

◆◆◆ 解説記事 ◆◆◆

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

東 森 充

大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻

1. はじめに

ロボット研究者から見て、食品はチャレンジングかつ魅力的な操作対象といえる。グリッパやロボットハンドによるマニピュレーション問題 [1] を考える場合、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。これは、どんなに強い外力が与えられても操作対象が変形しないという仮定の利便さ、すなわち、力学的・幾何学的解析の見通しの良さに起因している。一方、食品のような柔軟物体は粘弾性・レオロジー性を有しており、操作中に外力を受けて変形し、さらには破壊現象が起こる。このような物理現象の複雑さが操作対象としての食品に興味深さをもたらしており、講演者らの食品マニピュレーション・センシングに関する研究のモチベーションとなっている。本講演では、咀嚼（舌での押しつぶし）ロボットシミュレータを用いた高齢者食のテクスチャー評価システムを中心に、これまでの研究・開発状況を紹介する。

2. 高齢者食評価への取り組み

咀嚼・嚥下機能が低下した高齢者向けの食品（やわらか食、きざみ食、ゲル状食品、ペースト状食品、など）が開発されている。とりわけ高齢者にとっては、食事は単に栄養分を摂るためだけの行為ではなく、「美味しく楽しむ」という生活に彩りを与える重要なイベントの1つに位置付けられる。すなわち、高齢者食においては、Quality of Life の観点から、咀嚼・嚥下の安全性と美味しさが高水準で両立することが望まれる [2]。美味しさは、食品の化学的性質＝味や香りのみでなく、咀嚼・嚥下過程における物理的性質＝テクスチャー（食

感：舌触り、口溶け、喉越し、など）にも強く依存する [3]。高齢者食の研究・開発現場においてテクスチャーの客観的かつ定量的な評価データの獲得が切望される一方で、ヒトが実際に試食してアンケート形式でテクスチャー評価を行う官能試験では時間、コスト、信頼性の問題が重大な懸案事項となっている。従来、機器を用いた物理測定によってテクスチャーを評価する手法が開発されている [4] が、圧縮試験により食品を圧縮・破断する際の反力を計測し、その最大値や範囲から力学的テクスチャー（かたさ、もろさ、など）を評価するものが一般的である。これに対して講演者らは、舌で押しつぶして喫食する高齢者向けゲル状食品を対象として取り上げ、力学的テクスチャーのみでなく、ヒトが舌上で感知する繊細な幾何学的テクスチャー（滑らかさ、ざらつき、など）についても評価可能な新しいテクスチャー評価技術の開発に取り組んでいる。

3. 圧力分布解析に基づくテクスチャー評価システム

図1は、講演者らが提案したテクスチャー評価システム [5] の概要図を示している。はじめに、素材と配合の異なる複数種のモデリング用ゲル状食品を用意し、図1(a)に示すように、各ゲルのざらざら感などのテクスチャー官能評価値 ($0 \leq n \leq 100$) を取得しておく。この官能評価値データは、推定モデル作成時に教師データとして用いられる。次に、図1(b)下段に示すように、圧縮プレート、土台、圧力分布センサ（それぞれヒトの口蓋、舌、触覚受容器に対応）から構成される簡易的な咀嚼ロボットにより、ゲル状食品の押しつぶし動作をシミュレーションする。このとき、食品を圧縮・破断する過程の一連の圧力分布データを測定し、力学的情報のみでなく、これまで見落とされていたゲル状食品が舌上で破断していく際の繊細な幾何学的情報を獲得する。図2は、2種類の素材の異なるゲル状食品を圧縮・破断していった際の圧力分布画像の例を示している。両者の変遷の様子は目視レベルでも明快に異なり、ゲル破断片の大きさや広がり方など幾何学的な相違を検知できていることがわかる。次に、図1(b)上段に示すように、圧力分布データとテクスチャー官能評価値との関係を表す数値モデルを作成する。まず、圧

著者略歴

東森 充（ひがしもり みつる）

大阪大学 大学院工学研究科機械工学専攻 教授

略歴：1998年 広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了，同年株式会社東芝入社，2002年広島大学大学院工学研究科助手，2006年博士（工学）取得，同年大阪大学大学院工学研究科助手，2008年同准教授，2019年同教授，現在に至る。

E-mail: higashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

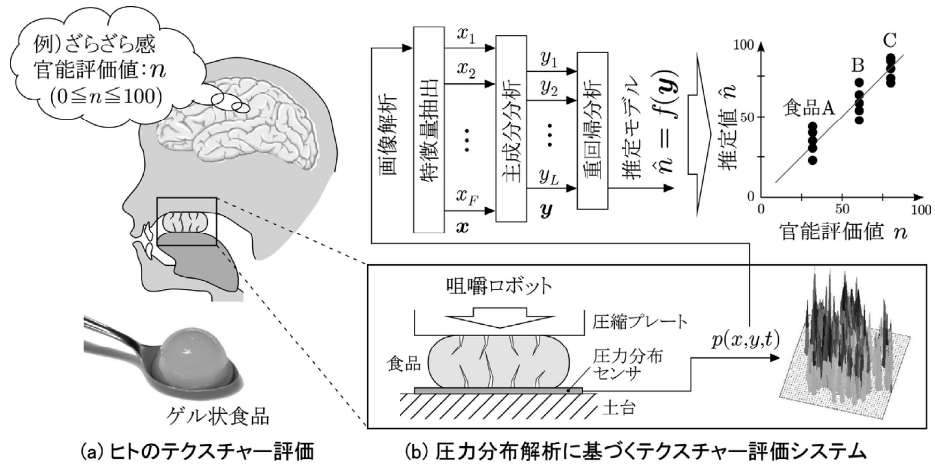


図1 テクスチャー評価手法の概要

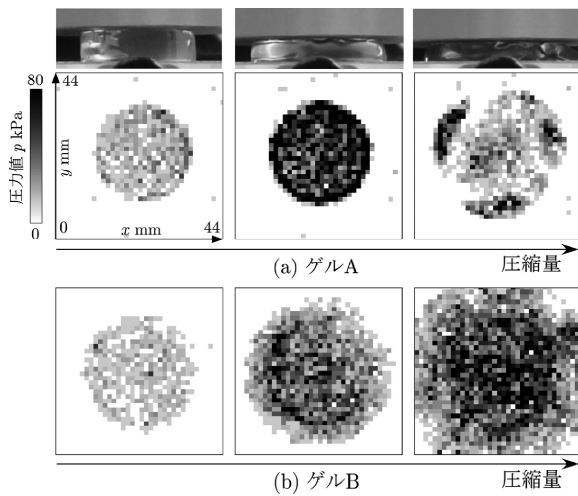


図2 ゲル圧縮破断中の圧力分布

力分布データに画像テクスチャー解析手法を適用して特徴量を抽出する。具体的には、空間濃度レベル依存法 [6] を用い、測定平面内での圧力値の存在頻度やパターンに関する統計的特徴量を算出する。続いて、特徴量ベクトルに主成分分析を施し、冗長な情報を除去することで次元が圧縮された主成分ベクトルを算出する。最後に、主成分ベクトルを説明変数、テクスチャー官能評価値を目的変数とした重回帰分析を行い、テクスチャー官能評価値の推定モデルを作成する (推定値: \hat{n})。図3に、23種類×6個のモデリング用ゲル状食品に対して、4つのテクスチャー評価項目(a)もちもち感(破断前, 柔らかく伸び, 舌を押し返す印象), (b)つるつる感(破断前, 表面の滑らかさ), (c)ねっとり感(破断後, 付着して押し広げにくい印象), (d)ざらざら感(破断後, 表面のざらつき)を推定した結果を示す。(a)と(c), (b)と(d)がそれぞれ機械的, 幾何学的テクスチャー

に該当する。各グラフにおいて、横軸はヒトのテクスチャー官能評価値であり、縦軸は提案システムによるテクスチャー推定値である。この結果は、機械的テクスチャーのみでなく、幾何学的テクスチャーについても高精度に推定できる可能性を示唆している (4項目の決定係数の平均値: $(\overline{R^2}) > 0.81$)。

以上のシステムをベースとし、ヒトの舌の弾性変形を考慮したテクスチャー評価システムの開発にも取り組んでいる [7]。実際のヒトの舌は柔軟性を有し、食品を咀嚼する際、柔軟物同士の力学的および幾何学的な相互作用を通じて圧縮・破断操作が行われる。このため、剛体のみで構成される機器測定環境と柔軟な舌を有するヒトの口腔内環境とでは、食品の破断状態(破断片の大きさ, 広がり方, など)が大きく異なってしまう恐れがある。したがって、機器測定によるテクスチャー評価結果をヒトの官能評価結果に近づけるためには、直感的に、両者の環境を近づけることが望ましい。以上の点を踏まえ、講演者らは、テクスチャー評価用のシリコン製弾性可変型模擬舌を開発している。この模擬舌は、ヒトの舌の弛緩状態から収縮状態までの弾性を再現可能である。咀嚼ロボット(図1(b)下段)の土台として模擬舌を導入し、模擬舌の弾性を適切に設定することで、テクスチャー推定精度が向上する可能性があることを明らかにしている。

4. おわりに

本講演では、高齢者向けゲル状食品を対象とした新しいテクスチャー評価システムについて紹介した。食品圧縮・破断中の圧力分布に基づくテクスチャー推定モデルを作成し、これまで評価が困難であった幾何学的テクスチャーを高精度に推定できる可能性を示した。紙幅の都合上割愛したが、テクスチャー評価自由度の

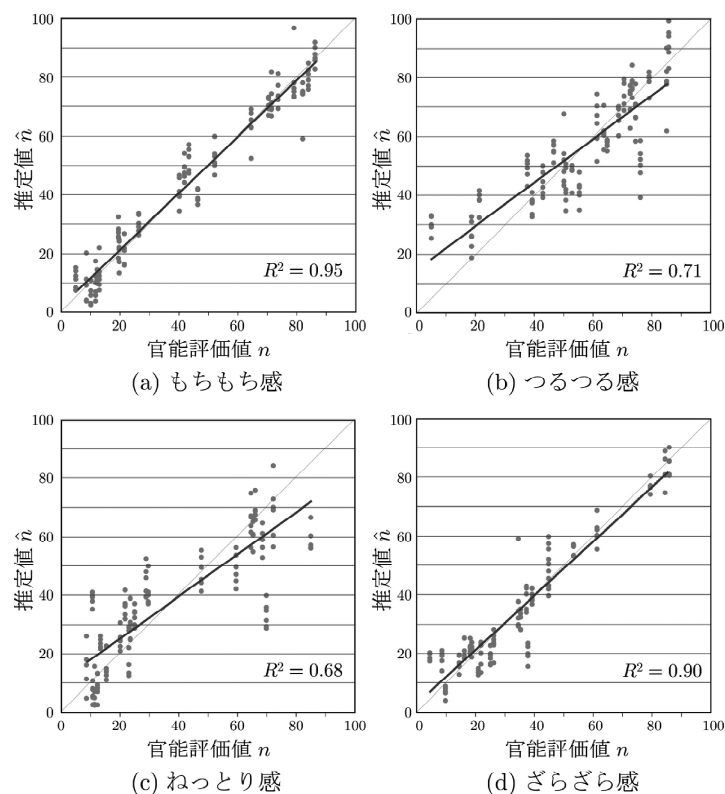


図3 テクスチャー推定結果

拡大に向けて、深層学習の活用 [8]、歯・舌両有型のシステムへの拡張 [9] にも取り組んでいる。ヒトの官能評価試験に代わるテクスチャー評価システムとして実用化を目指したい。

謝 辞

一連の研究を遂行するにあたり、三栄源エフ・エフ・アイ株式会社ならびに株式会社 J-オイルミルズの皆様から多大なるご協力を頂いた。心より感謝の意を表す。

References

- 1) K. Harada; “Manipulation Research -Trends of Research Related to Grasp Planning-” (in Japanese). J. Robotics Soc., Jpn., **31**, 320-325 (2013).
- 2) K. Nishinari; Texture and Rheology in Food and Health. Food Sci. Technol. Res., **15**, 99-106 (2009).
- 3) T. Funami; Next target for food hydrocolloid studies: Texture design of foods using hydrocolloid technology. Food Hydrocolloids, **25**, 1904-1914 (2011).
- 4) M. C. Bourne; “Food Texture and Viscosity: Concept and

Measurement” Academic Press, 2002.

- 5) T. Yamamoto, M. Higashimori, M. Nakauma, S. Nakao, A. Ikegami, S. Ishihara; Pressure Distribution-Based Texture Sensing by Using a Simple Artificial Mastication System. Proc. 36th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 864-869 (2014).
- 6) R. M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein; Textural Features for Image Classification. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC-3, 610-621 (1973).
- 7) A. Shibata, S. Ishihara, S. Nakao, A. Ikegami, M. Nakauma, M. Higashimori; “Food Texture Sensing by Using a Variable Elasticity Type Imitation Tongue” (in Japanese). J. Robotics Soc., Jpn., **34**, 631-639 (2016).
- 8) A. Shibata, A. Ikegami, M. Nakauma, M. Higashimori; Convolutional Neural Network based Estimation of Gel-like Food Texture by a Robotic Sensing System. Robotics, **6**, 37 (2017).
- 9) M. Higashimori, A. Shibata, R. Takahashi, Y. Nagahata, K. Kimura, R. Shimizu, M. Hotta, M. Inoue; “Texture Evaluation System and Texture Evaluation Method” (in Japanese). Japanese Patent Application 2019-022812.

「日本食品工学会フォーラム 2019 講演要旨より転載」