

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350094

研究課題名(和文) 歯根膜の柔軟性と受容特性に基づく食感センサを用いた食感計測に関する研究

研究課題名(英文) Food texture measurement based on flexibility and receptive characteristics of periodontal membrane

研究代表者

中本 裕之(Nakamoto, Hiroyuki)

神戸大学・システム情報学研究科・助教

研究者番号：30470256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、食感センサと咀嚼運動機構に食感知覚処理方法を組み合わせた食感計測システムの実現及び食感知覚の定量化である。ヒトは歯根と歯槽骨の間でクッションの役割を担う歯根膜という組織をもち、咀嚼時の歯根膜の伸縮を同膜内にある応答特性の異なる2種類の受容器によって検出し、最終的に脳内において食感として知覚する。この食感知覚の可能な計測システム実現のため、永久磁石と磁気素子群を用いて歯に相当する接触子の変位と、振動を計測できる食感センサを実現した。また、ヒトの咀嚼運動と同じ軌道と速度を実現可能な咀嚼運動機構を構成した。さらに、神経回路モデルを用いた知覚処理による食感判別手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a food texture system composed of a magnetic food texture sensor, a mastication mechanism and a receptive processing method was proposed. Human has periodontal membrane which mainly includes two different kinds of receptors. Food texture perception is based on the firing patterns of the two receptors. To realize a food texture system using human receptive characteristics, a proposed food texture sensor had magnetoresistive elements and an inductor. The sensor measured displacement and vibration that were applied to a tooth part. A mastication mechanism generated mastication motion like human's motion. In addition, a food texture classification method using a neural network model was proposed. Their effectiveness was confirmed through laboratory experiments.

研究分野：計測工学

キーワード：食感センサ フードテクスチャ 食感知覚

1. 研究開始当初の背景

食物を咀嚼し摂取することは、我々ヒトにおいて生命・健康の維持に必要な行為であり、その過程において我々は主に3つの刺激を知覚している。そのうち2つは食物の風味として重要な要素である味と香りであり、それぞれ味覚と嗅覚で知覚される。他1つは歯と食物間に発生する物理的關係である食感である。パリパリやシコシコなど食感の表現は無数に存在し、味と香りに劣らず食感の存在は大きい。現在においても食感に特徴をもたせた菓子や練り物などが多く商品化され人気を集めており、食感を適切に評価し任意の食感を設計することが今後の食品業界における新商品開発において必要とされている。

食感評価の手段は主に2つに分けられる。1つは被験者実験であり、もう1つは測定機器による評価である。前者は、多数の被験者を用いる場合はその準備やコスト、評価の個人差に対する考慮が必要となり、その再現性と信頼性にも疑問が残る。一方、測定機器による評価は定量的な評価が可能であるとされているが、市販の測定機器ではヒトの知覚している食感の部分的な評価しかできていない。ヒトが歯で食物を咀嚼する際、歯根膜という組織にある特性の異なる2種類の受容器が伸縮刺激を受けて発火し、その発火に基づいて食感の知覚がなされている。測定装置においてヒトが知覚する食感と同等の計測を可能とすることで、食品業界の製品開発におけるコスト削減や短期化を実現できる。

2. 研究の目的

本研究の目的を食感の定量化のための食感センサと精密な顎運動の可能な咀嚼運動機構を組み合わせた食感計測システムの実現とする。まず、その構成要素である食感センサを、歯、歯根膜及び歯槽骨の構造と物性をモデル化し設計製作する。さらに、ヒトの歯根膜には速順応性と遅順応性と異なる応答特性をもつ受容器があることを反映させ、2種類の検出素子を有するセンサとして実現する。歯に相当する部品(接触子)に永久磁石を埋め込み、その下に歯根膜に相当するエラストマ、接触子とエラストマを支えるベースの3つを組み合わせる。検出素子を有する基板にそれらを固定して食感センサとする。食品から受ける外力によって生じる接触子の変位に加えて振動を計測することで、遅順応性のみに対応する従来のロードセルを応用した測定装置に対し、提案する食感センサが、これまで計測が困難とされる速い食感変化も計測可能であることを検証する。

一方、咀嚼運動機構は精密な咀嚼運動を生成する必要があるため、ステッピングモータをアクチュエータとする咀嚼運動機構を構成する。ヒトの咀嚼運動を計測して得た軌道を元に咀嚼運動を実現する。さらに、咀嚼運動時における食感評価のため、2種類の特性

をもつ検出素子の出力を扱う知覚処理方法を確立する。

3. 研究の方法

食感計測システムを実現には、次の3つの要素を確立する必要がある。

- (1) 咀嚼運動を生成する機構
- (2) 歯根膜とその受容器特性に基づいた食感センサ
- (3) 咀嚼運動時における食感センサの出力に対する知覚処理

咀嚼運動機構は、ヒトの咀嚼運動の軌道範囲や速度の特性を計測した上で、咀嚼運動を再現可能な機構を設計・製作する。また、食感センサは研究の目的で述べた構造で設計する。計測原理は次のようになる。永久磁石の発生する磁界を複数の磁気抵抗素子で計測する。磁石が変位・回転することにより生じる磁界の変化を磁気抵抗素子の出力電圧の変化として取得し、非線形方程式を解くことにより永久磁石の変位を求める。このセンサは磁気抵抗素子に加えてインダクタも有しており、前者が遅順応性、後者が速順応性の特性を持つ。これらは歯根膜に内在する受容器群と同様の特性といえる。さらに、咀嚼運動機構と食感センサの試作後、食感評価のためのデータ取得実験を実施し、食感知覚処理方法の検証データとする。食感情報処理に多層構造からなる神経回路モデルと機械学習による食感識別モデルを応用し、食感センサの磁気抵抗素子とインダクタの出力を受け、最終的に食品の食感を識別する。

4. 研究成果

- (1) 咀嚼運動を生成する機構

ヒトの咀嚼運動は3次元的な軌道を生成していることから、3軸の駆動軸をもつ機構を設計・開発した。駆動機構は大きな力を発生することができるパラレルリンク機構での事例があるが、生成できる運動のレンジが小さく構造が複雑になるため、本研究ではボールねじを用いたスライダ機構を採用した。ボールねじを用いることで高い剛性を、またアクチュエータにステッピングモータを用いることで高い精密さを実現した。2軸方向に動作するXYスライダ(シグマ光機製、SGSP33-200(XY))にz軸スライダ(シグマ光機製、SGSP33-200(Z))を組み合わせ、3軸の駆動システムを構成した。その駆動システムを図1に示す。図1では、接触子が下に向くように食感センサが固定されており、x軸とy軸のボールねじがみえる。各軸の最大移動速度は20 mm/secである。これは、一般に食感の計測に用いられている計測機器の最大移動速度が10 mm/secであることと比較すると2倍の速度である。また、繰り返し位置決め精度は0.01 mm以下である。

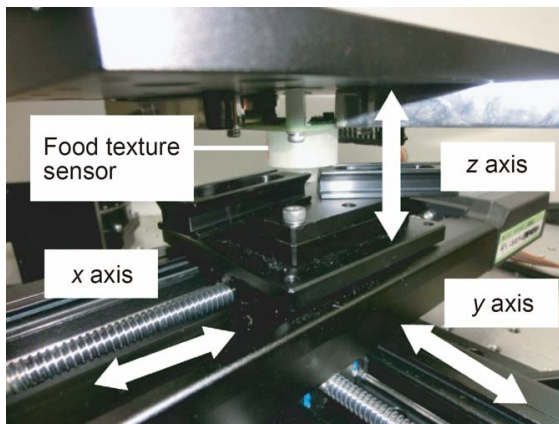


図1 3軸駆動機構

(2) 歯根膜とその受容器特性に基づいた食感センサ

設計した食感センサの構造を図2に示す。食感センサは歯に相当する接触子、歯根膜に相当するエラストマ、歯槽骨に相当するベースとそれらを支える基板の主に4つの構造物から構成されている。接触子は円錐台を逆にした形状で、食品に接触する円の直径は12 mmとした。接触子内部には円柱形状の永久磁石(厚さ1 mm、直径6 mm)が固定されている。直径26 mmの円柱形状のベースは中央に円錐台のくぼみがある。エラストマは接触子とベースの間に充填され、厚さは3 mm、アスカ-C硬度は15である。これらの部品は基板に接着剤で固定される。基板の反対面に4つの磁気抵抗素子と1つのインダクタを図3に示すように配置した。接触子に食品が接触した際、エラストマの柔軟性から接触子が変位する。この変位により磁気抵抗素子とインダクタが受ける永久磁石が発生する磁界強度が変化する。磁気抵抗素子は円の半径方向に感度軸をもちその方向の磁界強度に応じた電圧を出力する。インダクタは方向性を持たず、磁界強度の変化の大きさに対して誘導電圧を変化させる。これら素子は樹脂等のモールドによる防水が可能のため、水分のあるような食物の計測も可能である。

食感センサの部品の中で硬度が必要なのはプランジャとベースである。これらは図2で示したサイズと形状であるが、本研究では3次元造形機を用いてABS樹脂の積層整形により製作した。プランジャは歯冠部分と歯根部分の2つに分けて製作し、中に磁石を入れて接着し固定させた。次に、ベースのくぼみの中心とプランジャの中心を合せた後、両者の隙間にウレタンを流し込み固化させた。ウレタンが固化した後、プランジャとベースの位置合わせに使用する部分をプランジャから切断し、ベースの底面を電子基板に固定することで食感センサを製作した。製作したセンサを図4に示す。図4の白い部分がプランジャとベース、エラストマ層であり、その下に回路基板がある。回路基板の片端にはプラグのコネクタがある。

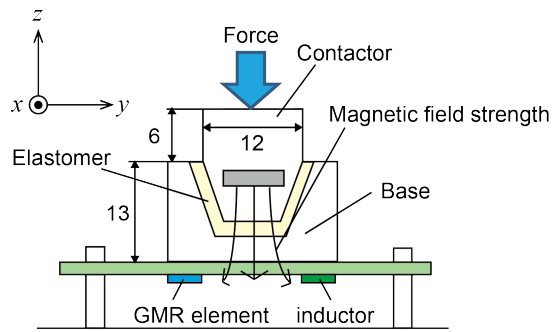


図2 食感センサの構造

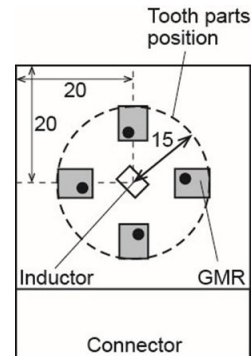


図3 基板上的素子の配置

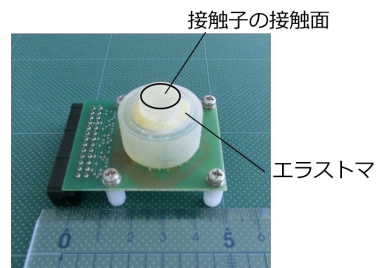


図4 製作した食感センサ

食感センサの4つの磁気抵抗素子の出力電圧から変位を算出する方法について述べる。これまで著者らの研究において、磁石の微小変位はGMR素子の出力の2乗に反比例することが明らかとなっている⁵⁾。この特性にもとづいて式(1)のような校正式を用いて3軸の変位を求める。式(1)の $v_i (i = 1, \dots, 4)$ は各GMR素子の出力電圧を表しており、 C_{dxj} 、 C_{dyj} 、 $C_{dzj} (j = 1, \dots, 9)$ は校正行列 C の要素を表す。また、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は3軸方向の変位を表す。校正行列 C の各要素は既知の出力電圧と変位の組み合わせを用いて最小二乗法による重回帰分析で決定する。一度校正行列を決定することで計測時は単純な計算で変位を算出することが可能であり、リアルタイムに食感センサの出力を確認する用途にも対応が可能である。

食感センサと駆動機構を用いて実験を行った。校正した食感センサを次節で述べる3次元駆動システムに固定し次に示す範囲の変位を0.5 mm刻みで与えた。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{V}$$

$$= \begin{bmatrix} C_{dx1} & \dots & C_{dx9} \\ C_{dy1} & \dots & C_{dy9} \\ C_{dz1} & \dots & C_{dz9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1/v_1^2 \\ 1/v_1 \\ \vdots \\ 1/v_4^2 \\ 1/v_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$-1.0 \leq x, y \leq 1.0$$

$$-1.0 \leq z \leq -0.5$$

与えた変位は、 $5 \times 5 \times 2 = 50$ 通りとなる

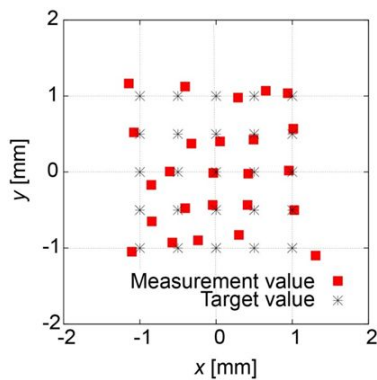
食感センサと駆動機構を用いて実験を行った。校正した食感センサを次節で述べる 3次元駆動システムに固定し次に示す範囲の変位を 0.5 mm 刻みで与えた。

$$-1.0 \leq x, y \leq 1.0$$

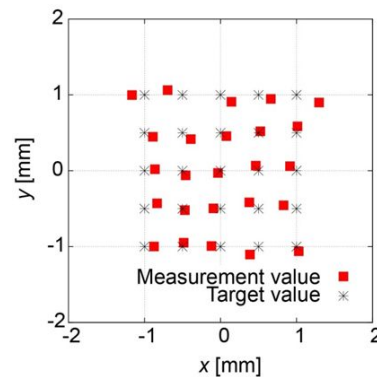
$$-1.0 \leq z \leq -0.5$$

与えた変位は、 $5 \times 5 \times 2 = 50$ 通りとなる。

$z = -1$ における xy 平面上の結果を図5、 xz 平面の結果を図6に示す。この評価における変位の最大誤差は 0.22 mm で、変位のレンジの 2 mm の 10%程度である。 xy 平面上と xz 平面上ともに、原点付近の位置の誤差に比べ原点から距離が大きくなるにつれて誤差が大きくなり精度が低い傾向にあることから分かる。この傾向の原因としては、プランジヤ

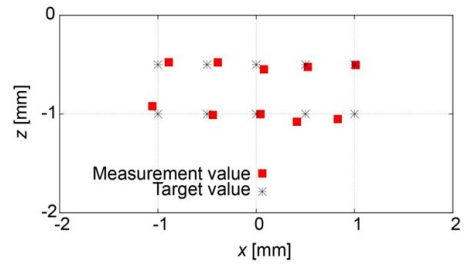


(a) $z = -0.5$

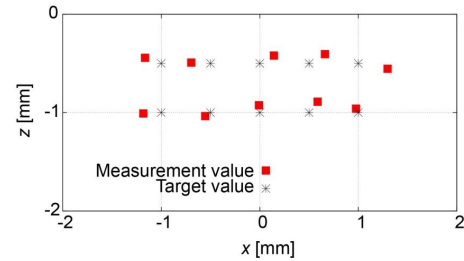


(b) $z = -1.0$

図5 xy 平面上における目標値と計測値



(a) $y = 0.5$



(b) $y = 1.0$

図6 xz 平面上における目標値と計測値

が変位だけでなく微小回転を生じたためと考えられる。ただし、食物を押し付ける実験においては、原点まわりのあまり変位の小さなレンジを主に使用すると考えられ、3軸の ± 0.5 mmの範囲内における最大誤差は 0.18 mm とレンジの 10%に収まっていることから実用上は問題無いと考えられる。

(3) 咀嚼運動時における食感センサの出力に対する知覚処理

本研究では食感知覚の方法として、機械学習による方法と神経回路モデルによる方法の2つを検討した。ここでは前者について報告する。

食感センサの計測値は変位と誘導電圧である。フックの法則により変位から力を算出することができ、食品の破断中の時系列の計測値を用いて食品を識別することを考え、学習器としてサポートベクターマシン(以下、SVM とする)を選択した。SVM はニューロンモデルとして最も単純な線形しきい素子を用いて2クラスのパターン識別器を構成する手法である。特徴ベクトルとそれに対応するクラスラベルを定義し識別器のパラメータの学習を行う。

食感センサ、駆動機構、SVM を組み合わせて食感評価システムを構築し、実験を実施した。食品としてポテトスナックを破断試験した際の応答の例を図7に示す。左の軸は磁気抵抗素子(GMR と表記)で計測した力を表しており、右の軸は誘導電圧(IND と表記)を表している。計測時間は 6 sec であり、サンプリング周波数は 10 kHz である。図7によるとこの食品の外側はある程度の硬さがあり、1度大きな破断が生じた後、小さな破断が継続していることがわかる。小さな破断の際は誘導電圧が上下しており、微細な振動が継続的に発生していることが見て取れる。SVM の特徴ベクトルとしてこの力と誘導電圧を用いる。磁気抵抗素子の出力電圧から算出し

た力は 100 データ毎に平均をとった。また、誘導電圧は Hanning 窓関数をかけて、離散フーリエ変換した後、100 データ毎に平均をとる。先に述べたポテトスナックに加えて、グミ、ビスケット、コーンスナックの 4 種類の食品について、破断実験を 10 回ずつ行い結果を取得した。交差検証を行った結果、力のみを特徴ベクトルとして用いた SVM では 92.5% の正答率であった。グミとコーンスナックは力の変動の傾向が似ているため、その 2 つの間で誤答が生じたと考えられる。また、誘導電圧のみを特徴ベクトルとして用いた SVM では 95% の正答率となった。コーンスナックとポテトスナックは誘導電圧の変動が大きく、グミとビスケットは変動が小さいという傾向があり、それらの間で誤答が生じた。特徴ベクトルとして力と誘導電圧の両者を用いた場合の正答率は 100% となった。特徴の異なる力と誘導電圧を同時に取得することが、食感評価に有効であることがわかる。比較実験として、市販の食感測定器を用いて破断試験を実施した。得られた荷重のデータを用いて SVM の特長ベクトルを定義し、同様の識別実験を行ったところ、正答率は 87.5% となった。このことから、食品の破断時の力と誘導電圧の両者を計測することが、食感評価に有効であることが示された。

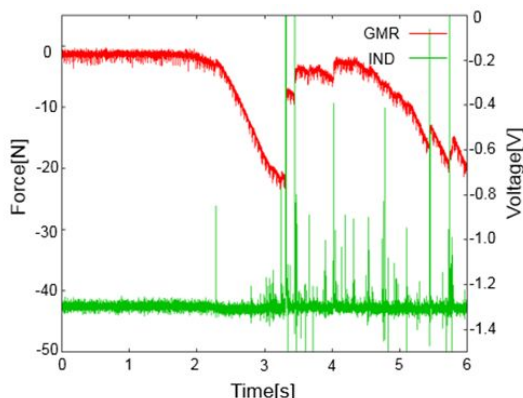


図7 破断の結果例 (ポテトスナック)

本研究では咀嚼運動を生成するための駆動機構、歯根膜にある受容器の特徴をもつ磁気式食感センサ、機械学習手法を応用した知覚処理について要素研究を推進し、最終的に食感評価システムを構成した。評価実験の結果、市販の食感測定器よりも正しく食感を識別できることを確認し、提案する食感評価システムの有効性を検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

西久保 大輔, 中本 裕之, 小林 太, 小島 史男,
ヒトの歯の構造を持つ食感センサ, 日本食品科学工学会誌, 査読有,
Vol. 63, 2016, 掲載確定.

Hiroyuki Nakamoto, Taketo Wakabayashi, Futoshi Kobayashi, and Fumio Kojima, Estimation of Displacement and Rotation by Magnetic Tactile Sensor Using Stepwise Regression Analysis, Journal of Sensors, 査読有,
Vol. 2014, 2014, pp. 1-7,
DOI:10.1155/2014/459059.

〔学会発表〕(計 8 件)

Hiroyuki Nakamoto, Daisuke Nishikubo, Shuhei Okada, Futoshi Kobayashi, Fumio Kojima, Food Texture Classification Using Magnetic Sensor and Principal Component Analysis, The Third International Conference on Computing Measurement Control and Sensor Network - 2016, 2016.5.20-22, 島根県立産業交流会館 (島根県), 査読有, 発表確定.

中本 裕之, 岡田 崇平, 西久保 大輔, 小林 太, 小島 史男, 2 種類の異なる検出素子をもつ食感センサの神経回路モデルによる識別, 第 43 回知能システムシンポジウム, 2016.3.10-11, 室蘭工業大学 (北海道)

Hiroyuki NAKAMOTO, Daisuke NISHIKUBO, Futoshi KOBAYASHI, Fumio KOJIMA, Development of Food Texture Sensor Using Two Magnetic Sensing Elements, 2015 IEEE Symposium on Robotic Intelligence in Informationally Structured Space, 2015.12.8-10, Cape Town (South Africa), 査読有, 2015, pp. 117-121.

西久保 大輔, 中本 裕之, 小林 太, 小島 史男, 磁気抵抗素子とインダクタを有する食感センサの応答評価, 第 32 回センシングフォーラム, 2015.9.10-11, 大阪電気通信大学 (大阪府), 2015, pp. 351-354.

西久保 大輔, 中本 裕之, 小林 太, 小島 史男, 磁気式食感センサを用いたフードテクスチャ計測の研究, 日本食品科学工学会第 62 回大会講演会, 2015.8.27-29, 京都大学 (京都府), 2015, pp. 105.

中本 裕之, 若林 岳人, 小林 太, 小島 史男, 永久磁石と磁気抵抗素子を用いた触覚センサによる接触情報の推定, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014.5.21-13, 盛岡市アイーナ (岩手県), 2014, pp. 453-456.

若林 岳人, 中本 裕之, 小林 太,
小島 史男, 磁気式触覚センサのため
の重回帰分析による磁石の変位及び回
転の推定, 第 22 回 MAGDA コンファレン
ス in 宮崎, 2013.12.2-3, 宮崎観光ホテ
ル(宮崎県), 2013, pp. 91-94.

初瀬 仁志, 中本 裕之, 小林 太,
小島 史男, 歯の構造に基づいた食感
センサの開発, 日本食品科学工学会第
60 回記念大会講演会, 2013.8.29-31,
実践女子大学(東京都), 2013, pp. 215.

〔その他〕

[http://www2.kobe-u.ac.jp/~hnaka/home.ht
ml](http://www2.kobe-u.ac.jp/~hnaka/home.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中本 裕之 (NAKAMOTO, Hiroyuki)
神戸大学・大学院システム情報学研究科・
助教
研究者番号: 30470256