

令和 元年 5 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00813

研究課題名（和文）歯根膜内の受容器の特性を有する食感センサを用いた食感の定量化に関する研究

研究課題名（英文）Food texture quantification using food texture sensor with characteristics of receptors in the 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・准教授

研究者番号：30470256

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、食品を破断する際の力と振動を同時に計測可能な食感センサを用いて食感計測システムを構築することを目的とした。食感センサの高精度化と高感度化を進めるとともに、多軸の咀嚼動作システムを構成した。さらに食感評価のモデルとしてニューラルネットワークとロジスティック回帰モデルを用いて、食感表現にもとづく定量化の方法を提案した。人間の知覚する食感の定量化に対して新たな方法確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の知覚する食感の定量化に対して、ニューラルネットワークやロジスティック回帰モデルが有用であること、サクサクやバリバリなどの食感表現にもとづいた定量化ができることを本研究により明らかにした。このことはいままで官能試験で主に評価してきた人間の食感の感覚を、食感センサやモデルを用いた方法によって推定が可能であることを示す。本研究により、食感の定量化の実用を求めている食品製造業にとって有効な技術を見出した。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to develop a food texture measurement system. The key device is a food texture sensor which has force and vibration measurement elements. The design of the food texture sensor improved accuracy and sensitivity. The sensor was attached to a multi-axis mastication system. This study also proposed a novel method to quantify food texture using neural network and logistic regression model. The method calculated a degree of food texture based on measurement data by the sensor.

研究分野：計測工学

キーワード：計測 食感センサ 食感定量化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

食物を咀嚼・摂取することは、栄養の摂取による生命機能の維持、咀嚼運動による生理的機能の促進など我々にとって必要不可欠の活動のみならず、食事を通じた満腹感や幸福感を得る精神的な効果もある。そのため、栄養はもとより味、香り、食感に特長をもち、美味しいと感じられる食品が求められており、食品業界では様々な食品が開発されている。味と香りの定量評価のため味覚や嗅覚を模倣したセンサの開発と利用が進展している一方、食感に関しては食品の物性を測定する試験機が利用されているが、食感そのものを定量的に評価するシステムの研究開発と実用化が遅れている。サクサクやモチモチなど、人気のある食感をデザインし適切に評価することが食品製造業界における今後の新商品開発において必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、食品を破断する際の力と振動を同時に計測可能な食感センサを核とした食感計測システムを構築することを目的とした。その目的の達成のため、次の3つのサブテーマを設定した。

1つは食感センサの高精度化と高感度化である。食感を定量化するシステムを確立するには、計測を担う食感センサの高精度化が必須である。そのためには人間の歯の構造や受容器の特性を維持しつつ、磁石や2つの素子の配置や柔軟層の材料、各部の寸法を改善することで高精度化と高感度化を実現し、さらに食感センサ後段の増幅回路に低ノイズ化の回路を組み込む。2つ目は、これまでの研究で構築した多軸の咀嚼運動システムと力センサを用いて2軸並びに3軸の咀嚼運動による計測を可能とするため、咀嚼運動システムを構築する。3つ目は、人間の食感知覚の信号処理をモデル化する。食感センサは力と振動の2種類の計測データを取得するが、それらにもとづいて食感を定量化する食感知覚モデルを提案する。モデルにはニューラルネットワーク、ロジスティック回帰モデルを用いる。

3. 研究の方法

食感評価システムを構築するため、目的で挙げた3つのサブテーマを進めた。

a) 磁気式食感センサの高精度化及び高感度化

本研究の磁気式食感センサは磁気抵抗素子とインダクタという2種類の素子を搭載しており、磁気抵抗素子で静的な情報である変位及び力を、インダクタで動的な情報である振動を取得する。食感センサは図1に示すように、接触子、柔軟膜、ベース及び基板からなっており、接触子は永久磁石を内包する。計測原理は次の通りである。食品が接触子に接触し、接触子が変位することで基板上的素子に対する永久磁石からの磁界が変化する。この変化にもとづいて変位を算出し電圧の変動を振動として計測する。この原理の有効性は先行して行った研究において明らかにしてきたが、本研究において、磁石の持つ磁束密度、磁気抵抗素子とインダクタの位置を再設計し、これまで試作した食感センサよりも高精度化及び高感度化を実現した。さらに各素子の出力を増幅する回路を見直し、専用のプリント基板上で低ノイズの計装アンプを搭載したものを新たに設計、製作した。接触子の変位の範囲を1mm程度とし、その変位を12bitの分解能で定量化し、繰り返しとヒステリシスに関する誤差を5%以内とすることを目標値とした。これら食感センサの高精度化と増幅回路の低ノイズ化は、他のサブテーマにも影響する重要な実施項目であるため、平成28年度当初より研究開発を進め、その年度内にセンサ基板と増幅基板の試作までを実施した。

b) 多軸の咀嚼運動システムの構築

サブテーマb)では、人間が食感を知覚する際に同時に行う咀嚼運動を駆動するシステムを構築した。咀嚼運動は顎の関節の動作により生成される多軸の運動であり、人間の食感の知覚はその運動に依存する。そこで物性試験機のように1軸運動ではなく、2軸の運動による食感評価の可能性を検証した。本サブテーマも平成28年度よりシステムの設計と製作を行い、その年度内において基礎的な評価を実施した後、サブテーマc)の実施に応用した。

c) 食感の知覚処理のモデル化

食感の知覚処理モデルを提案し、磁気式食感センサと咀嚼運動システムを用いて取得した食品の破断時のデータにもとづいてモデルの有効性を検証した。食感センサは2種類の応答特性の異なるセンサ素子をもつことを特徴としている。このように応答特性の異なる受容器は人間の触覚にも存在し、受容器は発火によってパルスを発生させる。その処理系は階層性をもつ脳の体性感覚野が担っているとされている。そこで、食感の知覚処理をリカレントニューラルネットワーク(以下、RNN)を用いてモデル化した。磁気式食感センサの出力を入力し、直接的にパリパリやふわふわなどの食感表現の強度を出力させるようなRNNの構造を設計した。また、モデルに一般化線形モデルの1つであるロジスティック回帰モデルを組み込んだ方法も提案し、特に力と振動データにもとづいて食感を定量的に評価できることを確認した。

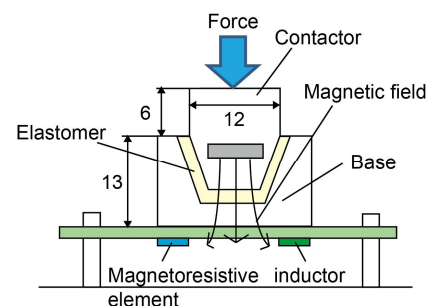


図1 磁気式食感センサの構造

4. 研究成果

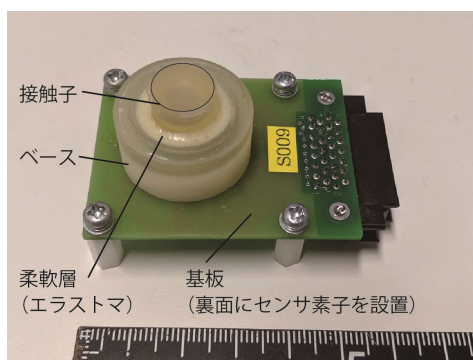
サブテーマ a) では、磁気式食感センサの試作を数回行ったが、最終的に決定した食感センサの構造を図 1 に示した。接触子とベースは硬度が必要なため ABS 樹脂で製作した。接触子は円錐台の形状で、食品に接触する円の直径を 12mm とした。接触子内部には厚さ 1 mm、直径 6 mm の円形磁石が 2 個だけ直列に固定されている。ベースは直径 26mm の円形で、中央に円錐台のくぼみがある。エラストマは接触子とベースの間にウレタンを充填、固化させた。接触子が 1.5 mm 程度変位するようエラストマの厚さを 3 mm とし、アスカー C 硬度を 15 と決定した。接触子と反対の面の回路基板の円周上に巨大磁気抵抗効果を利用した磁気抵抗素子 8 個を、その円の中心にインダクタ素子を配置した。接触子、エラストマ、ベースはそれぞれヒトの歯、歯根膜、歯槽骨に相当する。2 種類の受容器は磁気抵抗素子とインダクタ素子が対応する。図 2(a) に接触子の接触面を平面とした食感センサを、図 2(b) に素子を搭載した面を示す。なお、本研究では接触子として他に切歯や臼歯を模した形状をもつものも製作した。接触子は永久磁石をもつため、接触子に力が加わりその磁石が変位することで素子にかかる磁界強度が変化する。この磁界強度の静的変化を 8 個の磁気抵抗素子が取得することで接触子に加わる力を計測できる。この力はセンサの構造とクーロンの法則とフックの法則にもとづいて 8 個の磁気抵抗素子から算出される。加えて、同時に磁束密度の動的な変化によって生じる誘導起電力をインダクタ素子が出力し、その電圧変化を本研究では接触子に生じた振動として扱う。この食感センサの基板に加えて、磁気抵抗素子とインダクタの出力を増幅する回路基板も製作した。増幅率は磁気抵抗素子が 500 倍、インダクタが 10,000 倍であり、従来よりも 2 倍以上高感度な計測が可能となった。

接触子の押し込み方向に変位を与えた。0.0 mm から 1.5 mm までの変位範囲を 0.02 mm 間隔で繰り返し与えたときの力を、食感センサと比較のためのロードセルで計測した。この 1.5 mm の押し込みに必要な力は約 80 N のレンジであり、ロードセルの計測値との誤差は 2.1 N であった。このレンジに対する誤差率は 3% 以下であり、5% 以下の目標値を達成した。また、磁気抵抗素子とインダクタの周波数特性について評価した。加振器を用いて接触子に強制振動を発生させたところ、振動の振幅が変化しない範囲において磁気抵抗素子が一定の出力をすることにに対し、インダクタは 10 Hz から出力を大きくし 300 Hz 程度までの周波数で振幅の小さな振動でも大きな出力となることが明らかとなった。このことは、サクサクやパリパリなどのような力の変化の激しい食感に対して、インダクタはその破断における振動を高感度に検出することが可能であることを示す。これらの結果から、設計時に想定した応答特性の異なる 2 種類の素子を持ち、繰り返しとヒステリシスに関する誤差を 5% 以下に抑えた食感センサを実現できた。

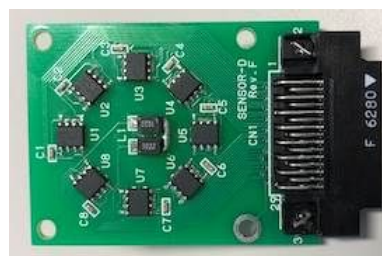
サブテーマ b) では、咀嚼動作システムの設計と製作を行った。人間の顎の動作は 3 軸の並進と 1 軸の回転で再現できるとされているが、食感センサの接触面に対して垂直に食品が接触する動作を対象とするためとして 1 軸の回転を省略し、直交する 3 軸の方向に並進を可能とする動作システムを設計した。各軸はステッピングモータをアクチュエータとする電動スライダである。3 軸中 2 軸で噛みしめる動作を再現するために 2 軸で円弧軌道を生成させ、咀嚼動作を模倣することが可能である。構成したシステムを図 3 に示す。最大動作速度は 5 mm/s である。駆動システムは PC と RS232c により接続され、動作の指令値も PC から送信する。また、この PC には A/D 変換ボードも搭載させ、そのボードと食感センサの増幅回路を接続した。このことにより、ワンボタンで動作と計測が可能なシステムを構成した。

サブテーマ c) では、2 つのモデルを用いて食感の定量化を行った。本研究ではオノマトペと呼ばれるサクサクやモチモチなどの食感表現を対象としており、それぞれの強度を定量的に評価する方法を提案した。また、それらの方法の検証をサブテーマ a) と b) で述べた食感センサと咀嚼動作システムを組み合わせたシステムを用いて行った。

モデルの 1 つには RNN の 1 つである全結合離散時間 RNN を用いた。食感センサは食品の破断時における力と振動の時系列データを取得する。したがって、連続するデータを扱うことができる RNN を用いた。RNN の学習には Back Propagation Through Time (BPTT) を用いた。市販の



(a) 接触子表面が平面の食感センサ



(b) センサ基板の裏面。

図 2 製作した磁気式食感センサ

菓子類をサンプルとし、サクサク、パリパリ、フワフワの3種類の食感表現の定量化を試みた。まず34名の一般被験者の官能評価により12種類のサンプルを評価し、有意差のあった食感を決定した。次に食感センサで力と振動の計測データを各サンプル10回ずつ取得した。計測データと官能評価により決定した食感表現の組み合わせをRNNに学習させ、クロスバリデーションによりそのRNNの出力を評価した。図4にその結果の例を示す。RNNの結果は全ての試行回数に対して最も強い食感と評価した回数の割合を示しており、官能評価の結果は官能評価でその食感があると回答した人数の割合を示す。学習させたデータによってRNNの個体差があるものの、データセットが10組であっても人間の官能評価の結果と同様の結果となることが明らかとなった。

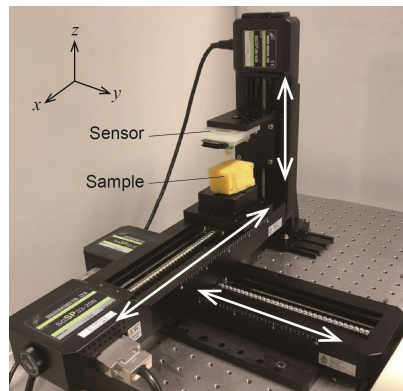
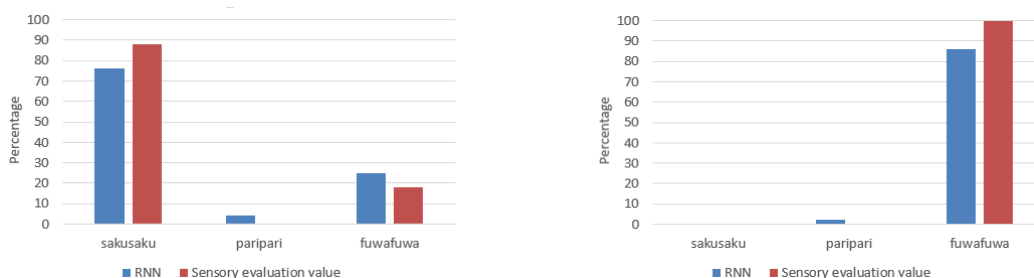


図3 咀嚼動作システム

加えてモデルにロジスティック回帰モデルを用いた場合の結果について述べる。このモデルではロジスティック関数を用いる。それに入力する合成変数を構成する説明変数群を食感センサで計測した力と振動の計測データの14種類の特徴量とした。官能評価は10名の一般の被験者として10種類の食品に対して食感の有無を回答させた。特徴量と食感の有無をデータセットとして、各説明変数の係数をロジスティック回帰により決定することで、食感センサの計測データから特定の食感の強度を推定することを可能とする。結果の例を図5に示す。この結果では5種類の食感の強度がレーダーチャートで示してある。図5(a)ポテトスナックは係数を決定に用いたデータで検証したものであるが、ウエハースは係数の決定に用いていないデータにもとづく食感強度の推定であり5種類の食感に対して官能評価と同等の結果が得られた。

以上のように、本研究では食感センサ、咀嚼動作システム、食感評価方法のそれぞれの要素研究を推進し、最終的な食感の定量化は統合したシステムを用いた実施した。特に食感評価方法では、RNNとロジスティック回帰モデルを用いた食感の評価方法を提案し、人間の知覚する食感の定量化に対して有用な知見を得ることができた。これらの成果は、さらに複雑なモデルによる高精度なモデル化を推進するとともに、食感の定量化が求められている業界への実用が期待できる。



(a) ビスケット (b) マシュマロ

図4 RNNモデルによる食感評価結果



(a) ポテトスナック (b) ウエハース

図5 ロジスティック回帰モデルによる食感強度の推定結果

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

Ninomae Souda, Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Food Texture Quantification Using a Magnetic Food Texture Sensor and Dynamic Time Warping, Food Science and Technology Research, 査読有, Japanese Society for Food Science and Technology, Vol. 24, No. 2, 2018, 257-263.

<https://doi.org/10.3136/fstr.24.257>

Hiroyuki Nakamoto, Daisuke Nishikubo, Futoshi Kobayashi, Food texture evaluation using logistic regression model and magnetic food texture sensor, Journal of Food Engineering, 査読有, Vol. 222, 2017, 20-28.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.008>

Shuhei Okada, Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Fumio Kojima, A Study on Classification of Food Texture with Recurrent Neural Network, Intelligent Robotics and Applications, 査読有, Vol. LNAI9834, 2016, 247-256.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-43506-0_21

[学会発表] (計 7 件)

Hiroyuki Nakamoto, Ninomae Souda, Daisuke Nishikubo, Futoshi Kobayashi, Food Texture Evaluation Using Tooth-shaped Sensor and Statistic Model, 2017 6th International Conference on Informatics, Electronics and Vision, 2017.

早田 一, 中本 裕之, 小林 太, 長畑 雄也, 廣末 頼泰, 磁気式センサと Dynamic Time Warping による天ぷらの食感評価, 日本食品科学工学会第 65 回大会, 2018.

早田 一, 中本 裕之, 小林 太, 磁気式食感センサによる時系列データの類似度を指標とした食感の定量化, 第 18 回公益社団法人計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2017.

[その他]

ホームページ等

<http://www2.kobe-u.ac.jp/~hnaka/research.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。