

# VR 調理学習システムのための 変形曲面による固体群の崩れ表現

Collapse of Group of Individual Bodies Using Transformation Surface for VR Cooking System

栗本雄多<sup>1)</sup>, 舟橋健司<sup>2)</sup>

Yuta Kurimoto and Kenji Funahashi

1) 名古屋工業大学 情報工学専攻

(〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, yutamoto@center.nitech.ac.jp)

2) 名古屋工業大学 情報工学専攻

(〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, kenji@nitech.ac.jp)

**Abstract :** We have reserched an interactive manipulation model for a group of indivisual bodies (GIB) such as sand or lava. The GIB is represented as a height field, and the variation of the height field represents a movement of GIB. An exact calculation of large number of bodies is quite complex, and the amount of calculation takes much time. Therefore we treat the GIB as one object. However GIB was calculated locally and sequentially. In this paper, we propose the new manipulation model which treats the whole of collapse of GIB as a kind of local GIB. In our model, the collapse is calculated with transformation surface same as the GIB manipulation model.

**Key Words:** *VR cooking system, interactive manipulation, a group of individual bodies, transformation surface, collapse*

## 1. はじめに

近年, VR 技術の発展は目覚ましく, 医療や産業などの分野で VR を用いたシミュレータが開発されている. ユーザはこれらのシステムを利用することで多大な恩恵を受けることが可能である. しかしこれまで, 用いられる装置が巨大であったり高価であったりするため, 一般家庭への導入は進んでいない. 一方で, ゲームコントローラをはじめ, 安価な入力装置も入手可能となっており, 一般家庭への普及を目的とした学習支援システムの研究が行われている [1].

当研究室では, VR 学習コンテンツの対象として VR 調理学習システムの開発を行っている. このシステムは操作者が調理の手順を学習するためのものである. 調理工程で操作対象となるものは調理容器 (フライパン, 鍋など), 調理器具 (包丁, ヘラなど), 食材, 水などである. これらを表現するには, 固体 (剛体, 弾性体), 流体の挙動を表現する必要がある. また, 操作者が臨場感を得るために, 操作対象の挙動がリアルタイムに表現されている必要がある.

ところで, 調理工程を体験するためには米や食材片などの多数の小さな固体の集合の挙動を表現する必要もある. 関連する研究として, 砂や溶岩流についての研究 [2][3] が挙げられる. 溶岩流のモデル [2] では粒子法が用いられており,

厳密な挙動の再現が試みられている. しかし, 多大な計算時間が必要であり, リアルタイムシミュレーションには GPU などによる並列計算が必要である. また, 砂のモデル [3] ではハイトフィールドを基に逐次計算を行っており, 局所的な操作においては比較的高速ではあるが, 大域的な操作は考慮されていない.

これらのモデルに対して, 我々は「複数の固体で構成されるが, 全体を一つの集合として扱う対象」を固体群と定義し, 固体群全体に作用する力学的影響を近似的に計算することにより挙動を表現する固体群操作モデル [4] を提案している. このモデルでは固体群全体を一つの操作対象とするため, 固体群を構成する個々の固体の挙動計算は行わずに, 全体の挙動を一括して決定している. 操作者が自然と感じられる挙動表現と高速な計算の両立が可能である. 固体群は調理容器の姿勢変化に伴う重力の影響や (ヘラなどの) 調理器具による干渉により全体形状が変化し, 移動する. 一方, 積み上がった固体群が崩れる挙動は全体を一括して決定できないため, 局所的な計算で簡易的に表現している. そのため, 1 ステップで処理される崩れ挙動は局所的なものであり, 挙動が全体に影響するには相当な時間が必要である.

そこで, 本研究では局所的な計算のみで崩れを表現する

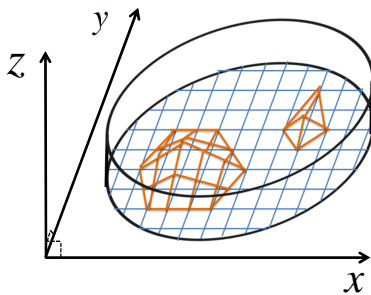


図 1: 調理容器内の固体群表現

のではなく、まず崩れの生じる領域を限定的に決定し、その上で当該領域全体に対して、固体群全体の挙動を一括して求める手法と同様に崩れを表現する手法を提案する。本モデルでは高速な計算速度を保ちつつ、固体群を構成する個々の固体の性質による崩れの進行速度の違いを表現可能であり、高い汎用性がある。

## 2. 変形曲面による固体群の操作

当研究室がこれまでに提案した固体群操作モデルでは、固体群をハイトフィールドで表現する(図1)。モデルの簡略化のため、調理容器は底部が平面の凸多角形と、底部に対して垂直な側面で構成される形状とし、調理容器底面には2次元格子を定義する。格子座標  $(x, y)$  における固体群の高さ、すなわちその格子における固体群の体積を  $h(x, y)$  とすると、調理容器内  $c$  に存在する固体群の総体積  $V$  は以下のように表される。

$$V = \sum_{(x,y) \in c} h(x, y) \quad (1)$$

各時刻で各格子の高さを変化させることにより固体群の挙動を表現し、テクスチャマッピングにより描画する。このときの固体群の変化分を経験的に定義した曲面で近似表現する。この曲面を変形曲面と呼称する。ある時刻  $t$  において、中央に固体群が存在する調理容器が傾けられた場合(図2-1)、固体群は調理容器の下部に移動すると考える。固体群の移動を表現するために、体積の増加と減少を表す変形

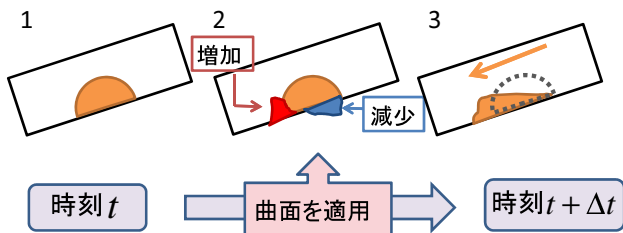


図 2: 曲面による固体群の移動表現

曲面を適用する(図2-2)。このように時刻  $t + \Delta t$  における固体群の様子を決定する(図2-3)。

ただし、固体群が崩れる挙動は一部分で生じる場合があるため、変形曲面によらず局所的な計算で表現する。初めに、ある格子の高さ  $h(x, y)$  と、ある格子に対して容器中心方向に存在する2近傍の格子の高さ  $h(x_1, y_1), h(x_2, y_2)$  の差  $d_1, d_2$  を求める。次に、以下に示す  $d_1, d_2$  としきい値  $T$  の4種類の大小関係から各格子の高さを再設定する。

1.  $d_1 > T \cap d_2 > T$  のとき,  

$$h(x, y) = \frac{1}{3}(h(x, y) + h(x_1, y_1) + h(x_2, y_2))$$
2.  $d_1 > T \cap d_2 \leq T$  のとき,  

$$h(x, y) = \frac{1}{2}(h(x, y) + h(x_1, y_1))$$
3.  $d_1 \leq T \cap d_2 > T$  のとき,  

$$h(x, y) = \frac{1}{2}(h(x, y) + h(x_2, y_2))$$
4.  $d_1 \leq T \cap d_2 \leq T$  のとき,  

$$h(x, y) = h(x, y)$$

この処理を1フレームにおいて有限ステップ実行することで高さの変化は徐々に全体に及び、固体群が崩れていく挙動を表現する。

## 3. 変形曲面による固体群の崩れ表現

### 3.1 従来手法との比較

従来の固体群操作モデルでは、固体群が崩れる様子は局所的な計算のみで実現している。したがって、固体群を構成する個々の固体の密度や粘性などの性質による崩れの進行速度の違いを表現することができない。そこで、本手法では固体群の崩れのある領域内で一括して扱い、崩れが生じる領域に作用する力を基に領域内の固体群挙動を簡易的に求めることで、高速な処理速度での崩れ挙動を表現する。これにより、従来手法ではNステップ必要な崩れ処理を、適切なパラメータを設定することで任意のステップで行うことが可能となる。従来手法の崩れの表現と提案手法の崩れの表現の比較を図3, 4に示す。

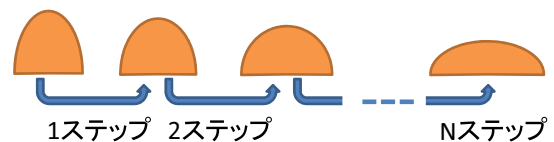


図 3: 従来手法の崩れ表現

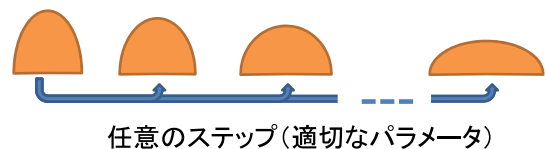


図 4: 提案手法の崩れ表現

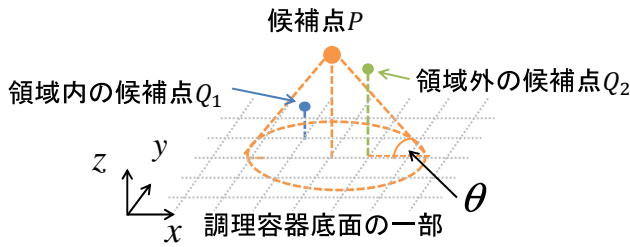


図 5: 候補点 P が作る崩れ領域

### 3.2 崩れ中心候補点

まず、崩れが起こる可能性のある領域、およびその中心点を求める。ある格子  $(x_i, y_j)$  を注目点とした場合、注目点とその 4 近傍の格子  $(x_{i-1}, y_j)$ ,  $(x_{i+1}, y_j)$ ,  $(x_i, y_{j-1})$ ,  $(x_i, y_{j+1})$  の高さを比較する。以下の条件を共に満たしたとき、注目点を中心とした崩れが起こる可能性があるとして判定し、注目点を崩れの候補点とする。

$$h(x_i, y_j) > \frac{h(x_{i-1}, y_j) + h(x_{i+1}, y_j)}{2} \quad (2)$$

$$h(x_i, y_j) > \frac{h(x_i, y_{j-1}) + h(x_i, y_{j+1})}{2} \quad (3)$$

ただし、この段階では候補点は数多く検出される。そこである格子  $P$  で発生する崩れが影響を及ぼす領域として、 $P$  を頂点とする円錐を崩れ領域と考える。円錐の斜面の角度  $\theta$  は積み上げた固体が安定を保つ最大傾斜角、安息角とする。崩れ領域内部に  $P$  と異なる候補点  $Q$  が含まれる場合、 $Q$  は  $P$  で発生する崩れに含まれるため  $Q$  を中心とした崩れの挙動計算は行う必要がない(図 5)。具体的には、最も高い点  $P$  から判定、候補点の削減を行うことにより、最終的な崩れ中心の候補点を得る。

### 3.3 崩れ変形曲面の適用

ところで、前述の円錐形状の固体群を想定した場合、もし候補点  $P$  の高さを固定したままで体積(固体群)を減少させたならば、それはある箇所において固体群の積み重なり具合の傾斜が安息角を超えている、すなわち崩れが起こることを意味する。そこで、各最終候補点  $P$  の作る円錐状の崩れ領域の体積  $V_P$  と、当該崩れ領域(格子)内に存在する固体群の体積  $V_e$  の比率  $R = V_e/V_P$  ( $0 < R \leq 1$ ) が  $R < 1$  を満たすときに実際に崩れが起こると判定する。

容器内に存在する固体群の一部が崩れる状況において(図 6-1)、当該領域に崩れ変形曲面を適用し(図 6-2)、固体群の崩れを表現する(図 6-3)。崩れ変形曲面は大小 2 つのガウス曲面の差と定義し(図 7)、投影面におけるこの中心点  $G_c$  を候補点  $P$  に一致させる。また変形曲面は候補点  $P$  の高さに応じて拡大縮小を行う。

## 4. 実験結果

前述のモデルに基づき、実験システムを計算機(CPU: Inter(R)Core(TM) i5-2400 3.10GHz, MEM: 4.00GB, OS: Microsoft Windows7)上に構築し、実験を行った(図 8)。

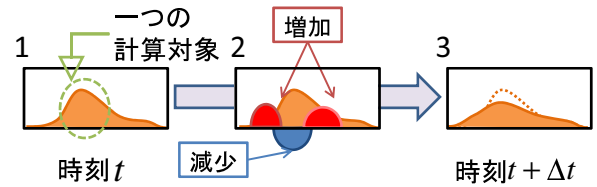


図 6: 曲面による固体群の崩れ表現

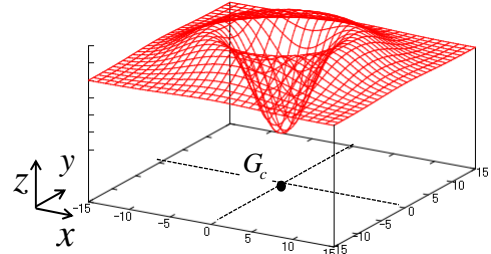


図 7: 崩れの変形曲面

本実験では、任天堂株式会社より発売されている Wii リモコンを入力装置として利用した。調理容器はフライパン、固体群は炒飯を想定している。予備実験では、ハイトフィールドの格子数が 317 点程度で固体群挙動が自然に感じられるとの評価が得られた。なお、格子数が整数の 2 乗値と異なるのは、調理容器の形状によって変化するためである。格子数を 317 点とし、固体群を描画した様子を図 9, 10 に示す。

提案モデルの処理速度を単位時間当たりの描画更新速度(fps)により評価した(表 1)。調理容器底面に定義された 2 次元格子の格子数を多くするほど格子間隔が狭くなり、より細かい固体群の描画が可能となる。なお、一般に言われる対話操作に必要な描画更新速度より遥かに速い速度が得られているが、実際の調理学習システム構築時には、ヘラなどの調理器具による固体群操作、調理容器(フライパン)の煽り操作による固体群の舞い上がり、食材の調理容器への投入や皿への移動(こぼれ処理)に加え、食材切断等の加工も処理する必要があるため、過剰な処理速度ではない。また、数名の被験者に本システムを体験してもらったとこ

表 1: 処理速度についての実験結果

格子数	fps
317	1015
529	620
901	393
1343	203

る，固体群の崩れの進行速度の違いが感じられるという評価が得られた．従来モデルでは崩れの速度を遅くすることはできたが，早くすることは格子数を荒くする以外にできなかった．本提案モデルでは格子数を調整することなく，崩れの速度を変更可能であり，例えばシチューなどの対象も表現可能だろう．なお，実験における各パラメータは経験的に定めている．

## 5. むすび

我々の提案する固体群操作モデルでは変形曲面により挙動計算することで高速な処理を実現しているが，これまで崩れの計算においては逐次処理を行っていた．本研究では局所的な崩れにも変形曲面を適用するモデルを提案した．このモデルでは，初めに崩れが起こる可能性のある局所領域候補を求める．次に安息角により崩れが及ぼす影響範囲を考える．そして，変形曲面を適切なパラメータで適用する．崩れの挙動に変形曲面を適用することで，固体群を構成する個々の固体の性質による崩れの進行速度の違いを表現可能とした．実験結果からわかるように非常に高速な処理速度であり，最終的なアプリケーションシステムにおいても対話操作が可能であると考えられる．

今後の課題としては，崩れの変形曲面の形状について再考し，様々な崩れ方の違いをより詳細に表現することが挙げられる．また，本研究の最終目標は操作者が料理の手順を学ぶためのシステムを作ることであるため，食材を洗う，切るなどの工程を対象としたモデル構築することも必要である．

謝辞 研究を進めるにあたり，有益な議論を頂いた本研究室諸氏に感謝する．なお，本研究の一部は JSPS 科研費 24501186 の研究助成による．

### 参考文献

- [1] 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．
- [2] 小田 泰行，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，Vol2，No.1，pp.51-60，2003．
- [3] 西田 友是，尾上 耕一，“Virtual Sandbox”，Proc. of Pacific Graphics 2003 (The 11th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications)，pp.252-259，2003-10．
- [4] 森井 敦士，上垣内 翔太，山本 大介，舟橋 健司，“VR 調理学習システムのための存在確率に基づく粒子による固体群の上下動の表現”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.16，No.4，pp.539-549，2011.12．



図 8: 実験の様子

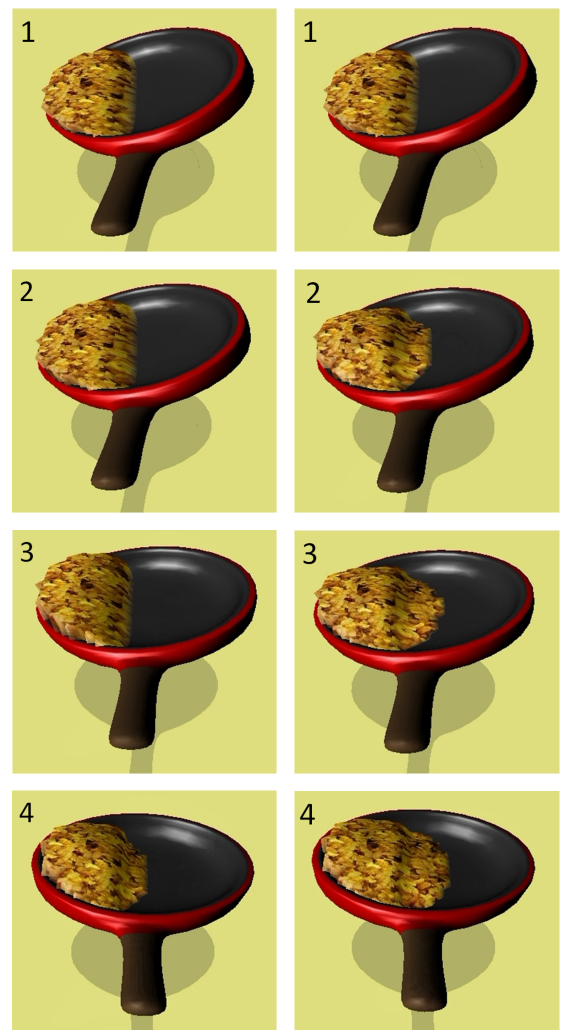


図 9: 緩やかな崩れ

図 10: 急激な崩れ