

食材の多様な硬さを提示可能な包丁デバイスの開発

堀越涼太^{†1} 松浦昭洋^{†1, a)}

本稿では、食材の切る際の多様な硬さを提示する包丁デバイスを提案する。本デバイスは細分された刃パーツをもち、それらをサーボモータで独立に動作させて食材の局所的な圧力を実現し、食材を実際には切ることなく、包丁デバイスと食材パーツを用いて所望の硬さを体感させる。これまでに、一様に柔らかい/硬い食材、硬軟が交互に現れる多層の食材、サイン波状に硬さが変化する食材などの硬さを一定の精度で実現した。

Development of A Kitchen Knife Device That Presents Sensation in Cutting Food Objects with Various Stiffness

RYOTA HORIKOSHI^{†1} AKIHIRO MATSUURA^{†1, a)}

In this study, we present a kitchen knife device that provides pressure of specific food objects. The device consists of subdivided blade parts that independently move up and down by servo motors and realize local change of pressure, which makes users experience stiffness of objects without actually cutting them. So far, we realized with some degree the pressure setting of uniformly soft/hard food objects, those with alternating stiffness, and those whose stiffness changes in the sin-like curve.

1. はじめに

食物の調理は人の生存に関わる重要な行為であり、これまで多くの道具・器具とその効果的な使用方法が開発され、またその物理的な特性や操作の熟達に関する研究が行われてきた。本稿では、主要な調理器具の一つである包丁を対象として取り上げる。包丁に関しては、食品の切断面や被切削試料の形状変化や包丁を研ぐ際の刃先角度と切れ味に関する研究[1][2]、刃のマイクロな形状と切れ味の関係を分析した研究[3]など形状や物理量に基づく切れ味に関する研究があり、さらに、いくつかの完成度で研いだ包丁の刃先形状と切れ味や研ぎ味の官能評価の関係を調査した研究[4]や、複数の食材を用いて切断時に生じた力と加速度から得た物理量と切断時の感覚因子との関係を評価した研究[5]など人の感性と関連した包丁の切れ味や研ぎ味に関する研究、包丁に装着した加速度センサの値から体験者の包丁技術を判定する研究[6]や初学者と熟達者の包丁操作の運動解析に関する研究[7]など切る操作の熟達に関する研究が行われている。さらに、文献[8]においては、児童に対して安全に包丁調理に対する教育を行うための、導電糸からなる刃をもつ包丁型デバイスを用いた視聴触覚のフィードバックが可能な安全教育システムが提案されている。しかし現状では、特定の食材の形状や局所的な部位を切る際の圧力や架空の切れ味を体感可能なエンタテインメントを志向した包丁デバイスは筆者らの知る限り存在していない。

そこで本研究では食材の硬さに着目し、切る方法として地面に対し垂直に包丁を下ろして切る「(垂直)押し切り」を想定し、型取りゲージの構造を利用した、圧力センサとサーボモータを用いて硬さのリアルタイム制御・提示が可能な包丁デバイスを開発した。本デバイスは、型取りゲージのアイデアを利用して、三つの細分された刃パーツをもち、それぞれの刃パーツは内蔵する360度連続回転サーボモータにより、刃の先端近くに設置される圧力センサの値に応じて、食材の各部位(高さ)毎に設定された圧力を実現するよう独立して上下動する。仮想的な硬さの時

系列パターンの実現を検証するため、食材を切る際の具体的な圧力変化のパターンとして、本稿では一様に柔らかい/硬い食材、硬軟が交互に現れるミルフィーユのような多層の食材、サイン波状の硬さ変化をもつ食材という条件下でそれらの硬さの食材を切る操作を試みた。

2. システム概要

2.1 主な構成要素

本システムは主に包丁デバイス、3Dプリンタで作成された食材ピース、Arduino Uno、PCから構成される。以下、包丁デバイス、圧力値制御等の詳細について説明する。

2.2 包丁デバイス

包丁デバイスの刃部分は、一つの剛体で作成すると、食材あるいはそれを模した物体を切りきる動作を行うためには、実際にそれを地面まで切って毎回分割する必要がある。その切る感覚を仮想的に実現するため、本デバイスでは複数の細分されたパーツをもつ型取りゲージの構造を採用し、包丁の刃を垂直方向に分割した刃パーツを三つもつデバイスを作成した。単体の刃パーツを図1に示す。刃パーツはラック&ピニオンの構造をもち、先端部分には右下の刃先パーツを取り付ける。刃パーツ本体のサイズは幅18mm、高さ123mm、奥行き15mmであり、刃先パーツの高さは20mmである。このように本体と刃先に分けている理由はそれらの接続部分に圧力センサ(FSR400、有効センサ領域:直径5.08mm、感圧範囲:0.1~20N)を取り付けるためである。ピニオン(円形歯車)の裏面には360度連続回転サーボモータ(FS90R、最大トルク:4.8Vで1.3kg・cm)を設置しており、それにより三つの刃パーツを独立に上下動させることができる。包丁デバイスの重さは190.0gである。図2に包丁デバイスの一面を、図3にその裏面を示す。

^{†1} 東京電機大学
Tokyo Denki University
a) matsuo@rd.dendai.ac.jp

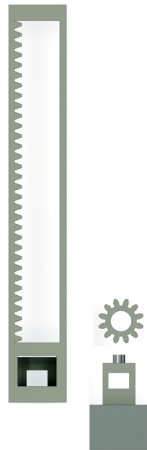


図 1 刃パーツのラック&ピニオンと刃先パーツ
Figure 1 Rack & pinion of the blade part and the tip part.

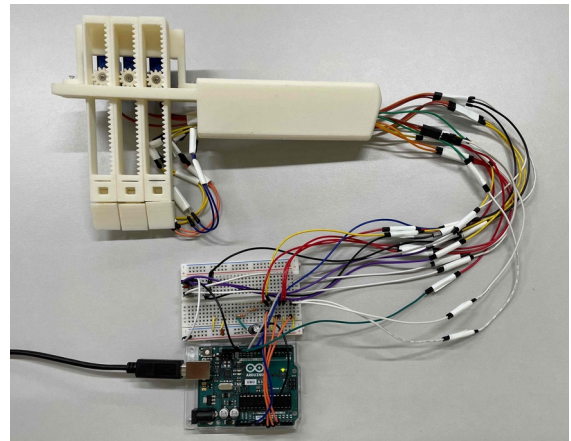


図 4 システムの全容
Figure 4 System overview.

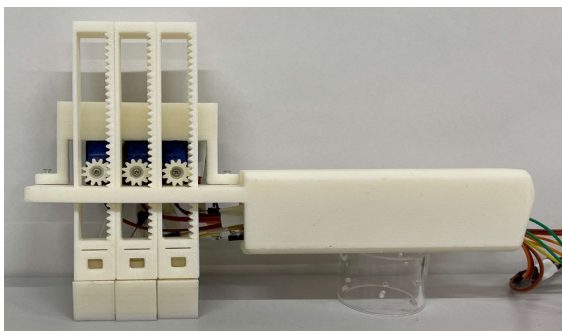


図 2 包丁デバイス (表面)
Figure 2 Knife device (front side).

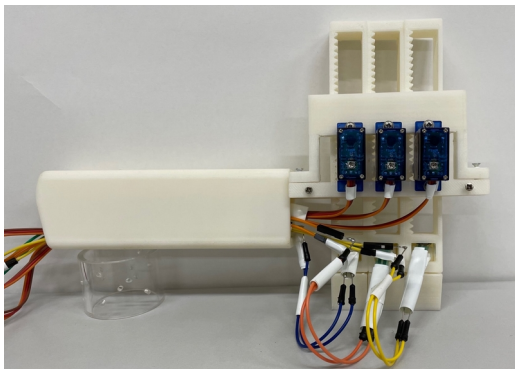


図 3 包丁デバイス (裏面)
Figure 3 Knife device (back side).

3. デバイスの動作結果

3.1 操作の流れ

作成した包丁デバイスを用いた操作の流れを示す. 水平なテーブルの上に3DプリンタでABS樹脂により作成された食材ピース (今回使用したもののサイズは16×18×36mm) に対して, 把持した包丁デバイスをその上方からほぼ垂直に下ろす. 一つあるいは複数の刃パーツが食材ピースと接触した後, 設定された食材の高さ分デバイスを下ろし続け, それぞれの高さでの硬さを体感する. 図5に包丁デバイスを食材ピース (視認しやすさのため, カラー用紙で包含) に下ろす様子を示す.

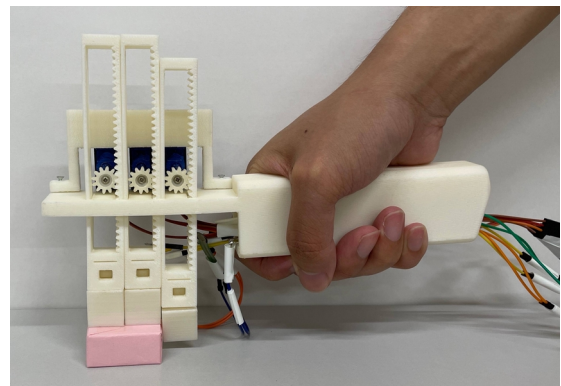


図 5 包丁デバイスを食材ピースに下ろす様子
Figure 5 Lowering the knife device onto the food piece.

3.2 実験内容と結果

(1) 実験内容

今回食材のタイプとして, 以下の三タイプの硬さの変化をもつものを用い, 仮想的な実現を試みた.

タイプ1: 一様に柔らかい/硬い食材

タイプ2: 硬さが硬軟交互に現れる食材

タイプ3: 上に凸のサイン波状に硬さが変化する食材

圧力センサ値の変化の計測は, デバイスの柄から最も遠いもの一つを用いて行い, 長さ90mm分刃パーツが上方に移動するまでデバイスを下ろし続けた際の圧力センサ値を取得した. ここで, 刃パーツの移動量はサーボモータの回転数 (刃パーツ内のピニオンの回転数に対応) からの見積値を用いる. また, 包丁デバイスを食材ピースに向かって下ろす動作をサーボモータを止めた状態で行うと, 圧力セ

続いて Arduino による制御について述べる. Arduino は包丁デバイスの刃パーツに付属する圧力センサからの出力値 (0V から 5V に対応して, センサ値 0 から 1023 までを出力) を受け取り, その値に応じて PWM 制御によりサーボモータの回転数と回転方向を制御する. ある硬さをもつ食材 (パーツ) を切る操作を行う際, その食材の高さ毎, つまり各刃パーツの高さ毎に達成すべき圧力センサの値が予め設定されており, 圧力センサ値が設定より大きいときは刃がより上方に動く方向にサーボモータを回転させてセンサ値を低め, その値が設定より小さいときはサーボモータを逆回転させてセンサ値を上げる. これらの Arduino によるデータの取得とモータの制御は, 本稿の実験では, 通信の遅れによる問題がほとんど生じていないと考えられる 20Hz で行った. 本章最後に PC を除くシステムの全容を図 4 に示す.

ンサ値はデバイスの下ろし始めと下ろし終わりを除いて一定に近いものとなり、センサ値の平均は 80 程度であった。そこで、タイプ 1 の様に柔らかい/硬い食材においては、センサ値がそれぞれ 50/100 を維持するよう制御した。タイプ 2 の硬軟交互に現れる食材においては、センサ値により明確な差を付け、刃パーツの高さ 30mm 分の移動毎にセンサ値が 60 と 100 を交互に取るよう制御した。タイプ 3 ではサイン波の $0 \sim \pi$ を刃パーツの高さの移動量 $0 \sim 90\text{mm}$ に対応させ、 $\pi/2$ におけるサインの値 1 を刃パーツの移動量 45mm の位置におけるセンサ値 80 に対応させた。切る操作は全ての食材タイプに対して 5 回ずつ試行した。

(2) 実験結果

まずタイプ 1 の様に柔らかい/硬い食材に対する刃パーツの移動量と圧力センサ値の変化を表すグラフをそれぞれ図 6、図 7 に示す。

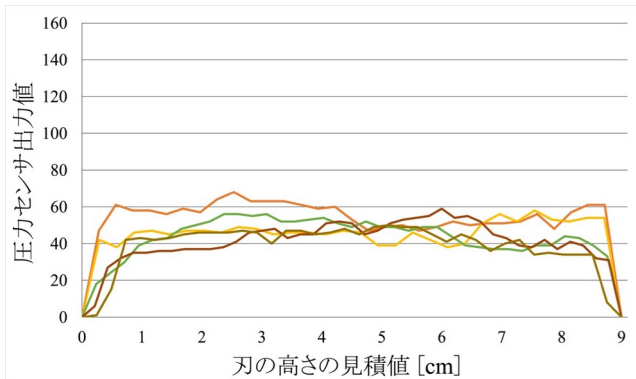


図 6 タイプ 1 (軟) : 刃の高さと圧力センサ出力値の変化
Figure 6 Type 1 (soft): blade height and pressure value.

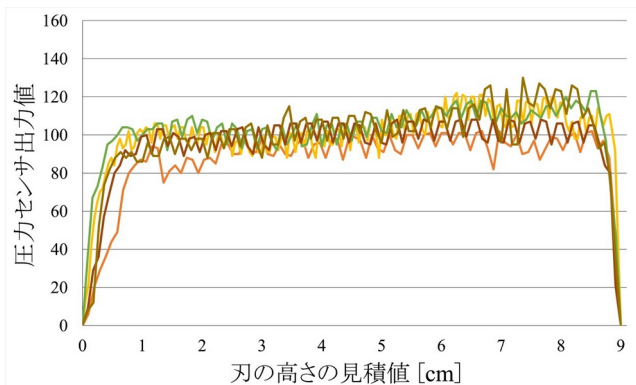


図 7 タイプ 1 (硬) : 刃の高さと圧力センサ出力値の変化
Figure 7 Type 1 (hard): blade height and pressure value.

一様に柔らかい/硬い場合のグラフにおいて、全 5 回の試行に渡る刃パーツの移動量 1~8cm の間の圧力センサ値の平均はそれぞれ 47.5/102.4 であった (より狭い範囲の 2~7cm の間ではセンサ値の平均はそれぞれ 49.7/98.8)。グラフより、いずれの場合も包丁デバイスの下ろし始めと下ろし終わりの 1cm 弱のセンサ値が増減する部分を除き、圧力センサ値を平坦に近く維持できていることが確認でき、センサ値の平均も 1~8cm の間で、予め設定した 50/100 と 3% 未満の乖離である値を得た。体感に関しては、現状著者らの主観に留まるが、硬軟いずれの場合もほぼ一定の硬さを維持していることが確認された。

次にタイプ 2 の硬軟が交互に現れる食材に対する刃パーツの移動量と圧力センサ値の変化を表すグラフを図 8 に示す。刃の高さ 3cm および 6cm の硬軟が変化するタイミング前後やその間のセンサ値の安定度が試行回によって異なり

不安定であるが、いずれの回もセンサ値が硬軟硬の順となっていることが視認できる。またタイプ 1 と同様、著者と周囲の体験者に限るがこれらの硬軟は実際に体感された。

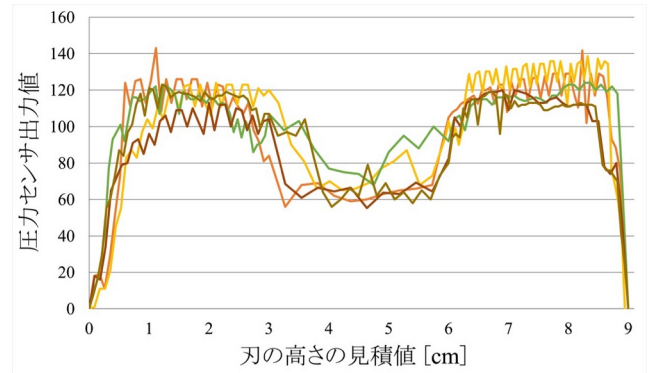


図 8 タイプ 2: 刃の高さと圧力センサ出力値の変化
Figure 8 Type 2: blade height and pressure value.

最後にタイプ 3 のサイン波状に硬さが変化する食材に対する刃パーツの移動量と圧力センサ値のグラフを図 9 に、さらに、曲線状であることを確認するために、20Hz5 フレームによるセンサ値の移動平均を表示したグラフを図 10 に示す。これらのグラフより、刃の高さ 0-9cm において凡そ上に凸の曲線を描くことや、高さ 4.5cm 前後でセンサ値の最大値を取り、その値は設定値である 80 に近いことが確認できた。なお、(上に凸の)曲線状にセンサ値が変化することの判断は体感では難しい。

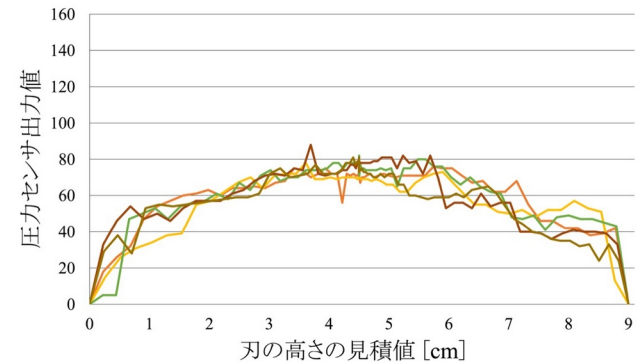


図 9 タイプ 3: 刃の高さと圧力センサ出力値の変化
Figure 9 Type 3: blade height and pressure value.

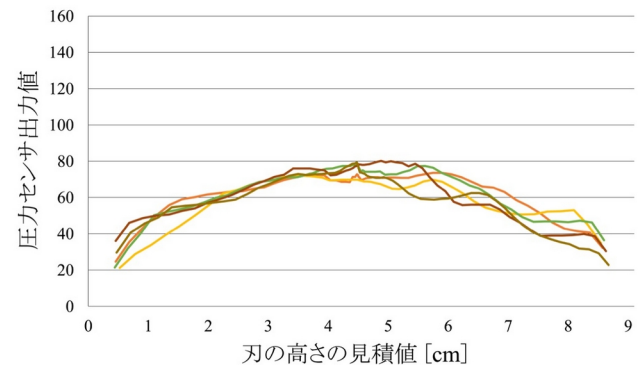


図 10 タイプ 3: 刃の高さと圧力センサ出力値の変化 (移動平均)
Figure 10 Type 3: blade height and pressure value (moving average).

4. 考察

4.1 今回の実験の圧力変化と今後の発展について

今回の実験では、比較的単純な3タイプの圧力の変化の再現を試みた。現存する食材を切った際の圧力変化に関しては、文献[5]において12種類の食材を用いて、食材の下に設置した6軸力覚センサを用いて圧力変化が計測されており、その中では、タイプ1に関しては絹豆腐や木綿豆腐が様に近い柔らかさをもった食材であることが見て取れ、ジャガイモとコンニャクも一定に近い圧力が持続する性質をもち、タイプ1は現実の食材の再現への応用も見込まれる。多層な食材として[5]ではキャベツとタマネギが計測されているが、これらの野菜の圧力データは多少変動はしているもののタイプ2のように硬軟が明確に交互に現れるものではなく、今回の設定に近い食材があるかは現状不明である(ミルフィーユのケーキは該当する可能性が残る)。タイプ3については純粋に人工的であることが予想される。今回実装した圧力制御のアルゴリズムとしては、3タイプそれぞれの圧力変化を実現するものを個別に作成しており、現状では任意の食材の圧力のパターンを入力として、それを実現するものとはなっていない。しかし、圧力データの数フレームの先読みとそれを反映したサーボモータの制御により、ロバストな圧力制御アルゴリズムへの拡張が可能と考えられる。それができれば、上記[5]で計測された現実の食材の圧力データが与えられたとき、その即応的な再現が可能となる。

4.2 仮想的に切る操作のエンタテインメント性について

包丁は、通常食材を切ることに特化して作られた道具であり、エンタテインメントへの応用に関しては、例えば韓国のパフォーマンスショーNANTAでリズム楽器として用いられたりしているものの、道具の危険性や倫理上、教育上の問題も含むため、その展開には慎重な扱いは必要となる。同時に、刃物で何らかの物体を切るという操作・動作は、それ自体習熟・熟達の要素・過程を含み、爽快感や達成感も付随し、さらに、切る際の硬さ、振動、滑らかさ、弾力等と関連した「切れ味」という物理的な特性と人の感性の双方に関係する要素をもつ行為であるため、エンタテインメントへの展開は有望と考えられる。本研究における比較的シンプルな硬さの時系列変化の条件下でも、筆者らや同研究室の学生、オープンキャンパスでの体験者らが、硬さの異なる食材やミルフィーユのように急激に変化する食材を切る体験した際、包丁で切るという単純な行為からは想像しにくいほど喜びを伴う驚きや新鮮さの反応を表現しており、その行為・体験には新たなエンタテインメント性の萌芽があると考えている。さらに、上記のような包丁と切る行為に関係する振動や弾力などのパラメータ群の体感も実現し、現実の食材に加え現実には存在しない条件や実際には危険だが仮想体験ならば望まれる場合などを効果的にデザインし、体感可能にできれば、包丁デバイスをを用いた新たなエンタテインメントコンテンツを創出できる可能性があると考えられる。

5. おわりに

食材の設定された硬さを提示する包丁デバイスを開発し、いくつかのタイプの硬さの変化の実証実験を行い、一定程度の制度で実現可能であることを確認した。今後は、より多様な硬さの変化を実現するロバストなアルゴリズムの構築、刃パーツ数の増加、本包丁デバイスを利用したエンタテインメントコンテンツの制作、今回扱った押し切り以外の切り方の実現等を検討・実現していく予定である。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 21K12198 の助成を受けて行った。

参考文献

- 1) 岡利多か子: 包丁の切れ味に関する研究 一包丁による被切削試料の変形を中心として一, 日本調理科学会誌, Vol. 8, No. 2, pp. 94-104 (1975).
- 2) 岡利多か子: 包丁の切れ味について, 日本調理科学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 49-51 (1989).
- 3) 竹腰久仁雄, 後藤学: 刃物の刃先先端のマイクロ構造と切れ味劣化に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 70, No. 695, pp. 2155-2162 (2004).
- 4) 川崎太志, 飯聡, 西村由二三, 白土男女幸, 濱田明美, 仲井朝美, 芳田哲也: 熟練者が研いだ包丁の刃先形状と官能評価との関係, 日本調理科学会誌, Vol. 42, No. 2, pp. 123-128 (2009).
- 5) 乃生将也, 佐藤敬子, 下川房男, 石塚裕己: なぜ, 包丁の切断により異なる感覚が生起されるのか?, 日本感性工学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 301-307 (2020).
- 6) 小林花菜乃, 加藤岳大, 横窪安奈, G. Lopez: 加速度センサを用いた包丁技術の判定, 第34回人間情報学会講演集, pp. 13-14 (2019).
- 7) 由良亮, 藤岡美香, 山本麻衣, 萩原勇人, 楠瀬千春: 包丁操作の運動解析—初学者と習熟者の特徴—, パイオメカニズム学会誌, Vol. 44, No. 4, pp. 229-235 (2020).
- 8) 齊藤志保, 野嶋琢也, 広田光一, 櫻井翔: KKse—包丁調理における児童の安全教育システム—, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 116, No. 340, pp. 39-44 (2016).