

ロボットマニピュレーションと「食べる」

大阪大学大学院工学研究科

機械工学専攻 知能機械システム学領域 教授 東森 充

1. はじめに

筆者は、2006年10月に機械工学専攻の助手として着任した。以来、一貫して、ロボティクス・メカトロニクスに関する研究に従事し、2019年4月に教授に昇任した。研究テーマの中心は、ロボットハンドを用いた対象物の把持と操りに関する研究であり、この分野は、ロボットマニピュレーションと称されている。具体的には、ロボット-対象物系の数理モデル構築、対象物の位置と姿勢の制御計画、そのためのロボットの作業動作生成、これらを実装するハードウェア、ソフトウェア、およびシステム全体の設計・開発を行ってきた。

2010年代に入り、ロボット研究者の間でソフトロボティクス、すなわち“柔らかい素材で造られたロボット”や“柔らかい対象物の操作”への関心が強まり、筆者も、柔軟対象物のマニピュレーション問題として、食品の運搬・盛付マニピュレーションや生体組織（臓器、細胞シート）のアクティブセンシングに携わっていた。このとき、“柔軟対象物はデリケートであり、大きな力や変位を与えてはいけない、過剰な塑性変形や破壊を招いてはいけない”という意識が常にあった。それは、剛体操作には現れない拘束条件であり、柔軟物操作に興味深さと同時に多大な「煩わしさ」をもたらしていた。そのような中、食品関連企業の方に、食品の圧縮破断試験の映像を見せて頂く機会があった。躊躇無く食品を破壊する様子に、また、それが「美味しさ」の評価のためと聞いて、胸がすく思いがした。前述の拘束条件から解放される問題を見出した瞬間であった。

2. ロボットマニピュレーションと「食べる」

以上のような経緯を経て、近年、筆者は、「食べる」側の視点で食品マニピュレーションを議論することに興味を持っている。図1(a)のように、ヒトの咀嚼は、食品に対する“硬い歯による咬断動作”と“柔らかい舌による圧縮動作”から構成され、両者を切り替えながら食品の変形→破断→再形成といった操作を行い、巧みに食塊（唾液と混ぜり合った食品破断片群の塊）を形成していく。また、このような複雑な動作と平行して、咬合力および舌圧分布といった時空間的に感知可能な力覚情報に基づき、「もちもち」「ざらざら」「ねっとり」「ロどけ」など、多様なテクスチャー（食感）を評価している。興味深いことに、ヒトは上記のような複雑なマニピュレーション・センシング技能を、幼少期からの訓練により獲得し（あるいは先天的に有し）、日常的にはほぼ無意識に遂行している。このようなヒトの咀嚼機能の工学的解析は、咀嚼困難者の増加が予測される超高齢化社会に向け、医学分野における摂食機能の力学的理解、ならびに、食品科学分野における介護食の食塊凝集性とテクスチャーの最適化に関連して切望されている。しかしながら、従来の人工咀嚼に関する研究は、食品に対する材料試験に留まるもの（筆者が映像で目撃したもの）、あるいは、ヒトの口腔部周辺の筋骨格や駆動原理の再現に注力したものに大別され、ヒトのような食塊形成マニピュレーション、さらには時々刻々と変化する食塊状態のセンシングにまで踏み込んだ研究は見当たらない。そこで、本研究室では、「ヒトの歯

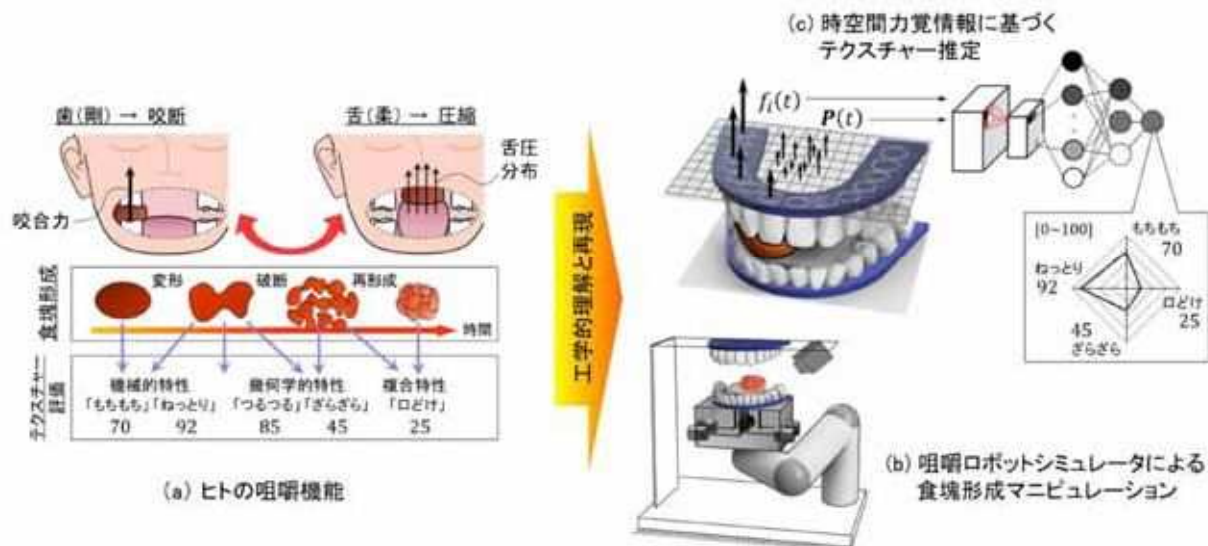


図1 ヒトの咀嚼機能の工学的理解と再現に向けた咀嚼ロボットシミュレーション

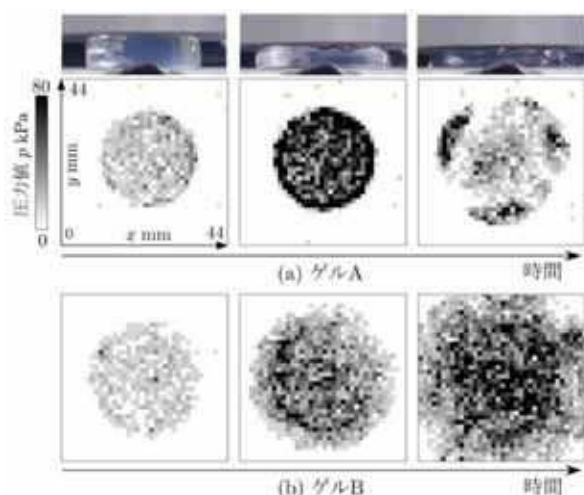


図2 人工咀嚼過程の圧力分布

＝剛体と舌＝柔軟体の複合動作による食塊形成マニピュレーション機能とテクスチャーセンシング機能は、どのようなロボット制御モデルで表現できるか？ それを実機システムで再現可能か？」という問題意識の下、咀嚼ロボットシミュレーション手法の確立を目指している。具体的には、咀嚼のための歯・舌運動特性の解明とモデル化、歯舌両有型咀嚼ロボットシミュレータによる食塊形成マニピュレーションの実現(図1(b))、時空間力覚情報に基づくテクスチャー推定モデルの構築(図1(c))に取り組んでいる。

3. 高齢者食のテクスチャー評価システム

本節では、咀嚼シミュレータ研究の先駆けとして開発した高齢者食のテクスチャー評価システムについて紹介する。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。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。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＝テクスチャーにも強く依存する。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が、圧縮試験により食品破断過程の1軸反力を計測し、その最大値や範囲から機械的特性を評価するものが一般的であった。これに対して筆者らは、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、機械的のみでなく、ヒトが舌上で感知する繊細な幾何学的特性についても評価可能な新しいテクスチャー評価システムを開発した。このシステムでは、剛性可変機能を有するシリコン製人工舌、リニアアクチュエータで制御される圧縮用プレート、圧力分布センサ(それぞれヒトの舌、口蓋、触覚受容器に対応)から構成される簡易な咀嚼ロボットを用い、ゲル状食品の押しつぶし咀嚼をシミュレーションする。このとき、食品を圧縮・破断す

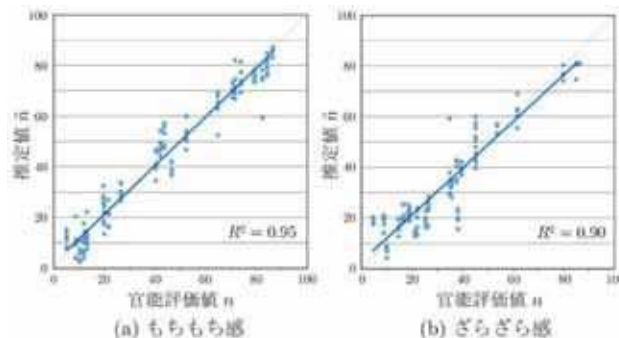


図3 テクスチャー推定結果

る過程の一連の圧力分布データを測定し、機械的情報のみでなく、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、二種類の素材の異なるゲル状食品を人工咀嚼した際の圧力分布の様子を示している。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。このような時空間力覚情報とヒトのテクスチャー官能評価値とを関連付ける数理モデルを構築するために深層学習を取り入れ、画像認識技術の分野において威力を発揮している畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を採用した。咀嚼過程の圧力分布データを時系列の画像フレーム群として扱い、一定サンプリング条件で抽出した画像フレームを連結し、1枚の大きな入力画像を作成する。この入力画像からヒトのテクスチャー官能評価値を出力するCNNモデルを作成した。図3に、23種類×6個のゲル状食品に対して、2つのテクスチャー評価項目(a)もちもち感(食品破断前、柔らかく伸び、舌を押し返す印象)、(b)ざらざら感(食品破断後、表面のざらつき)を推定した結果を示す。なお、(a)、(b)はそれぞれ機械的、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、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、機械的のみでなく、幾何学的テクスチャーをも高精度に推定できる可能性を示唆している。以上のシステムをベースとし、歯・舌両有型システムへの拡張と食塊形成マニピュレーション手法の開発に着手している。

4. おわりに

本稿では、筆者の研究室で推進している咀嚼ロボットシミュレータに関する研究について紹介した。超高齢化社会に向け、ヒトの咀嚼メカニズムの工学的解明と再現、介護用食品の最適化支援を目指し、チャレンジを続けていきたい。これまでに、多くの先生方、共同研究者の皆様、学生諸君からご指導、ご協力を頂いた。心より感謝の意を表す。

(広島大学 電気系 平成8年卒
情報工学専攻 10年修士
複雑システム工学専攻 18年博士)