

平成 24 年度 卒業論文

VR 調理学習システムにおける  
調理器具による押さえつけ動作とすくい上げ動作

指導教員  
舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学 工学部 情報工学科  
平成 21 年度入学 21115068 番

佐東 康平

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	従来研究の固体群操作モデル	4
2.1	固体群操作モデルの概要	4
2.2	調理容器の定義と固体群の表現方法	5
2.3	変形曲面	7
2.3.1	変形曲面の形状	7
2.3.2	変形曲面によるハイトフィールドへの加算	10
2.3.3	変形曲面による加算後の処理	10
2.4	存在確率に基づく固体群	11
2.5	容器外へのこぼれの表現	11
2.6	部分球形状の調理容器の操作	12
2.7	変形曲面による固体群の崩れの表現	14
2.8	剛体による固体群操作	15
2.8.1	調理器具の定義	15
2.8.2	調理器具と固体群の干渉判定	15
2.8.3	調理器具の軌跡と固体群の変形	17
2.8.4	調理器具の正の変形曲面	18
第3章	押さえつけ動作とすくい上げ動作	21
3.1	提案モデルの概要	21
3.2	調理器具による押さえつけ動作	22
3.2.1	変形曲面の形状	22
3.2.2	変形曲面の変数の設定	22

3.3	調理器具によるすくい上げ動作 . . . . .	24
3.3.1	調理器具上の固体群の表現方法 . . . . .	24
3.3.2	調理容器から調理器具への固体群移動 . . . . .	24
3.3.3	調理器具上の固体群の形状 . . . . .	25
<b>第4章</b>	<b>実験</b>	<b>27</b>
4.1	実験システム . . . . .	27
4.2	処理速度についての評価 . . . . .	28
4.3	挙動の自然さについての評価 . . . . .	31
<b>第5章</b>	<b>むすび</b>	<b>33</b>
	謝辞	34
	参考文献	35

## 第1章 はじめに

バーチャルリアリティ（以下，VR）とは、「現前していないにも関わらず，観測する者に同一の表象を生じさせる技術やシステム」[1] のことである。つまり，観測者があたかも実際の環境を利用しているのと本質的に同等の効果を持った環境を，コンピュータ上に作り出し，体験する [2] ということである。VR の使用用途は多岐に渡り，医療，製造，科学，デザイン，エンターテインメントなど幅広く利用されている。例としては，手術に関するシミュレータ [3]，学校での教育や訓練を目的としたシミュレータ [4][5]，インターネットを通じて香りを配信するシミュレータ [6] などが挙げられる。これらの VR システムを利用することで，実際に体験したい環境や操作したい対象物を準備するためのコストの削減，実体験を必要とする訓練効率の向上，実際の環境や物体を扱った際に起こりうる危険性の回避訓練などが可能になる。しかし，このようなシステムは実現するための装置が非常に高価で，大規模なものが多いため，VR 技術が一般家庭に広く普及しているとは言えない。

近年では，かつて高価だった体感的な操作が可能な装置が比較的，安価に手に入るようになり，一般家庭でも使用可能な VR システムやデバイスが身近な存在となりつつある。任天堂株式会社から発売されているビデオゲーム機「Wii」[7] では「Wii リモコン」と呼ばれるデバイスを用いることで直感的な操作が可能である。このような装置が普及することにより，一般家庭向けの新たな VR コンテンツの可能性が広がりつつある。ところで近年，核家族や単身赴任の増加に伴い，自分自身で料理をしなければならない状況が増えているため，調理に関する学習，訓練のためのシステムの需要が高まっている。このような状況において，調理の習得を支援するためのシステムに関する研究 [8] が進んでいる。また，株式会社タイトーから，料理を題材にしたゲーム「クッキング・ママ」[9] が発売されている。これは，操作者がゲーム内でミニゲームを行っていくことで，料理の手順を楽しみながら学習することを目的としている。

当研究室でも，一般家庭を対象とした VR コンテンツとして料理を取り上げ「バーチャル

お料理教室」の開発を行っている。このバーチャルお料理教室では、前述したクッキング・ママとは異なり、実際の調理に近い感覚で料理の手順を学習することができる。料理の手順とは具体的に、食材の準備、切断などの加工、加熱などの調理、盛り付け、といった料理における一連の手順を指す。当研究室ではこれまでに、調理の工程において、ご飯や具材などの、複数の小さな固体が集まったものに対する対話操作の研究を行ってきた。このような小さな固体の集まりに関する研究として、溶岩 [10] や砂 [11]などを対象とした対話操作がある。文献 [10] では、粒子法を用いることで、動きを厳密に表現しているが、固体一つ一つの挙動を全て計算しているため、計算量が大きく対話操作に不向きである。また文献 [11] では、粒子法を用いない格子に基づいたモデルにより対話操作を実現しているが、挙動の変化が局所的な逐次処理により計算されており、大域的な操作には対応できない。

これらの対象物のうち、フライパンなどの調理容器に入れて扱うものを、当研究室では「複数の小さな固体が集まったものを全体で一つの集合体」として考え、一つの操作対象として扱う。この操作対象を固体群と呼び、一つの操作対象として処理することで、高速な対話操作を可能とする固体群操作モデル [12] を提案している。この固体群操作モデルでは、固体群を個々の粒子の集合ではなく、調理容器の底面に配置した2次元格子に設定する各格子における対象物の高さ情報により、すなわち、ハイトフィールドにより固体群の形状と挙動の変化を表現している。この手法では、文献のモデルのような厳密な挙動を表現することは困難であるが、人が無意識に期待する挙動を高速に表現することを第一の目的とし、リアルタイム処理を実現している。

また、操作者が自由に操作することができる調理器具を導入し、調理器具による固体群の干渉を表現することで、さらなる直感的な操作を可能にした [13]。このモデルでは、調理器具の移動方向は水平面上に限定し、進行方向により操作面の法線方向を一意に決定することで、2自由度の操作を実現していた。また文献 [14] は、調理器具開発の第二段階として、移動範囲を水平方向のみの移動から上下方向の移動を認めることで移動範囲の拡張を行い、さらに、進行方向による操作面の法線方向の制限を鉛直軸を中心とする回転まで認めた。これにより操作面が常に垂直な範囲で調理器具による4自由度の操作を実現した。しかしこのモデルでは、調理器具の操作面が、調理容器の底面に対して垂直であるため、調理器具で食材片を下に押さえつける、すくい上げるなどの操作が不可能である。そこで本研究では一旦、調理器具の操作面を調理容器の底面に対して水平に限定し、3自由度の平行移動と鉛直軸を

中心とする1自由度の回転を行う調理器具による，食材片を押さえつける，すくいあげる操作モデルを提案する．

第2章では，従来の固体群操作モデルの概要を説明する．第3章では提案モデル，第4章では提案モデルの実験と結果について述べる．

## 第2章 従来研究の固体群操作モデル

### 2.1 固体群操作モデルの概要

本章では，当研究室でこれまでに提案してきている従来の固体群操作モデルについて説明する．この固体群操作モデルでは，固体一つ一つの挙動を計算するのではなく，固体群を一つの操作対象として処理することで挙動計算を高速化し，対話操作を実現する．操作者はフライパンのような形を想定した調理容器を傾ける，左右に振るといった操作を行うことで，調理容器内の固体群を形状変化させることができる．また，ヘラのような調理器具を用いて，調理容器内の固体群を局所的に操作することもできる．格子表現固体群操作モデルでは，固体群全体を一つの操作対象とみなし，固体群全体に作用する力による挙動を曲面で近似表現する．このような固体群の挙動を表現する際に生成する曲面を「変形曲面」と呼称する．変形曲面による固体群の挙動の例として，時刻  $t$  から時刻  $t + \Delta t$  における容器内の固体群の形状変化を固体群の断面図を用いて図 2.1 に示す．

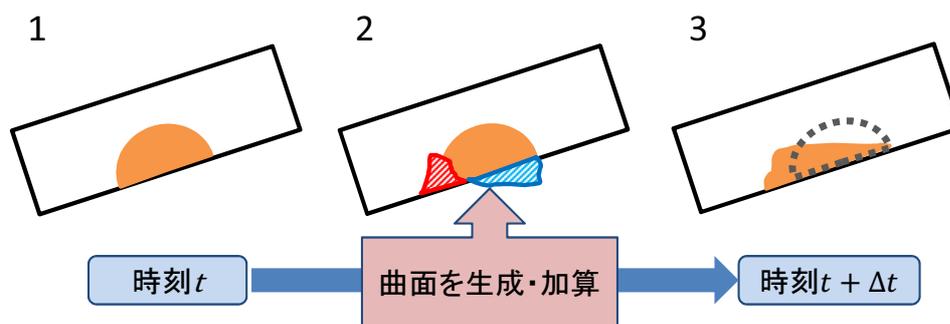


図 2.1: 変形曲面による固体群の形状変化の過程

1. 傾けられた容器内に固体群が存在する場合，固体群は重力により容器下方へ移動する．
2. 変形曲面を生成し，固体群の体積を増加，減少させる．

3. 時刻  $t + \Delta t$  の固体群は時刻  $t$  よりも容器下方へ移動する。

このような処理を行うことで固体群の挙動を高速に表現することができるが、実際に図 2.1-2 のような変形曲面の形状を求めることは困難である。そこで、代替の処理を行うことで図 2.1-2 の処理を近似的に表現している。この代替的な処理を固体群の断面図を用いて図 2.2 に示す。

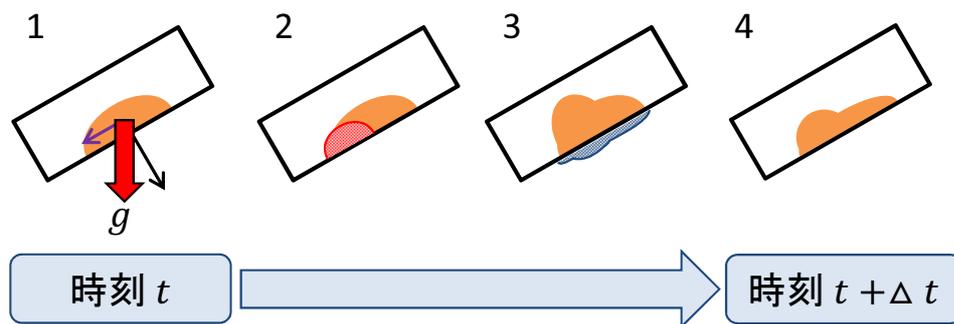


図 2.2: 正の変形曲面を用いた代替処理

1. 傾けられた容器内に固体群が存在する場合、固体群は重力  $g$  により容器下方へ移動する。
2. 固体群が移動する方向に正の変形曲面を生成し、固体群の体積に加算する。
3. 容器内の固体群全体の体積と、曲面加算前の体積が等しくなるように体積補正を行う。
4. 時刻  $t + \Delta t$  の固体群は時刻  $t$  よりも容器下方へ移動する。

また、図 2.2 において生成する正の変形曲面の形状には、計算量を少なくするため図 2.3 のような半楕円柱を用いる。

## 2.2 調理容器の定義と固体群の表現方法

固体群操作モデルでは、一つの調理容器内に存在する固体群を、見かけ上は複数に分かれていても、一つの操作対象として扱う。その調理容器を以下のように定義する。

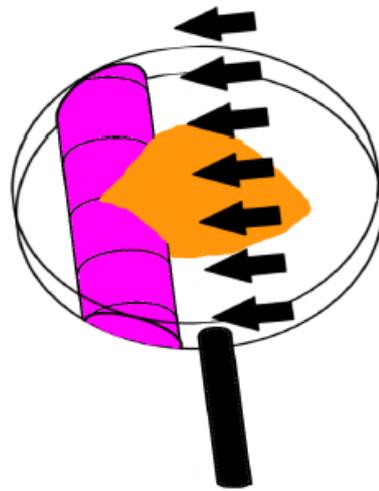


図 2.3: 半楕円柱形状の変形曲面

- 容器底面：凸多角形の平面図形
- 容器側面：底面に対して垂直，高さを  $h$  とする

また固体群は調理容器内に定義したハイトフィールドによって表現する．調理容器の形状が円柱で，内部に固体群が存在する場合の例を図 2.4 に示す．

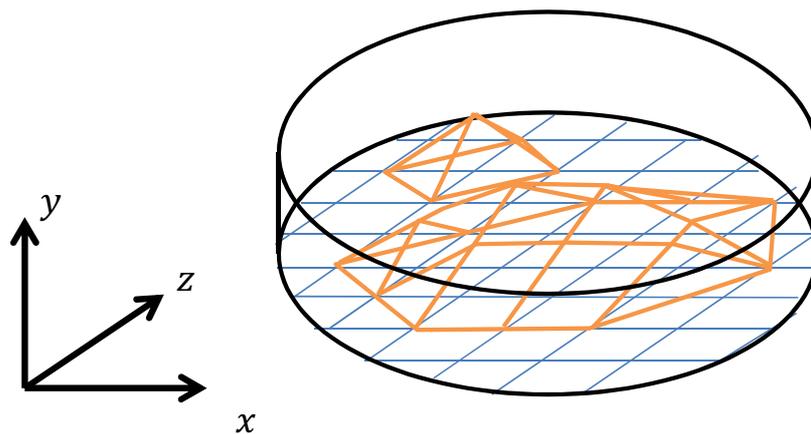


図 2.4: 円柱形状の容器の中に固体群が存在している様子

ハイトフィールドの格子  $(x_i, z_j)$  が持つ値  $f(x_i, z_j)$  と、その格子の面積  $S(x_i, z_j)$  を用いることで、その格子に存在する体積  $V(x_i, z_j)$  を表すことができる。

$$V(x_i, z_j) = S(x_i, z_j)f(x_i, z_j) \quad (2.1)$$

したがって、調理容器内に存在する固体群の総体積  $V_c$  は、調理容器内にあるハイトフィールドの格子数  $N$  を用いて次のように表される。

$$V_c = \sum^N V(x_i, z_i) \quad (2.2)$$

ハイトフィールドの各格子の値を変化させることで、調理容器内の固体群の挙動を表現する。

## 2.3 変形曲面

### 2.3.1 変形曲面の形状

固体群操作モデルで生成する正の変形曲面は半楕円柱であるため、変形曲面を定義する変数を以下に示す。(図 2.5)

- 調理容器底面と平行である楕円の長半径  $a$
- 調理容器底面と垂直である楕円の短半径  $b$
- 調理容器内での位置  $o_D$
- 楕円柱の中心軸  $L_D$
- 楕円柱の長さ  $r_D$

調理容器を振る、傾けるなどの動作を行うことによって、調理容器内の固体群に、調理容器底面に平行な力  $F_b$  が加わるとする。この時、固体群は重心  $G_c$  に集まっていると仮定し、変形曲面の生成位置を重心  $G_c$  から力  $F_b$  の方向に位置するように設定する。半楕円柱の生成位置  $o_D$  は以下のように求められる。

$$o_D = G_c + \frac{F_b}{|F_b|} \nu a \quad (2.3)$$

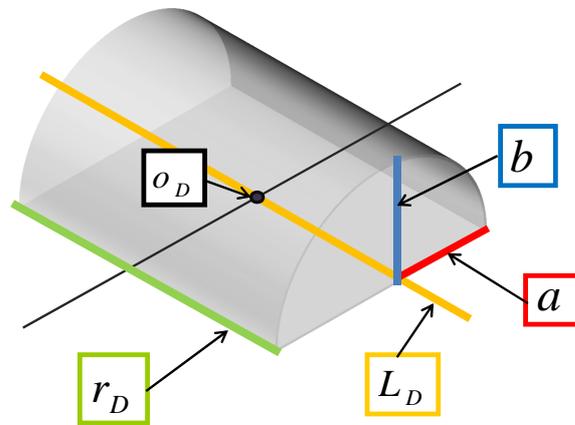


図 2.5: 半楕円柱の形状決定

ここで、 $G_c$  はハイトフィールドの重心であり、以下のように求められる。

$$G_c = \frac{1}{V_c} \sum_{i,j}^N f(x_i, z_j) m_{ij} \quad (2.4)$$

$m_{ij}$  はハイトフィールドの格子の座標であり、 $\nu$  は任意の定数である。

半楕円柱の断面となる楕円の長半径  $a$  は、固体群操作モデルにおける固体群の移動距離と移動する体積量の双方に関するパラメータである。長半径  $a$  が  $a = 0$  ならば、半楕円柱は存在しないことになり、固体群は移動しない。固体群は剛体とは異なり、図 2.6 のように容器端に達しても移動し続ける。そのため、固体群の大部分が容器の端まで移動し終わるまで  $a > 0$  とする必要がある。

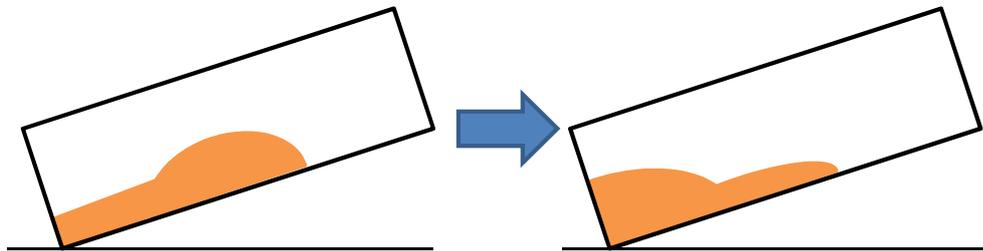


図 2.6: 固体群の調理容器端での動き

そこで，調理容器の側面から固体群に作用する垂直抗力  $F_N$  を考え， $a$  は調理容器の端に接している固体群の量に対して減少するように定義する．

$$a = \begin{cases} T_1 - |F'_N| & (T_1 \geq |F'_N|) \\ 0 & (T_1 < |F'_N|) \end{cases} \quad (2.5)$$

ここで， $T_1$  は定数， $F'_N$  は調理容器の側面からの抗力  $F_N$  のうち， $F_b$  に平行な成分である．固体群操作モデルでは  $F_N$  を，容器の側面に接する固体群の量とその重心から近似的に求める．ここで， $F'_N$  は以下のように求められる．

$$F'_N = -|F_N| \cos\phi \frac{F_b}{|F_b|} \quad (2.6)$$

$\cos\phi$  は以下のように， $F_b$  と  $F_N$  の内積で表すことができる．

$$\cos\phi = \frac{F_N \cdot F_b}{|F_N||F_b|} \quad (2.7)$$

また， $F_N$  は以下のように求められる．

$$F_N = T_2 V_c^{side} \frac{G_c^{side}}{|G_c^{side}|} \quad (2.8)$$

ここで， $T_2$  は定数， $V_c^{side}$  は調理容器の側面に接している格子の体積の総和， $G_c^{side}$  は調理容器の側面に接している固体群の重心であり，それぞれ以下のように求められる．

$$V_c^{side} = \sum^{N_{side}} f(x_{i'}, z_{j'}) \quad (2.9)$$

$$G_c^{side} = \frac{1}{V_c^{side}} \sum^{N_{side}} f(x_{i'}, z_{j'}) m_{i'j'} \quad (2.10)$$

式(2.9)，式(2.10)における， $N_{side}$  は調理容器内に定義されたハイトフィールドの格子のうち，調理容器の側面に接している格子  $(x_{i'}, z_{j'})$  の総数であり， $m_{i'j'}$  は格子  $(x_{i'}, z_{j'})$  の座標である．

長半径  $a$  は固体群が容器の側面から受ける抗力を考慮して定義されたパラメータであるが，固体群に作用する力や固体群の体積による影響が少ない．よって，これらを補うために短半径  $b$  を以下のように定義する．

$$b = \begin{cases} T'_2 |F_b| - \mu' \sqrt{V_c} & (|F_b| \geq \mu) \\ 0 & (|F_b| < \mu) \end{cases} \quad (2.11)$$

$T_2'$  は定数,  $\mu$  は最大静止摩擦係数,  $\mu'$  は動摩擦係数を表すパラメータである.

半楕円柱の姿勢は, 楕円柱の芯となる直線  $L_D$  で定義される.  $L_D$  は  $o_D$  を通り,  $F_b$  と直交ベクトルであるため, 実数  $t$  とベクトル  $l_D$  を用いて, 以下のように表される.

$$L_D = o_D + tl_D \quad (2.12)$$

$l_D$  は以下の条件を満たすベクトルである.

$$l_D \cdot \frac{F_b}{|F_b|} = 0 \quad (2.13)$$

楕円柱の長さ  $r_D$  は, 調理容器の底面を構成する平面図形と直線  $L_D$  の交点が交わってできる線分の長さに等しくなるように設定する.

### 2.3.2 変形曲面によるハイトフィールドへの加算

2.3.1 節において決定した変形曲面のパラメータより, 正の変形曲面である半楕円柱を生成し固体群に加算を行う. 変形曲面による加算は, 加算する対象の格子  $(x_i, z_j)$  の座標  $m_{ij}$  と直線  $L_D$  との距離  $l_{ij}$  が  $l_{ij} \leq a$  となる格子に行く. 正の変形曲面によって加算された格子  $(x_i, z_j)^{add}$  が持つ値  $f(x_i, z_j)^{add}$  は以下のように求められる.

$$f(x_i, z_j)^{add} = \begin{cases} f(x_i, z_j) + b\sqrt{1 - (\frac{l_{ij}}{a})^2} & (l_{ij} \leq a) \\ f(x_i, z_j) & (l_{ij} > a) \end{cases} \quad (2.14)$$

### 2.3.3 変形曲面による加算後の処理

固体群操作モデルでは, 変形曲面によって固体群の挙動を表現するが, 変形曲面による加算後, 固体群の総体積が曲面加算前と比べて増加する. そこで, 変形曲面加算後の体積が加算前の体積と等しくなるようにハイトフィールドの全格子に対して減算を行う. 減算後の格子  $(x_i, z_j)$  が持つ値  $f(x_i, z_j)'$  は以下のように求められる.

$$f(x_i, z_j)' = \frac{V_c}{V_c^{add}} f(x_i, z_j)^{add} \quad (2.15)$$

$f(x_i, z_j)^{add}$  は変形曲面加算後の格子の値である.  $V_c^{add}$  は変形曲面加算後のハイトフィールドの格子が持つ値の総和であり, 以下のように求められる.

$$V_c^{add} = \sum^N f(x_i, z_j)^{add} \quad (2.16)$$

このような処理を行うことで, 体積を維持しつつ固体群の挙動を表現することができる.

## 2.4 存在確率に基づく固体群

現実世界における固体群の最小構成要素は微小な固体であり，有限の大きさを持っている．従来の固体群操作モデルでは，固体群はハイトフィールドによって表現されているため最小構成要素が定義されていない．そのため，ハイトフィールドで表現されている固体群では，無限小の固体が存在していることになる．そこで，ハイトフィールドで表現された固体群の最小構成要素  $\alpha$  を定め，それ以上の大きさの固体群のみを描画する． $f(x_i, z_j) < \alpha$  である格子  $f(x_i, z_j)$  が存在する場合，その格子における固体群の存在を  $f(x_i, z_j)$  を用いて確率的に判定し，その結果に従って固体群描画を行う．このような確率的に存在が決定される固体群の描画のために，独立なハイトフィールドである，描画ハイトフィールドを定義する．描画ハイトフィールドの各格子が持つ値  $f^e(x_i, z_j)$  は，調理容器内に定義されたハイトフィールドから以下のように求める．

- $f(x_i, z_j) < \alpha$  のとき

$$f^e(x_i, z_j) = \begin{cases} (P(x_i, z_j) \text{ の確率で}) & 0 \\ (1 - P(x_i, z_j) \text{ の確率で}) & \alpha \end{cases} \quad (2.17)$$

- $f(x_i, z_j) \geq \alpha$  のとき

$$f^e(x_i, z_j) = f(x_i, z_j) \quad (2.18)$$

$P(x_i, z_j)$  は格子  $(x_i, z_j)$  に固体群が存在する確率であり，以下のように求める．

$$P(x_i, z_j) = \frac{f(x_i, z_j)}{\alpha} \quad (2.19)$$

毎フレーム，変形曲面でハイトフィールドの形状を変化させた後，以上のように存在確率に基づく固体群を反映した容器内における固体群分布を計算する．計算結果を描画ハイトフィールドに代入して描画することで，調理容器内の固体群を表現する．

## 2.5 容器外へのこぼれの表現

計算コストを抑えた粒子を導入することで，容器内の固体群が容器外へ落下する様子を表現する．容器外へこぼれが発生する条件を定義するために設定するこぼれ境界を図 2.7 に

示す．

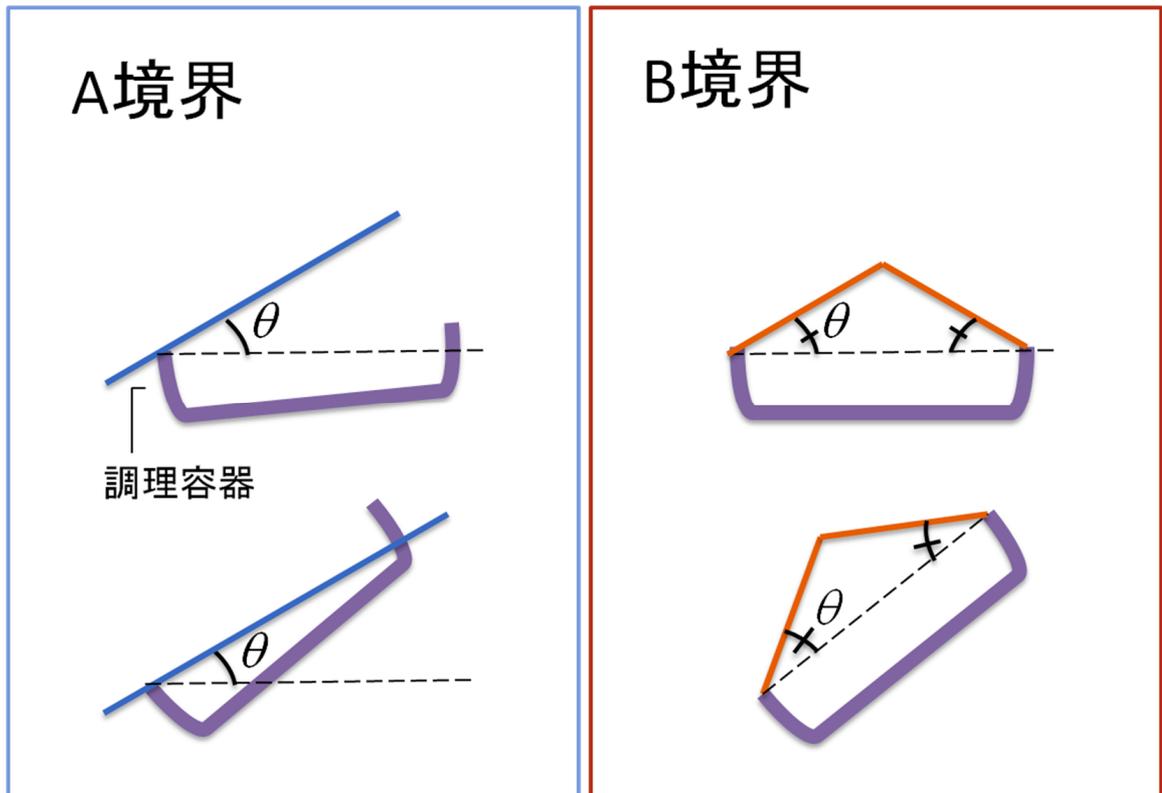


図 2.7: 固体群のこぼれ境界

A 境界は容器を傾けた際に固体群がこぼれる高さの境界，B 境界はへらなどの調理器具によって押し出されることで固体群がこぼれる高さの境界である．なお， $\theta$  は積み上がった固体が自発的に崩れることなく安定を保つ斜面の角度とする．固体群は二つの境界のどちらかを越えた部分に対し，2.4 節で説明した存在確率に基づいた粒子を自由落下のみを行う「自由落下粒子」へと変換し，容器外の空間へ落とすことでこぼれの挙動を実現する．また，境界を越えた高さから容器外へのこぼれによって減少する固体群体積を求め、こぼれる前の容器内の固体群体積から減算することで体積の補正を行う．

## 2.6 部分球形状の調理容器の操作

ところで，2.2 節，2.3 節で述べた固体群操作モデルは，計算の簡略化のため，容器形状は一般的な加熱調理容器を想定した底部を平面に限定している．しかし，例外として中華鍋の

ような底部全体が丸みを帯びた容器も存在する．また，将来的に「バーチャルお料理教室」で料理手順における「盛り付け」の工程を表現する上で，皿などの一般的に丸みを帯びた食器も扱いたい．そこで，丸みを帯びた容器の形状を部分球と考えることで簡略化を行い，少ない計算量を保ちつつ部分球形状の調理容器による操作も実現している．

このモデルでは容器形状を部分球とし，固体群と同様に表現するための部分球容器に対するハイトフィールド格子を導入する(図 2.8)．基準面の各格子における部分球面の高さにより容器形状を表す．その曲面の高さと固体群の体積による高さを足し合わせることで容器内の固体群の表面位置を算出する．また，容器形状が曲面であるため，容器内の固体群の挙動には傾斜より決定できる重力による局所的な力が作用する．これを静止している容器から力を受けていると考え，容器操作による力との合力が固体群に作用するとみなす．さらに，曲面の傾斜によって固体群はある点に集まるような挙動をするため，その点から各格子の距離によって設定できる半楕円体形状の変形曲面を適用する．そして，合力により曲面の形状と位置を決定し，ハイトフィールドへ加算した後，全体から増加した体積を減算することで，体積を維持しつつ固体群が移動と変形を表現する．

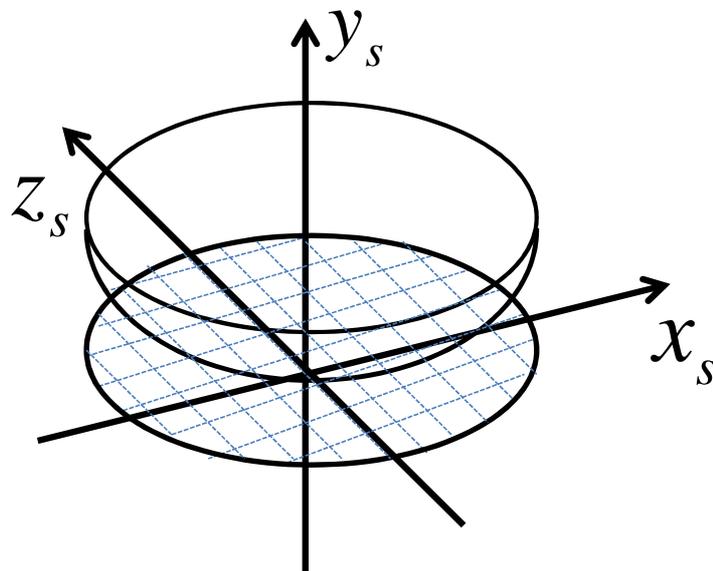


図 2.8: 部分球容器に対するハイトフィールド格子

## 2.7 変形曲面による固体群の崩れの表現

調理容器内の固体群の移動は、容器を移動することにより起こるだけではない。容器移動などにより固体群が高く積み上げられた状態で容器を静止した場合にも、限定された範囲で崩れが起こる。そこで崩れる固体群全体、あるいはその一部分を一体的に扱い、変形曲面によって崩れを表現する。このモデルでは、適切なパラメータを設定することで、固体群の崩れを任意のステップで行うことが可能となる。固体群の崩れ挙動を固体群の断面図を用いて図 2.9 に示す。始めに崩れが起こる可能性のある箇所を近傍との関係から求める。次に、円錐状の崩れ領域を定義する。崩れ領域は積み重なった固体群が安定を保つ形状を基に作る。崩れ領域の体積と固体群の体積との比較によって固体群の形状を推定し、崩れが起こるかを最終的に判定する。崩れが起こると判定された領域に変形曲面を適用することにより、大きな領域で固体群が崩れる挙動を表現する。また、変形曲面を適切に設定することで、任意のステップで崩れが表現可能となる。

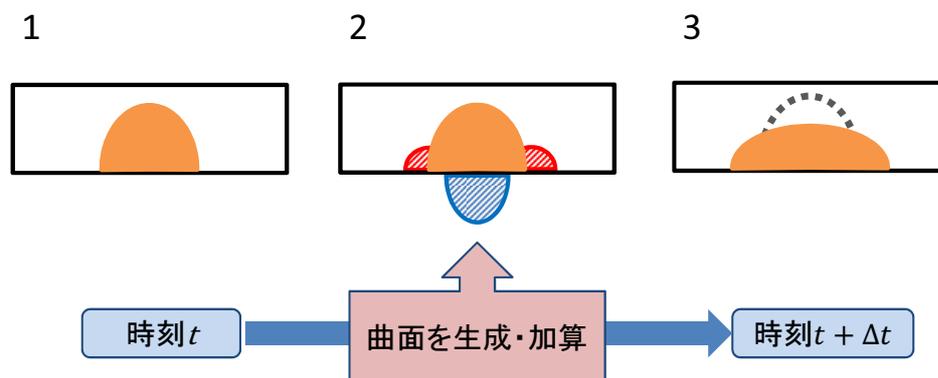


図 2.9: 曲面による固体群の崩れ表現

1. 急な斜面を形成するように積み重なった固体群が崩れると判定する。
2. 変形を実現するための曲面を定義し、体積を増加、減少させる。
3. 崩れる前よりも緩やかな斜面を形成する。

## 2.8 剛体による固体群操作

### 2.8.1 調理器具の定義

前説までで、調理容器を振る、傾けるといった方法で、固体群を間接的に操作することは可能であるが、固体群を局所的に操作することは困難である。この節では剛体の調理器具による固体群を局所的に操作するためのモデルについて説明する。フライパンなども調理器具の一種であるが、これらは調理容器と呼び、ヘラなどを調理器具と呼称することにする。

このモデルでは、剛体は固体群と接触する部分（以下、固体群操作部と呼称する）が1つ以上の長方形からなるものと限定し、固体群操作部が鉛直となる姿勢で、水平方向と上下方向の平行移動と、面の向きを鉛直軸により回転する移動を行うものとする。

### 2.8.2 調理器具と固体群の干渉判定

本モデルでは、調理器具の水平方向と上下方向の移動、そして面の向きの鉛直軸による回転を行う。そこで、調理器具の固体群と接触する部分を構成する頂点により構成される三次元凸包を考え、その凸包と固体群の干渉を調理器具と固体群の干渉として扱うものとする。凸包の例を図 2.10 に示す。

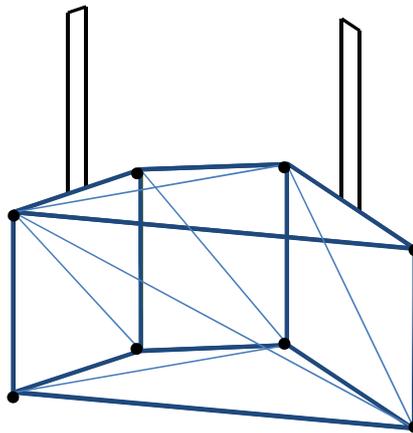


図 2.10: 凸包の例

調理器具は三次元空間上を自由に平行移動させることができるため、凸包を構成する点は三次元座標によって表される。そこで、ある格子  $(x_i, z_j)$  上の固体群の高さが  $f(x_i, z_j)$  で表

されるとき、点  $(x_i, f(x_i, z_j), z_j)$  を  $P_{ij}^h$  とし、同様に点  $(x_i, 0, z_j)$  を  $P_{ij}^y$  とする。このとき、以下の2つの条件を満たす場合、固体群は凸包  $H_{ch}$  と干渉していると判定する。

1. 凸包  $H_{ch}$  とハイトフィールドの格子の平面（以下、格子座標平面と呼称する）に正射影した平面図形  $H'_{ch}$  と、ハイトフィールドの格子  $p_{ij} = (x_i, z_j)$  が、 $p_{ij} \in H'_{ch}$  である。
2.  $P_{ij}^y$  と  $P_{ij}^h$  を通過する直線  $l_{yh}$  と凸包  $H_{ch}$  の交点  $P_{ij}$  が存在するとき、 $P_{ij}^y$  と  $P_{ij}$  の距離が、ハイトフィールドの格子が持つ値  $f(x_i, z_j)$  よりも小さい。

凸包を構成する三角形  $S_k$  の3つの頂点  $A_k, B_k, C_k$  を、直線  $l_{yh}$  が鉛直となるようにアフィン変換したものを、 $A'_k, B'_k, C'_k$  とする。また、鉛直となるように変換した直線は  $l'_{yh}$  とする。三角  $S'_k$  と直線  $l'_{yh}$  の交点を  $P'_{ijk}$  とすると、 $P'_{ijk} = (x_i, y_{ijk}, z_j)$  であり、 $P'_{ijk}$  の値は以下のように求められる。

$$P'_{ijk} = A'_k - \frac{1}{n'_k} \{n'_k{}^x (P'_{ijk} - A'_k)^x + n'_k{}^z (P'_{ijk} - A'_k)^z\} \quad (2.20)$$

なお、 $n'_k$  は三角形  $S'_k$  の法線ベクトルである。

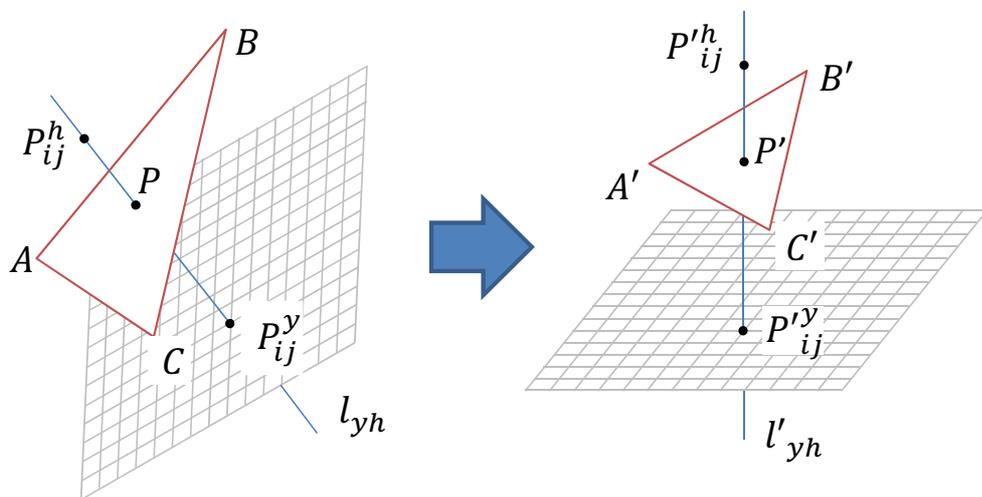


図 2.11: 直線  $l_{yh}$  が鉛直になるようにアフィン変換

ここで、凸包と直線が干渉している場合、2つの交点を持つことが凸包の定義より明らかなので、2点を区別するため、ハイトフィールドの格子  $(x_i, z_j)$  において凸包と干渉している

高さ  $z_{ijk}$  が低い方の高さを  $h^{low}(x_i, z_j)$  , 高い方の高さを  $h^{high}(x_i, z_j)$  とする (図 2.12 参照) .

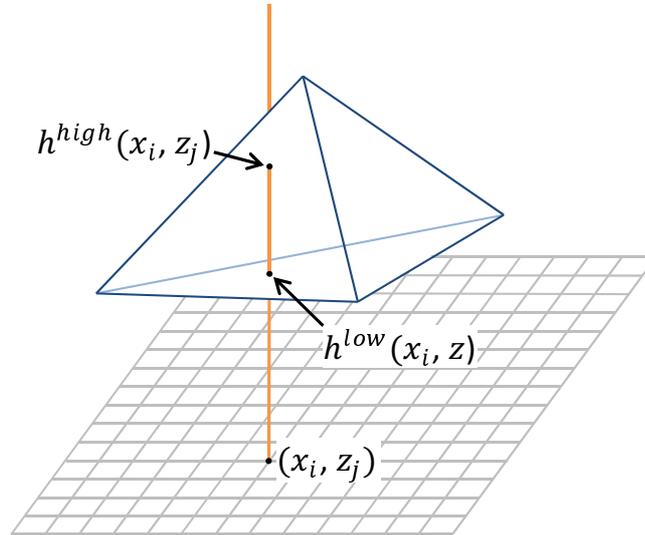


図 2.12: 凸包と直線の交点

### 2.8.3 調理器具の軌跡と固体群の変形

調理器具の固体群操作部の移動軌跡より上部に存在していた固体はその下に存在する固体との摩擦によって, ある程度の量が引きずられるように動く (図 2.12) . そこで, 固体群操作部とある格子  $(x_i, z_j)$  が干渉している場合に, その格子から減らす値  $v_{ij}^{sub}$  を以下のように求める .

$$v_{ij}^{sub} = \begin{cases} 0 & (f(x_i, z_j) < h^{low}(x_i, z_j)) \\ f(x_i, z_j) - h^{low}(x_i, z_j) & (h^{low}(x_i, z_j) \leq f(x_i, z_j) \leq h^{high}(x_i, z_j)) \\ f(x_i, z_j) - (h^{high}(x_i, z_j) - h^{low}(x_i, z_j)) & \\ \quad - \frac{f(x_i, z_j) - h^{high}(x_i, z_j)}{2} & (f(x_i, z_j) > h^{high}(x_i, z_j)) \end{cases} \quad (2.21)$$

これにより, 減算される体積の総和  $V^{sub}$  は, ハイトフィールドの全格子数  $N$  を用いて, 以下のように求められる .

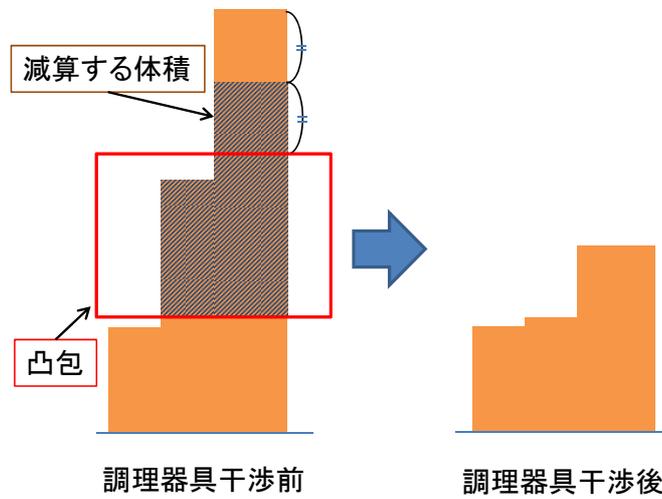


図 2.13: 凸包と固体群の干渉

$$V^{sub} = \sum_{ij}^N v_{ij}^{sub} \quad (2.22)$$

格子  $(x_i, z_j)$  から  $V_{ij}^{sub}$  を減算することで、固体群が調理器具の移動軌跡との干渉により変形する挙動を表現する。

#### 2.8.4 調理器具の正の変形曲面

調理器具と固体群との干渉によって生成される正の変形曲面は四分楕円柱とし、変形曲面を定義する変数は以下のようにする (図 2.14)。

- 四分楕円柱の断面となる楕円の長半径  $a$
- 四分楕円柱の断面となる楕円の短半径  $b$
- 四分楕円柱の長さ  $d$
- 空間上の位置  $o_C$
- 楕円の短軸と長軸に直交する直線  $L_C$

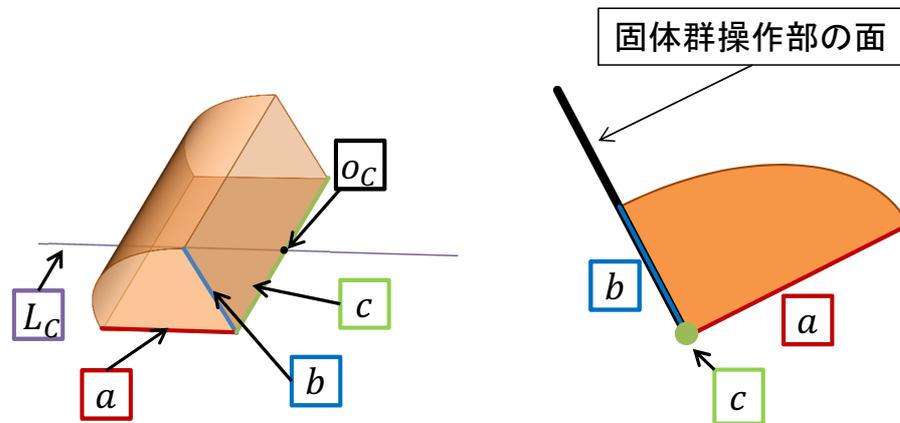


図 2.14: 四分楕円柱のパラメータ

空間上での位置  $o_C$  は固体群操作部上に設定する基準点を用いて決定する．楕円柱の高さ  $c$  は固体群操作部の幅  $d$  を設定する．楕円の短軸と長軸に直交する  $L_C$  は固体群操作部の法線と平行であり，点  $o_C$  を含む直線とする．固体群操作部の一番下の部分である辺を固体群操作部の底辺と呼ぶと，長半径  $a$  の方向を固体群操作部の面法線と平行に設定し，短半径  $b$  の方向は固体群操作部の面に平行，かつ固体群操作部の底辺と垂直に設定する．長半径  $a$  は調理器具の移動速度  $v$  と固体群操作部の面法線  $n$  を用いて，次のように設定する．

$$a = T_3 |v \cdot n| \quad (2.23)$$

ここで， $T_3$  は定数である．この四分楕円柱によって格子に加算する値は 2.8.3 節で求めた，減算する体積の総和  $V^{sub}$  より求めるため，短半径  $b$  には定数を設定する．

調理器具の移動軌跡との干渉によって減算した体積と同体積の四分楕円柱を生成し，格子に値を加算する．しかし，固体群の形状を格子によって表現しているため，離散化した値を用いているため体積が保持されるとは限らない．そこで，減算した体積と正の変形曲面により加算する体積を同じにするため，格子に加算する値に対して修正を行う．正の変形曲面により格子の値を増加させる体積の総和  $V^{add}$  は，以下のように求められる．

$$V^{add} = \sum^N v_{ij}^{add} \quad (2.24)$$

格子  $(x_i, z_j)$  が正の変形曲面を加算する前の値を  $G(x_i, z_j)$  とすると, 加算後の持つ値  $G'(x_i, z_j)$  は, 以下のように求められる.

$$G'(x_i, z_j) = G(x_i, z_j) + \frac{V^{add}}{V^{sub}} v_{ij}^{add} \quad (2.25)$$

## 第3章 押さえつけ動作とすくい上げ動作

### 3.1 提案モデルの概要

前章 2.8 節で述べた調理器具による固体群の局所的な操作モデルは、操作面を鉛直に制限した 4 自由度の操作が可能である。しかし固体群を押さえつける動作、一部分をすくい上げる動作には対応していない。操作面の制限をなくし、6 自由度にする必要があるが、操作途中で操作面の水平面に対する角度が変化する状況は非常に複雑である。そこで本章では、調理器具の操作部を水平に限定し、3 自由度の平行移動と鉛直軸を中心とする 1 自由度の回転に制限した上で問題点を明確化し、実現方法を考案する。

まず、調理器具による上から下方向への固体群の押さえつけ動作について考察する。前節での調理器具による操作は、前後左右方向への押さえつけ動作と見なすことができる。まず、同様に調理器具と固体群の干渉を、調理器具操作部の軌跡により表される凸包により判定する。続いて変形曲面により固体群の変形を表現したいが、重力方向の違いなどから従来の四分楕円柱では適切に表現できない。上下方向での押さえつけの場合、操作部の周りに固体群がはみ出てくるのが想像できる。そこでトーラス状の変形曲面を考えることとする。

ところで固体群は、容器からこぼれて落下する場合を除き、容器と一対一の関係としている。ヘラなどの調理器具で固体群をすくい上げるためには、固体群を複数に分割する必要がある。そこで、調理器具の操作部も調理容器と同等に扱うことを考える。これまでも複数の容器が存在する状況は、例えばある容器から固体群をこぼし、他の容器で受け止めるなど、既に実現できている。しかし容器で他の容器内の固体群を直接すくうことは想定していなかった。以下では、ヘラを側面のない調理容器として扱い、容器間での固体群の直接的な移動を考える。

## 3.2 調理器具による押さえつけ動作

### 3.2.1 変形曲面の形状

調理器具を用いて上方向から固体群を押さえつけた場合、固体群操作部から受ける力によって、押さえつけられた部分と固体群操作部周辺の固体群が変形する。そこで本研究では、トーラスを上下半分にした半トーラス状の変形曲面を用いて、調理器具で固体群を押さえつけた際に固体群操作部周辺の固体群が盛り上がる挙動を表現する。また調理器具の移動速度と、調理器具によって押さえつけられた面積に応じて、半トーラスの大きさ、形状を変える事で、より自然な固体群の盛り上がり表現する。

### 3.2.2 変形曲面の変数の設定

生成する正の変形曲面は半トーラスとするため、以下のように変形曲面を定義する変数を設定する(図3.1)。

- トーラスの大半径  $R$
- トーラスの小半径  $r$
- 調理容器内での位置  $o_T$

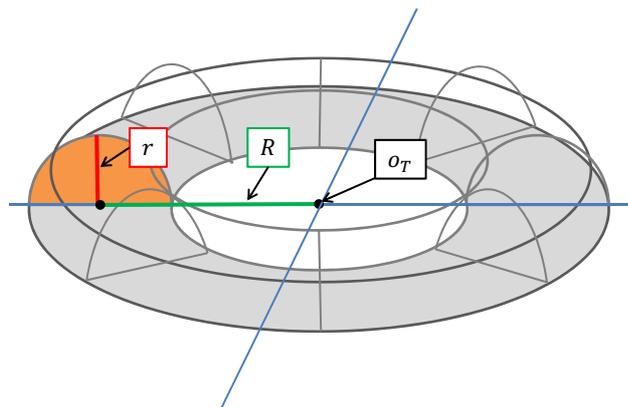


図 3.1: 半トーラスのパラメータ

調理器具で固体群を押さえつけることにより、固体群は固体群操作部から力を受ける。このとき、固体群は押さえつけられた部分の重心  $G_T$  に力がかかっていると仮定し、変形曲面の

生成位置  $o_T$  を重心  $G_T$  に設定する．固体群が押さえつけられている部分の重心  $G_T$  は以下のように求められる．

$$G_T = \frac{1}{S_T} \sum^N m'_{ij} \quad (3.1)$$

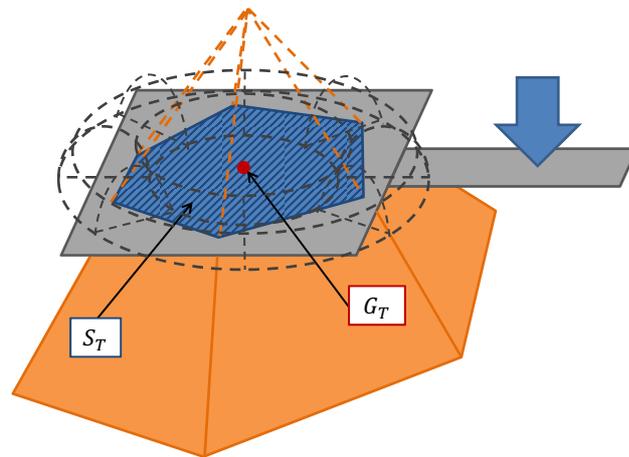


図 3.2: 固体群の押さえつけ動作

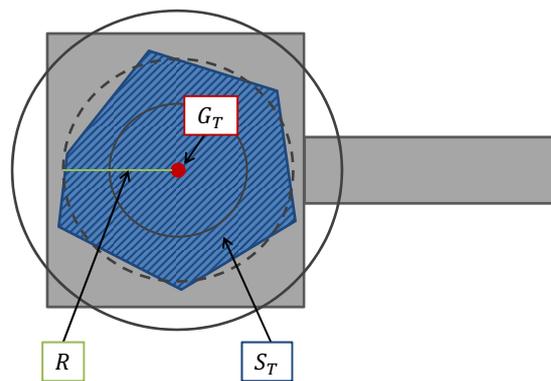


図 3.3: 固体群の押さえつけ動作

$S_T$  は押さえつけられた固体群の面積であり，2.8 節において説明した固体群操作部と干渉している格子数である．また， $m'_{ij}$  は押さえつけられたハイトフィールドの格子の座標である．また，トーラスの大半径  $R$  は押さえつけられた固体群の面積  $S_T$  と同じ面積の円の半径と近

似することで、以下のように求められる。

$$R = \sqrt{\frac{S_T}{\pi}} \quad (3.2)$$

半トーラスの体積は押さえつけ動作によって減算する体積より求めるため、トーラスの小半径  $r$  は押さえつけ動作によって減算する体積  $V^{sub}$  とトーラスの大半径  $R$  を用いて、以下のように求める。

$$r = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{V^{sub}}{R}} \quad (3.3)$$

### 3.3 調理器具によるすくい上げ動作

#### 3.3.1 調理器具上の固体群の表現方法

調理器具を用いて調理容器内の固体群をすくい上げる場合、固体群は、調理容器内に留まる部分と調理器具上に乗る部分に分かれる。そこで、調理器具上の固体群を調理器具に定義したもう一つのハイトフィールドによって表現する。調理器具のハイトフィールドの格子  $(x'_i, z'_j)$  が持つ値  $f'(x'_i, z'_j)$  と、その格子の面積  $S'(x'_i, z'_j)$  を用いることで、その格子に存在する体積  $V'(x'_i, z'_j)$  を表すことができる。

$$V'(x'_i, z'_j) = S'(x'_i, z'_j) f'(x'_i, z'_j) \quad (3.4)$$

したがって、調理器具上に存在する固体群の総体積  $V_{sp}$  は、調理器具のハイトフィールドの格子数  $N'$  を用いて以下のように表される。

$$V_{sp} = \sum^{N'} V'(x'_i, z'_j) \quad (3.5)$$

#### 3.3.2 調理容器から調理器具への固体群移動

調理容器内の固体群を調理器具ですくい上げることで、調理容器内の固体群が調理器具上へ移動する。調理器具へ移動する調理容器内の格子の値  $v_{ij}^{move}$  を従来の凸包を用いて、以下のように求める。

$$v_{ij}^{move} = \begin{cases} 0 & (f(x_i, z_j) < h^{low}(x_i, z_j)) \\ 0 & (h^{low}(x_i, z_j) \leq f(x_i, z_j) \leq h^{high}(x_i, z_j)) \\ f(x_i, z_j) - h^{high}(x_i, z_j) & (f(x_i, z_j) > h^{high}(x_i, z_j) \text{ かつ } v_{xz} < T_4) \\ \frac{f(x_i, z_j) - h^{high}(x_i, z_j)}{2} & (f(x_i, z_j) > h^{high}(x_i, z_j) \text{ かつ } v_{xz} \geq T_4) \end{cases} \quad (3.6)$$

$v_{xz}$  は  $xz$  平面における調理器具の移動速度,  $T_4$  は定数である. これにより, 調理器具上へ移動する固体群の総体積  $V^{move}$  は, 調理容器のハイトフィールドの格子数  $N$  を用いて, 以下のように求められる.

$$V^{move} = \sum_{ij}^N v_{ij}^{move} \quad (3.7)$$

また, 調理器具上への固体群の移動に伴い, 2.8 節の固体群操作部との干渉によって減算する格子の値  $v_{ij}^{sub}$  と減算する体積の総和  $V^{sub}$  を, 以下のように変更する.

$$v_{ij}^{sub} = \begin{cases} 0 & (f(x_i, z_j) < h^{low}(x_i, z_j)) \\ f(x_i, z_j) - h^{low}(x_i, z_j) & (f(x_i, z_j) \geq h^{low}(x_i, z_j)) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$V^{sub} = \sum_{ij}^N v_{ij}^{sub} - V^{move} \quad (3.9)$$

### 3.3.3 調理器具上の固体群の形状

調理器具上の固体群は, 操作部を水平面に限定しているため, 一定の形状を維持するものと仮定する. また, 現時点では課題を大きくしないために, 調理容器内の固体群との干渉は行わないものとする. 調理器具の固体群を加算する正の変形曲面の形状は円錐とする (図 3.4). 円錐の高さ  $h'$  は  $V^{move}$  を用いて, 以下のように求める.

$$h' = \sqrt[3]{\frac{3V^{move} \tan^2 \theta}{\pi}} \quad (3.10)$$

$\tan \theta$  は定数である. また, この変形曲面によって格子  $(x'_i, z'_j)$  に加算する値  $f'(x'_i, z'_j)^{add}$  は, 以下のように求められる.

$$f'(x'_i, z'_j)^{add} = h' - d \times \tan \theta \quad (3.11)$$

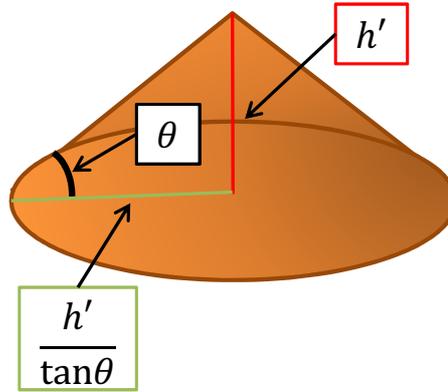


図 3.4: 円錐の形状

$d$  は調理器具ハイトフィールドの中心  $o_{sp}(x_{osp}, z_{osp})$  と格子  $(x'_i, z'_j)$  の距離であり、以下のよう  
に求められる。

$$d = \sqrt{(x_{osp} - x'_i)^2 + (z_{osp} - z'_j)^2} \quad (3.12)$$

正の変形曲面により格子の値を増加させる体積の総和  $V^{tadd}$  は、以下のように求められる。

$$V^{tadd} = \sum^{N'} f'(x'_i, z'_j)^{add} \quad (3.13)$$

格子  $(x'_i, z'_j)$  が正の変形曲面を加算する前の値を  $G_{sp}(x'_i, z'_j)$  とすると、加算後の持つ値  $G'_{sp}(x'_i, z'_j)$   
は以下のように求められる。

$$G'_{sp}(x'_i, z'_j) = G_{sp}(x'_i, z'_j) + \frac{V^{move}}{V^{tadd}} f'(x'_i, z'_j)^{add} \quad (3.14)$$

調理器具上に存在する固体群の総体積  $V_{sp}$  が一定の値  $T_5$  を超えた場合、安息角に基づき、  
こぼれてしまうものとする。 $V_{sp} > T_5$  の場合、調理器具へ移動する固体群の総体積  $V^{move}$   
を以下のように変更する。

$$V^{move} = 0 \quad (V_{sp} > T_5) \quad (3.15)$$

また、固体群操作部との干渉によって減算する格子の値  $v_{ij}^{sub}$  は、2.8 節の従来モデルを適用  
する。

## 第4章 実験

### 4.1 実験システム

以上の提案モデルを用いて実験システムを作成した。この研究では、一般向けの調理学習システムを目標としている。本実験では、入力装置として、任天堂株式会社より発売されている「Wii リモコン」と、POLHEMUS 社より発売されている「PATRIOT」を用いた。PATRIOT は磁気を利用した 3 次元位置測定装置である。これにより、調理器具の移動、回転を行うようにした。以下の構成の計算機で実験システムを構築した。

- CPU: Intel(R)Core(TM)i5-2400 CPU 3.10GHz
- RAM: 4GB
- GPU: NVIDIA(R)GeForce GT 430

実験システムでは、調理容器を直径  $32.5\text{cm}$ 、側面の高さ  $6.4\text{cm}$  のフライパン、調理器具をヘラ、そして固体群を炒飯と想定している。調理容器内と調理器具上の固体群はテクスチャマッピングにより描画する。図 4.1 に実験の様子を示す。操作者は、Wii リモコンを操作することで、調理容器を傾けることができる。また、PATRIOT を装着したヘラを操作することで、調理器具を移動させることができる。本実験システムでは、操作者は調理容器内の固体群に対して以下のような操作をすることが可能である。

- 調理容器を傾け、容器内の固体群を移動、変形させる
- 調理器具を用いて、容器内の固体群を押さえつける
- 調理器具を用いて、容器内の固体群をすくい上げる

図 4.2 は調理容器内の固体群を、調理器具のヘラを用いて押さえつけている様子である。調理器具により固体群が押さえつけられ、調理器具の固体群操作部周辺の固体群が盛り上が



図 4.1: 実験の様子

る様子わかる。また、図 4.3 は調理容器内の固体群を、ヘラを用いてすくい上げている様子である。調理器具を調理容器内からすくい上げることで、調理器具上に固体群が移動している様子わかる。

## 4.2 処理速度についての評価

実験システムを用いて、提案モデルにおけるハイトフィールドの格子数と処理速度の関係性について調べた。表 4.1 に各格子数における描画更新速度を示す。描画更新速度は小数点以下を四捨五入した値である。

格子数	FPS
256	82
676	40
1296	17

表 4.1: 処理速度についての実験結果



図 4.2: 固体群を押さえつける様子



図 4.3: 固体群をすくい上げる様子

一般的に対話操作システムには10~12FPS以上の処理速度が必要とされている。表より、対話操作を行うのに十分な処理速度であり、こぼれの処理、さらには洗う、切る、盛り付けるなどのシステムとの併用も可能であると言える。

### 4.3 拳動の自然さについての評価

提案モデルの調理器具の動きによる固体群拳動の自然さについて評価するために、実際に本システムを体験してもらい、簡単なアンケートを行った。手順は以下の通りに行った。

1. システムの概要と操作方法を説明し、操作に慣れるまで操作してもらう。
2. 調理器具を用いて固体群を押さえつける際の固体群拳動の自然さについて7段階評価のアンケートに答えてもらう。
3. 調理器具を用いて固体群をすくい上げる際の固体群拳動の自然さについて7段階評価のアンケートに答えてもらう。

自然さの目安は、

- 評価1: 全く自然に感じられない
- 評価4: VRシステムとしての実用に耐えうる程度
- 評価7: 現実と同じように感じられる

とした。図4.4に押さえつけ動作、すくい上げ動作の両動作における調理器具による固体群拳動についての評価結果を示す。

押さえつけモデルの評価平均値は4.125、すくい上げモデルの評価平均値は4.25となり、どちらも「VRシステムとしての実用に耐えうる程度」を超えている。実験後の干涉より、「調理器具で固体群をすくい上げる様子がわかる」という積極的な意見が得られた。しかし、押さえつける動作に関しては「固体群を押さえつけている様子はわかるが、炒飯らしさが無い」、「炒飯というより麻婆豆腐のようなゲル状の物体を押さえつけている感じがする」という問題点の指摘もあった。これは、固体群モデルでは密度に関して考慮しておらず、どこまでも押さえつけることができしまい、また横から全て流れるようにはみ出してしまうため

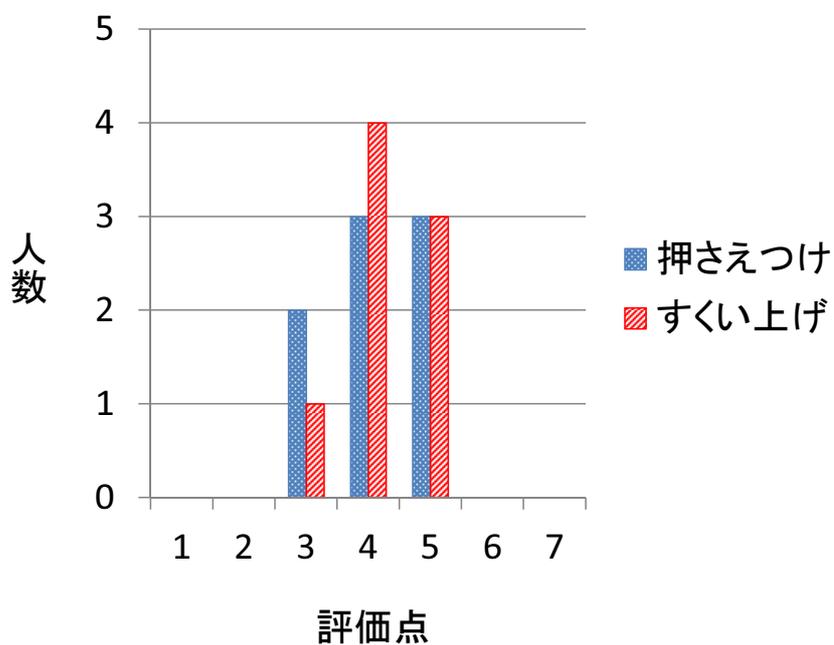


図 4.4: 挙動の自然さについての評価

だと考えられる。また、「すくい上げた固体群を調理容器内に戻したい」、「調理器具の任意の一部分に固体群を乗せたい」という意見が多かった。現在は問題点を明確にするために特徴的な動作に注目し、また実験システムでは制限しているためだと考えられる。

## 第5章 むすび

本研究では、調理器具の操作部を調理容器の底面に対して水平に限定し、3自由度の平行移動と鉛直軸を中心とする1自由度の回転を行う調理器具による、食材片の押さえつける、およびすくい上げる操作モデルを提案した。調理器具で固体群を押さえつける際の変形曲面に半トラスを用いることで、固体群操作部周辺の固体群が盛り上がる様子を表現した。また、調理器具操作部上でも調理容器同様に固体群を操作できるものとし、調理容器内の固体群の一部を分割した上で調理器具上に移動することで、調理容器内の固体群を調理器具ですくい上げる動作を実現した。

今後の課題として、固体群の押さえつけ挙動をより自然に表現するために、調理器具の移動範囲を制限することが挙げられる。調理器具の移動範囲を制限することで、既にある程度、押さえつけられた固体群を、さらに押さえつけることができないような表現を行う。また、調理器具上の固体群を調理容器内の固体群に戻す、調理器具上の固体群を別の容器に移し替えることで盛り付ける動作も行いたい。最終的に、調理器具の操作を6自由度にすることで、調理器具による固体群操作は、いっそう臨場感が向上すると考えられる。

本研究の最終目標は調理における一連の手順を全て再現できる「VR調理学習システム」の構築である。そのため、「調理」の他に、「食材の準備」、「食材の加工」といったモデルを提案し、組み合わせることで、VR調理学習システム全体の構築を進めていく。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、日頃から多大な御尽力を頂き、ご指導を賜りました名古屋工業大学、舟橋健司 准教授、伊藤宏隆 助教、山本大介 准教授に心から感謝致します。また、本研究に対して御討論頂きました本学 中村研究室の皆様ならびに中部大学 岩堀研究室の皆様深く感謝致します。最後に、本研究に多大な御協力頂きました舟橋研究室諸氏に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝: “バーチャルリアリティ学”, 工業調査会, 2010.
- [2] 服部桂: “人工現実感の世界”, 工業調査会, 1991.
- [3] 向井信彦, 西村律郎, 小杉信: “手術シミュレータ向け出血表現の高速化手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.3, pp.371-376, 2006.
- [4] 瀬戸崎典夫, 森田裕介, 武田仰: “ニーズ調査に基づいた多視点型 VR 教材の開発と授業実践”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.4 pp.537-544, 2006.
- [5] 渡部直人, 田邊亨, 原田哲也: “ヒューマンエラー誘発機能など特徴的な機能を実装した VR 訓練システムの開発と評価”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.4, pp.497-504, 2006.
- [6] Jacque MESSAGER, 高木茂行: “インターネットで香りを配信するシステム”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.3, pp.159-163, 2004.
- [7] 任天堂株式会社 Wii,  
<http://www.nintendo.co.jp/index.html>
- [8] 加藤史洋, 三武裕玄, 長谷川晶一: “体験型料理シミュレータ”, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回大会講演論文集, 2D2-2(DVD-ROM), 2010.
- [9] 株式会社スクウェア・エニックス クッキングママ,  
[http://www.square-enix.com/jp/archive/wii\\_cookmama/](http://www.square-enix.com/jp/archive/wii_cookmama/)
- [10] 小田康行, 村岡一信, 千葉則茂: “溶岩流の粒子ベース・ビジュアルシミュレーション”, 芸術科学会論文誌, Vol.2, No.1 pp.51-60, 2003.

- [11] 西田友是, 尾上耕一: “Virtual Sandbox”, Proceedings of IEEE 2003 Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pp.252-259, 2003.
- [12] 舟橋健司, 小栗進一郎: “家庭での利用を目的とした VR 調理学習システムのための固体群操作モデルの検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会講演論文集, pp.171-172, 2008.
- [13] 森井敦士, 森愛絵, 山本大介, 舟橋健司: “VR 調理学習システムのための剛体による固体群操作モデル”, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回大会講演論文集, 2C2-2(DVD-ROM), 2010.
- [14] 小塚太智: “VR 調理学習システムにおける調理器具の移動範囲の拡張”, 平成 23 年度名古屋工業大学卒業論文, 2012