多モード音響共鳴を用いたテンソルセル触覚センサ†

寺田 夏樹*・篠田 裕之**・安藤 繁*

Tensor Cell Tactile Sensor Utilizing Multimode Acoustic Resonance

Natsuki TERADA*, Hiroyuki SHINODA** and Shigeru ANDO*

In this paper, we propose a novel stress/strain sensing probe for tactile sensors, which observes the internal strain caused by touches through the resonance frequency shifts of a cavity. We form a spherical cavity below the touching surface and put a transmitter in it. Then we can observe strong resonance ($Q \sim 100$) at several frequencies. Since they are uniquely related with the shape, we can determine the deformation of the cavity from their frequency shifts. We formalize the relationship between the frequency shifts and the internal stress/strain. We also show an efficient manufacturing method of the sensor and several experimental results for determining contact style with a single receiver, and for obtaining direction information with triple receivers.

Key Words: tactile sensor, tensor cell, acoustic resonance, robot, inverse problems, PVDF

1. はじめに

触覚センサ¹⁾は、ロボットやマニピュレータを始め、柔軟で高度な自律システムのキーデバイスとして研究が進められている。代表的方法は、検出子を2次元的に配置した基板を柔軟カバーで覆う構造を有するもので^{2)~4)}、柔軟体の役割は、柔らかさの付与と検出子の保護が主要であった。近年、この柔軟体の役割に注目し、表面の応力や変形の下方伝達特性の活用を目指した研究^{5)~7)}や、このための設計指針を与える研究⁸⁾が進められている。しかし、2次元的配置に含まれる問題点に関しては特に注目されることはなかった。

これに対して、筆者らは、弾性体内部に応力や変形のプローブを3次元的に配置して、表面での接触情報を獲得する3次元構造触覚センサに関して、基礎的な方法論と具体的構成法を提案してきた^{10)~16)}。特にテンソルセル触覚センサと呼ぶ方法では、弾性体内の応力テンソル場の固有構造が弾性体表面での接触次元(点接触、線接触、面接触)と、接触力の位置と広がりに関係付けられることを明らかにし、このことを利用し、弾性体内の応力テンソルを直接計測することにより、接触体の種類と形態、および位置と方向に関する情報を得るための触覚センシングプローブとして、1点で応力テン

ソルの6自由度すべてを測定する、いわゆるテンソルセルの利用を提案し^{15),16)}、理論解析と基礎実験によって有効性を示した。

しかし、このテンソルセルの実現は必ずしも容易ではない。主要な問題は、テンソルセルの埋め込みが弾性体の応力場を乱さず柔軟性を損なわないことと、多自由度のセンサ信号を外部に引き出すことの困難さにある。前報告で提案したPVDFを表面に貼り付けた立方体型テンソルセル^{15),16)}では、場を乱さないためにセルサイズを小さくしたときに感度が低下する問題と、7本もの信号線のために柔軟性が損なわれ自由な配置が困難である等の問題があった。これに対し、本論文で提案しようとする空洞共鳴型テンソルセルは、弾性体表面の変形を弾性体内の空洞の音響共鳴周波数のシフトとして捉えるため、これらの問題点を大幅に解消できる。

この空洞共鳴型触覚センサは以下のような構造をもつ。まず弾性体内部に空洞を形成し、1個の送信子を配置する。送信子を通じて空洞内に音場を生成すると、複数の周波数において鋭い共鳴が発生する。これらの周波数は空洞の変形形態に応じた独自の変化を示す。したがって複数の共鳴周波数シフトから空洞の変形形態と変形量を測定し、さらに、表面変形から内部変形への伝達関係を逆にたどることによって、触覚センサ表面における接触情報を獲得することができる。

この構造の利点は以下のようにまとめられる。

- 構造が空洞と1対の送受信子のため非常に簡単。
- 高い Q 値(空気で100程度が可能)を利用した高精度計測が可能。
- 多自由度の情報を1本の信号線で伝送可能。
- 適切な共鳴モードが立つような空洞形状の設計により、様々な変形パラメータが取得可能。

† 第33回SICE学術講演会で発表(1994・7)

* 東京大学工学部 東京都文京区本郷7-3-1

** 東京農工大学工学部 小金井市中町2-24-16

* Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

** Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Koganei

(Received May 17, 1996)

(Revised November 22, 1996)

Fig. 1 A schematic diagram of a tactile sensor using tensor cell, and an acoustic resonant stress sensing element.

本研究では、最初に弾性体内の歪みテンソルの変化と共鳴周波数の変化との関係を定式化し、続いて、最も対称性が高い形状をもつ球形空洞に対して、それらの関係の具体形を導く。球形空洞の意義を述べた後、これを実際に試作して、応力テンソルのランクとその主成分の大きさ(主応力)が測定可能であることを確認する。さらに、受信子を3個に増やすことによって、主応力の方向を含めた全自由度が測定可能であることを、理論的実験的に明らかにする。

2. 理論: 空洞変形による共鳴モードの周波数シフト

2.1 空洞の共鳴モード

一般に、空洞内における音圧の時間空間分布 $p(x, y, z, t)$ は、D'Alembert の方程式

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

を満たす。空洞表面における境界条件は

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (2)$$

である。このシステムの非減衰振動解は、 $p(x, y, z, t) = p(x, y, z)e^{j\omega t}$ と置くことにより、Helmholtz 方程式

$$\Delta p = -k^2 p \quad (3)$$

と上記境界条件の連立解として与えられる。これが共鳴モードである。共鳴モードは無数に存在する。この中で周波数が同一な共鳴モードの組は縮退共鳴モードと呼ばれる。縮退共鳴モードは主に空洞の対称性によって生じる。

2.2 応力テンソルと周波数シフトの関係

一般に、一様な弾性体では応力テンソル成分 σ_{ij} から歪みテンソル成分 ϵ_{ij} への一意な関係

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad (4)$$

が存在する。Hは弾性体の柔軟性や圧縮性の大小によって決まる行列である。空洞の影響による周囲の応力場の変化を空

洞が十分に小さいとして無視し^(注1)、空洞形状は歪みに比例して変形するものと仮定する。変形が微小ならば共鳴周波数のシフトは歪みテンソルに対して線形であるから^{19), 20)}、 i 番目の共鳴モードの共鳴周波数を $\omega_i (i = 1, 2, \dots, n)$ とすると、それらのシフト量 $\Delta\omega_i$ は、

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_1 \\ \Delta\omega_2 \\ \vdots \\ \Delta\omega_n \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} = AH \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad (5)$$

のように歪みテンソルおよび応力テンソルと関係付けられることになる。Aは、空洞の形状、用いる共鳴モードなどによって定まる変換行列であり、目的に応じた適切な設計が可能である。

次に、完全対称な空洞形状を仮定して、これらの変換行列の具体形を求める。

2.3 球形空洞の共鳴モードとその周波数シフト

半径 R の理想球形空洞の共鳴モードの音圧分布は、それぞれ動径 r 、頂角 θ 、方位 ϕ 方向の量子数 l, m, n を用いて

$$p_{l,m,n}(r, \theta, \phi) = \begin{cases} j_l(\frac{\alpha_{ln}r}{R})P_l(\cos\theta) & m=0 \\ j_l(\frac{\alpha_{ln}r}{R})P_l^m(\cos\theta)\cos m\phi & m>0 \\ j_l(\frac{\alpha_{ln}r}{R})P_l^m(\cos\theta)\sin m\phi & m<0 \end{cases} \quad (6)$$

ただし

$$m = -l, -l+1, \dots, l-1, l$$

$$j_l(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2x}} J_{l+\frac{1}{2}}(x) \quad (J_l(x) \text{ は Bessel 関数})$$

$$\alpha_{ln} \text{ は } \frac{dj_l(x)}{dx}, (x>0) \text{ の } n \text{ 番目の零点}$$

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2-1)^n \quad (\text{Legendre 関数})$$

$$P_l^m(x) = (1-x^2)^{m/2} \frac{d^m P_l(x)}{dx^m} \quad (\text{Legendre 陪関数})$$

のように表される²¹⁾。 p_{lmn} に対応する共鳴周波数は

$$\omega_{lmn} = \frac{\alpha_{ln}c}{R} \quad (c: \text{音速}) \quad (7)$$

のように m によらないため、 l, n が同一なモードは $2l+1$ 重に縮退している。

この中で、我々は3重に縮退した最低周波数モード $(1, m, 1)$ に着目する。それらは、Fig.2に模式的に示すように、それぞれ三つの直交軸方向に振動する音圧分布をなす。ここで空洞に微小変形が加わると、それぞれの振動方向の距離が変化するため、共鳴周波数がシフトし縮退が解ける。

歪みの主軸に一致させて直交座標系 (x, y, z) をとり、摂動論²¹⁾にしたがって歪みテンソルの主成分(主歪み) $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$ の関数として変形前の周波数 $\omega_0 \equiv \omega_{1m1}$ からのそれぞれの周波数シフト量 $\Delta\omega_x, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$ を計算すると、

(注1) 数値シミュレーションによると、空洞の有意な影響は、その空洞を中心とする直径の3倍程度の領域までしか及ばない¹⁹⁾。

Fig. 2 Schematic diagrams of the $(1, m, 1)$ degenerated resonant mode and their separation due to inhomogeneous deformation.

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_x \\ \Delta\omega_y \\ \Delta\omega_z \end{bmatrix} = -\frac{\omega_0}{5} \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

のように求められる。主応力から主歪みへの関係

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

を用い (E :ヤング率, ν :ポアソン比), 逆行列をとって等方的成分と各方向の成分に分解することにより

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = A_1 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} + A_2 \begin{bmatrix} \Delta\omega_x/\omega_0 \\ \Delta\omega_y/\omega_0 \\ \Delta\omega_z/\omega_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ただし

$$A_1 \equiv \frac{3E(1-4\nu)}{2(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (11)$$

$$A_2 \equiv -\frac{5E}{2(1+\nu)} \quad (12)$$

$$\Delta\omega \equiv \frac{\Delta\omega_x + \Delta\omega_y + \Delta\omega_z}{3} \quad (13)$$

の関係を得る。

このことは、周波数シフトからすべての主応力が求まることを意味する。座標軸 (x, y, z) は未知だから向きは分からないが、序論で述べたように、これらだけでも、接触の次元と広がりに関する触覚情報を得るには十分である。

2.4 球形空洞と縮退共鳴モードを利用する意義

シリコンゴムなど触覚センサに用いる弾性体のほとんどは非圧縮性であるから、変形が原因で (10) 式の等方的成分 (体積に反比例) が変化することはほとんどない。一方、温度などが原因の音速変動は大きな等方的成分を生じさせる。すなわち、すべての主応力対に関する差

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} - \sigma_{yy} &= A_2 \frac{\Delta\omega_x - \Delta\omega_y}{\omega} \\ \sigma_{yy} - \sigma_{zz} &= A_2 \frac{\Delta\omega_y - \Delta\omega_z}{\omega} \\ \sigma_{zz} - \sigma_{xx} &= A_2 \frac{\Delta\omega_z - \Delta\omega_x}{\omega} \end{aligned} \quad (14)$$

および全主応力に関する和

$$\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = -\frac{3E}{1-2\nu} \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (15)$$

を分けて測ると、前者に変形情報、後者に外乱要因という分離が実現されている^(注2)。同時に、これらの周波数の差は、差が小さいほどビート波形として容易に観察可能であることに注意。これは、縮退モードの利用によって、いわゆる差動計測の構造と利点が導入可能になったことを意味する。和の成分の方はビート信号のキャリアの周波数シフトに相当する。この点は実験の項において確認するとともに、適切な信号処理法について考察を与える。

球形を用いるもう一つの意義は、方向依存性を排して主応力を測定するために最も適した形状という点にある。

3. 単一受信子型空洞の製作と基礎実験

3.1 空洞プローブの構造と形成法

製作した単一プローブ型センサを Photo. 1 に示す。

Photo. 1 Acoustic resonant tactile sensing probe.

弾性体はシリコンゴム系の液体を硬化させて形成する。このとき、弾性体内部に空洞を形成する方法には

- (1) 型を用いて上下別々に製作した後に接着する。
- (2) 型を入れて硬化させた後にカットし取り出す。
- (3) (球形空洞の場合に限るが) 気泡を入れる。

といった方法が考えられる。(1)の方法は自由度が高いが、対称性のよい加工が困難な問題がある。(2)の方法では精度よい球形の型が利用可能であるが、その固定法と接着した後の弾性体の均質性の維持にやや難がある。これに対して(3)の方法は球形という特性が最もよく利用され、加工精度も高い。このため、本論文では3の方法を採用した。ただし、空気を吹き込むと浮力が働いて固定が困難であるため、シリコンゴムと密度がほぼ等しい液体として水を注入した。十分な静止状態の後に水はほぼ完全な球形になり、弾性体材料が硬化し

(注2) 音速変動は周波数から主応力への変換係数にも影響する。

た後に水を抜くことによって球形空洞を形成する。水を抜いた後の穴は、受信子に至る音響管に用いることができる。

送信子には、圧電材料ある PVDF フィルムを 3mm 角に切り、両面の電極に極細のウレタン導線をつけて空洞内部に挿入した。受信子は空洞内部には入れず、細管で音圧を空洞外部に取り出し、マイクロフォンを使用して音圧をとる。こうして作った直径 1cm の空洞の共鳴特性を Fig. 3 に示す。図の縦線は理論によって導かれる共鳴周波数であり、実験結果によく一致する。

Fig. 3 Resonant characteristics of the spherical cavity with 1cm diameter filled with air.

3.2 送信子の駆動法と共鳴検出法

送信子を駆動する最も単純な方法は周波数スイープであるが、同時に多モードの共鳴を観測できないため測定の間分解能が上らない。周波数空間での差動構造を活かし、センサとして実時間動作可能にするために、我々はバースト波を使用する。このバースト波は、検出すべき共鳴周波数を含む帯域でフラットにパワーを集中させるとよい。すなわち、単発のバーストとして包絡線が sinc 関数の正弦波を用い、送信子の駆動と同期させて受信子の出力を観測する。このバーストの残響は同時に多モードの共鳴を含むため、それらの干渉としてビート波形が観測される。接触によって空洞の共鳴周波数が 2 つに分離している時に実際にビートが生じていることが観測された (Fig. 4)。ビート波形から周波数シフトを求めるアルゴリズムの詳細に関しては継続する論文で報告したい。

3.3 応力テンソル構造の検出実験

点接触を与えると最低周波数の共鳴モードが 2 つに分離することが確認された。センサ表面の空洞の真上から、変形を 0.5mm ずつ与えた時の共鳴モードの分離の様子を Fig. 5 に示す。与えた変形の量と周波数シフト量の間には比例関係が確認された。

点、線、面の 3 種類の接触を与えた時の共鳴モードの分離の様子を Fig. 6 に示す。線接触を与えると共鳴モードは 3 つに分離した。一方、面接触を与えると共鳴モードは 2 つにしか分かれなかった。しかし、元の共鳴周波数と分離後の低周波側の共鳴周波数を比べると点接触は低周波側にシフトしているのに対し、面接触では高周波側にシフトしているという

Fig. 4 Waveforms with and without "beat". (top: without stress, bottom: with stress)

Fig. 5 Separation of the degenerated resonant modes under a point contact.

違いがみられた。

これらの結果から 3 種類の応力テンソル構造の区別がつく

Fig. 6 Separating schemes of resonant modes for three contacting style, i.e., point-, line-, or plane-style. Each corresponds with the difference in rank of stress tensor induced by contact.

ことが分かった。

4. 複数受信子方式テンソルセルの試作と実験

ここまでの議論で受信子は単一としてきたが、音響管が共鳴モードの節(ふし)に接近すると、出力が低下する問題がある。また、共鳴モードの空間的情報が失われることから、応力テンソルの方向を推定できないという欠点も生じる。これらの問題は受信子を複数にすることで解決できる。

4.1 共鳴の空間構造

空洞中心を原点とする空間座標系をとる。歪みテンソルの主軸の単位ベクトルを $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$, 対応する主歪みを $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ とする。そのときの周波数シフトと、それに対応するモードの空洞表面 (x, y, z) での音圧分布は、 $\vec{r} = (x, y, z)^t$ としてTable 1のようにまとめられる。(付録参照)

Table 1 Sound pressure distribution of the three orthogonal $(1, 1, 1), (1, -1, 1)$, and $(1, 0, 1)$ modes with relating to the shift rates of resonant frequencies.

mode	frequency shift rate	pressure distribution
p_1	$-(3\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3)/5$	$\vec{e}_1 \cdot \vec{r}$
p_2	$-(\epsilon_1 + 3\epsilon_2 + \epsilon_3)/5$	$\vec{e}_2 \cdot \vec{r}$
p_3	$-(\epsilon_1 + \epsilon_2 + 3\epsilon_3)/5$	$\vec{e}_3 \cdot \vec{r}$

3つのモードの周波数が異なれば、各モードの音圧変動を測定できる。したがって、3点で各モードの音圧を測定すれば、その振幅の比から歪みテンソルの主軸を決定できる。これは応力テンソルの主軸と一致する。

なお、3つのモードのうち2つのモードの周波数が一致することが、点接触などの場合に生じる。このとき、同時に最大主応力となるのは1つだけの主応力であると仮定すると、高周波側のモードが最大主応力、低周波側のモードが残りの2つの主応力と対応することになり、高周波側のモードに対応する方向ベクトルから接触の重心を推定できる。また、2つの主応力が最大主応力になっているとみなせる場合には、低周波側のモードが他の1つの応力に対応すると判断できるため、このモードに対応する方向ベクトルから、残りの2つ

のベクトルが張る平面を推定できる。

一方、3つとも周波数が一致する場合は全く推定ができないということになるが、この場合には3つの応力テンソルの主値が一致しており、したがって等方的な応力が働いているとみなせるので、そもそも方向ベクトルを推定する意味はない。

単純に3点での振幅の比をとる場合は、各成分に正負の任意性が生じるから、結局4点の任意性が生じる。この影響を最小にするためには、センシングエリアと受信子の位置の関係をFig. 7のようにして、センシングエリアを向く方向ベクトルの各成分の符号を、なるべく同符号になるようにすればよい。

Fig. 7 Top: optimum location of the receivers by which the direction vector of a point contact can be measured most widely. Bottom: effective area where the direction vector can be determined. (d :depth of the cell)

各モードの位相も考慮すれば、振幅に負の値を導入することが出来、自由に3点を設定できる。

4.2 接触方位の検出実験

実際にFig. 7に従って、3つの受信子を直交する3軸に沿って配置したセンサを製作した(Photo. 2)。次いで提示した式にしたがって、点接触時のその点と空洞中心を結ぶ方向ベクトルを推定してみた。その結果をFig. 8に示す。実際の空洞の位置 $(x=y=0.0, z=23.0)$ とは若干異なるが、特定の1点を指している。このことから、受信子を3個に増やすことによって、応力テンソルの方向が推定できることが確かめられた。

5. 結 論

本論文では、触覚センサ表面の変形を、内部に埋め込まれた空洞の音響共鳴周波数のシフトとしてとらえる空洞共鳴型触覚センサを提案した。すなわち、最初に、弾性体に対する

Photo. 2 A photograph of the acoustic resonant tensor cell with three orthogonally arranged receivers.

Fig. 8 Result of the contact direction estimation using the tensor cell with three receivers. Orientations of principal compressive stress are indicated by arrows at the corresponding contact points. They roughly are orientating the tensor cell.

接触によってどのような共鳴周波数の変化が得られるかを理論的に示し、次に、このセンサの一つの効率的な製作法を提案し、実際にそれによって試作されたセンサを用いて、接触に

よって弾性体内に生じる三つの主応力が同時に測定可能であることを示した。さらに、複数の受信子を用いることにより、それら主応力の向きも検出できることを理論的かつ実験的に示した。

参考文献

- 1) 木下 源一郎: 人工触覚による対象物形状の特徴抽出, 計測自動制御学会論文集, **14**, 1, 90/96 (1978)
- 2) H.R.Nicholls and M. H. Lee: A Survey of Robot Tactile Sensing Technology, *Int. J. Robotics Res.*, **8**, 3, 3/30 (1989)
- 3) P.P.L.Regtien: Tactile Imaging, *Sensors and Actuators A*, **31**, 83/89 (1992)
- 4) R. D. Howe: Tactile Sensing and Control of Robotic Manipulation, *J. Advanced Robotics*, **8**, 3, 245/261 (1994)
- 5) R. S. Fearing: Tactile Sensing Mechanisms, *Int. J. Robotics Res.*, **9**, 3, 3/23 (1990)
- 6) R. S. Fearing: Using a Cylindrical Tactile Sensor for Determining Curvature, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, **7**, 6, 806/817 (1991)
- 7) R. E. Ellis and M. Qin: Singular-Value and Finite-Element Analysis of Tactile Shape Recognition, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2529/2535 (1994)
- 8) 下条 誠: 触覚センサにおける弾性体カバーの空間周波数フィルタリング効果, 日本機械学会論文集 **C**, **59**, 567, 224/229 (1993)
- 9) H.Shinoda and S.Ando: A Tactile Sensor with 3-Dimensional Structure, *Proc. 10th Sensor Symposium*, Tokyo, 187/190 (1991)
- 10) H.Shinoda and S.Ando: A Tactile Sensing Algorithm based on Elastic Transfer Function of Surface Deformation, *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **3**, 589/592 (1992)
- 11) H.Shinoda, M.Uehara and S.Ando: A Tactile Sensor Using Three Dimensional Structure, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, **1**, 435/441 (1993)
- 12) H.Shinoda and S.Ando: Ultrasonic Emission Tactile Sensor for Contact Localization and Characterization, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, **3**, 2536/2543 (1994)
- 13) 成瀬, 玉山, 篠田, 安藤: 超音波検出型 3次元構造触覚センサ, 第33回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 123/124 (1994)
- 14) S.Ando and H.Shinoda: Ultrasonic Emission Tactile Sensing, *Proc. IEEE Control Systems Magazine*, **15**, 1, 61/69 (1995)
- 15) N. Morimoto, H. Shinoda, and S. Ando: Tensor Cell: A Complete Stress Sensing Element for Tactile Sensor, *Proc. 12th Sensor Symposium*, Osaka, 179/182 (1994)
- 16) H.Shinoda, N.Morimoto and S.Ando: Tactile Sensing Using Tensor Cell, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 825/830 (1995)
- 17) 篠田 裕之: 三次元構造触覚センシングに関する研究, 計数工学科博士論文 (1994)
- 18) 寺田 夏樹: 多モード音響共鳴を用いる触覚センシング, 計数工学科修士論文 (1995)
- 19) N.Terada, Y. Kumano, H. Honma, H. Shinoda and S. Ando: "Acoustic Resonant Tactile Sensing," *Proc. 13th Sensor Symposium*, Tokyo, 221/224 (1995)
- 20) 寺田, 熊野, 本間, 篠田, 安藤: 空洞の共鳴を用いる触覚センシング, 第35回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 615/616 (1995)
- 21) Leonard I. Schiff (井上訳), "新版量子力学", 吉岡書店 (1972)

《付 録》

A. 摂動論による共鳴モードのシフトと音圧分布の求め方(概略)

空洞表面が $R = Rf(\theta, \phi)$ に変形したとき,

$$r' = rf(\theta, \phi), \quad \theta' = \theta, \quad \phi' = \phi \quad (\text{A.1})$$

と変数変換し, (3) 式の Δ の変化分は

$$\begin{aligned} H' = & (f^2 - 1)\Delta + \left(\frac{f_\phi^2}{\sin^2 \theta} + f_\theta^2 \right) \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \\ & \frac{f}{r} \left(\frac{f_\theta}{\tan \theta} + \frac{f_{\phi\phi}}{\sin^2 \theta} + f_{\theta\theta} \right) \frac{\partial}{\partial r} + \\ & \frac{2f}{r} \left(\frac{f_\phi}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \phi} + f_\theta \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

となる. ところが, 空洞の歪みテンソルの主軸を

$$\vec{e}_i = (x_i, y_i, z_i), \quad \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j = \delta_{ij} \quad (0 \leq i, j \leq 3) \quad (\text{A.3})$$

とし, 対応する主歪みを $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 \ll 1$) とすると,

$$\begin{aligned} \frac{r'}{r} \approx & 1 + (\epsilon_1 x_1^2 + \epsilon_2 x_2^2 + \epsilon_3 x_3^2) x^2 \\ & + (\epsilon_1 y_1^2 + \epsilon_2 y_2^2 + \epsilon_3 y_3^2) y^2 \\ & + (\epsilon_1 z_1^2 + \epsilon_2 z_2^2 + \epsilon_3 z_3^2) z^2 \\ & + 2(\epsilon_1 x_1 y_1 + \epsilon_2 x_2 y_2 + \epsilon_3 x_3 y_3) xy \\ & + 2(\epsilon_1 y_1 z_1 + \epsilon_2 y_2 z_2 + \epsilon_3 y_3 z_3) yz \\ & + 2(\epsilon_1 x_1 z_1 + \epsilon_2 x_2 z_2 + \epsilon_3 x_3 z_3) zx \end{aligned}$$

を得るので, これを $f(\theta, \phi)$ に代入する.

一般に, 一つの周波数に縮退した共鳴モード ψ_i に関して $(\psi_i, H' \psi_j)$ を要素とする行列 A を作ると, 歪みによる k^2 の変化率は A の固有値に一致する. すなわち, A の固有値を λ_i とすると, 周波数のシフト率は $-\lambda_i/2$ となり, 対応するモードは

$$(A - \lambda_i I_n) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = 0 \quad (I_n: n \text{ 次単位行列}) \quad (\text{A.4})$$

の解 u_i に対して $\sum_i u_i \psi_i$ で表わされる. なお, $(1, m, 1)$ モードの場合には $n = 3$ となる.

[著 者 紹 介]

寺 田 夏 樹 (学生会員)

1994 年東京大学工学部計数工学科卒業, 1996 年同大学院工学系研究科計数工学専門課程修了, 同年に鉄道総合研究所に入所, 現在に至る. 鉄道における新しい計測制御技術の研究を目指している.

篠 田 裕 之 (正会員)

1988 年東京大学工学部物理工学科卒業, 1990 年同大学院工学系研究科計数工学専門課程修士修了, 工学修士. 1990 年より同大学助手, 1995 年, 博士(工学), 同年より東京農工大学講師, 現在に至る. 音響を用いる非接触触覚計測, 三次元構造を有する触覚センサ, 光・音響計測などの研究と教育に従事. 平成 4 年, 平成 5 年(友田賞)計測自動制御学会論文賞, 平成 6 年佐藤記念知能ロボット研究奨励賞受賞. 物理系に埋め込まれた情報処理機構の解明とその工学的応用を目指している.

安 藤 繁 (正会員)

1974 年東京大学工学部計数工学科卒業, 1976 年同大学院修士, 1979 年同博士課程修了, 工学博士. 1979 年より同大学助手, 1980 年より同講師, 1984 年より電気通信大学助教授, 1987 年より東京大学工学部助教授, 1996 年より同教授, 現在に至る. 画像処理, 信号処理, 光および音響計測, 計測基礎論, 電子回路などの研究と教育に従事. センサとセンシングの知能化, 人間の感覚・知覚機能の工学的実現を目指している. 昭和 53 年, 62 年, 平成 5 年(友田賞)計測自動制御学会論文賞受賞. 著書に画像処理論(昭晃堂), 電子回路(培風館)等. 日本音響学会, 日本光学会, 情報処理学会, 電気学会, IEEE, OSA などの会員.