

# 料理ロボットによる野菜の乱切りのための切断手法の提案

○上馬 正寛 董 晨宇 木村 航平 工藤 俊亮（電気通信大学）

乱切りとは、野菜を大きさは揃えつつ不規則な形に切る切り方である。野菜を包丁で切断するロボットの研究は数多く行われているが、野菜を乱切りするロボットの研究はそれほど行われていない。野菜を乱切りするときは、大きさを揃えて切断することが重要である。しかし、野菜の形状を把握し、大きさが揃う切断面を決定することは簡単ではない。そこで、本論文では野菜の形状と中心線から切断面を決定する手法を提案する。野菜を模したモデルや実際の野菜を撮影して得たモデルを用いてシミュレーションを行い、本手法を検証した。本手法により、野菜の体積が一定になるような乱切りを料理ロボットで実現できるようになる。

## 1. 序論

近年、ロボット家電や家庭用ロボットの市場は拡大が続いている。本研究では家庭用料理ロボットによる包丁の操作に着目した。

乱切りとは、野菜を大きさは揃えつつ不規則な形に切る切り方である。野菜を包丁で切断するロボットの研究は数多く行われているが、野菜を乱切りするロボットの研究はそれほど行われていない。野菜を乱切りするときは、大きさを揃えて切断することが重要である。しかし、野菜の形状を把握し、大きさが揃う切断面を決定することは簡単ではない。この切断面を決定する手法を提案することが、本論文の目的である。

野菜の切断に関する研究として、今井らはロボットアームに包丁を装着し野菜を切断する手法を提案した [1]。しかし単純な切断動作を扱っており、乱切りは扱っていない。ロボットアームによる乱切りの研究も行われているが [2]、大きさを揃えることができていない。一方、ロボットアームを使わない専用ロボットとして、渡辺精機の人参回し乱切り機が挙げられる [3]。この機械は人参の太さを自動で計測し、大きさを揃えて切断することで乱切りを実現している。しかし、この手法は棒状の野菜にしか適用できないため、歪な形の野菜には対応できない。他にもイナモクのごぼう乱切り機 [4] やシンセメックのカボチャ乱切り装置 [5] があるが、これらの装置はある特定の野菜にしか対応していない。

そこで本論文では、大きさを揃えて野菜を乱切りするための切断面を決定する手法を提案する。具体的には、野菜の中心を通る中心線に沿って、野菜の形状から体積が一定となる切断面を決定する。

## 2. 提案手法

### 2.1 乱切りについて

乱切りとは、野菜を大きさは揃えつつ不規則な形に切る切り方である。不規則な形に切ることで表面積が大きくなり、火の通りや味の染み込みが良くなる。ただし大きさが不揃いだとな火の通りが不均一になり、加熱後に柔らかい野菜と硬い野菜が混じることがあるため、大きさは揃えることが望ましい。人が野菜を乱切りする際の具体的な手順は以下の通りである。

- (1) 野菜を大きさが揃うように包丁で斜めに切る。
- (2) 野菜を少し回転して切り口を上にする。

これらの作業を野菜の端まで交互に繰り返す。しかしロボットにおいては、まな板に載せた野菜を回転させるより、野菜を回転させずに切断方向を変えて乱切りする方が、包丁のみ操作すれば良いため効率的である。

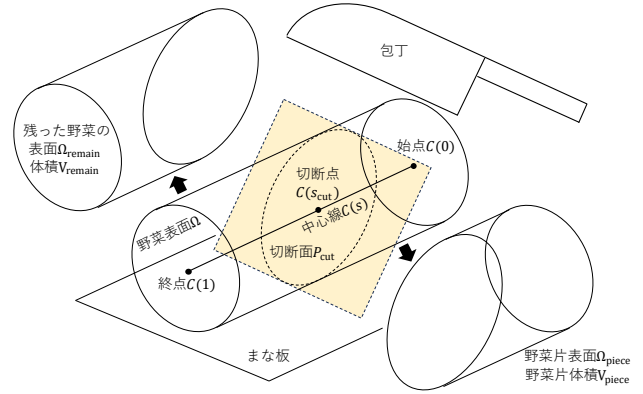


図 1: 野菜のモデル

本論文では、この乱切りのための全ての切断面を決定する手法を提案する。

### 2.2 野菜のモデル

図 1 に本論文で使用する野菜のモデルを示す。表面形状  $\Omega$  の野菜がまな板に載せてあるとする。野菜の端から端まで中心を通って結ぶ曲線を中心線  $C$  とし、媒介変数  $s$  により次のように表す。

$$C(s) = \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \\ z(s) \end{bmatrix} \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (1)$$

ここで、 $s = 0$  の位置を始点  $C(0)$ 、 $s = 1$  の位置を終点  $C(1)$  とする。野菜を切断する際は、始点  $C(0)$  から終点  $C(1)$  に向かって順に切断していくこととする。切断面  $P_{\text{cut}}$  は、平面の法線の向きと、中心線と平面の交点  $C(s_{\text{cut}})$  (切断点) によって定めるものとする。

また、野菜を切断して得られた部分を野菜片と定義する。切断時において切断面  $P_{\text{cut}}$  よりも始点  $C(0)$  側にある野菜の表面形状を、野菜片表面  $\Omega_{\text{piece}}$  とする。野菜片表面  $\Omega_{\text{piece}}$  とその穴を塞ぐ複数の切断面に囲まれた範囲が野菜片であり、その体積を野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  とする。反対側に残った野菜は、表面形状を  $\Omega_{\text{remain}}$ 、体積を  $V_{\text{remain}}$  とする。

### 2.3 乱切りのパラメータ

乱切り動作は以下の三つのパラメータで調整する。

- 切断体積  $V_{\text{cut}}$ : 所望の野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  を指定する。
- 切断角度  $\theta$ : 節 2.1 の手順 (1) で示した野菜を斜めに切る動作における、包丁の角度を指定する。指

定可能な値は  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$  であり、 $\theta = 0$  のときは乱切りではなく輪切りになる。

- 回転角度  $\varphi$ : 節 2.1 の手順 (2) で示した野菜を回転する動作における、野菜の回転角度を指定する。指定可能な値は  $0 \leq \varphi < 2\pi$  であり、 $\varphi = 0$  のときは野菜を回さない切り方になる。

## 2.4 切断面の算出

$m$  回目の切断における切断点  $C(s_{\text{cut}})$  の切断面  $P_{\text{cut}}$  は、節 2.1 で示した野菜を回転して斜めに切る動作を模倣するため、以下のように算出する。まず、切断点  $C(s_{\text{cut}})$  における中心線の単位接線ベクトル  $\hat{\mathbf{t}}_{\text{cut}}$  を次のように求める。

$$\hat{\mathbf{t}}_{\text{cut}} = \frac{\frac{d}{ds}C(s_{\text{cut}})}{\|\frac{d}{ds}C(s_{\text{cut}})\|} \quad (2)$$

次に図 2 のように、切断点  $C(s_{\text{cut}})$  を原点とし、接線ベクトル  $\hat{\mathbf{t}}_{\text{cut}}$  の方向を X 軸、まな板に平行な平面上にあって X 軸に垂直な方向を Y 軸とした座標系を定義する。この座標系を固定し、接線ベクトル  $\hat{\mathbf{t}}_{\text{cut}}$  を Z 軸に対して切断角度  $\theta$  だけ回転させ、さらに X 軸に対して回転角度  $(m-1)\varphi$  だけ回転させる。こうして得られたベクトルを切断面  $P_{\text{cut}}$  の単位法線ベクトル  $\hat{\mathbf{n}}_{\text{cut}}$  とする。これは次のように回転行列で表せる。

$$\hat{\mathbf{n}}_{\text{cut}} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \cos \varphi' \sin \theta & \cos \varphi' \cos \theta & -\sin \varphi' \\ \sin \varphi' \sin \theta & \sin \varphi' \cos \theta & \cos \varphi' \end{bmatrix} \hat{\mathbf{t}}_{\text{cut}} \quad (3)$$

ここで、 $\varphi' = (m-1)\varphi$  である。したがって、切断面  $P_{\text{cut}}$  は次の式を満たす位置  $\mathbf{p}$  を通る平面となる。

$$(\mathbf{p} - C(s_{\text{cut}})) \cdot \hat{\mathbf{n}}_{\text{cut}} = 0 \quad (4)$$

また、法線ベクトル  $\hat{\mathbf{n}}_{\text{cut}}$  が向く方向を切断面  $P_{\text{cut}}$  の表側とすると、切断面の裏側にある野菜が野菜片である。よって、野菜片表面  $\Omega_{\text{piece}}$  は野菜表面  $\Omega$  のうち次の式を満たす位置  $\mathbf{p}$  により構成される。

$$(\mathbf{p} - C(s_{\text{cut}})) \cdot \hat{\mathbf{n}}_{\text{cut}} < 0 \quad (5)$$

## 2.5 切断面の決定

切断面  $P_{\text{cut}}$  は、野菜片の大きさを揃えるため、野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  が切断体積  $V_{\text{cut}}$  に一致するように決定する。ただし実際には、中心線の媒介変数  $s$  は離散化して扱うため、切断点  $C(s_{\text{cut}})$  における野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  が切断体積  $V_{\text{cut}}$  に最も近くなるように切断面を決定する。具体的には、中心線上の全ての位置を切断点  $C(s_{\text{cut}})$  と仮定し、切断面  $P_{\text{cut}}$  と野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  を計算する。そして、体積の誤差  $\varepsilon = |V_{\text{piece}} - V_{\text{cut}}|$  が最小となる切断面を選択する。

全ての切断面を決定するには、切断面を一つずつ決定する必要がある。なぜなら、一回切断するたびに野菜の表面形状  $\Omega$  が変化し、体積の誤差  $\varepsilon$  が最小となる切断面も変化するからである。また、節 2.1 の手順 (2) に示した野菜を回転させる動作を模倣するため、野菜の回転角度も一回切断するたびに变化させる必要がある。全ての切断面を決定する手順を以下に示す。

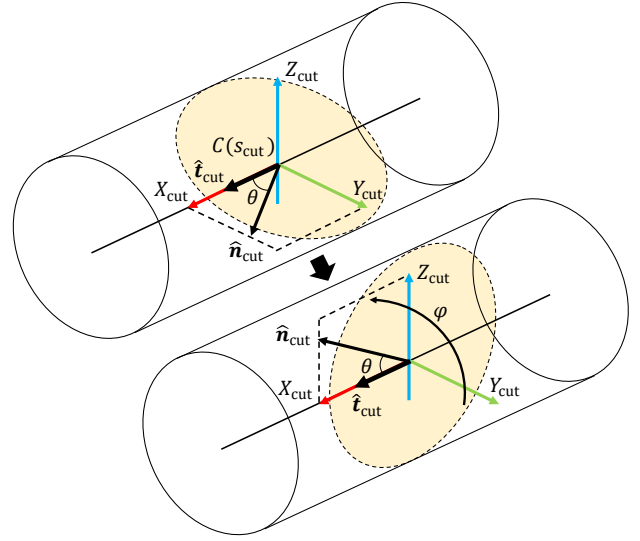


図 2: 切断面の算出

- (1)  $m$  回目の切断における切断面  $P_{\text{cut}}$  を、野菜表面  $\Omega$ 、中心線  $C(s)$ 、切断体積  $V_{\text{cut}}$ 、切断角度  $\theta$ 、回転角度  $(m-1)\varphi$  より決定する。
- (2) 残った野菜の表面形状  $\Omega_{\text{remain}}$  とその穴を塞ぐ複数の切断面により構成される表面を、次の切断における野菜表面  $\Omega$  とする。
- (3) (1) から (2) を、残った野菜の体積  $V_{\text{remain}}$  が切断体積  $V_{\text{cut}}$  より小さくなるまで繰り返す。

## 3. 実装

### 3.1 システム構成

ロボット環境を図 3 に示す。野菜の表面形状  $\Omega$  を検出するため、三菱重工業製ロボットアーム PA10-7C の手先に Intel 製 RGB-D カメラ RealSense D435 を装着した。RGB-D カメラで撮影した深度画像は、Python 上で RealSense を扱うライブラリ PyRealSense により取得した。野菜の表面形状  $\Omega$  は点群で表現することとし、三次元データを扱うオープンソースライブラリ Open3D [6] で深度画像を点群に変換した。また、中心線  $C(s)$  は先行研究 [2] に基づき、深度画像からおおよそ 1 mm の間隔で離散化された状態で取得した。これらのデータを用い、Open3D で提案手法を実装した。

### 3.2 野菜内部の点群の生成

切断後に残った野菜の表面形状  $\Omega_{\text{remain}}$  は、複数の切断面による穴が開いている。その穴を塞いで新たな野菜表面  $\Omega$  とするには、野菜の表面だけでなく切断面  $P_{\text{cut}}$  にも点群が必要である。そのため事前に野菜の内部を点群で充填し、切断後も切断面に点群が残るようにした。凹形状を含む野菜に対しても正しく内部点群を生成するため、以下の手順で点群を生成した。

- (1) 野菜の点群を複数のバウンディングボックスに分割する。
- (2) バウンディングボックス内で凸包を計算する。
- (3) 凸包の内部に様にランダムな点群を生成する。

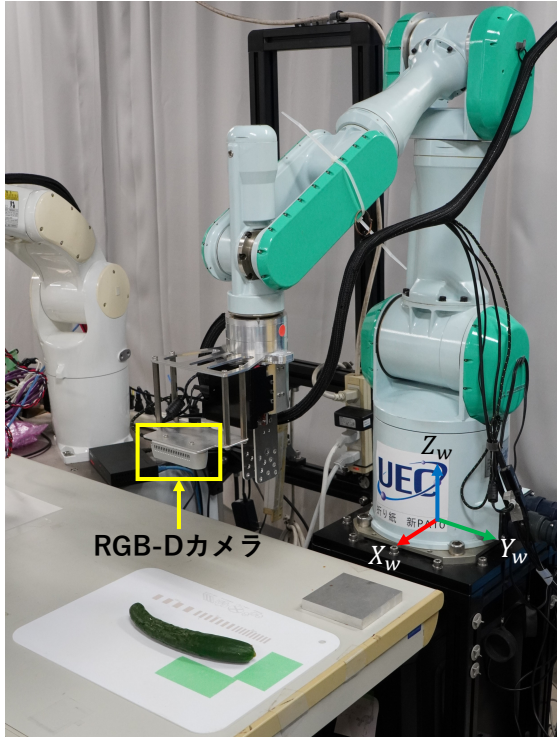


図 3: ロボット環境と世界座標系

### 3.3 野菜片体積の計算

野菜片体積  $V_{\text{cut}}$  は以下のように計算した。提案手法に基づき切断面  $P_{\text{cut}}$  と野菜片表面  $\Omega_{\text{piece}}$  を求めた後、それらを囲む凸包を計算し、その凸包の体積を野菜片体積  $V_{\text{cut}}$  とした。なお野菜の形状によっては、切断面  $P_{\text{cut}}$  が本来切断しない部位に被ってしまうことがある。そのため DBSCAN クラスタリングを用いて、切断点  $C(s_{\text{cut}})$  に最も近いクラスタのみを野菜片表面  $\Omega_{\text{piece}}$  として扱うようにした。

### 3.4 全ての切断面の決定

切断体積  $V_{\text{cut}}$ 、切断角度  $\theta$ 、回転角度  $\varphi$  の値を指定し、野菜表面  $\Omega$  と中心線  $C(s)$  から以下の手順で全ての切断面を決定した。

- (1)  $m$  回目の切断において、切断点  $C(s_{\text{cut}})$  を前の切断点 (1 回目は始点  $C(0)$ ) から順番に選び、野菜の回転角度を  $(m-1)\varphi$  として切断面  $P_{\text{cut}}$  と野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  を計算する。野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  が切断体積  $V_{\text{cut}}$  を超えた時点でこの処理を終了する。ただし野菜片体積が切断体積を最初から超えていた場合は、始点  $C(0)$  に向かって逆向きに切断点を選び、野菜片体積が切断体積を下回った時点で処理を終了する。
- (2) 計算済みの野菜片体積  $V_{\text{piece}}$  のうち、体積の誤差  $\varepsilon = |V_{\text{piece}} - V_{\text{cut}}|$  が最小となる切断面  $P_{\text{cut}}$  を選択する。
- (3) 残った野菜の表面形状  $\Omega_{\text{remain}}$  とその穴を塞ぐ複数の切断面により構成される表面を、次の切断における野菜表面  $\Omega$  とする。
- (4) (1) から (3) の処理を終点  $C(1)$  まで繰り返す。

表 1: 三次元モデルの直径と乱切りした後の野菜片体積

| 三次元<br>モデル | 直径 [mm] |    | 野菜片体積 [mm <sup>3</sup> ] |      |
|------------|---------|----|--------------------------|------|
|            | 始点      | 終点 | 平均                       | 標準偏差 |
| (a)        | 30      | 30 | 10654                    | 60   |
| (b)        | 20      | 60 | 10572                    | 246  |
| (c)        | 60      | 20 | 10929                    | 1207 |
| (d)        | 30      | 30 | 10462                    | 157  |
| (e)        | 20      | 60 | 10593                    | 264  |
| (f)        | 60      | 20 | 10941                    | 1186 |
| (g)        | 80      | 80 | 11564                    | 5434 |
| (h)        |         |    | 10658                    | 266  |
| (i)        |         |    | 10778                    | 892  |

## 4. 実験

### 4.1 実験方法

以下の三次元モデルに対して提案手法を適用した。

- (a) きゅうりを模した円柱
- (b) 人参を模した円錐台（細い方が始点）
- (c) 人参を模した円錐台（太い方が始点）
- (d) きゅうりを模した曲がった円柱
- (e) なすを模した曲がった円錐台（細い方が始点）
- (f) なすを模した曲がった円錐台（太い方が始点）
- (g) 大根を模した太い円柱
- (h) さつまいもを模した回転楕円体
- (i) 実際のきゅうり

(a) から (h) は人工的に作成した、野菜を模した形状の三次元モデルである。長さは全て 150 mm で、直径は表 1 の通りとした。なお (h) は回転楕円体であり、長径は 150 mm、短径は 50 mm とした。(i) は図 3 に示すように、実際のきゅうりを撮影して得た三次元モデルである。これらの三次元モデルに対して、乱切りのための切断面を提案手法により決定した。パラメータは全てのモデルで切断体積  $V_{\text{cut}} = 15^3 \pi \text{ mm}^3 \approx 10603 \text{ mm}^3$ 、切断角度  $\theta = 45^\circ$ 、回転角度  $\varphi = 90^\circ$  に統一した。

### 4.2 実験結果

三次元モデルと、乱切りした後の野菜片を図 4 に示す。全ての図で画像の右側が始点である。乱切りの特徴である不規則な形に切断されていることが分かる。図 4(g) のように、提案手法を用いて太い野菜を小さい体積で乱切りすると、薄切りになることが分かる。

また、野菜片体積の平均と標準偏差を表 1 に示す。モデル (c), (f), (g) の標準偏差が大きいのは、始点側が太いために、最初の方の野菜片体積が切断体積より大きくなっているためである。節 3.4 の手順 (1) に示した通り、切断面を決定する際に野菜片体積が切断体積を最初から超えていた場合は、始点に向かって逆向きに切断点を選ぶ。しかし始点ではこれ以上逆向きに切断点を選ぶことができないため、野菜片体積が大きくなる。そのため、モデル (c), (f) のように太い方を始点とするより、モデル (b), (e) のように細い方を始点とした方が、体積をより一定にできる。



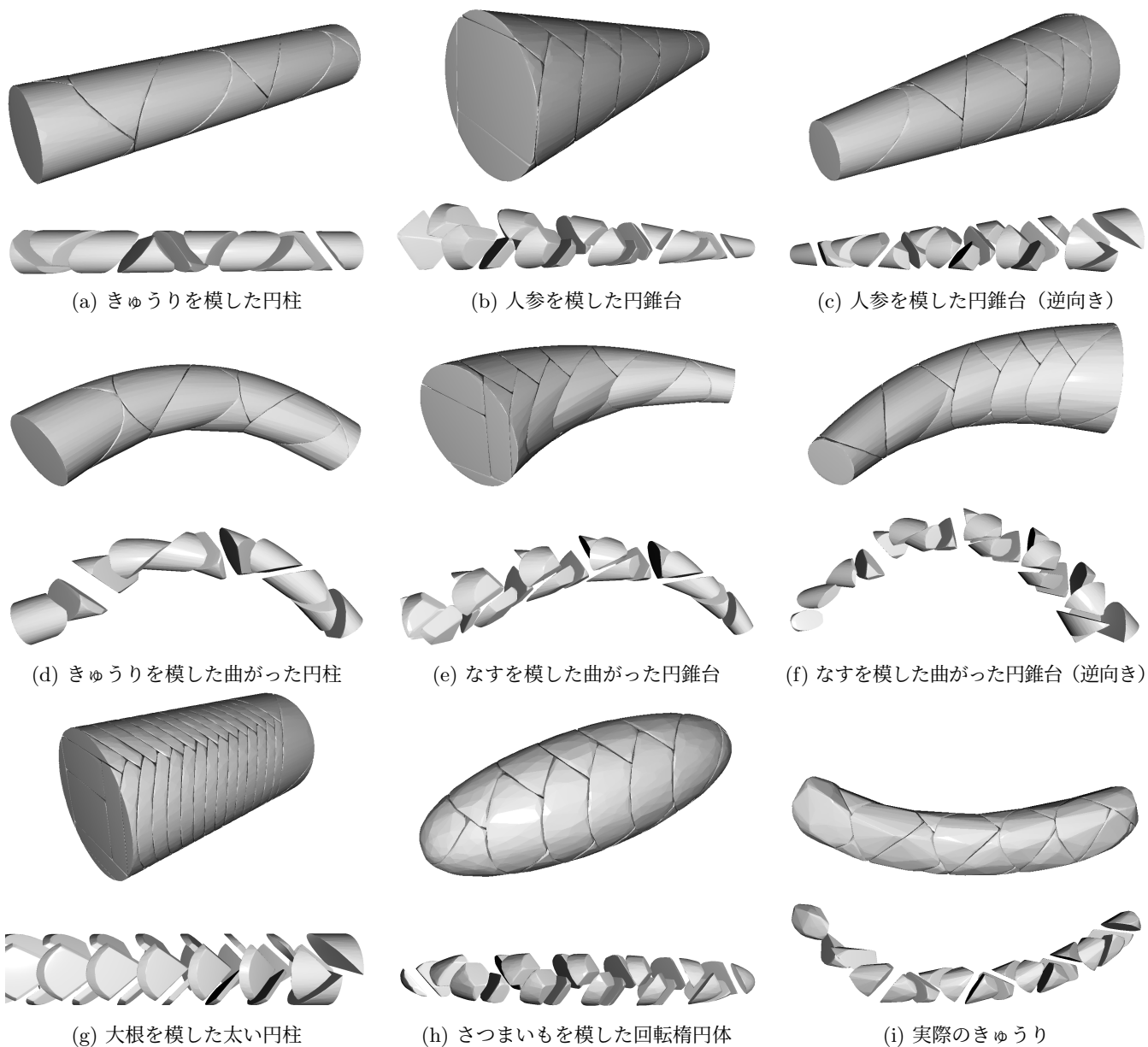


図 4: 三次元モデル（上）と乱切りした後の野菜片（下）

## 5. 結論

本論文では、大きさを揃えて野菜を乱切りするための、野菜の表面形状と中心線から切断面を決定する手法を提案した。乱切りの動作は、切断体積  $V_{\text{cut}}$ 、切断角度  $\theta$ 、回転角度  $\varphi$  の三つのパラメータで調整できるようにした。提案手法を Open3D で実装し、野菜を模して作成した三次元モデルや実際の野菜を撮影して得た三次元モデルに適用した。その結果、本手法で乱切りのための切断面を決定できることが確かめられた。

今後は本手法を用いて実際に野菜を切断する。具体的には、まな板に載せてある野菜に対し、自動で撮影、三次元モデルへ変換、切断面を決定、乱切りまで行う。また、実際の野菜を撮影して三次元モデルに変換するフローはまだ完成しておらず、手作業で調整して三次元モデルを作成した。今後この三次元モデルに変換するフローを改善する。

## 参 考 文 献

- [1] 今井啓明, 松田啓明, 末廣尚士, 工藤俊亮: “双腕ロボットによる料理作業実現のための食材の切断方法の提案”, 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 1498–1503, 2014.
- [2] 上馬正寛, 滝澤優, 末廣尚士, 木村航平, 工藤俊亮: “双腕ロボットによる湾曲した野菜の切断”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2P1-D25–, 2023.
- [3] 渡辺精機株式会社: “人参回し乱切り機 VR-60”, <https://watanabe-seiki.co.com/vr-60.html>
- [4] 株式会社イナモク: “牛蒡加工機 乱丸 IKB-AC60”, [https://inamoku.jp/pages/25/detail=1/b\\_id=81/r\\_id=35/](https://inamoku.jp/pages/25/detail=1/b_id=81/r_id=35/)
- [5] シンセメック株式会社: “カボチャ乱切り装置”, <https://www.synthemec.co.jp/pumpkin/>
- [6] Qian-Yi Zhou, Jaesik Park and Vladlen Koltun: “Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing,” arXiv:1801.09847, 2018.