

ジャミング転移による硬さおよび形状の提示が可能な食感提示システムの提案

笹川 真奈^{1,a)} 新島 有信^{1,b)} 青木 良輔^{1,c)} 渡部 智樹^{1,d)} 山田 智広^{1,e)}

受付日 2018年4月20日, 採録日 2018年11月7日

概要: 我々は, ジャミング転移を活用し, 口内に硬さおよび形状を提示することで食感を表現するシステムを提案する. ジャミング転移とは, 密度によって粉粒体が異なる振舞いをする物理現象のことである. ジャミング転移を活用することで, 様々な形状をした物体を口内に含めることができ, 加えて口内でその物体の硬さを自由に変えることができる. 本研究ではまず, 空気圧によりジャミング転移を発生させるプロトタイプを実装し, ユーザ実験を行った. ユーザ実験では, プロトタイプを用いて提示可能な硬さの範囲および分解能について調査した. 結果, 範囲としては, マシュマロ程度の柔らかさからシャーベット程度の硬さまで, 分解能としては, 最大4種類の異なる硬さを口内に提示が可能ということが確認できた.

キーワード: 食感, ジャミング転移, 咀嚼

A Food Texture Display with Hardness and Shape by Jamming

MANA SASAGAWA^{1,a)} ARINOBU NIJIMA^{1,b)} RYOSUKE AOKI^{1,c)}
TOMOKI WATANABE^{1,d)} TOMOHIRO YAMADA^{1,e)}

Received: April 20, 2018, Accepted: November 7, 2018

Abstract: We proposed a food texture display with hardness and shape by jamming. Jamming is a physical process which particles behave differently depending on the density. We implemented a prototype of a pneumatic jamming system. We confirmed the human perception regarding provided hardness, especially the range and the resolution, by using the prototype. As a result, the provided range of hardness was that between marshmallow softness and sherbet hardness, and the provided resolution of hardness was four.

Keywords: food texture, jamming, chewing

1. はじめに

食事はヒトが生きていくうえで重要な営みである. そして, ヒトは食事によって身体的な満足感と精神的な満足感を得ることから, 食体験を豊かにすることで Quality of Life (QoL) を向上させることができると考えられる.

近年では, パーチャルリアリティ技術をはじめとする情

報技術の発展にともない, テクノロジーによって食体験を豊かにする手法が提案されている. たとえば, ユーザが食べている食品の味を変化させる手法として, 電気刺激を舌 [9] や顎 [23] に流して味を変化させる手法や, Augmented Reality 技術を利用して視覚刺激を食品に重畳させることで視覚と味覚のクロスモーダル知覚を生起させて味を変化させる手法 [10], [13] があげられる. また, 食品の味だけでなく, 食感を変化させる手法も提案されている. たとえば, 咀嚼中の音に着目して, 食品の咀嚼時に, 加工した咀嚼音を重畳させることで食感を変化させる手法が提案されている [2], [17], [20]. これらの手法は, テクノロジーによって実際に食べている食品の性質が変化すると錯覚させることで食体験を向上させるというアプローチをとっているため,

¹ 日本電信電話株式会社 NTT サービスエボリューション研究所
NTT Service Evolution Laboratories, NTT Corporation,
Yokosuka, Kanagawa 239-0847, Japan

a) mana.sasagawa.ka@hco.ntt.co.jp

b) anijima@acm.org

c) yousuke.aoki.nz@hco.ntt.co.jp

d) tomoki.watanabe.cd@hco.ntt.co.jp

e) tomohiro.yamada.mr@hco.ntt.co.jp

食品摂取が必要であるという制約がある。したがって、アレルギーや糖尿病などが原因で食事制限をしているユーザは、食品摂取をとまなうこれらの手法を用いることができない場合がある。

一方で、食品摂取をとまなわない食体験の提供、すなわちバーチャルな食体験を提供することができれば、食事制限をしているユーザの QoL 向上につながると考えられる。バーチャルな食体験の提供を実現するために重要な技術の 1 つとして、バーチャルな食感提示技術があげられる。なぜならば、ヒトが食品の特性を知覚する際に、食感是最も重要な要素の 1 つとされているからである [14]。食品摂取をとまなわないバーチャルな食感提示技術に関する既存技術として、口にくわえたデバイスの力覚フィードバックによって硬さを提示する手法 [7] や電気刺激を咬筋に印加して収縮を起こすことで硬さを提示する手法 [11] が提案されている。

しかし、食感、食物のレオロジー的、構造的属性の総体であり、複数のパラメータによって構成されているため [15]、バーチャルな食体験の提供を目的とした食感提示技術としては、硬さの提示だけでは不十分であると考えられる。そこで本論文では、食感の構造的属性に関係するパラメータとして食品の形状に着目し、硬さと形状の両方を提示可能な食感提示システムを提案する。我々は、硬さと形状を提示する手法として、触覚ディスプレイ [16] やソフトロボティクス [1] やユーザインタフェース [3] で利用されているジャミング転移 [8] という物理現象に着目した。ジャミング転移とは、密度によって粉粒体が異なる振舞いをする物理現象のことであり、粉粒体の密度が大きいときは固体のように振る舞い、粉粒体の密度が小さいときは液体のように振る舞う現象を示す。たとえば、既存研究 [3] では、挽いたコーヒーの粉を粉粒体として袋に詰め、袋内の気圧を真空ポンプで制御することでジャミング転移を生起させており、袋が柔らかい状態で変形させた後に、袋の内部の空気を抜くことで硬くして形状を維持している。本論文では、既存研究 [3] で提案されている機構を参考に、ジャミング転移を利用した食感提示システムのプロトタイプを作成し、硬さと形状の両方を提示可能であることを確認するとともに、ユーザ実験やデモ展示を通じて硬さに関する定量的評価および定性的評価を実施した。

本論文の貢献は以下のとおりである。

- ジャミング転移を利用して硬さと形状の両方を提示する食感提示システムの提案およびプロトタイプの実装をしたこと
- ユーザ実験やデモ展示を通じて、プロトタイプによって提示可能な硬さの範囲と分解能について、定量的評価および定性的評価を実施したこと

2. 関連研究

本章では、食感提示技術に関する研究とジャミング転移に関する研究について述べる。

2.1 食感提示技術に関する研究

食感提示技術は、実際の食品の食感を変化させる技術とバーチャルな食感を提示する技術に分けられる。実際の食品の食感を変化させる手法として、咀嚼運動に合わせて加工した咀嚼音を提示することで食品の新鮮さや分厚さが変化すると錯覚させる手法 [2], [17], [20] や食器の重心位置を制御することで食品の重量知覚を変化させ、それにより食感も変化すると錯覚させる手法 [6] があげられる。

一方で、食品摂取をとまなわずにバーチャルな食感を提示する手法として、機械的に力覚フィードバックを提示する手法 [7] と電気刺激を筋肉に提示して食感を知覚させる手法 [21] があげられる。Iwata らは、食品を噛んだときの力学的特性を測定する部分と、測定値に基づいて力覚フィードバックを提示する部分からなる食感呈示装置 (Food Simulator) を開発した [7]。力学的特性の測定部には圧力センサを利用し、力覚フィードバック提示部は 4 節リンクを DC モータで駆動する 1 自由度の構造となっている。実際の食品の咀嚼時の圧力変化を測定して再現することで、食品の硬さだけでなく、破断応力後の圧力波形や食品の変形の仕方のある程度再現することができる。新島らは、咀嚼のタイミングに合わせて電気刺激を咬筋に提示することにより、硬さと弾力性を提示するシステムを提案した [21]。電気刺激の電圧や提示時間を制御することで、複数種類の硬さや弾力性を提示することができる。Hashimoto らは、飲み物を飲んでいるときの吸引感覚をバーチャルに提示するストロー型の装置 (Straw-like User Interface) を開発した [4]。実際の吸引時のストロー内の圧力変化と音と振動情報を記録し、ストローに取り付けられた弁の開閉とスピーカによって吸引感覚を再現する。

このように、モータや電気刺激や空気圧を利用して食感の力覚的特性をバーチャルに提示するための手法が提案されているが、食品の形状を提示することはできていない。

2.2 ジャミング転移に関する研究

ジャミング転移とは、密度によって粉粒体が異なる振舞いをする物理現象のことであり [8]、この現象を利用することにより、硬さと形状を提示可能なインタフェースの研究が行われている。Follmer らは、ジャミング転移を利用したユーザインタフェースを提案した [3]。ジャミング転移を利用した硬さ提示により異なる触覚フィードバックを与えることが可能なタンジブルユーザインタフェースや、時計型やコントローラ型などに形状が変化する電話を、真空ポンプと負圧センサを組み合わせたシンプルな機構で実

現している。Brownらは、ロボットハンドにジャミング転移を利用することで、様々な形状の物体をセンサを使わずに把持する手法を提案した[1]。粉粒体が詰まった袋をロボットハンドの把持部とし、柔らかい状態で押し付けることで把持対象の物体の形状にフィットさせ、その後に空気を抜いて把持部を固定することで物体を持ち上げることができる。

このように、ジャミング転移を利用したインターフェースは、硬さと形状をシンプルな機構で提示できるという特徴があるが、食感提示システムへの応用可能性については検証されていない。

3. 提案手法

本章では、ジャミング転移を用いた食感提示装置に関するコンセプトおよびそのプロトタイプの実装について述べる。

3.1 コンセプト

我々は、ジャミング転移を用いて口に含む物体の硬さおよび形状を提示することで、食感を提示するシステムを提案する(図1)。口に含む物体として、粉粒体の入った柔軟性のある袋を使用する。本システムでは、袋内の気圧を真空ポンプによって制御することでジャミング転移を発生させ、硬さおよび形状を提示する。袋から空気を吸い出すと、袋内の気圧が低くなり、袋は硬くなる。また、袋に空気を入れると、袋内の気圧が高くなり、袋は柔らかくなる。これらの現象を用いて、本システムは任意の硬さを提示することができる。また、袋が柔らかい状態で形状を変え、その後に袋を硬い状態にすることで変形が維持されるため、本システムは任意の形状をも提示することができる。本システムを用いて硬さおよび形状を提示する手順を以下に示す。

- (1) 気圧が制御されていない状態の袋を任意の形状に変形させる。
- (2) 袋内の空気を真空ポンプで抜くことで硬い状態にし、変形を維持する。
- (3) 袋内の気圧を真空ポンプで調整することで、任意の硬さにする。
- (4) ユーザがその袋を咀嚼することにより、硬さと形状をユーザの口内に提示する。

3.2 プロトタイプの実装

我々は、気圧の制御によりジャミング転移を発生させる装置[3]を基にプロトタイプの実装を行った。本プロトタイプは図2に示すとおり、以下で構成される。(a) パーソナルコンピュータ (MacBookPro), (b) マイクロコンピュータ (Arduino/Genuino Uno), (c) 気圧センサ (model: MIS-2500-015V from Metrodyne Microsystem Corporation),

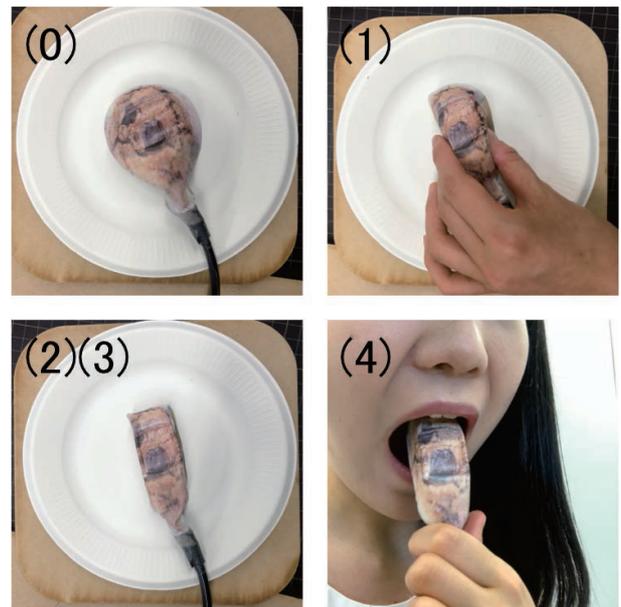


図1 本システムの使用手順。(0) 気圧が制御されていない状態の袋。(1) ユーザが袋を任意の形状に変形させる。(2), (3) 袋内の気圧を制御することで、変形および任意の硬さを維持する。(4) ユーザの口内に硬さと形状を提示する。本システムでは、風船の表面にクッキーの柄を印刷した袋を使用している。また、変形を維持するためには、 -5 kPa 以下の気圧が必要

Fig. 1 The procedure to use this system. (0) A bag with no pressure controlled. (1) A user deforms the bag to any shapes. (2), (3) It controls the inside pressure to maintain the deformation and the intended hardness. (4) The user chews the bag that simulates hardness and shape. In the picture, the surface of the bag is printed like a cookie texture. The inside pressure of the bag is -5 kPa , the minimum pressure to maintain shape.

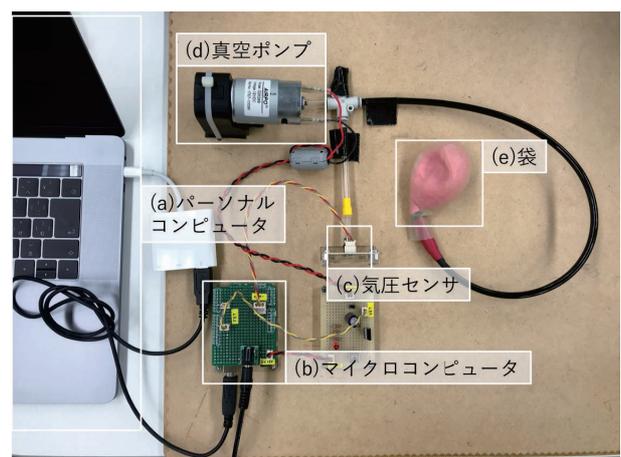


図2 本プロトタイプのハード構成

Fig. 2 Our prototype hardware configuration.

(d) 真空ポンプ (model: ROB-10398 from SparkFun), および, (e) 袋 (20gのコーヒー粉を入れた9インチの天然ゴム風船)。

本プロトタイプでは、袋内の気圧を制御することにより、

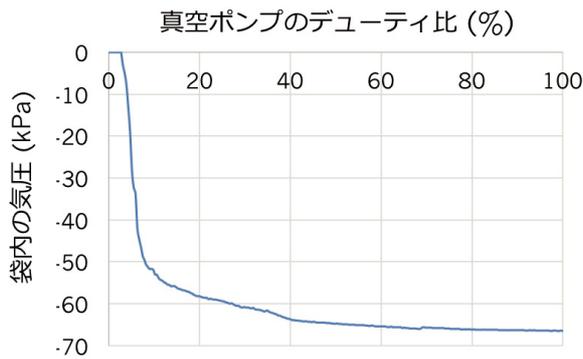


図 3 本プロトタイプにおける袋内の気圧 (kPa) と真空ポンプのデューティ比 (%) の関係. 取得した気圧の値が安定した後に計測した 1 秒間の平均値をプロットした. 変形を維持するために最低限必要な気圧は -5 kPa (デューティ比が 3.5%) であった

Fig. 3 The relation between the inside pressure of the bag (kPa) and the duty cycle of the vacuum pump (%). The mean values for one second after the pressure stabilized were plotted. -5 kPa (when the duty cycle is 3.5%) is the minimum pressure to maintain deformed shape.

様々な硬さおよび形状を提示する. 気圧の制御は, マイクロコンピュータが真空ポンプに対して PWM 制御を行うことで実現する. 袋内の気圧と真空ポンプのデューティ比の関係は, 図 3 に示すとおりである. 気圧センサから取得する値のサンプリングレートは 100 Hz であった.

本プロトタイプを用いて提示が可能な形状のバリエーションは, 袋の外身のサイズ, 伸縮性, 強度, および, 袋の中身の粒度に依存する. 本プロトタイプで提示可能な形状の例を図 4 に示す. 本プロトタイプよりも, 袋の外身の伸縮性および強度が高いほど形状を複雑に, 袋の中身の粒度が細かいほど形状を滑らかに, 形作ることが可能であると考えられる.

4. 実験

提案手法の初期検討として, プロトタイプを用いて提示可能な硬さの範囲と, その範囲内で知覚可能な硬さの分解能について検証するために, ユーザ実験を実施した. 本実験は, 社内の倫理審査の承認を経て実施したものである.

4.1 実験装置

本プロトタイプの袋の耐久性を上げるため, 袋を 12 インチの天然ラテックス風船で包んだ. また, 被験者の衛生面を考慮し, サランラップおよび厚さ 0.02 mm のポリエチレン袋で袋を覆い, 被験者の口内に袋が直接触れないようにした. さらに, 実験開始前に袋を除菌シートで拭き, 被験者ごとに新品のサランラップおよびポリエチレン袋を使用した. 袋は円板状の形状にして被験者に手渡した. また, 本装置のモータ音による実験結果への影響を考慮し, 実験

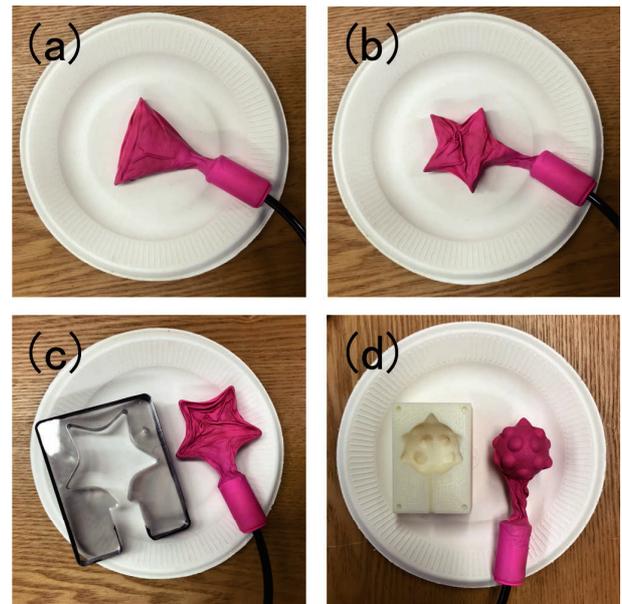


図 4 本プロトタイプを用いて様々な形状を形作った様子. (a) 手で形作った三角形. (b) 手で形作った星形. (c) アクリル板で作製した型と型にはめ込んで形作った星形. (d) 3D プリントで作製した型と型にはめ込んで形作った複数の棘がついた球形. (d) は袋の外身 (天然ゴム風船) の伸縮性および強度と, 袋の中身 (コーヒーの粉) の粒度の限界により, 棘が丸くなり, 型どおりの形状にならなかった

Fig. 4 Various shapes by using our prototype. (a) The triangle made by hands. (b) The star made by hands. (c) The mold and the star made by using the mold. (d) The mold and the sphere with thorns made by using the mold. (d) did not become a form of the mold because of limitations of the balloon elasticity, the balloon strength, and the coffee powder granularity.

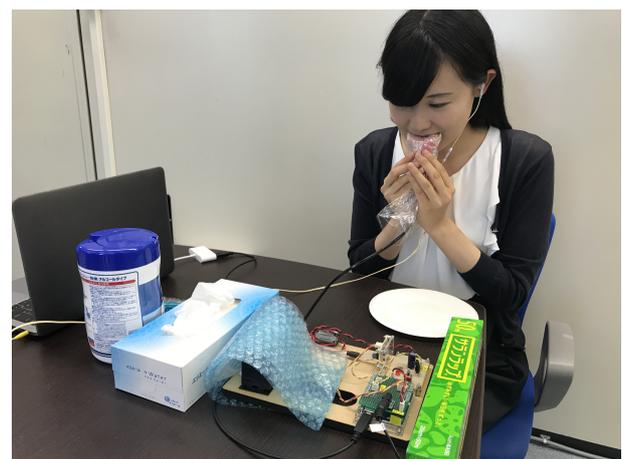


図 5 本実験の様子

Fig. 5 The scene of the experiment.

中は被験者にホワイトノイズを提示した (図 5).

4.2 被験者

11 名 (25 歳から 44 歳の男性 8 名および女性 3 名) の被験者が本実験に参加した. 被験者は, 事前に実験に関する

各試行において1回目と2回目の硬さを比較して、最も適している印象に○をつけてください。

試行	1回目	とても硬い	やや硬い	同程度	やや硬い	とても硬い	2回目
1	1回目						2回目
2	1回目						2回目

図 6 実験にて使用した回答用紙

Fig. 6 The answer sheet used in the experiment.

説明を聞き、同意書に署名をしてから実験に参加した。

4.3 実験手法

本実験では、袋を咀嚼する被験者に、7レベルの硬さを提示する。レベル1は袋内の気圧が0kPaとなる硬さ、レベル2は-10kPaとなる硬さ、レベル3は-20kPaとなる硬さ、レベル4は-30kPaとなる硬さ、レベル5は-40kPaとなる硬さ、レベル6は-50kPaとなる硬さ、レベル7は-60kPaとなる硬さとする。レベル1が最も柔らかく、レベル7が最も硬い状態である。また、各レベルの硬さを、荷重-変位測定ユニット (model: FSA-0.5K2-500N from IMADA) にて計測 (速度 20.0 mm/min にて 6 mm 押し込んだときの N を各々 1 回計測) した結果、レベル1は 10.4N, レベル2は 19.7N, レベル3は 28.4N, レベル4は 31.5N, レベル5は 49.0N, レベル6は 78.3N, レベル7は 86.0N の硬さであった。

これら7レベルの硬さをランダムに組み合わせた計21組 (7C2) を、シェフェーの二対比較法 [18] で比較する。

詳細の実験手順を以下に示す。

- (1) 被験者は以下の試行を練習する。
 - (a) ランダムに選択されたレベルの硬さの袋を咀嚼する (1 回目の咀嚼)。被験者は、被験者にとっての右側の前歯と奥歯の間で 10 秒間、袋を通常どおりに咀嚼する。
 - (b) 上記の咀嚼が終了した後、被験者は 10 秒間待機する。その間、真空ポンプを停止し、袋を咀嚼前の形状に戻す。
 - (c) 先ほど提示された硬さとは異なるレベルの硬さの袋を、同様に 10 秒間咀嚼する (2 回目の咀嚼)。
 - (d) 1 回目の咀嚼 (a) と 2 回目の咀嚼 (c)、どちらの方がより硬く感じたかを、図 6 に示す回答用紙にて、5 段階で回答する。
 - (2) 練習後、被験者は上記の試行を 21 回繰り返す。
 - (3) 試行が終わった後、最も柔らかい状態 (レベル 1) と最も硬い状態 (レベル 7) の袋を咀嚼してもらい、それぞれ、どのような食品の硬さに似ているかを自由記述してもらう。
- 一例として、各レベルの硬さの袋を上記で述べた実験手順 (1)(a) と同様に筆者が咀嚼した場合の、咀嚼前と咀嚼後の袋の様子を図 7 に示す。レベル 4 未満の硬さでは、咀嚼によって円板形の袋が薄く広がっている。レベル 4 以上

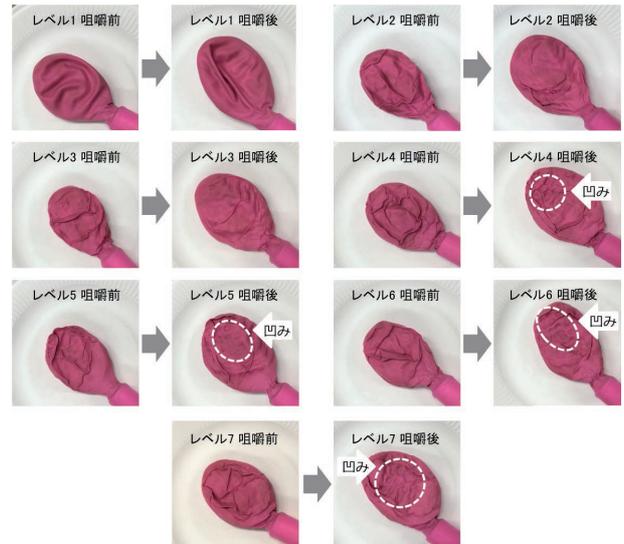


図 7 各レベルの硬さの袋を筆者が右側の前歯と奥歯の間で 10 秒間通常どおりに咀嚼した場合の咀嚼前と咀嚼後の袋の様子

Fig. 7 Each hardness level shape before/after chewing between the front teeth and the back teeth on the right side by the author for 10 seconds as usual.

の硬さでは、袋に歯型らしき凹みが残っている。このような袋の変形具合は、被験者の噛み方や噛む力、袋の外身と中身に依じて、異なる可能性がある。

上述のとおり、本実験における硬さの評価には、食品のテクスチャを評価する主要な手法の一つである官能評価 [22] を用いた。実験における咀嚼時に袋の形状は変化すると予測されるが、形状の変化にともなう知覚の変化も含め、被験者が実験時の咀嚼中に感じた感覚を元に、硬さを評価してもらった。

4.4 実験結果

被験者 11 名の回答を分析した結果を以下に示す。図 6 の回答用紙における 5 段階回答による官能評価の結果をスコアリングし、分散分析を行った結果、硬さのレベルの間に有意水準 1% の有意差が認められた ($F(6, 150) = 51.871, p < 0.01$)。さらに、多重比較を行った結果、図 8 に示すとおり、レベル 1 とレベル 2, 3, 4, 5, 6, 7 ($p < 0.01$) に、レベル 2 とレベル 4, 5, 6, 7 ($p < 0.01$) に、レベル 3 とレベル 5, 6, 7 ($p < 0.01$) に、レベル 4 とレベル 7 ($p < 0.05$) に、有意差が認められた。

また、硬さが似ている食品については、以下のような記述を得た。

- 最も柔らかい状態 (レベル 1) に似ている硬さの食品：大福、米、柔らかいパン、マシュマロ、スポンジケーキ、スナック菓子、葡萄、林檎、梨
- 最も硬い状態 (レベル 7) に似ている硬さの食品：硬いシャーベット、硬い肉、硬いガム、硬いグミ、クランキーチョコレート、クッキー、クラッカー、ドライ

硬さの心理尺度

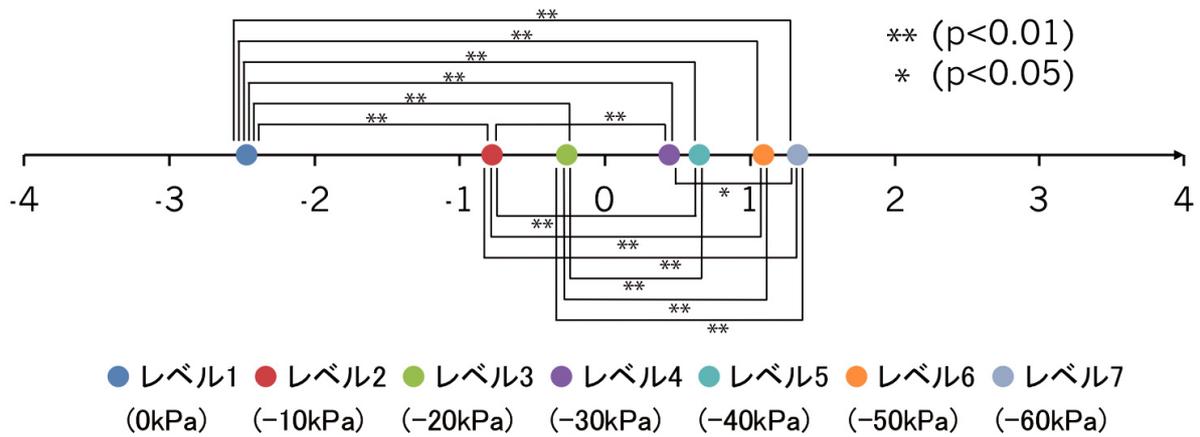


図 8 多重比較の結果. 4 を最も硬い, -4 を最も柔らかい, とした硬さの心理尺度をプロットした

Fig. 8 The psychological scale of hardness by Scheffe's paired comparison. The larger values mean harder values.

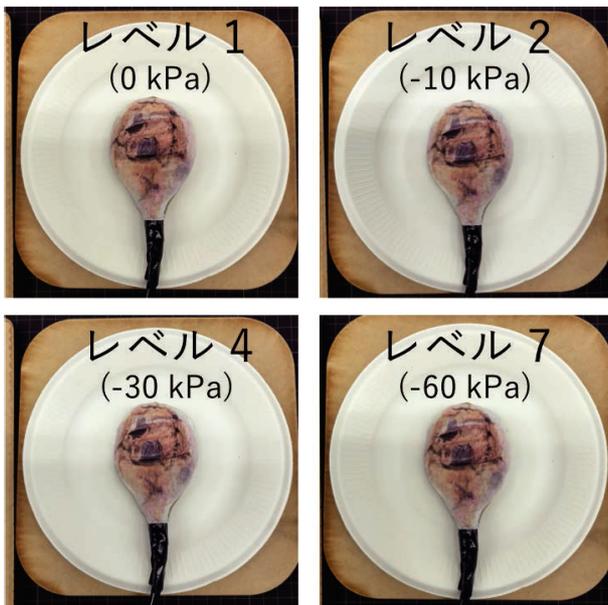


図 9 異なる硬さ提示時における袋の形状

Fig. 9 The shapes of the bag under different conditions of hardness.

フルーツ, イカ, タコ

4.5 考察

実験結果より, 本プロトタイプは, レベル 1, 2, 4, 7 の硬さを提示することで, 最大で 4 種の異なる硬さを口内に提示できることが確認できた. また, 被験者の自由記述により, 本プロトタイプにより提示できる硬さの範囲は, マシュマロ程度の柔らかさ (レベル 1) から, シャーベット程度の硬さ (レベル 7) であると考えられる. また, これらの硬さの提示は, 図 9 に示すとおり, 初期の形状を保つ



図 10 デモ展示の様子

Fig. 10 The scene of our demonstration.

たまま提示することが可能であった.

5. デモ展示

インタラクション 2018 において, 本プロトタイプのデモ展示を行い (図 10), 合計 50 人前後の来場者にジャミング転移を利用した食感提示システムを体験してもらった [19]. デモ展示では, プロトタイプ (図 2) およびポータブル版のプロトタイプ (図 11) を展示した. 咀嚼体験はプロトタイプ (図 2) でのみ行った. 咀嚼体験時には衛生面を考慮し, 各体験者は体験前に袋を除菌シートで十分

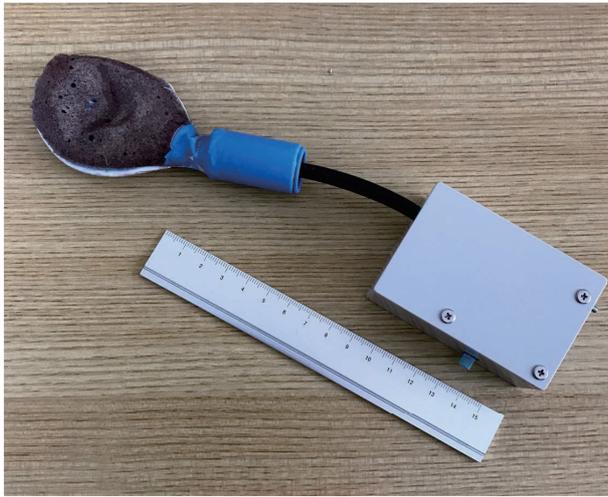


図 11 ポータブル版
Fig. 11 The portable prototype.

に拭き、新品のサランラップおよびポリエチレン袋で袋を包んだ。提示する硬さは、実験結果に基づき、口内で異なる硬さとして知覚可能な4種類のレベル（レベル1, 2, 4, 7）とした。

本デモの体験者から得られたフィードバックコメントは以下のとおりである。

- 硬さの違いはよく分かったため、次は舌や口内で感じる装置表面に工夫が欲しい。
- 中身や外身の素材を変えることでどんな食感が表現できるか試したい。
- 噛み切ったり飲み込んだりしたい。
- 振動や味や視覚など他の刺激も併用したい。
- 本装置の性能の検討と改善を続けて欲しい（分解能、密度、反応速度など）。

これらのフィードバックコメントより、プロトタイプによって複数の異なる硬さを知覚させることが可能であることが確認できた。一方で、テクスチャの表現や噛み切った感覚の提示は実現できておらず、食品の食感として知覚させるためにはまだ多くの課題が残っているといえる。

6. アプリケーション

本論文で提案した食感提示システムのプロトタイプは、1秒以内*1に異なるレベルの硬さを提示できる。したがって、その用途として、食品の初期状態の硬さを提示するだけでなく、咀嚼によって食品が柔らかくなっていくことも表現することができると考えられる。ただし、それを実現するためには、咀嚼回数をカウントするための咀嚼検知機能が必要となる。そこで、我々は咀嚼検知用のフォトリフ

*1 本プロトタイプにおいて硬さが遷移する時間は、真空ポンプが袋から吸い出すべき空気の量に依存する [3]。そこで、本プロトタイプが提示する硬さの中で、最も袋内の空気の量が多いであろうレベル1の硬さから、最も少ないであろうレベル7の硬さに移行する時間を計測し、その時間を硬さが遷移する最大の時間とみなし記載した。



図 12 フォトリフレクタを組み込んだプロトタイプを使用している様子
Fig. 12 The scene of using the prototype with a photo reflector.

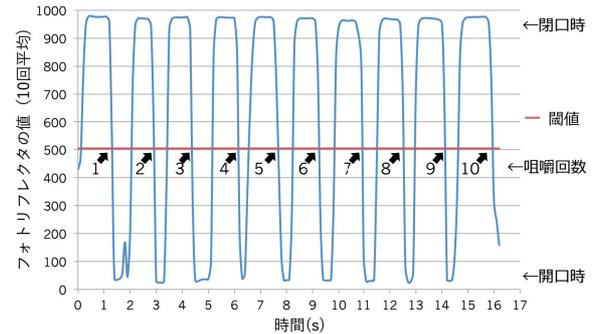


図 13 プロトタイプに組み込んだフォトリフレクタの値から咀嚼回数を推定する例
Fig. 13 The example of counting the chewing by using a photo reflector.

フレクタ (model: QTR-1A from Pololu Corporation) をプロトタイプに組み込んだ (図 12)。フォトリフレクタは、咀嚼によって上下する下顎の位置を測定しており、図 13 に示すように、咀嚼回数をカウントすることができる。咀嚼回数に応じて袋内の気圧の値を変化させることで、咀嚼による食感の変化を表現することができる。また、硬さと柔らかさの両方を表現できることから、その他の用途として、個人の咀嚼力に合わせた咀嚼訓練用システムとして用いることも考えられる。これらの用途の有用性や実現性については、今後、ユーザスタディを通じて確かめる予定である。

7. 議論

本論文で提案したジャミング転移を用いた食感提示システムの特徴は以下のとおりである。

- 食品摂取をともなわずにバーチャルな食感を提示できること。
- シンプルな機構で、硬さと形状の両方を提示できること。

これらの特徴は、バーチャルな食体験を提供するシステムを考えた場合に大きな利点になると考えられる。したがって、我々は、今後の食感提示システムの研究開発において、ジャミング転移技術は重要な技術の1つになるであろうと考えている。

一方で、本論文で提案した食感提示システムの現プロトタイプの問題は以下のとおりである。

- (1) マシュマロの柔らかさからシャーベットの硬さまでしか提示できないこと。
- (2) 硬さと形状の関係については未検証であること。
- (3) 形状をプログラマブルに変えられないこと。

(1) 提示可能な硬さはポンプの性能や袋の構造に依存した上限がある。今後、ハードウェアを改良することにより提示可能な硬さの範囲を拡張することができると考えている。

(2) 本論文では、特定の形状（円板状）という条件下で硬さの変化を検証したが、どの形状においても複数種類の硬さの食感を提示できるかは未検証である。形状が異なると知覚される硬さが増減すると考えられることから、今後、ユーザスタディを通じて硬さと形状の関係について検証する必要があると考えている。

(3) 現状のプロトタイプで任意の形状を提示するためには、袋を口の中に入れる前に、手や型によって形作ることが必要である。しかし、たとえばアクチュエータ機構を追加することによって、形状をプログラマブルに変えることができると考えている。追加するアクチュエータとしてはたとえば、複数のリニアアクチュエータなどから構成される可変フレーム [5] や、空気を入れるアクチュエータ [12] が考えられる。

将来的には、食感に関するその他のパラメータ（弾力性や粘性など）の提示可能性に関する検証や、バーチャルな食感提示が食体験の QoL 向上にどのように寄与するかについても検証を進める。最終的には、我々の提案システムを用いることで食事制限で苦しんでいるユーザの QoL を向上させることを目標とする。

8. まとめ

本論文では、ジャミング転移を利用して、硬さと形状の両方を提示可能な食感提示システムを提案した。プロトタイプとして、粉粒体（挽いたコーヒーの粉）を袋の内部に詰め、内部の空気を真空ポンプで抜くことで、変形した形状を維持したまま様々な硬さを提示可能な食感提示システムを実装した。ユーザ実験により、作成したプロトタイプは、マシュマロ程度の柔らかさからシャーベット程度の硬さの範囲で4種類の異なる硬さを提示可能であることが示された。また、デモ展示において50名程度に体験してもらい、食感提示システムとしての実現性と今後の改良に関するフィードバックを得られた。今後は、ハードウェアの改良による食感提示システムとしての性能向上を検討するとともに、食感提示システムが食事制限をしているユーザの QoL の向上にどの程度寄与するかを確かめる予定である。

参考文献

- [1] Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M.R., Lipson, H. and Jaeger, H.M.: Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, *Proc. National Academy of Sciences*, Vol.107, No.44, pp.18809–18814 (2010).
- [2] Endo, H., Ino, S. and Fujisaki, W.: The effect of a crunchy pseudo-chewing sound on perceived texture of softened foods, *Physiology & behavior*, Vol.167, pp.324–331 (2016).
- [3] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Cheng, N. and Ishii, H.: Jamming User Interfaces: Programmable Particle Stiffness and Sensing for Malleable and Shape-changing Devices, *Proc. UIST '12*, pp.519–528, ACM (2012).
- [4] Hashimoto, Y., Nagaya, N., Kojima, M., Miyajima, S., Ohtaki, J., Yamamoto, A., Mitani, T. and Inami, M.: Straw-like User Interface: Virtual Experience of the Sensation of Drinking Using a Straw, *Proc. ACE '06*, ACM (2006).
- [5] Hirai, T., Nakamaru, S., Kawahara, Y. and Kakehi, Y.: xSlate: A Stiffness-Controlled Surface for Shape-Changing Interfaces, *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, D113, ACM (2018).
- [6] Hirose, M., Iwazaki, K., Nojiri, K., Takeda, M., Sugiura, Y. and Inami, M.: Gravitative Spice: A System That Changes the Perception of Eating Through Virtual Weight Sensation, *Proc. AH '15*, pp.33–40, ACM (2015).
- [7] Iwata, H., Yano, H., Uemura, T. and Moriya, T.: Food Simulator: A Haptic Interface for Biting, *Proc. VR '04*, pp.51–57, IEEE Computer Society (2004).
- [8] Liu, A.J. and Nagel, S.R.: Nonlinear dynamics: Jamming is not just cool any more, *Nature*, Vol.396, No.6706, pp.21–22 (1998).
- [9] Nakamura, H. and Miyashita, H.: Development and Evaluation of Interactive System for Synchronizing Electric Taste and Visual Content, *Proc. CHI '12*, pp.517–520, ACM (2012).
- [10] Narumi, T., Nishizaka, S., Kajinami, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Augmented Reality Flavors: Gustatory Display Based on Edible Marker and Cross-modal Interaction, *Proc. CHI '11*, pp.93–102, ACM (2011).
- [11] Nijima, A. and Ogawa, T.: Virtual Food Texture by Electrical Muscle Stimulation, *Proc. ISWC '16*, pp.48–49, ACM (2016).
- [12] Ou, J., Skouras, M., Vlavianos, N., Heibeck, F., Cheng, C.-Y., Peters, J. and Ishii, H.: aeroMorph - Heat-sealing Inflatable Shape-change Materials for Interaction Design, *Proc. UIST '16*, pp.121–132, ACM (2016).
- [13] Ranasinghe, N., Nguyen, T.N.T., Liangkun, Y., Lin, L.-Y., Tolley, D. and Do, E.Y.-L.: Vocktail: A Virtual Cocktail for Pairing Digital Taste, Smell, and Color Sensations, *Proc. MM '17*, pp.1139–1147, ACM (2017).
- [14] Szczesniak, A.S.: CONSUMER AWARENESS OF TEXTURE AND OF OTHER FOOD ATTRIBUTES, II, *Journal of Texture Studies*, Vol.2, No.2, pp.196–206 (1971).
- [15] Szczesniak, A.S.: Texture is a sensory property, *Food quality and preference*, Vol.13, No.4, pp.215–225 (2002).
- [16] Yoshimoto, S., Hamada, Y., Tokui, T., Suetake, T., Imura, M., Kuroda, Y. and Oshiro, O.: Haptic Canvas: Dilatant Fluid Based Haptic Interaction, *SIGGRAPH '10*, p.13:1, ACM (2010).

- [17] Zampini, M. and Spence, C.: The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips, *Journal of Sensory Studies*, Vol.19, No.5, pp.347-363 (2004).
- [18] 高木英行: 使える!統計検定・機械学習 (3) 主観評価実験のための有意差検定, システム・制御・情報= Systems, control and information: システム制御情報学会誌, Vol.58, No.12, pp.514-520 (2014).
- [19] 笹川真奈, 新島有信, 青木良輔, 渡部智樹, 山田智広: ジャミング転移を利用した食感提示システム, インタラクシオン 2018 論文集, pp.386-388 (2018).
- [20] 小泉直也, 田中秀和, 上間裕二, 稲見昌彦: Chewing JOCKEY: 咀嚼音提示を利用した食感拡張装置の検討 (〈特集〉クロスモーダル/マルチモーダル), 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.18, No.2, pp.141-150 (2013).
- [21] 新島有信, 小川剛史: 電氣的筋肉刺激を用いたバーチャル食感提示手法に関する検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.21, No.4, pp.575-583 (2016).
- [22] 森 友彦, 川端晶子: 食品のテクスチャー評価の標準化, 光琳 (1997).
- [23] 青山一真, 櫻井健太, 古川正紘, 前田太郎, 安藤英由樹: 顎部電気刺激による味覚提示・抑制・増強手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.22, No.2, pp.137-143 (2017).



笹川 真奈

2017年お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。



新島 有信 (正会員)

2012年日本電信電話株式会社入社。2017年東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了。VRにおける触覚提示技術やウェアラブルセンサを用いた身体動作推定技術に関する研究に従事。博士 (工学)。



青木 良輔 (正会員)

2007年日本電信電話株式会社入社。2014年東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士過程終了。複数動作を組み合わせた操作インタフェース, インタラクシオンデザイン, 着衣型ウェアラブルセンシング, 生体情報処理, 運動学習に関する研究開発に従事。現在, NTT サービスエボリューション研究所勤務。博士 (情報科学)。



渡部 智樹 (正会員)

1992年横浜国立大学工学部卒業。同年, 日本電信電話株式会社入社。主に, 家電制御技術, 生体状態計測・推定技術の研究開発に従事。現在 NTT サービスエボリューション研究所主任研究員。博士 (工学)。情報処理学会, 電子情報通信学会, 各会員。



山田 智広 (正会員)

NTT サービスエボリューション研究所ネットワークロボット&ガジェットプロジェクトプロジェクトマネージャー・主席研究員。1992年新潟大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話株式会社に入社。以来, デジタルコンテンツ配信, アプライアンス, ロボティクス技術に関する研究開発に従事。2007年 MBA 取得。2015年よりネットワークロボット&ガジェットプロジェクトのプロジェクトマネージャー。iRooBO ネットワークフォーラム理事。電子情報通信学会 LOIS 研究会委員長, 情報処理学会, IEEE, ACM, 各会員。