

ジャミング転移を利用した食感提示システム

笹川 真奈¹ 新島 有信¹ 青木 良輔¹ 渡部 智樹¹ 山田 智広¹

概要: 本研究では、咀嚼状況に応じて口内の物体にジャミング転移を発生させることで、異なる食感を提示するシステムを提案する。ジャミング転移とは、粉粒体が密度によって異なる振る舞いをする物理現象である。本研究の初期検討として、異なる硬さをユーザに提示するプロトタイプの実装、およびプロトタイプを用いたユーザ実験を行なった。結果、本システムが提示する異なる硬さを、ユーザが口内で判別可能であることが確認できた。本検討により、咀嚼をする毎に柔らかくなるなど、多様な食感を提示できる可能性が示された。

A system to display food texture based on the jamming transition

MANA SASAGAWA¹ ARINOBU NIJIMA¹ RYOSUKE AOKI¹ TOMOKI WATANABE¹ TOMOHIRO YAMADA¹

Abstract: We proposed a system to display various food texture based on the jamming transition according to the chewing situation. The jamming transition is a physical phenomenon that powder particles behave differently depending on density. We implemented a prototype that displays various hardness to users. As a result of the user experiment, users can distinguish different hardness displayed by this system in the mouth. This result showed that the feasibility of displaying various food texture.

1. はじめに

近年、バーチャリアリティ技術における提示感覚として、食感が注目されている。Nijima ら [4] は咀嚼筋に電気刺激を与えることで、Iwata ら [3] は口にくわえたアクチュエータで歯に反発力を与えることで、食感を提示している。これらの研究は、咀嚼訓練やエンターテインメント、食品デザインなどへの応用が考えられている。

食感とは、「歯ごたえ」「口当たり」など、口内で感じる食品の物理的性質である [7]。したがって、食感を提示するためには、食品の硬さおよび形状を口内に対して提示することが重要だと考える。しかし、既存の研究では、口に何も含まない状態 [4] や、対象が歯に限定された状態 [3] で力覚フィードバックを与えているため、口内に対する硬さおよび形状の提示は難しい。そこで、本研究では、口に含む物体の硬さおよび形状を変え、口内に対して力覚フィードバックを与えることで、食感を提示する手法を提案する。

硬さおよび形状を制御する方法として、ジャミング転移

という物理現象を利用する。ジャミング転移とは、粉粒体が密度によって異なる振る舞いをする物理現象である。密度が大きくなると固体、小さくなると流体のように振る舞う。例えば、Brown ら [1] や Follmer ら [2] は、ロボットアームの先やユーザインタフェース用デバイスの形状を柔軟に変えるために、ジャミング転移を利用している。これらの研究では、粉粒体の入った袋を柔らかい状態に変形させた後に、袋の内部の空気を抜くことで硬くし、形状を維持している。このように、袋の内部の気圧を制御することで、硬さおよび形状を制御できる。また、吉元ら [5] は、粉粒体の入った袋を指先に装備し、袋の内部の水を出し入れする程度を変えることによって、異なる触感を提示するディスプレイを提案している。そこで我々は、空気を出し入れする程度を調整し、袋の内部の気圧を変化させることによって、気圧に応じた異なる硬さを提示できると考えた。

2. 提案

本研究では、口に含む物体の硬さおよび形状を変化させることで、口内に対して多様な食感を提示するシステムを

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

提案する。口に含む物体は粉粒体の入った柔軟性のある袋を使用する。硬さおよび形状は、袋の内部の気圧を制御し、ジャミング転移を発生させることで変化させる。

本稿では初期検討として、本システムが提示する異なる硬さをユーザが口内で判別可能かを検討する。本検討のため、異なる硬さをユーザに提示するプロトタイプの実装、およびプロトタイプを用いたユーザ実験を行った。

3. 実験デザイン

3.1 実験目的

異なる硬さを提示するプロトタイプを用いた場合の、人間が口内で知覚できる硬さの範囲、および、その範囲の中で知覚できる硬さの段階数、を明らかにする。

3.2 実験装置

プロトタイプとして、異なる硬さを提示する装置を実装した。ユーザは、袋を口内に含んだ状態で本装置を使用する。本装置のハードウェアは図1に示すとおり、パーソナルコンピュータ (MacBookPro)、マイクロコンピュータ (Arduino/Genuino Uno)、気圧センサ (MIS-2500-015V)、真空ポンプ (SparkFun ROB-10398)、袋 (コーヒー粉 20g が入った9インチの天然ゴムの風船)、で構成される。

本装置は、袋の内部の気圧を変えることで異なる硬さを提示する。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。真空ポンプのデューティ比と気圧の関係は、図2に示すとおりである。今回はこの図に基づき、デューティ比が10から70の範囲で真空ポンプを制御した。気圧センサのサンプリング

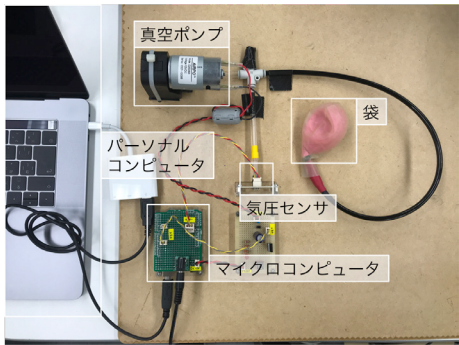


図1 実験装置のハードウェア構成。

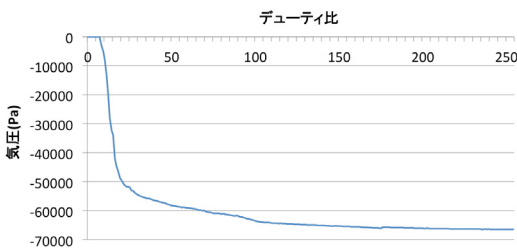


図2 実験装置におけるデューティ比 (0-255) と気圧 (Pa) の関係。気圧が安定した後に計測した1秒間の平均値をプロットした。

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3 実験で使った回答用紙。

レートは 100Hz である。

3.3 実験方法

3.3.1 準備

本実験の前準備として、天然ゴムの風船を天然ラテックスの風船 (12 インチ) で包み、袋を二重構造にすることで耐久性を上げる。また、衛生面を考慮し、袋を除菌シートで拭いた後、被験者が口内で袋に直接ふれないように、サランラップおよびポリエチレン袋 (厚さ 0.02mm) で2重に包む。除菌シートでの拭淨, サランラップおよびポリエチレン袋の交換は被験者毎に行う。加えて、本装置のモータ音を遮断するため、実験中はホワイトノイズを聞いてもらうよう、被験者に指示をする。

3.3.2 手順

本実験では、被験者 11 名 (男性 8 名, 女性 3 名) に本装置の袋を咀嚼してもらい、硬さの比較をしてもらう。その後、最も柔らかい状態と最も硬い状態の袋を咀嚼してもらい、硬さが似ている食品を回答してもらう。今回は、被験者に対して7段階の硬さ*1を提示する。これらの硬さを、シェフェの一対比較法 [6] で比較する。各段階の組み合わせ計 21 組を咀嚼することで比較してもらい、各組において、どちらの方がより硬いかを、5 段階で回答してもらう (図 3)。これらの回答結果を分析することで、被験者が口内で知覚できる硬さの範囲および段階数を得ることができる。

詳細の実験手順を以下に示す。

- (1) はじめに、本装置を用いた試行を1回練習してもらう。ここでの試行とは以下の流れを指す。
 - (a) 本装置の袋部分を 10 秒間、以下のやり方で咀嚼する。
 - ユーザにとっての右側の、前歯と奥歯の間、で咀嚼を行う。
 - 袋の中心部付近で咀嚼を行う。
 - 普段通りに咀嚼を行う。
 - (b) 咀嚼が終わったら 10 秒間待機する。待機中は、袋の中身を均等に広げる。
 - (c) 本装置の袋部分を再度、10 秒間咀嚼する。
 - (d) 終了したら1回目の咀嚼時 (a) と2回目の咀嚼時 (c)、どちらがより硬かったかを5段階で回答する。
- (2) 練習が終了したら、上記の試行を 21 回行なってもらう。
- (3) 全試行が終了した後、上記の試行を1度だけ行っても

*1 袋の内部の気圧が 0Pa、-10000Pa、-20000Pa、-30000Pa、-40000Pa、-50000Pa、-60000Pa、となる硬さ。Pa が小さいほど袋は硬くなる。

らい, 1 回目の咀嚼時 (a) と 2 回目の咀嚼時 (c), それぞれの硬さに似ている食品は何か, を自由に記述してもらう。この時の 1 回目と 2 回目はそれぞれ, 本装置における最も柔らかい状態と, 最も硬い状態*2である。

3.4 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。提示した硬さは, 柔らかい順に, 段階 1, 段階 2, 段階 3, 段階 4, 段階 5, 段階 6, 段階 7, とする*3。

分散分析の結果, 硬さの段階の間に有意水準 1% の有意差が認められた ($F(6, 150) = 51.871, p < 0.01$)。そこで, 多重比較 (有意水準 5%) を行なった結果, 図 4 に示すとおり, 段階 1 と段階 2, 3, 4, 5, 6, 7 に, 段階 2 と段階 4, 5, 6, 7 に, 段階 3 と段階 5, 6, 7 に, 段階 4 と段階 7 に, 有意差が認められた。

また, 似ている硬さの食品として, 最も柔らかい状態に対しては, パン, マシュマロ, 最も硬い状態に対しては, 氷菓子, クッキー, などが, 被験者から挙げられた。

3.5 考察

上記の分析の結果より, 段階 1, 段階 2, 段階 4, 段階 7 の出力をすることによって, ユーザに対して計 4 段階の硬さを提示できると考えられる。また, 上記の自由記述の結果より, 本装置によって提示できる硬さの範囲は, マシュマロ程度の硬さ (段階 1) から, 氷菓子程度の硬さ (段階 7) であると考えられる。

4. アプリケーション

上記の実験により, ユーザに対して異なる硬さを提示できることが示された。これにより, 本システムを用いることで, 噛めば噛むほど柔らかくなる, などの表現が可能となり, 多様な食感を実現できるようになると考えた。

そこで一例として, 咀嚼毎に柔らかくなる食感を提示するアプリケーションを実装した。咀嚼回数を推定するために, 上記の実験装置にフォトフレクタ (QTR-1A) を追加した。アプリケーションの使用シーンを図 5 に示す。本ア

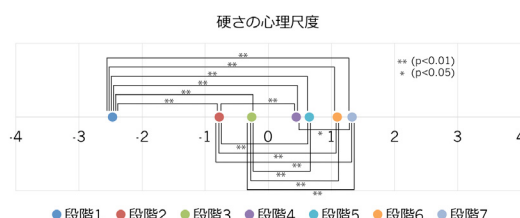


図 4 多重比較の結果. 4 を最も硬い, -4 を最も柔らかい, とした硬さの心理尺度をプロットした。

*2 袋の中の気圧が 0Pa の状態と, -60000Pa の状態。

*3 袋内の気圧が 0Pa の状態の硬さを段階 1, -10000Pa を段階 2, -20000Pa を段階 3, -30000Pa を段階 4, -40000Pa を段階 5, -50000Pa を段階 6, -60000Pa を段階 7, とする。



図 5 アプリケーションを使用し咀嚼をしている様子。

アプリケーションでは, フォトリフレクタによって計測した値を元に咀嚼回数を推定し, 回数が増える毎に, 段階 7, 4, 2, 1 の硬さを出力することで袋の硬さを柔らかくする。

5. まとめと今後の展望

本研究では, ジャミング転移を利用することで, 口を含む物体の硬さおよび形状を変化させ, 口内に対して多様な食感を提示するシステムを提案した。本稿では初期検討として, 硬さに関する検討を行い, 結果, 異なる硬さが提示できることが確認された。本検討により, 多様な食感が実現できる可能性が示された。

今後は, プロトタイプの改良を行うことで, 表現できる食感を広げていく。例えば, 複数の層を作ることで内外で異なる食感 (フォンダンショコラなど) の表現や, 反応速度を向上させることで瞬時に変わる食感 (煎餅など) の表現を実現する。また, 今回は硬さに着目した検証を行なったが, 今後, 形状についての検証も行う。

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, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 107, No. 44, pp. 18809–18814 (2010).
- [2] 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, *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, ACM, pp. 519–528 (2012).
- [3] Iwata, H., Yano, H., Uemura, T. and Moriya, T.: Food simulator: A haptic interface for biting, *Virtual Reality, 2004. Proceedings. IEEE*, IEEE, pp. 51–57 (2004).
- [4] Nijima, A. and Ogawa, T.: Virtual food texture by electrical muscle stimulation, *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ACM, pp. 48–49 (2016).
- [5] 吉元俊輔, 濱田友貴, 徳井隆博, 末竹哲也, 井村誠孝, 黒田嘉宏, 大城理: ダイラタント流体を用いた媒体制御型力触覚提示装置, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 16, No. 3, pp. 317–325 (2011).
- [6] 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).
- [7] 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).