

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12026

研究課題名(和文)多感覚統合と支配的知覚モデルによる食感動態の推定

研究課題名(英文) Prediction of dynamic food texture sensation by multimodal sensory integration and dominant model

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：触覚と聴覚により知覚される食感を推定する多感覚統合モデルを提案した。ガウス過程回帰モデルに対して食品を計測した際の力と振動、音のデータから決定した特徴量を入力し、サクサクなどの官能評価値を出力として推定した。実験を通じて官能評価の範囲の5%以下の小さな誤差で推定ができることを確認した。加えて、咀嚼の進行によって変化する食感を推定するモデルとして、計測データと過去の食感の強度から現在の食感の強度を推定する状態空間モデルを提案し、モデルの有効性を実験により確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多感覚統合によって食感を推定する方法は食感推定において新たなアプローチであり、インパクトも高い。また、時間変化を伴う支配的食感についても挑戦的な試みであり、咀嚼の開始から嚥下までの過程を対象とする Oral processing の考え方に沿っている。いずれも食感を推定する新たな方法を提案できた。食感は固形食品のおいしさを決定する必要な要素とされており、食品開発においても評価のニーズがある。本研究の成果を、食感の定量化のニーズをもつ企業への技術移転を進めたい。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a multisensory integration model that predicts the degree of food texture from the senses of tactile and hearing. The model is a Gaussian process model. Explanatory variables were feature values determined from the force, vibration, and sound data in food breakage. Objective variables were the sensory evaluation values of food textures such as saku-saku. This study verified that the model predicted the sensory evaluation values within a 5% error of the range of evaluation values through experiments. This study also proposed a state space model to predict a dominant sensation from measurement data and previous sensations. We confirmed the effectiveness of the model through laboratory experiments.

研究分野：計測工学

キーワード：食感計測 多感覚情報処理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我々は主に五感を通じて外界からの刺激を受容し、それらを統合することで知覚を行っている。例えば、食事に際し、主に味覚、嗅覚、触覚、及び聴覚によって味や香りおよび歯応えなどの感覚情報によりおいしさを知覚している。本研究ではこの知覚が多感覚の統合と支配的知覚の決定によってなされていると考える。多感覚統合については fMRI を用いるなどして神経生理学的な研究が多く進められているが、具体的な統合モデルは確立していない。一方、支配的な知覚を測定する官能評価法として Temporal Dominance of Sensations (TDS) 法がある。TDS 法は複数の知覚に関して強度を計測するのではなく、ある知覚を感じている時間を計測する方法であり、複数の知覚の感じた順序と継続時間を解析して支配的な知覚を統計的に決定する。しかし、TDS 法では記録した過去の知覚を扱うのみであるため、過去の知覚から現在の支配的知覚を推定するためには新たな数理モデルを確立する必要がある。多感覚統合は感覚から複数の知覚を決定することであり、その複数の知覚から支配的知覚が決定する。それぞれの決定のモデルを感覚のレイヤからボトムアップ的に構成することで、人の知覚や嗜好に訴える製品開発や脳の神経生理学的な理解に貢献できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時間とともに変化する複数の感覚を統合し知覚の動態を表現する数理的手法を確立することである。このことにより動的な知覚の定量的表現とその推定を実現する。対象となる知覚として食感及びその強さを扱う。これは食感が力覚、振動覚と聴覚の統合により生じる知覚であり、咀嚼の進行により食感が変化するためである。本研究ではこの 3 つの感覚を統合して複数の知覚を推定する多感覚統合の方法を提案する。特に力、振動、音の計測データから食感の強度を推定するモデルを考える。さらに知覚の時間変化から支配的知覚の動態を推定するモデルも提案する。

3. 研究の方法

本研究を 3 つのサブテーマに分けて推進した。

a) 食感センサの製作と計測システムの構築

本サブテーマでは磁気式食感センサとそれを組み込んだ計測システムを構築した。磁気式食感センサについては、これまで食感評価に対して振動データが有効だったことから、振動計測の高感度化のためにインダクタの高度化を行い、それに伴いセンサ基板の再設計を行った。さらに、人間の可聴周波数領域においてほぼ一定の周波数特性をもつコンデンサマイクを加えた。これらにより、食品を破断する際に食感センサのプロープに作用する力と振動、空気を伝搬する音を同期して計測可能なシステムを構成した。

b) 多感覚統合モデルによる食感強度推定

本サブテーマでは多感覚統合のためにガウス過程回帰を用いた食感推定方法を提案した。モデルの説明変数は感覚情報である力と振動、咀嚼音の計測データから決定される特徴量である。目的変数は食感の強度である。さらに、説明変数について、計測データとテンプレートデータとの間の波形の類似性を評価した特徴量を用いる方法も提案した。

c) 支配的食感決定モデルと食感の動態の解析

本サブテーマでは自己回帰の項を入れた状態空間モデルによる支配的食感の推定方法を提案した。計測データから決定した特徴量と TDS 法により決定した支配的食感の支配率との関係から状態空間モデルのパラメータを決定し、交差検証によって状態空間モデルの妥当性を検証した。

4. 研究成果

サブテーマ a) について、3 で述べた方法に沿って磁気式食感センサの設計と製作、コンデンサマイクの追加と計測システムの構成を行った。図 1 に磁気式食感センサの構造を示す。磁気式食感センサは基板の下の面に磁気抵抗素子とインダクタの 2 種類のセンサ素子をもつ。センサ素子の基板の反対の面にプロープ、工業用ばね、リニアスライダが配置されており、プロープは工業用ばねの上に配置される。プロープが食品と接触するとその力に応じて工業用ばねが縮み、プロープが変位する。プロープの内部には永久磁石が封入されており、プロープの変位によってセンサ素子に作用する磁界が変化する。磁気抵抗素子は磁界強度、インダクタは磁束密度の変化に応じて出力電圧が変化する。基板には AD 変換器を内蔵したマイコンが搭載されており、10kHz のサンプリング周波数でセンサ素子の出力電圧をデジタル化してデスクトップ PC へ送信する。PC は電圧データからプロープに作用する力と振動を算出する。図 2 に計測システムを示す。電動スライダの先端に取り付けられた磁気式食感センサは、スライダの動作により食品を圧縮・破断し、その際にセンサの先端に発生した力と振動を計測する。その計測に同期してマイクにより破断時の音を 51.2kHz のサンプリング周波数で計測する。図 3 はクッキーとあられを計測した結果である。クッキーは振動と音が小さいが、あられは振動と音がともに大きく頻度も高い。力の大きさはクッキーが若干小さい。他 15 種類の食品の計測を実施し、計測した力、振動、音の

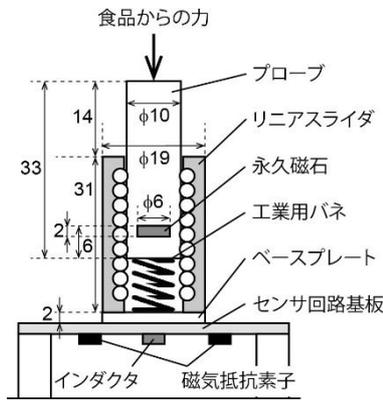


図1 磁気式食感センサの構造

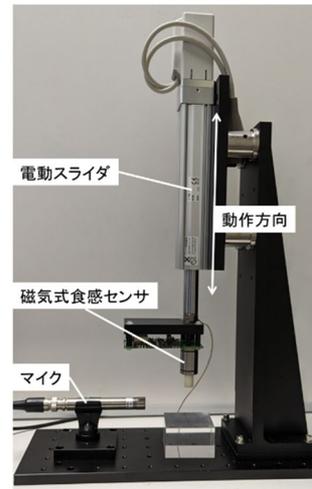


図2 計測システム

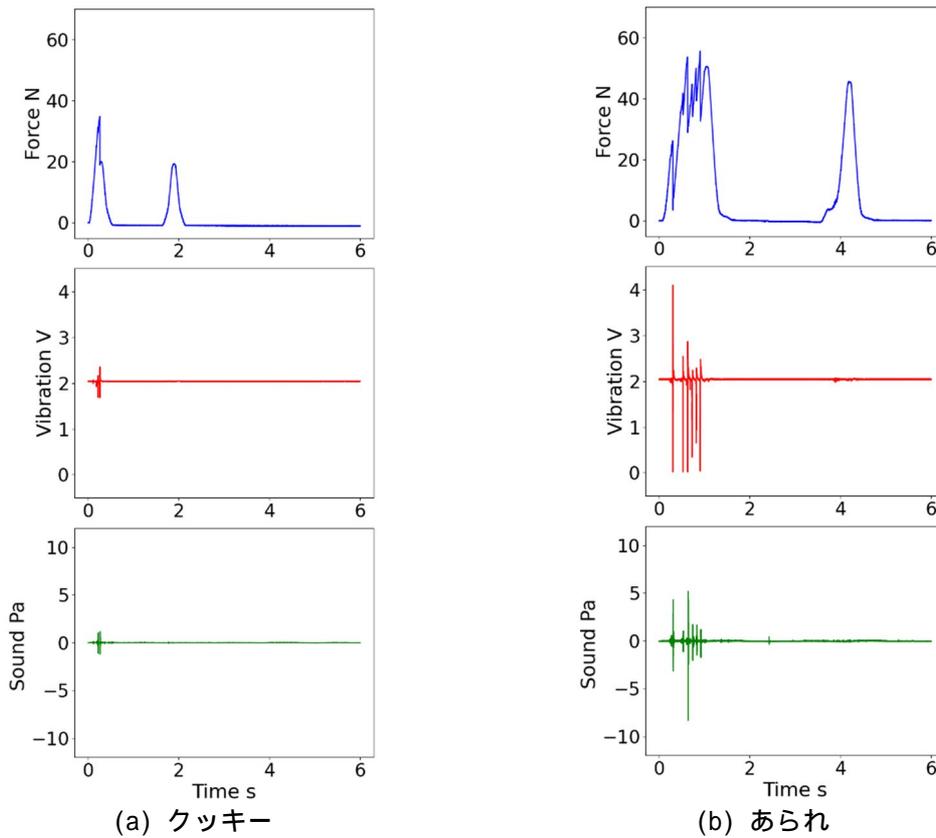


図3 計測システムによる計測例

データが食品の物理的な特性を反映することを確認した。

サブテーマ b)では、非線形回帰の1つであるガウス過程回帰モデルにより食感を推定する方法を構築した。モデルへの入力計測データから算出した特徴量である。力データからは硬さなどの6種類、振動データからはピーク数やオクターブバンドのスペクトルなど20種類、音データからはラウドネスの平均値やA特性のスペクトルなど36種類を特徴量とした。モデルの出力は官能評価値であり、定量的記述分析法によって記録した1から10までの強度で表す。官能評価はパネリスト10名で行い、年齢 23.2 ± 0.75 (平均 \pm 標準偏差) 男女比は9:1であった。8種類のスナック菓子 (S1: グラノーラ、S2: プレッツェル、S3: ポテトチップス、S4: おかき、S5: 芋けんぴ、S6: せんべい、S7: サブレ、S8: あられ) でサクサクとザクザクの食感を評価した結果を図4に示す。官能評価値はパネリスト全員の平均値であり、値の大きい方がその食感を強く感じたことを示す。計測実験は20回実施し推定値については平均値、その正負の標準偏差の範囲をエラーバーで表した。各食感ともに範囲内に官能評価値が含まれており、その官能評価値に近い平均推定値が得られた。以上のことから、提案した方法が食感の多感覚統合に有効であることを確認した。

サブテーマ c)について、自己回帰の項を入れた状態空間モデルによる支配的食感の推定を行った。状態空間モデルへの入力計測データから算出した硬さなどの9種類の特徴量、及び振動の最大ピーク数とピーク数の2種類の計11種類である。実験では食感センサで食品を10回連続

して圧縮し、その間 1 回ごとに合計 0.3ml の唾液を想定した水を加えた。官能評価では TDS 法によって 6 種類の食品に対して 8 種類の食感を評価した。図 5 にチーズスナックの結果を示す。大きい値から小さい値へ変化しているのがサクサクであり、逆に咀嚼が進むにつれて大きくなったのがべちゃべちゃである。赤い水平ラインは支配率の有意水準を表しており、提案したモデルが 7 つの食感で有意水準に対する高低を推定できていることを確認した。

多感覚統合によって食感を推定する方法は食感推定において新たなアプローチであり、特に食品科学の分野においてインパクトが高いと考えている。また、時間変化を伴う支配的食感についても挑戦的な試みであり、咀嚼の開始から嚥下までの過程を対象とする Oral processing の考え方に沿っている。いずれも食感を推定する新たな方法を提案しその有効性を検証できた。本研究では多感覚統合においてサクサクやカリカリなどの破碎に特徴のある食感を主に対象としたが、もちもちなどの粘性や粘着性なども日本では重要視される傾向がある。多様な食感に対して 1 つのモデルで表現するために提案する方法を拡張したい。食感は固形食品のおいしさを決定する必要な要素とされており、食品開発においても評価のニーズがある。本研究の成果を、食感の定量化のニーズをもつ企業への技術移転を進めたい。

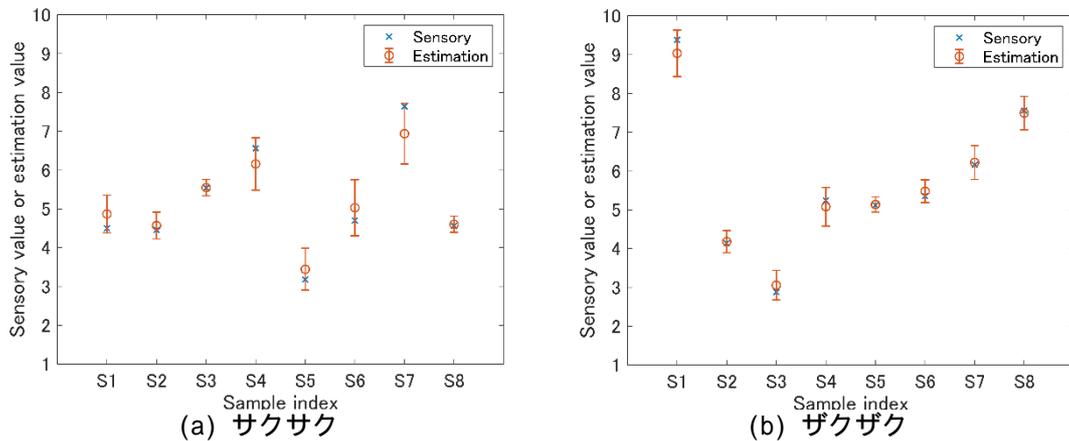
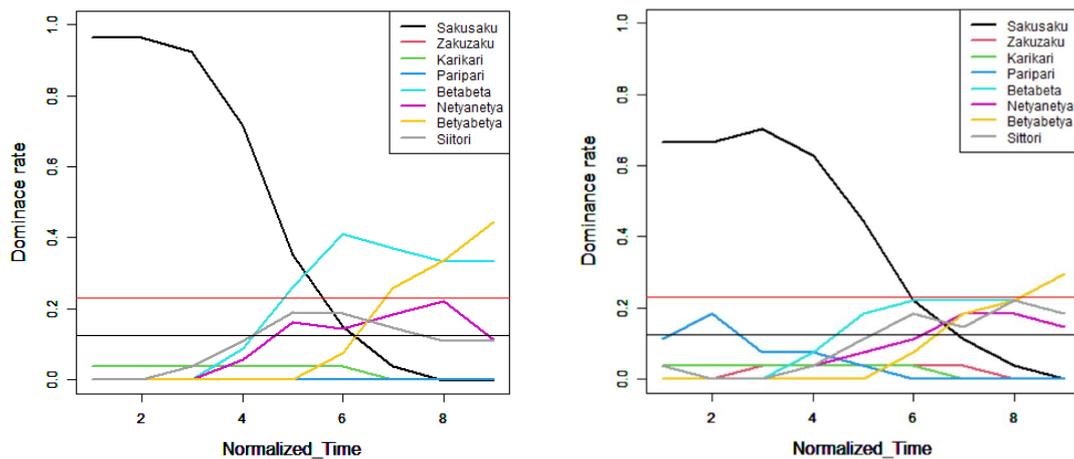


図 4 ガウス過程回帰による食感の推定結果と官能評価値との比較



(a) TDS 法による官能評価結果 (b) モデルによる推定結果

図 5 状態空間モデルによる推定結果と官能評価値との比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nishimura Ryoga, Nakamoto Hiroyuki, Kobayashi Futoshi	4. 巻 69
2. 論文標題 Texture estimation of snack foods using force, vibration, and sound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi	6. 最初と最後の頁 565 ~ 572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3136/nskkk.69.565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamoto Hiroyuki, Nagahata Yuya, Kobayashi Futoshi	4. 巻 16
2. 論文標題 Food Texture Measurement System Using Rod Type Actuator for Imitation of Human Mastication	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 421 ~ 426
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2022.p0421	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中本 裕之	4. 巻 227
2. 論文標題 ヒトの歯の構造と受容器の特性を模した食感センサ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 FFIジャーナル	6. 最初と最後の頁 115 ~ 120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34457/ffij.227.2_115	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamoto Hiroyuki, Yasuda Takeaki, Kobayashi Futoshi, Nagahata Yuya, Shimizu Rina, Kimura Ko	4. 巻 52
2. 論文標題 Sum of variance for quantifying the variation of multiple sequential data for the crispness evaluation of chicken nugget	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Texture Studies	6. 最初と最後の頁 470 ~ 479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jtxs.12612	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakamoto Hiroyuki, Nagahata Yuya, Kobayashi Futoshi	4. 巻 21
2. 論文標題 A Magnetic Food Texture Sensor and Comparison of the Measurement Data of Chicken Nuggets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3310 ~ 3310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21103310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Nishimura Ryoga, Nakamoto Hiroyuki, Kobayashi Futoshi
2. 発表標題 A Study of Snack Food Texture Estimation Based on Force, Vibration, and Sound Data in Fracture
3. 学会等名 Proceedings of 2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多田 雄毅, 中本 裕之, 平田 一郎, 小林 太
2. 発表標題 3Dフードプリンタによる造形物と食感に係る機械的性質の比較
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水 智美, 中本 裕之, 小林 太
2. 発表標題 荷重及び振動データを用いた多様な食感の定量化方法
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水 智美, 西村 亮我, 中本 裕之, 小林 太
2. 発表標題 サポートベクトル回帰による食品破断時の計測データを用いた食感推定
3. 学会等名 第30回インテリジェント・システム・シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西村 亮我, 中本 裕之, 小林太
2. 発表標題 多感覚の構成の違いによる食感の官能評価とその推定
3. 学会等名 第23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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水 智美, 中本 裕之, 小林 太
2. 発表標題 食品圧縮時の計測データを用いた多様な食感の定量化方法
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 多田 雄毅, 中本 裕之, 平田 一郎, 小林 太
2. 発表標題 3Dフードプリンタによる造形物と食品の食感比較
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 亮我, 中本 裕之, 長畑 雄也, 清水 里奈, 小林太
2. 発表標題 食品圧縮時の荷重, 振動及び音を用いた食感評価
3. 学会等名 ンテリジェント・システム・シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村 亮我, 中本 裕之, 長畑 雄也, 清水 里奈, 小林太
2. 発表標題 ガウス過程回帰を用いた荷重、振動、音によるチキンナゲットの食感評価
3. 学会等名 日本食品科学工学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楠見 健人, 中本 裕之, 小林 太, 長畑 雄也
2. 発表標題 磁気式食感センサの耐久性向上とレンジ及び分解能の評価
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 土井 陽貴, 中本 裕之, 小林 太, 長畑 雄也, 平田 一郎
2. 発表標題 ベイズ推定を用いた荷重・振動データにもとづく食感の推定
3. 学会等名 第22回日本感性工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 楠見 健人, 中本 裕之, 小林 太, 長畑 雄也
2. 発表標題 磁気式食感センサの改良と基本特性の評価
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentou Kusumi, Hiroyuki Nakamoto, Futoshi Kobayashi, Yuya Nagahata
2. 発表標題 Development of Magnetic Food Texture Sensor with Spring and Sliding Mechanism
3. 学会等名 IEEE SENSORS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 監修：都甲潔, 分担執筆：中本裕之	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 435
3. 書名 おいしさの科学とフードテック最前線	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 食感推定方法	発明者 中本裕之、長畑雄也 ほか	権利者 神戸大学, J-オ イルミルズ
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-137070	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

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

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------