

## 触覚センサーの製作と柔軟物の測定

### Manufacture of a tactile sensor, and measurement of the flexible thing

藤本 和城 \*\*, 松田 光央\*, 尾股 定夫\*\*, 坂野 進\*\*

Kazushiro Fujimoto\*\*, Mitsuo Matsuda\*, Sadao Omata\*\*, Susumu Sakano\*\*

\* 日本大学大学院工学研究科, \*\* 日本大学工学部

\*,\*\* Nihon University, College of Engineering

キーワード: 最大エントロピー法(Maximum Entropy Method), MT 法(Mahalanobis Taguchi Method)  
ユークリッドの距離(Euclid distance), EED 法(Evaluation by Euclid Distance)  
直交表(Orthogonal array)

連絡先: 〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原1番地

日本大学 工学部 機械工学科 メカトロニクス研究室

坂野 進, Tel:(024)956-8774, Fax.(024)956-8860, E-mail:[sakano@mech.ce.nihon-u.ac.jp](mailto:sakano@mech.ce.nihon-u.ac.jp)

#### 1. 緒言

医師は触診により病状を診断することが多く, 肝硬変, 腹膜炎, 乳がんなど, いろいろな病状の診断に触診が用いられている. また, 癌などの開腹手術においては医師が直接, 臓器に触れることによって治療を行っている.

このように触診から得られる情報は患者の患部の位置や状況を見極める上で非常に重要なものとなっている. また内視鏡と電気メスを主体とした低侵襲外科手術が急速に広まり, それを支援するいろいろな機器が開発されている<sup>1,2)</sup>. 患者の体への手術の負担の軽減や入院期間の短縮など低侵襲外科手術はいろいろなメリットを有している. 従来の外科手術においては, 外科医の手と目により手術が行われ, 特に, 繊細な感覚を有する手先の器用さが外科医の特徴であった. 外科手術の優劣は外科医の経験と器用さに大きく依存していたために外科手術の機械化や自動化はなかなか難しい医療分野であった. しかし, X線CT, MRI, 超音波画像装置など医療システム・機

器の急速な進展により, 外科医の目および手の代わりとなるものが出現している<sup>3,4)</sup>. また, ロボットを外科手術に適用する手術支援や手術の自動化が想定され, ロボットを外科手術支援に用いる研究や遠隔地でのロボットを用いた手術の遠隔自動化などの研究が行われている<sup>5)</sup>. 上述のような触診における診断の正確さは医師の臨床経験によるところが大きく, 若年の医師を始めとして臨床経験の浅い医師が正確な診断を可能とすることは難しく誤診が多い. 乳がんにおいては, 視触診が廃止になるという事例もある. そのため人が触覚により得られる診断情報に違いがあることから, 診断情報を定量的に得られる触覚センサーを用いた情報収集が必要不可欠といえる. また, ロボットを用いた手術の自動化における問題点の一つは発表されている手術用ロボットが内臓などの生体組織識別用のセンシングシステムを有しないことである. 今日まで, 人の五感の中で, 味覚, 聴覚, 視覚, 臭覚に代わるセンサーの研究・開発は盛んに行われてきた. 特に, 視覚, 聴覚に関するセ

ンサーの開発は活発である。しかし、触覚センサーを用いたセンシングシステムに関する研究は少ない。ロボットの手先の触覚センサーによりロボットに卵や豆腐を把持させる研究があるが、触覚センサーを具体的に適用した研究はほとんど見当たらない。本研究では、圧電素子を基本とした触覚センサーおよびセンシングシステムを製作し、生体組織の識別、主に人体表面や内臓内の腫瘍の識別を目的として実験を行った。腫瘍モデルとして柔軟物に異物を埋め込んだ計測物を製作し、それに触覚センサーを押し込むことで得られる時系列データを解析の基とした。得られた時系列データをMEM(Maximum Entropy Method)により周波数スペクトル化する。さらに、EED(Evaluation by Euclid Distance)法<sup>6)</sup>を用いて解析することにより、物体の硬さ・軟らかさを識別し、柔軟物とその内部にある異物の識別を試みた。

## 2. センサーおよびセンシングシステム

### 2.1 センシングシステム

ジルコンチタン酸鉛(PZT)の圧電素子を用いた触覚センサーを製作した。図1にセンサーの構成と圧力のセンシングの方法を示す。センサーは、一枚の板状のPZT先端にナイロン製の半球を取り付けたものである。このPZTはナイロン球を共振させるために使用される。もう一枚の板状のPZTをその外側に設け、振動の検出に使用した。共振状態にあったナイロン球が何かの計測物に接触すると共振振動数は変化する。計測物の音響負荷の違いにより共振振動数が変化することを利用した。計測物表面を触覚センサーで押し込んだ時に得られる共振振動数の変化を時系列データとして用いた。

### 2.2 測定の原理<sup>7)</sup>

非接触状態にあった触覚センサーが計測物に接触した際、センサーの共振振動数は変化する。触覚センサーを図2に示すように有限長の棒でモデル化する。センサーの共振振動数は測定対象物の音響負荷(密度や伝播速度)により変化する。図2はシリコンの表面を押し込んだ様子を示し、共振状態にあるナイロン球

の先端を未知の音響インピーダンスを有する物体に接触させた場合に棒の長さX方向に平

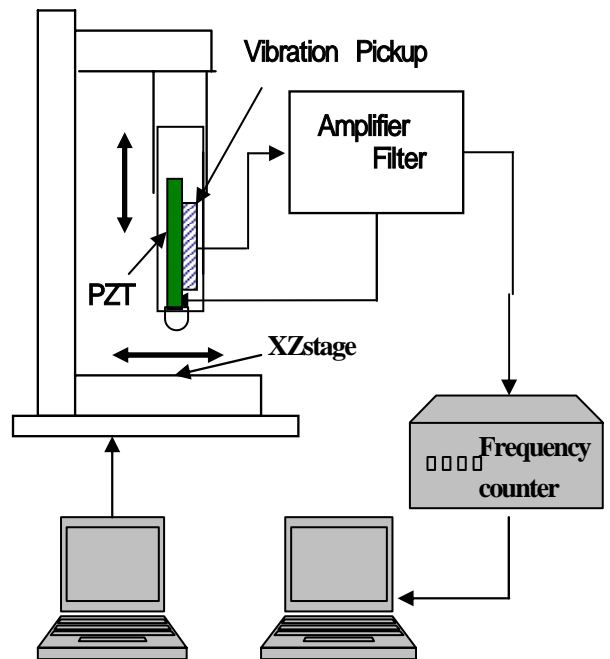


図1 実験設備および触覚センサーの測定回路

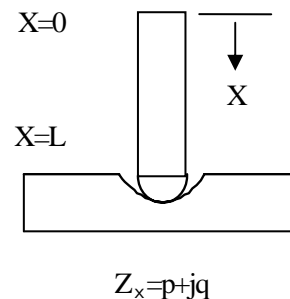


図2 先端が物体表面に接触した際の模式図

面波が伝播する。波動方程式は次式となる。

$$\frac{d^2 \Phi}{dt^2} = C_r^2 \frac{d^2 \Phi}{dx^2} \quad (1)$$

ここに、 $\Phi$  : 速度ポテンシャル  
 $C_r$  : 棒の音速

式(1)より、変数分離法および境界条件の導入により共振振動数は式(2)のように求められる。また、センサーが計測物に接触し

ていない状態での共振振動数は式(3)となる。式(2)および式(3)からセンサーの物体の接触の有無による共振振動数の変化は式(4)と求められる。計測物の表面を押し込むことにより得られる共振振動数の時間変化が計測物の硬軟の時系列データとなる。収集した時系列データにMEM解析を施すことにより計測物に特有の周波数スペクトルが得られる。

$$f_x = \frac{nC_r}{2L} \left( 1 - \frac{q_x}{n \rho_r C_r} \right) \quad (2)$$

ここに、  
 $n$  : 次数、 $\rho_r$  : 棒の密度  
 である。

$$f_0 = \frac{nC_r}{2L} \quad (3)$$

$$\Delta f = - \frac{C_r q_x}{2\pi L Z_r} \quad (4)$$

ここに、 $Z_r$  : 棒の音響インピーダンス  
 $L$  : 棒の長さ

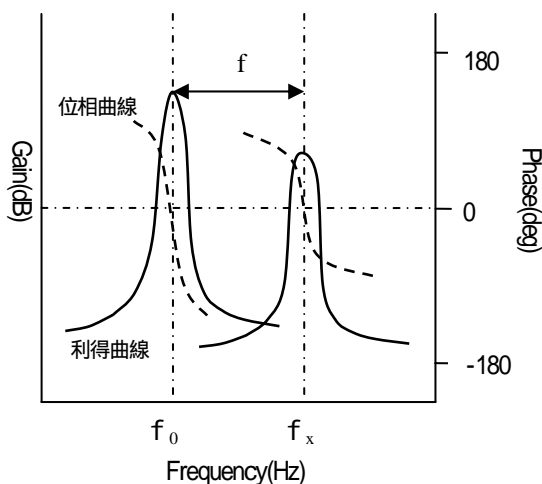


図3 共振周波数の変化

### 3. EED (Evaluation by Euclid Distance) 法

#### 3.1 ユークリッドの基準空間

マハラノビスの距離を基としたMT法 (Mahalanobis-Taguchi Method) は均質なデータ群 (基準データ) で基準空間を構成し、その空間における基準 (原点) と未知の比較データのマハラノビスの距離の大小により未知のデータが基準データ群に属するか、別のデータ群に属するものなのかを識別する。多次元情報処理手法の一つの手法である。これまでに医療、製造、検査などいろいろな分野に適用され、その有効性が確認されてきた<sup>8,9)</sup>。しかし、識別精度を高めるために大量の基準データを必要としている。また、基準データ間の相関が高いと解析が困難となる問題を有している。本研究では、基準データが少量でも直交表を用いた仮想データ生成により、多量のデータを発生させることで実験データの精度向上につながり、上記の問題を解決する。基準データと未知のデータ間に何らかの相関のある場合には、基準空間における距離はマハラノビスの距離となるが、直交表を用いて発生したデータ間には相関はなく、距離はユークリッドの距離となる。EED法によるデータの識別の概念を図4に示す。

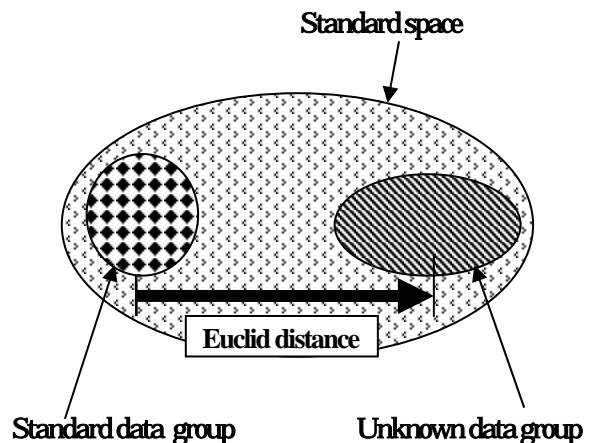


図4 EED法

### 3.2 ユークリッドの距離

ユークリッドの距離の算出法を以下に示す。はじめに基準空間を決める。その計測特性を  $X_1, X_2, \dots, X_k$  とし、基準空間中の  $n$  個の対象に対して各々  $k$  個の測定項目のデータを集め、それを基準空間データとする。  $X_1, X_2, \dots, X_k$  の平均  $m_1, m_2, \dots, m_k$  と標準偏差  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k$  を求め、次式から基準空間のデータを基準化する。

$$x_{ij} = \frac{X_{ij} - m_i}{\sigma_i} \quad (5)$$

(i=1,2,...,k, j=1,2,...,n)

次に基準化されたデータの相関行列  $R$  を求める。

$$r_{ij} = \frac{1}{n} (x_{i1}x_{j1} + x_{i2}x_{j2} + \dots + x_{in}x_{jn}) \quad (6)$$

(i,j=1,2,...,k)

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

次に、相関行列  $R$  の逆行列  $A$  を求める。

$$A = R^{-1} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & a_{kk} \end{pmatrix} \quad (8)$$

以上より、マハラノビスの距離  $D^2$  が求められる。

$$D^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

上式はデータ間に相関のある場合における距離であるが、本研究においては、直交表を用

いてデータ間に相関のない仮想データを生成し、それを使用する。この場合には、距離はマハラノビスの距離からユークリッドの距離に変わる。ユークリッドの距離は次式となる。

$$D^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k a_i x_i^2 \quad (10)$$

## 4. 計測物硬軟識別実験

### 4.1 センサーの特性実験

製作した触覚センサーの特性を調べるため柔軟物としてシリコン濃度 40% ~ 100% 計 7 種類のシリコンを準備し、シリコンに触覚センサーを押し込み、周波数変化で計測物の硬軟識別ができるか実験を行った。識別実験手順は以下のとおりである。

- (1) 触覚センサーを  $z$  軸方向に 0.05 mm/s の速度で計測物の表面上から 0.3 mm 押し込み、時系列データを収集する。
- (2) 収集した時系列データを MEM (最大エントロピー法) により周波数スペクトル化する。
- (3) 周波数を 255 等分し、対応する周波数に対するデータの平均パワーを求め、次式で示される 2 水準のデータを直交表に割り付ける。式の中で、+ を第 1 水準のデータに、- を第 2 水準のデータとした。これは平均値から  $\pm 5\%$  で仮想データを生成することを示している。

データ =

$$\text{平均パワー値} \times (1 \pm 0.05) \quad (11)$$

なお、直交表は  $L_{256} (2^{255})$  を作成し、用いた。

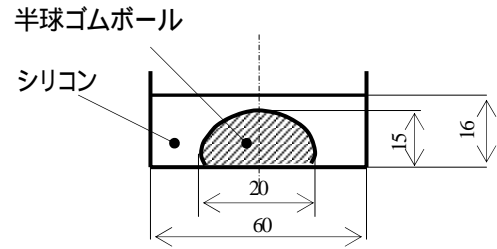
- (4) 直交表から得られる仮想データ群を用いて、ユークリッドの基準空間を作成する。この空間においては基準となるシリコンに対する距離 (ユークリッドの距離) は 1.0 周辺に分布する。

- (5) 他の濃度が違うシリコンに対して上記と同様にして時系列データを収集する。これらのデータに対して周波数スペクトル化し、式(10)によりユークリッドの距離を求める。
- (6) ユークリッドの距離の大小によりシリコンの硬軟、および濃度の識別を行う。

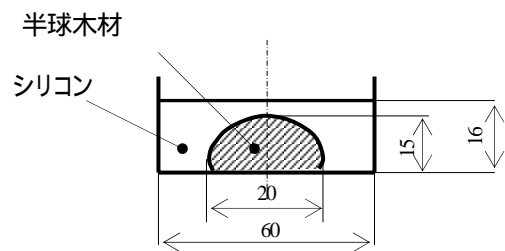
#### 4.2 柔軟物に異物を入れての識別実験

シリコン（濃度40%）内に異物を埋め込み、シリコン内における異物の硬軟の識別が可能か実験を行った。異物には、ゴムボール、木材、プラスチックの3種類を使用した。用いた計測物を図5に示す。識別実験手順は以下のとおりである。

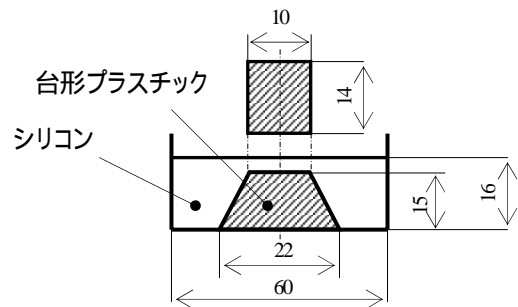
- (1) 触覚センサーをz軸方向に0.05mm/sの速度で計測物の表面上から0.3mm押し込み、時系列データを収集する。また、それをx軸方向に1mm間隔で30mmにわたり計測していく。
- (2) 収集した時系列データをMEM（最大エントロピー法）により周波数スペクトル化する。
- (3) 周波数を255等分し、対応する周波数に対するデータの平均パワーを求め、前述の式(11)で示される2水準のデータを直交表に割り付ける。式の中で、+を第1水準のデータに、-を第2水準のデータとした。これは平均値から±5%で仮想データを生成することを示している。なお、直交表は $L_{256}(2^{255})$ を作成し、用いた。
- (4) 直交表から得られる仮想データ群を用いて、ユークリッドの基準空間を作成する。前述のように、この空間においては基準となるシリコンに対する距離（ユークリッドの距離）は1.0周辺に分布する。
- (5) 他の計測物に対して上記と同様にして時系列データを収集する。これらのデータに対して周波数スペクトル化し、式(10)によりユークリッドの距離を求める。
- (6) ユークリッドの距離の大小によりシリコンと異物の硬軟の識別を行う。



(a)半球ゴムボール



(b)半球木材混合



(c)台形プラスチック

図5 様々な測定物

## 5 実験結果

例としてシリコン濃度70%の実験結果、時間-周波数変化のグラフを図6に示す。また時系列データにMEMを施し、周波数スペクトル化したものを図7に示す。0~50Hzまでを255等分し、対応するパワー値を用いた。以下に、シリコンの濃度による硬軟の識別および柔軟物と異物の識別実験結果を示す。

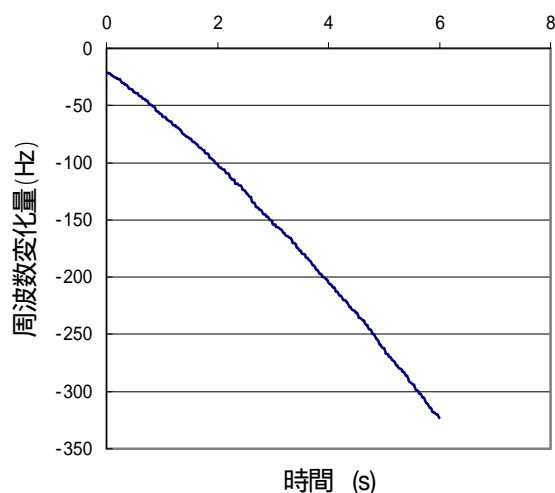


図.6 シリコン濃度70%の時間と周波数変化量の関係

図9に示すように濃度の違う柔軟物はユークリッドの距離は離れており，識別が可能である．

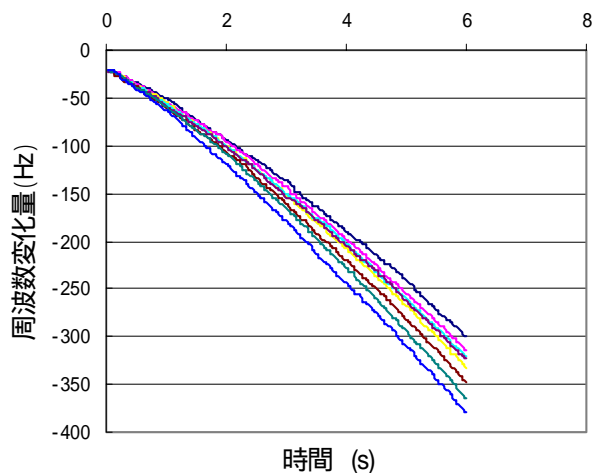


図.8 シリコン濃度40%～100%の周波数変化量比較

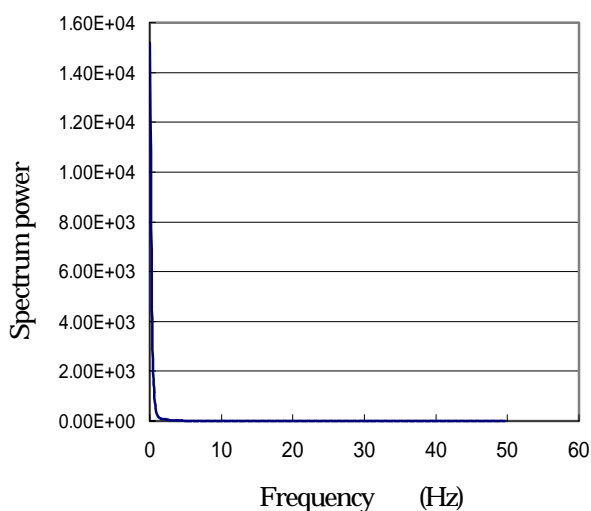


図.7 シリコン濃度70%のMEM解析結果

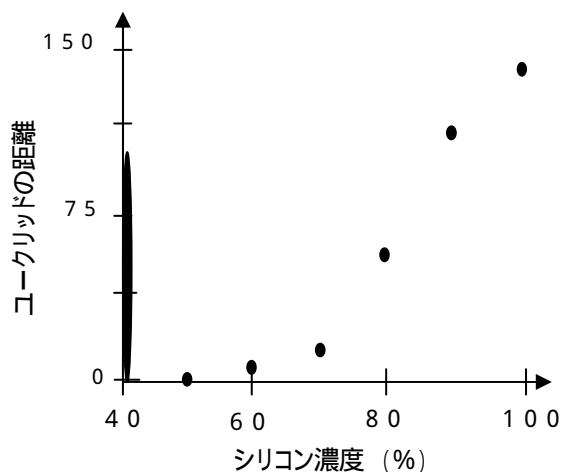


図.9 シリコン濃度による硬軟の識別(濃度40%を基準)

## 5.1 シリコンの濃度による硬軟の識別

シリコン濃度40%～100%の計7種類の時間 - 周波数変化を図8に示す．またシリコン濃度40%を基準データとしたEED識別結果を図9に示す．またユークリッドの距離が濃度40%，50%，60%，70%，80%，90%，100%の順になっている．40%は軟らかく，100%に近づくユークリッドの距離が大きくなっているのが硬いことがわかる．

## 5.2 柔軟物に埋め込まれた異物の識別

### 5.2.1 半球状ゴムボール混入の場合

シリコンに半球状ゴムボールを埋め込んだ時のEED識別結果を図10に示す．0mmの点のデータを基準空間として識別した．異物中心に行くにしたがってユークリッドの距離が大きくなり，シリコン内の異物の硬軟識別ができた．

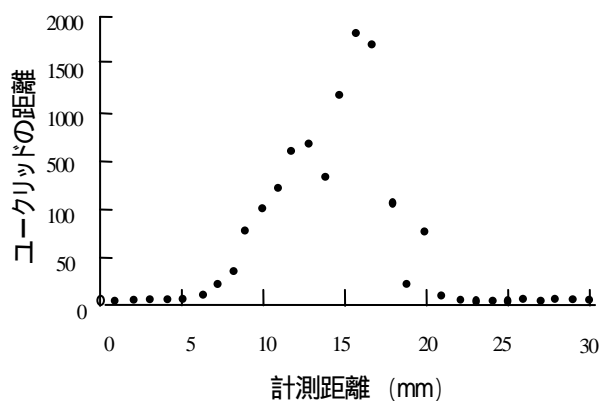


図.10 半球ゴムボール混合シリコン硬軟の識別(0mmのデータを基準空間とした)

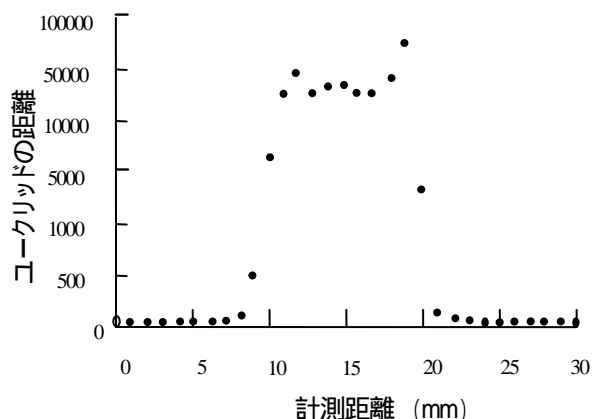


図.12 台形プラスチック混合シリコン硬軟の識別(0mmのデータを基準空間とした)

### 5.2.2 半球状木材混入の場合

シリコンに半球状木材を埋め込んだ時のEED識別結果を図11に示す。0mmの点のデータを基準空間として識別した。ゴムボール混入時と同様にユークリッドの距離による異物の硬軟識別ができた。

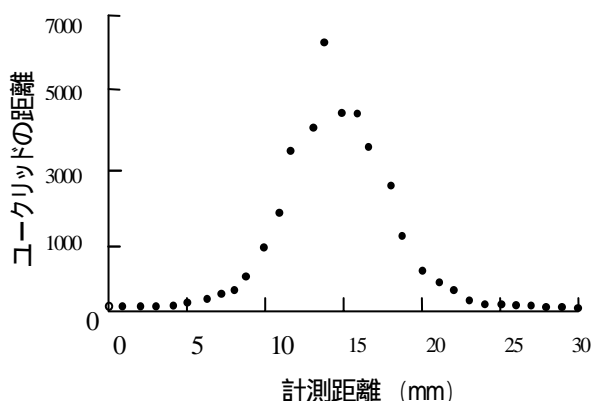


図.11 半球木材混合シリコン硬軟の識別(0mmのデータを基準空間とした)

### 5.2.3 プラスチック混入の場合

シリコンに台形型プラスチックを埋め込んだ時のEED識別結果を図12に示す。0mmの点のデータを基準空間として識別した。この場合においてもゴムボール混入時と同様にユークリッドの距離による異物の硬軟識別ができた。また、ユークリッドの距離がシリコン内部の異物の形状を示す結果となり、このセンシングシステムによる計測物内部形状把握の可能性が見出された。

以上の実験結果に示したように触覚センサーの構成とEED法により柔軟物と異物の識別が可能である。

## 6. 結 言

本研究では、PZT圧電素子を組み込んだ触覚センサーを用いて計測物表面を押し込むことにより得られる時系列データの変化を測定した。時系列データにMEM解析を施すことにより得られる周波数スペクトル値を特徴量として、EED法を用いることにより、計測物表面、及び内部混入物の硬軟識別が可能であることを示した。本研究における結論は以下のとおりである。

- (1) 濃度が異なるシリコンの硬軟識別ができ、計測物表面上における硬軟識別が可能となった。
- (2) 計測物内部混入物の硬軟識別が可能となった。
- (3) ユークリッドの距離の大小がシリコン内部の形状を示す結果となり、このセンシングシステムによる計測物内部形状把握の可能性が見出された。
- (4) 圧電素子を用いた触覚センサーを用いることにより、医師の触診に代わるセンサーへの応用の可能性が示された。
- (5) 直交表を用いた仮想データの生成法により、少ないデータからでも多量の仮想データを発生させる方法を示し、その有効性を確認した。

## 7. 今後の課題

### ( ) 生体組織 (豚, 鶏) を用いた実験

将来, 臨床に応用することを目的にしているため, 今後, 豚や鶏の生体を用いた実験を行いたいと考えている.

### ( ) センサーの精度, 計測法の改良

本研究においてはセンサーを押し込むことで, 共振周波数の変化から時系列データを得ていた. 実験結果図 10, 図 11, 図 12 からわかるようにユークリッドの距離にばらつきが出たため, センサーの回路の改良, およびセンサーの先端の改良, また( )に述べたように生体組織にも使用できるようにセンサーの防水加工を行っていきたい. また, 実験時の湿度や温度などを考慮していないため測定時の環境条件を一定にしていく必要がある.

## 参 考 文 献

- 1) 橋本大定: 内視鏡下手術における三次元視, 第2回コンピュータ外科研究会論文集, pp. 458 - 459, (1990)
- 2) 正宗賢ほか: 内視鏡下手術におけるLaparo-Navigatorの開発, 第3回コンピュータ外科研究会論文集, pp. 69 - 70, (1994)
- 3) 鎮西清行: オープンMRIとロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 37 - 40, (2000)
- 4) 土肥健純: コンピュータ外科におけるロボット技術, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 636 - 639, (1996)
- 5) 生田幸士: 医療ロボティクスへの道, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 1, pp. 49 - 52, (2000)

- 6) Y. Omori, H. Takagi, T. Arita and S. Sakano, Electrical measurement of writing pressure and application to certification, 12<sup>th</sup> IMEKO TC4 International Symposium, pp. 478 - 482, (2002)
- 7) S. Omata, S. Kiyono, S. Mori, T. Ito, Development of] the new digital sign pen using tactile sensor for handwritten recognition, Technical Digest of the 18<sup>th</sup> Sensor Symposium, (2001)
- 8) 坂野進, MTS法を用いた紙幣の識別, 品質工学, Vol. 8, No. 3, pp. 58 - 64, (2000)
- 9) 松田里香, ほか, MTS法の将来宇宙機用ソフトウェアへの適用, 品質工学, Vol. 10, No. 1, pp. 37 - 41, (2002)