

令和 3 年 5 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06263

研究課題名（和文）咀嚼圧力分布解析に基づく力学的・幾何学的テクスチャー推定システムの構築

研究課題名（英文）Development of Mechanical and Geometrical Texture Sensing System Based on Mastication Pressure Distribution Analysis

研究代表者

東森 充 (Higashimori, Mitsuru)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30346522

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、ロボットシステムによる食品テクスチャー（食感）推定手法を提案した。ヒトの口腔内を模擬した咀嚼ロボットシミュレータを開発し、人工咀嚼過程で計測した咬合圧および舌圧分布を時系列画像フレーム群として扱い、畳み込みニューラルネットワークを用いてテクスチャー官能評価値を推定する手法を開発した。市販食品を用いた検証実験を実施し、ヒトを上回る精度でテクスチャーを推定できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、柔軟対象物の変形から破壊までの一連の物理現象を取り扱うマニピュレーション・センシング問題について取り扱い、人工咀嚼過程の咬合力と舌圧を画像情報として処理し、深層学習を利用することで多様なテクスチャー（食感）の推定が可能なることを明らかにした。本研究の成果は、新しい食品評価技術の確立およびヒトの官能評価処理メカニズムの解明に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：This work proposed a new food texture estimation method by using a robot system. By imitating human's oral mechanism, a robotic mastication simulator was developed. Biting and tongue pressure distribution measured during mastication was processed as a series of image frames. Using a convolutional neural network, the value of human sensory evaluation of texture was estimated. Through experimental validation, it was shown that the proposed method has a potential ability of estimating texture with higher accuracy than that of human.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス，食品工学

キーワード：咀嚼ロボット 食品テクスチャー 圧力分布解析 深層学習

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットによるマニピュレーション・センシング問題では、操作対象として工業部品などを想定した剛体を出発点とするのが一般的である。一方、食品は粘弾性を有しており、外力を受けて変形し、さらには破壊現象を起こす。ヒトは、食品を咀嚼し、食塊を形成していく過程において、図1(a)に示すように、歯から得られる反力(咬合力)のほかに舌から得られる圧力分布(舌圧分布)に基づいてテクスチャー(食感)を評価している。食品の研究・開発現場において、テクスチャーデータを高精度かつ大量に取得したいという要望は強い。しかしながら、従来の機器を用いたテクスチャー評価手法では、ヒトの歯の咬断機能に対応した手法の研究が中心となっていた。一方で、研究代表者らは、食品を圧縮・破断する過程の2次元圧力分布の時間応答に注目してきた。これまで見逃されていた圧縮・破断過程の力学的・幾何学的情報を取得し、適切な情報処理モデルを構築すれば、ヒトが舌上で感知する繊細な力学的・幾何学的テクスチャーを推定できるのではないか、という着想が本研究の出発点となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、柔軟対象物の変形から破壊までの一連の物理現象を取り扱うマニピュレーション・センシング問題について議論する。図1(b)に示すように、咀嚼ロボットシミュレータによる人工咀嚼で獲得した時空間力覚情報に基づき、食品の力学的・幾何学的テクスチャー(食感)を推定する手法を確立する。はじめに、ヒトの歯および舌の特性を模倣した咀嚼ロボットシミュレータを開発し、従来の歯・食品のみでなく、舌・食品といった柔軟物同士の力学的および幾何学的相互作用を介した圧縮・破断操作を人工的に再現する。この過程における食品状態の変化を圧力分布測定によって捕らえ、その特徴からヒトが食した際に感知するテクスチャーを推定する数理モデルを深層学習によって構築する。最終的に、実食品を用いたテクスチャー推定実験を行い、提案手法の有効性を定量的に明らかにする。本研究は、新しい食品評価技術確立およびヒトの官能評価処理メカニズム解明に貢献する、機械・情報・生体工学と食品科学を融合させた学際的研究である。

### 3. 研究の方法

以下の手順により、テクスチャー推定システムを構築し、実験により有効性を確認する。

(1) 官能評価値の取得：図2(c)に示すように、教師データとして、複数種類の食品について、テクスチャー官能評価値を準備しておく。官能評価値は実際にヒトが試食を行うことによる官能試験により取得する。官能評価値 $n_i$ は、テクスチャー評価項目 $i$ (例えば、 $i = 1$ : “サクサク”,  $i = 2$ : “ホロホロ”, など)ごとに設定する。

(2) 人工咀嚼による咬合圧・舌圧分布測定：図2(a)に示すように、ヒトの口腔部を模して設計された、歯・舌両有型咀嚼ロボットを用いて食品の圧縮・破断試験を行う。この間の咬合圧および舌圧分布を取得し、時系列データ $P(x, y, t)$ として保存する。ただし、 $(x, y)$ は圧力検出位置を示し、各歯状ボタン領域における平均圧力を咬合圧とした。

(3) テクスチャー推定モデルの構築：図2(b)に示すように、咬合圧および舌圧分布の時系列データを時系列画像フレーム群として扱う。この中から複数フレームを選出し、水平方向に結合することで畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network, 以下、CNN)への入力画像を作成する。入力画像を学習用とテスト用に分け、学習用の入力画像とそれに対応

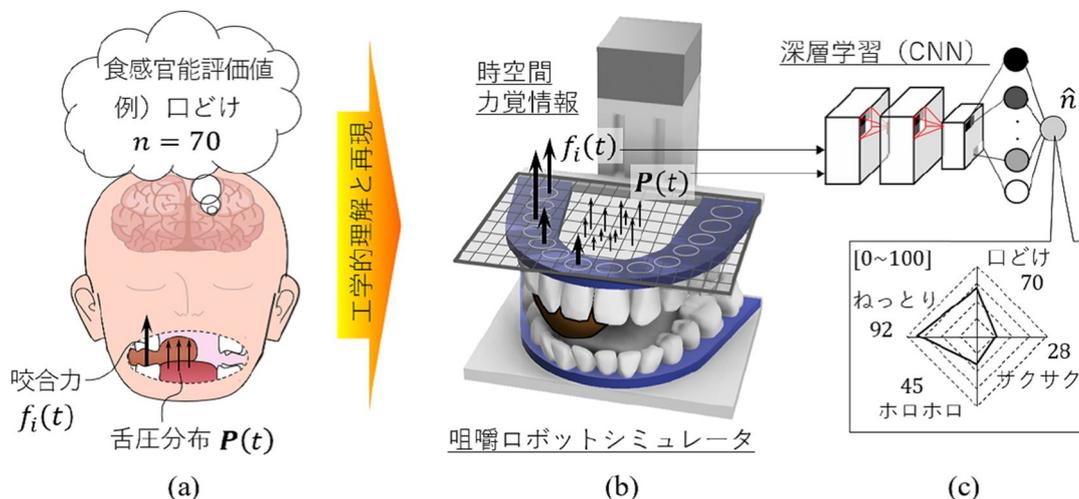


図1 咀嚼ロボットシミュレータを用いたテクスチャー推定のコンセプト

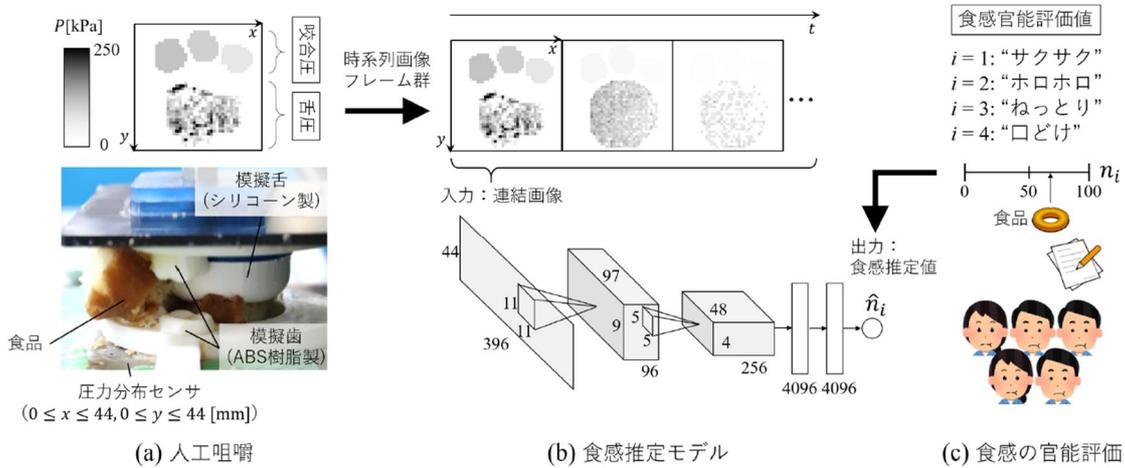


図2 提案システムの全容

するテクスチャー官能評価値 $n_i$ を教師データとして学習を行い、入力画像に対して推定値 $\hat{n}_i$ を出力とするCNNモデルを構築する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験試料と官能評価値

今回、6種類の市販ドーナツ（オールドファッション）A～Fを試験食品として用いた。これらに対して、5人の試験員が官能評価試験により、4つのテクスチャー評価項目（ $i = 1$ : “サクサク”， $i = 2$ : “ホロホロ”， $i = 3$ : “ねっとり”， $i = 4$ : “口どけ”）について、対象テクスチャーの強さの度合いを0～100の整数値で評価し、その平均値を官能評価値 $n_i$ とした。

##### (2) 人工咀嚼による咬合圧・舌圧分布測定

本実験では、咀嚼中の食塊状態の変遷を再現するために、ドーナツA～Fそれぞれについて、ヒトが0, 15, 30回咀嚼動作を行った状態（それぞれ、食塊状態I, II, III）を疑似的に再現した人工食塊を作製し、試験食品として用いた。図2(a)に示すように、土台側に圧力分布センサ（ニッタ株式会社製：空間分解能1 [mm]，時間分解能10 [ms]，圧力分解能2 [kPa]，測定範囲44 [mm] × 44 [mm]）と3本のABS樹脂製下歯，上方の可動プレート側に3本の上歯とシリコン製模擬舌を設置した歯・舌両有型咀嚼ロボットを用いて、人工咀嚼を行った。可動プレートは、PCおよびリニアアクチュエータによって制御され、周波数1[Hz]で10秒間の上下運動を行い、試験食品の圧縮・破断を行う。この間の咬合圧，舌圧分布データ $P(x, y, t)$ を取得する。

##### (3) テクスチャー推定モデルの構築

時刻 $t$ における咬合圧および舌圧分布データ $P(x, y, t)$ を $x-y$ 平面について全域で積分し、全体反力 $F(t)$ を算出する。10回の上下運動に対応した10回の反力ピークのうち、1, 2, 10回目の反力ピークを、それぞれ、 $t_1, t_2, t_3$ とする。これら反力ピークにおける $P(x, y, t)$ を1枚の圧力分布画像として取り扱い、食塊状態I～IIIのそれぞれについて3枚ずつ、計9枚の圧力分布画像を取得する。これらを水平方向に連結することで、図3(a)に示すように、1枚の画像を作成する。この画像は、咀嚼過程の時空間力覚情報を凝縮したものと位置付けられ、これをCNNへの入力画像とする。参考として、図3(b)に6種類のドーナツA～Fの、図3(b)に6種類のドーナツA～Fの“口どけ”官能評価値とともに示す。“口どけ”官能評価値の低いDとEでは、食塊状態IIIの $t_2, t_3$ においても舌圧が残っている。このことから、咀嚼が進んでも食塊が広がらず、まとまった状態で残っているこ

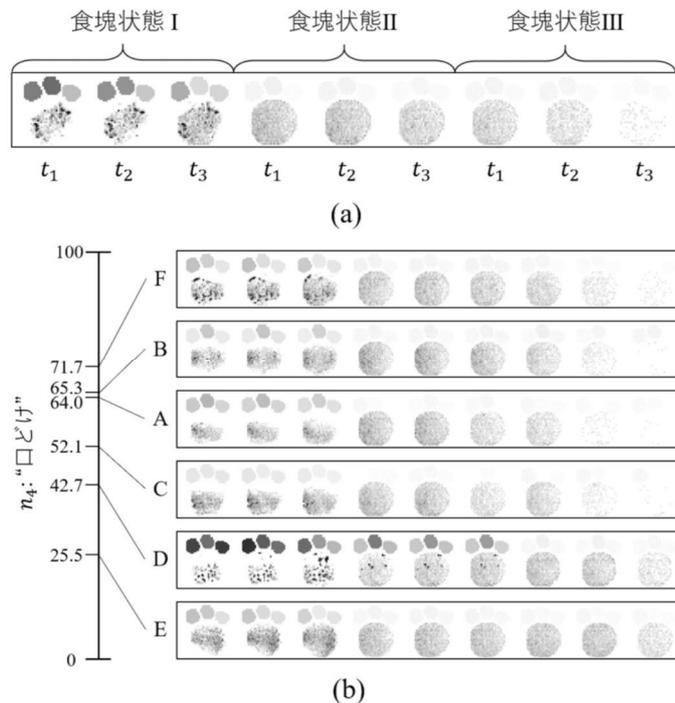


図3 入力画像（咀嚼過程の時空間力覚情報）

とが推測できる．F, B, AおよびCにおいては、大きな違いが見られないが、“口どけ”の高いものほど、食塊状態Iにおける反力が大きいことが推測できる．しかしながら、BおよびCをAと比較すると、どちらも食塊状態Iにおける咬合圧が低く、舌圧感知範囲が広いという共通点があるにもかかわらず、BとAの官能評価値の差が+1.3、CとAの差が-11.9であり、他の要因の存在が示唆されている．このように、入力画像と官能評価値との関係は、多くの要因が複雑に絡み合って形成されており、推定モデルの構築にあたって、ヒトが適切な特徴量を定義することは容易ではない．したがって、多様なテキストチャーの推定に向け、特徴量を学習によって獲得するCNNの有用性が期待できる．

今回、A～Fの各種類15個ずつ、計90個のデータを取得した．このうち1個のデータをモデル作成に使用しないテストデータとして取り除き、残りの89個のデータに対して、舌圧部の回転操作（0°、90°、180°、270°）および反転操作を行ってデータ数を712個に増やしたものを訓練データとして用いた．平均二乗誤差を推定誤差とし、訓練データを用いて100エポックの学習を行い、CNNモデルを構築し、テストデータの入力画像からテキストチャー官能評価値の推定値 $\hat{n}_i$ を算出した．CNNは図2(b)の構造を用いた．Leave-one-out交差検証を行い、推定精度を確認した．

#### (4) 推定結果

図4(a)に、学習における推定誤差の変化を示す．横軸はエポック、縦軸は推定誤差の90回の交差検証における平均値を1エポック目の値を基準に正規化した値を示している．すべてのテキストチャーの訓練・テスト両データについて、学習が進むにつれ、推定誤差が減少していることが確認できる．図4(b)に、官能評価値

$n_i$ と推定値 $\hat{n}_i$ との関係を示す．決定係数 ( $R^2$ ) に着目すると、“口どけ” (図4(b-4)) において、 $R^2 = 0.67$ と高い精度で推定できている．このことは、テキストチャーを適切に推定可能であることを示唆している．二乗平均平方根誤差 ( $RMSE$ ) に着目すると、“サクサク”と“ねっとり”においては $RMSE$ 値が大きく、“ホロホロ”においては $RMSE$ 値が小さい．誤差の原因として、測定時に食塊が設置された位置などによる測定誤差が考えられる．測定誤差は入力画像の各食塊状態、歯状ボタンなどの一部の領域に色の濃淡として表れるが、 $RMSE$ 値がテキストチャーによって大きく異なる点から、CNNは各テキストチャーに応じて異なる領域に着目して推定を行っていると推測できる．CNNを用いた手法の妥当性を確認するために、同じ実験データに対する特徴量定義手法による推定実験も行った．図5に、CNNおよび特徴量定義手法における4種類のテキストチャー評価項目の $R^2$ 値を示す．CNNの $R^2$ 値は、“ホロホロ”においては特徴量定義手法の $R^2$ 値を下回っているが、“サクサク”と“ねっとり”においては上回っている．4種類のテキストチャーの平均値は、両手法共に $\bar{R}^2 = 0.62$ である．以上の結果は、提案手法により、特徴量の事前定義なしでテキストチャーを適切に推定可能な可能性を示唆している．また、ヒトのテキストチャー推定精度として、8名の官能評価値から決定係数を算出したところ、 $R^2 = 0.47$ であった．このことから、提案手法はヒトを上回る精度でテキストチャーが推定可能なことが示唆された．

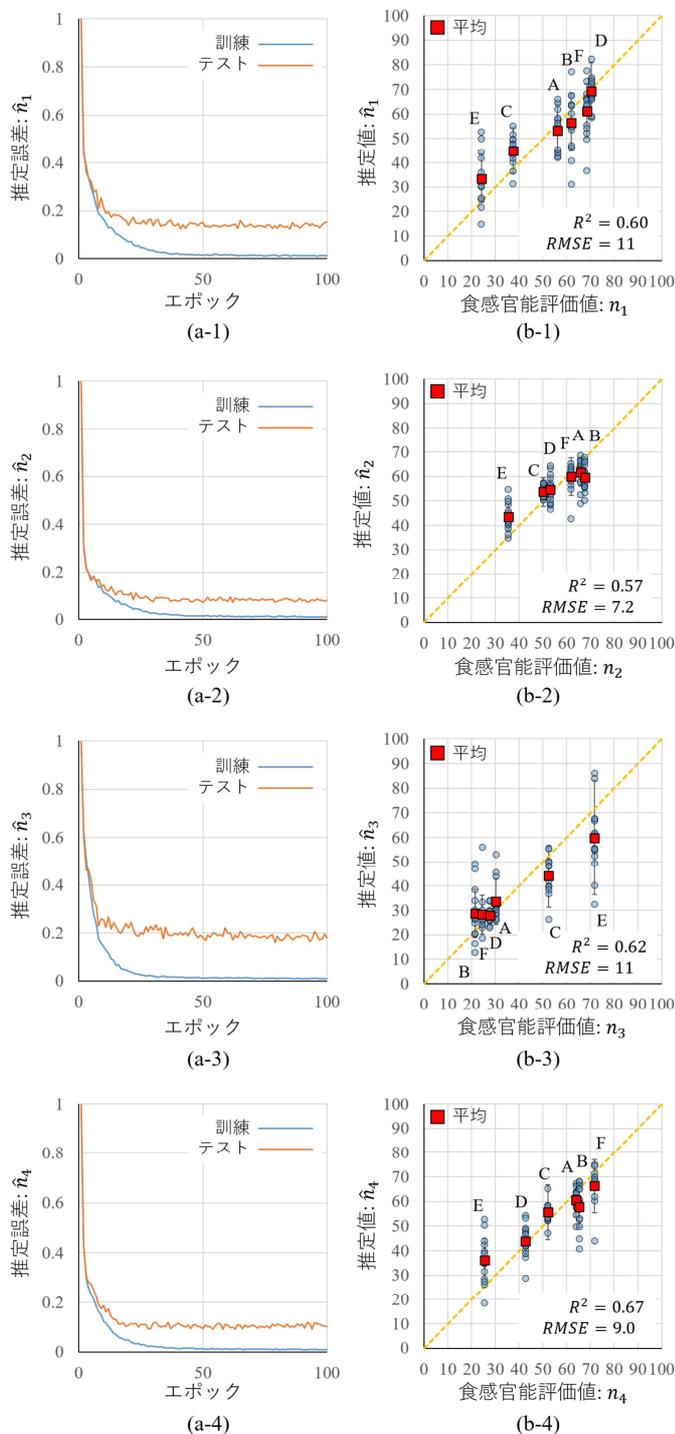


図4 推定実験の結果

### (5) まとめと今後の展望

本研究では、咀嚼ロボットシミュレータを用いたテクスチャー推定システムを開発した。咬合圧および舌圧分布データを時系列画像フレーム群として扱い、CNNを用いてテクスチャー官能評価値を推定する手法を提案した。本手法のように、歯・舌両感覚を考慮し、深層学習と組み合わせたテクスチャーシステムは、国内外いずれにも見当たらない。今後の展望として、推定精度向上に向けて、入力画像構成方法およびCNN構造の検討を進めることが重要である。

さらに、CNNの判断根拠の可視化技術である Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) 等を導入し、「咀嚼過程における“いつ、どこ”の力覚情報が各種テクスチャーと深く関与するか」について解析し、そもそものヒトのテクスチャー評価メカニズムの解明へとチャレンジする予定である。

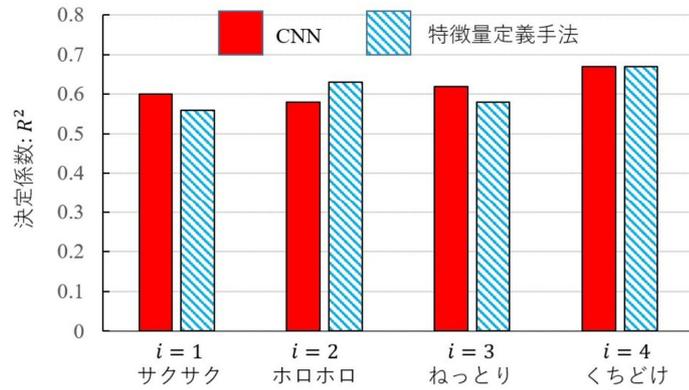


図5 CNNと特微量定義手法との比較.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shibata Akihide, Takahashi Ryoma, Nagahata Yuya, Kimura Kou, Shimizu Rina, Hotta Mariko, Inoue Masami, Higashimori Mitsuru	4. 巻 31
2. 論文標題 Food Texture Estimation Using Robotic Mastication Simulator Equipped with Teeth and Tongue	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2367 ~ 2367
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2019.2353	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 M. Higashimori, A. Shibata, A. Ikegami, M. Nakauma, K. Hori, and T. Ono	4. 巻 32
2. 論文標題 Half-Wave Lissajous Curve Analysis of Tongue Pressure while Eating Gel-like Food	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. of Biorheology	6. 最初と最後の頁 39-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.17106/jbr.32.39	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 Akihide Shibata, Akira Ikegami, Makoto Nakauma and Mitsuru Higashimori	4. 巻 vol. 6, issue 4, 37
2. 論文標題 Convolutional Neural Network based Estimation of Gel-like Food Texture by a Robotic Sensing System	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Robotics	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/robotics6040037	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 4件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Nishi, A. Shibata, Y. Nagahata, K. Kimura, M. Inoue, and M. Higashimori
2. 発表標題 Mastication Class Estimation for Food Bolus by Using Convolutional Neural Network
3. 学会等名 2019 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西慶一郎, 柴田暁秀, 長畑雄也, 木村功, 井上賀美, 東森充
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークを用いた食塊の被咀嚼回数推定
3. 学会等名 日本食品科学工学会第66回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田暁秀, 西慶一郎, 高橋龍馬, 長畑雄也, 木村功, 井上賀美, 東森充
2. 発表標題 咀嚼ロボットシミュレータにおける食塊形成の時空間解析
3. 学会等名 日本食品科学工学会第66回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋龍馬, 柴田暁秀, 西慶一郎, 長畑雄也, 木村巧, 清水里奈, 堀田真理子, 井上賀美, 東森充
2. 発表標題 歯・舌両有型咀嚼ロボットシミュレータを用いたテクスチャーセンシング
3. 学会等名 日本食品科学工学会第66回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東森充
2. 発表標題 ロボットシミュレータを用いた食品のテクスチャー評価
3. 学会等名 第2回食感の適切な評価手法を求めて～嚥下困難者対応食品の最新の研究動向と現場での展開（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東森 充
2. 発表標題 咀嚼・嚥下機能評価における画像解析の応用～工学サイドから
3. 学会等名 ： 第25回日本摂食嚥下リハビリテーション学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東森 充
2. 発表標題 ロボットシミュレータを用いた食品のテクスチャ - 評価
3. 学会等名 FOOMA JAPAN 日本食品工学会フォーラム2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東森 充
2. 発表標題 咀嚼シミュレータによる食品テクスチャー評価
3. 学会等名 平成30年度第3回新潟県食品技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西慶一郎，柴田暁秀，池上聡，中馬 誠，東森 充
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークを用いたゲル状食品のテクスチャ推定システム
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田暁秀, 白石勝人, 池上聡, 中馬 誠, 東森 充
2. 発表標題 画像テクスチャ解析を用いた嚙下音からの炭酸圧推定
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田暁秀, 池上聡, 中馬誠, 東森充
2. 発表標題 量み込みニューラルネットワークを用いた食品テクスチャ推定
3. 学会等名 第18回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(SI2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西慶一郎, 柴田暁秀, 池上聡, 中馬誠, 東森充
2. 発表標題 量み込みニューラルネットワークを用いたゲル状食品のテクスチャ推定システム
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田暁秀, 池上聡, 中馬誠, 東森充
2. 発表標題 画像テクスチャ解析を用いた嚙下音からの炭酸圧推定
3. 学会等名 第41回日本バイオレオロジー学会年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計5件

産業財産権の名称 食感評価システム及び食感評価方法	発明者 東森充ら（全8名）	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-021923	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 食塊形成装置，食塊の形成方法	発明者 東森充ら（全10名）	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-019597	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 食塊形成装置，咀嚼状態評価方法，食感評価方法及び食塊の製造方法	発明者 東森充ら（全8名）	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-151113	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 機械学習システム，食感評価モデル，食感評価装置，機械学習方法および食感評価方法	発明者 中馬誠，池上聡，東森充	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-101580	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 食感評価システム及び食感評価方法	発明者 東森充ら（全7名），	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-022812	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

#### 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
---------	---------