. $F_{(x,y)}$ 方向の弾性体は, 歪み領域が狭く歪みが大きくなり, 逆方向の弾性体は, 歪み領域が広く歪みが小さくなる. つまり, $F_{(x,y)}$ 方向の弾性体は歪みの密度が大きく, 逆方向の弾性体は密度が小さくなる.

よって, 以下のように示すことができる.

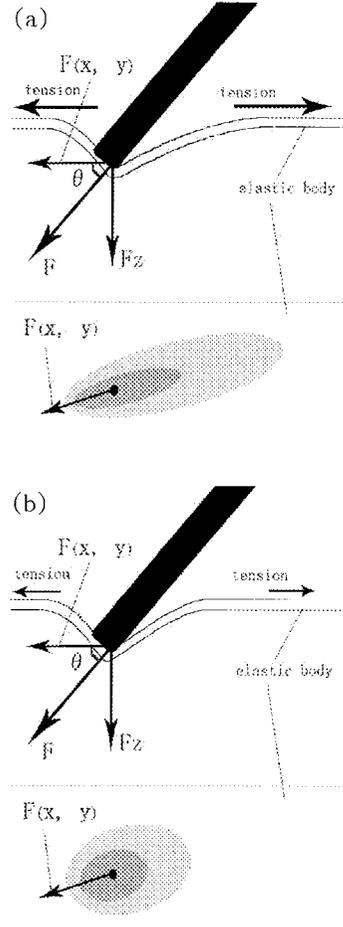


図 2 弾性体の歪み分布の例. (a) 張力が強いとき. (b) 張力が弱いとき.
Fig. 2 An example of distorted distribution in the elastic body. (a) with the large tension. (b) slack elastic body.

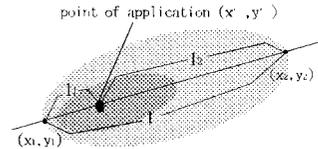


図 3 外力を算出するための歪み領域内の要素.
Fig. 3 Points of distorted distribution to calculate the external pressure with.

$L_1 < L_2$ のとき, 進行方向は L_1

$L_1 > L_2$ のとき, 進行方向は L_2

$L_1 = L_2$ のとき, $\theta = \pi$, $F_{(x,y)} = 0$

さらに, 外力 F と $F_{(x,y)}$ が成す鋭角 θ を求める. θ が小さくなるほど式 (1) の L_1 と L_2 の差が増えることから, θ は L_1 と L_2 の比の値に比例する. 張力が大きくなるにつれて歪み領域が広がり, 全体の歪みの密度が小さくなることも考慮する. 次式により $F_{(x,y)}$ の方向が ℓ_1 のときの θ を求める.

$$\theta = \frac{L_2}{L_1} \times k \times \text{tension} \quad (2)$$

ただし, k は定数であり, tension は張力である. また, このときの外力 F の大きさは次式で示すことができる.

$$|F| = \sum (h_{(x,y)} \times N) \quad (3)$$

ただし, h は弾性体の位置ごとの係数, N は歪みの大きさを示している.

したがって, 式 (1)(2)(3) より, $F_{(x,y)}$ が L_1 方向のときの F_x と $F_{(x,y)}$ は次式より求めることができる.

$$F_x = \sum (h_{(x,y)} N) \sin \left(\frac{|\vec{\ell}_1| \sum_{(x_1, y_1)}^{(x,y)} N}{\frac{(x_2, y_2)}{(x,y)} k \times \text{tension}} \right) \quad (4)$$

$$F_{(x,y)} = \sum (h_{x,y} N) \cos \left(\frac{|\vec{\ell}_1| \sum_{(x_1, y_1)}^{(x,y)} N}{\frac{(x_2, y_2)}{(x,y)} k \times \text{tension}} \right) \quad (5)$$

2.3 係数の取得

力隔センサを使用して, 式 (3) の弾性体の位置ごとの係数を設定する. 弾性体を固定したときや, 変形させた状態のまま計測に用いるときは, 一定の力でも歪み量が変動する. また, 弾性体の密度変化によっても歪み量が変化する. そこで, 高精度な計測結果を求める場合は, 計測前に特定位置ごとに係数を設定する必要がある. 特に $F_{(x,y)}$ 成分の計測値の刻みを細かくする場合には, 式 (1) にも弾性体の位置ごとの係数 $h_{(x,y)}$ を適応させなければならない. 次式に式 (1) に係数 h を適応させた式を示す.

$$L_1 = \frac{\sum_{(x_1, y_1)}^{(x,y)} h_{(x,y)} \times N}{|\vec{\ell}_1|}$$

$$L_2 = \frac{\sum_{(x_2, y_2)}^{(x,y)} h_{(x,y)} \times N}{|\vec{\ell}_2|} \quad (6)$$

3. 結 論

外力の大きさ, 作用点, 入射角度の情報が得られる皮膚型センサを作成するため, 弾性体の外力が作用する方向の歪み領域が狭くなり, 外力が作用する方向とは逆の歪み領域が広がる性質を利用した3軸の外力算出モデルを考案した. また, 弾性体の位置ごとに重みをつけ, 弾性体の位置による歪み量の変化に対応した.

文 献

- [1] 神山 和人, 梶本 裕之, 稲見 昌彦, 川上 直樹, 柳田 康幸, 前田 太郎, 舘 , " 触覚カメラに関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.6 (20010919) pp. 491-494, Sept.2001.
- [2] 神山 和人, 梶本 裕之, 稲見 昌彦, 川上 直樹, 舘 , " 触覚のテレインテグレーションシステムに関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.7 (20020918), pp. 443-444, Sept.2002.
- [3] 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", 社団法人日本機械学会, 日本機械学会論文集. C 編, Vol.61, No.585(19950525) pp.1949-1954, May.1995.
- [4] 大岡 昌博, " 光学式三軸触覚センサ", 社団法人日本機械学会, 日本機械学会誌, 98(924), p.928, 19951105, Nov.1995.
- [5] 大岡 昌博, " ピラミッドアレイ状光導波形触覚センサの試作", 社団法人日本機械学会, 日本機械学会論文集 (C 編), 65-636, pp.3210-3217, 1999.
- [6] 大岡 昌博, " 光学式マイクロ三軸触覚センサの試作", 社団法人日本機械学会, 日本機械学会論文集 (C 編), 66-650, pp.3344-3351, 2000.