

生体組織識別のための基礎研究

(触覚センサーを用いた食肉の識別)

A Basic Research for Discrimination of Living Body Tissues (Discrimination of Meats using Tactile Sensor)

- 松田 光央*, 有田 貴博*, 坂野 進**
- Mitsuo Matsuda*, Takahiro Arita*, 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

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、乳がんなどのいろいろの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。最近、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の機器が開発されている^{1,2)}。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の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

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^{3,4)}。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⁵⁾。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ために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考えられる。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。ロボットの手の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、生体組織の識別を目的として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構成した。触覚センサーにより生体組織上をなぞることにより得られる生体組織の硬さ・軟らかさによ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⁶⁾を用いて解析することにより生体組織の識別を試みる。本研究では、生体組織として各種の食肉を用いた。食肉の種類と肉の部位の識別を試みた。

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) の圧電素子を市販のボールペン軸に組み込むことにより触覚センサーを構成した。圧電素子を用いた予備実験で、一定の上下位置で食肉の表面をなぞるためには人が筆記する要領で行えばよく、また、文字「2」を描くようにして食肉の表面をなぞれば繰り返しの誤差の少ない圧力を得られることが解った。そこで、触覚センサーの構成にはボールペンを用いた⁷⁾。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。一個の円筒状のPZTがボールペン軸に固定され、ボールペン軸を共振するために使われる。もう一個の円筒状のPZTがその外側に設けられ、振動の検出に使われる。共振状態にあったボールペン軸が何かの測定対象物に接触すると共振振動数は変化する。測定対象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する。生体組織の表面を触覚センサーでなぞった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る。

2.2 測定の原理⁸⁾

非接触状態にあった触覚センサーが生体組織に接触した時に生体組織の硬軟によりセンサー

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。棒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。図はボールペン先で生体組織の表面をなぞった様子を示

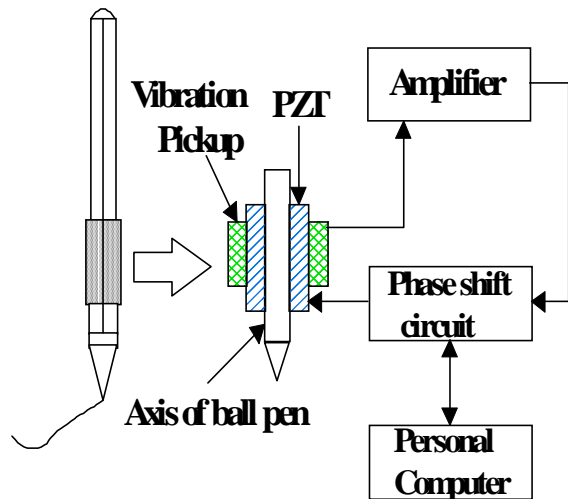


Fig. 1 Structure of ball-point pen and measuring circuit

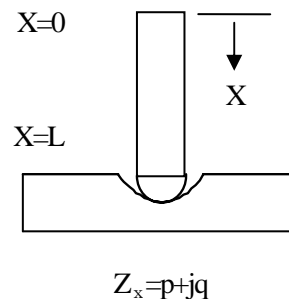


Fig. 2 Contact model of ball-point pen

し、共振状態にある棒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方向に平面波が伝播する。波動方程式は次式となる。

$$\frac{d^2 \Phi}{d t^2} = C_r^2 \frac{d^2 \Phi}{d x^2} \quad (1)$$

ここに、 Φ : 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、棒が物体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)から棒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。生体組織の表面をなぞることにより得られる共振振動数の時間変化が生体組織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生体組織に特有の周波数スペクトルが得られる。

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

ここに、

n : 次数, ρ_r : 棒の密度
である。

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

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

ここに、 Z_r : 棒の音響インピーダンス
 L : 棒の長さ

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、検査などいろいろの分野に適用され、その有効性が確認されてきた^{9,10)}。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の発生によ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3に示す。

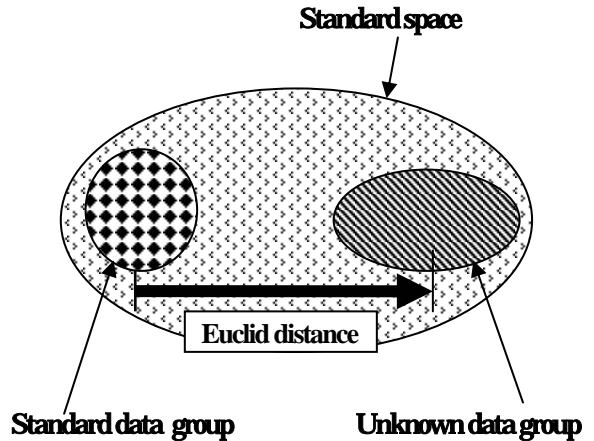


Fig3 Concept of Standard space and Euclid distance

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。

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

($i=1, 2, \dots, k, j=1, 2, \dots, n$)

次に基準化されたデータの相関行列 R を求める。

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

($i, j=1, 2, \dots, k$)

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

次に、相関行列Rの逆行列Aを求める。

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

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。

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

この式を用いると、 $x_i \geq 0$ に拘わらず同じ値を取ることでとなる。 x_i の正負を区別することにより、ユークリッドの距離は正負の値を取ることが可能となる。例えば、ある硬さの物体の特性値を用いて基準空間を構成した場合に、その物体よりも軟らかい物体のユークリッドの距離は負の距離となり、硬い物体の距離は正の距離となる。 x_i の正負を区別したユークリッドの距離は次式となる。

$$D^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\text{sign}] a_i x_i^2 \quad (11)$$

ここに、 $[\text{sign}]$ は $x_i > 0$ の場合には+を、 $x_i < 0$ の場合には-を用いる。

4. 食肉の識別実験

4.1 実験方法

圧電素子を組み込んだボールペンを用いて食肉の表面に「2」の字を描くようにしてなぞった。「2」の字を描くようにしてなぞるのはボールペンの筆圧をほぼ一定にでき、肉の硬さの検出が安定して得られるからである。いろいろの文字を描いて安定性を確認し、「2」の文字とした。食肉の表面をなぞることにより得られる時系列データを用いて識別実験を行った。用いた食肉とその部位を表1に示す。識別実験手順は以下のとおりである。

- (1) 基準となる食肉部位（もも肉）の表面に「2」を10回描き、圧電素子から得られる時系列データを収集する。
- (2) 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10個の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±10%で仮想データを生成することを示している。

データ＝

$$\text{平均パワー値} \times (1 \pm 0.10) \quad (12)$$

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食肉の部位に対する距離（ユークリッドの距離）は1.0周辺に分布する。
- (5) 他の部位の肉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(11)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食肉および部位の識別を行う。

Table. 1. Meats used in the experiment

Beef	Pork	Chicken
Thigh	Thigh	Thigh
Lever	Lever	Lever
Chuck roll	Loin	White meat
Tongue	Tongue	Breast
Tender loin	Tender loin	Gizzard
Short plate	Spareribs	————
Strip loin	Heart	————

4. 2 実験結果

牛肉の部位の識別の基準肉とした牛もも肉の時系列データを図4に示す。肉の表面を「2」を描くようにしてなぞると、このようなデータが得られる。この時系列データにMEMを施し、周波数スペクトル化したものを図5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、牛、豚および鶏肉の識別実験結果を示す。

① 牛肉の部位の識別

もも肉を基準データとした実験結果を図6に示す。もも肉に比べてバラ肉、サーロイン、牛タン、牛レバーは距離が負になっているので軟らかく、ロース、ヒレは距離が正になっているので硬い。図に示すようにそれぞれの肉のユークリッドの距離は離れており、識別が可能である。

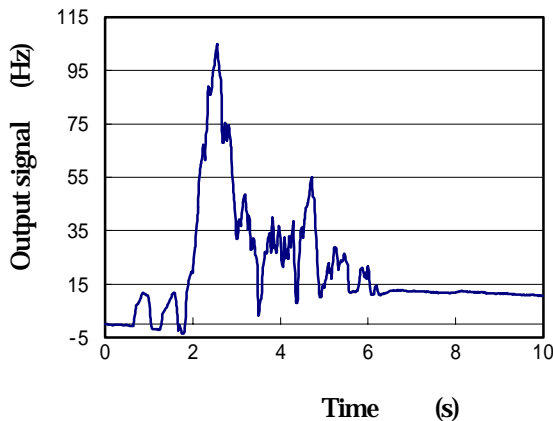


Fig. 4 Time series data of beef thigh

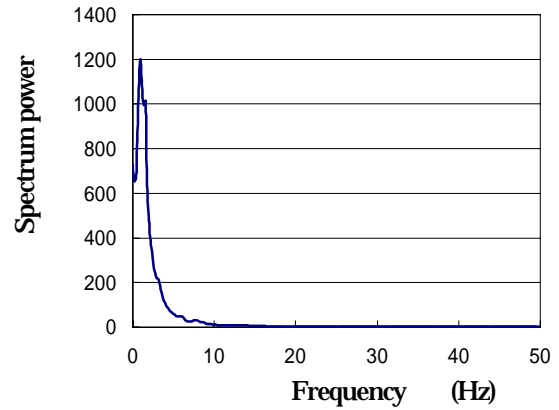


Fig. 5 Frequency spectrum of beef thigh

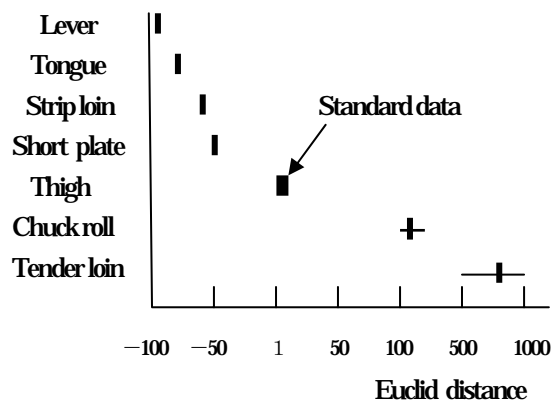


Fig. 6 Discrimination result of beef

② 豚肉の部位の識別

豚肉に対する識別結果を図7に示す。もも肉を基準データとした結果である。牛肉の場合と違い、もも肉に比べて全ての部位の肉が軟らかい。図に示すように各部位肉間のユークリッドの距離により識別可能である。

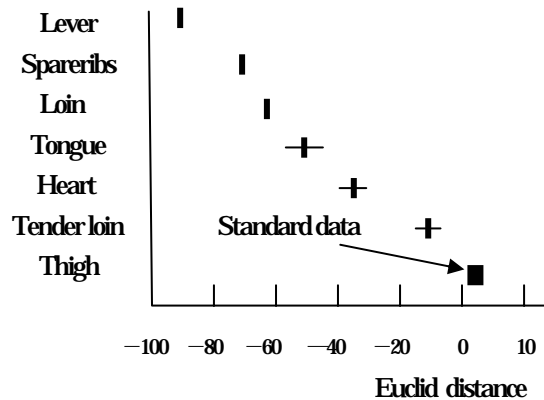


Fig. 7 Discrimination result of pork

③ 鶏肉の部位の識別

図8に鶏肉の識別結果を示す。牛肉の場合と同様に、部位の中に軟らかいものと硬いものがある。この場合にも、ユークリッドの距離の違いにより、部位の識別が可能である。

④ 牛, 豚, 鶏肉の識別

3種の肉の識別を行った。牛のレバーを基準データとして比較したものを図9に示す。牛レバー, 鶏レバー, 豚レバーの順に硬くなっている。3種の肉の違いを識別可能である結果となっている。他の部位での実験結果を図10に示す。もも肉間の識別も可能である。

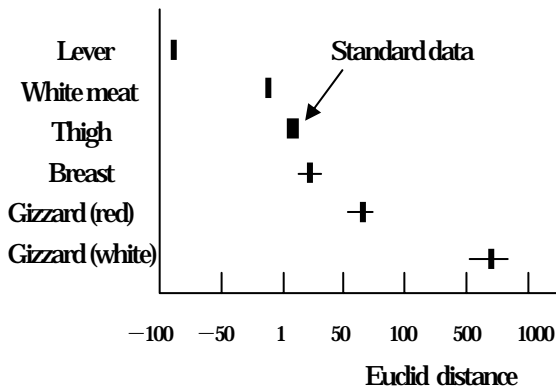


Fig. 8 Discrimination result of chicken

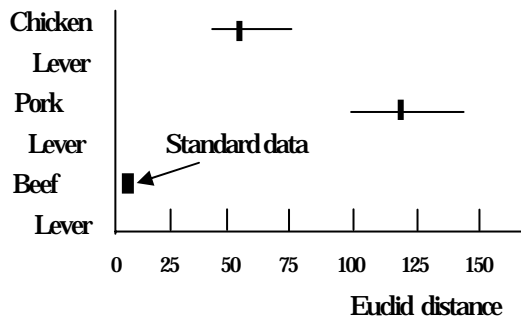


Fig. 9 Comparison of levers

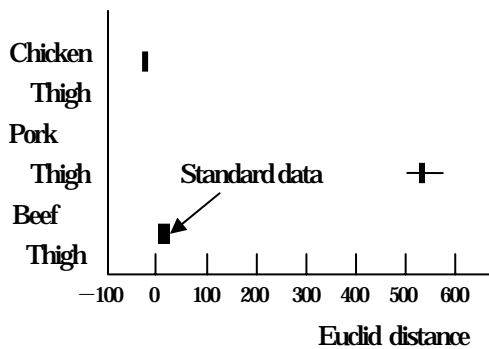


Fig. 10 Comparison of thigh meats

以上の実験結果に示したように、ボールペン型の触覚センサーの構成とEED法により生体組織としての食肉の部位の識別が可能である。しかし、少々の問題点も考えられる。本研究では、触覚センサーを肉に押し込む際の力の加減を一定とするために数字の「2」を描くようにした。不特定多数の人が同じ肉を計測した場合に同一の結果が得られるかどうかは不明であり、今後の課題である。また、実際の生体における内臓などの組織と食肉では組織は異なる。今後、豚や鶏の生体を用いた実験検証が必要である。

5. 結 言

本研究では、ボールペン軸にPZT圧電素子を組み込んだ触覚センサーを用いて食肉の表面をなぞることにより得られる時系列データの変化から食肉の硬軟を測定した。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食肉の部位の違い、種類の違いを識別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) EED法を基本とした解析により、食肉の種類と部位の識別を可能とした。牛肉, 豚肉および鶏肉の3種の肉に対してユークリッドの距離の大小により識別が可能であることを示した。

(2) 圧電素子を用いたボールペン型の触覚センサーを用いて触診することにより、医師の触診に代わるセンサーによる触診の可能性を示した。

(3) 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。

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MR I 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 , 12th IMEKO TC4
International Symposium , pp . 478 -
482, (2002)**
- 7) 坂野進，高木博基、有田貴博：ユーク
リッドの距離を用いたサインの識別—
電子認証への適用—，日本機械学会論
文集
- 8) **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 18th Sensor Symposium,
(2001)**
- 9) 坂野進，MT S法を用いた紙幣の識別，
品質工学，Vol. 8, No. 3, pp. 58-64,
(2000)
- 10) 松田里香，ほか，MT S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)