基礎論文

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

森井 敦士[*1]　上垣内 翔太[*2]　山本 大介[*3]　舟橋 健司[*3]

Existence Probability Particle Based Interaction Model of Group of Individual Bodies for VR Cooking System

Atsushi Morii[*1], Shota Kamigaito[*2], Daisuke Yamamoto[*3], and Kenji Funahashi[*3]

Abstract – Manipulation model, particularly vertical motion of a group of individual bodies (GIB) such as a mass of rice is proposed in this paper. In this model, we can make up and down motion of GIB by using a container interactively. GIB is treated as one object near container, which means that calculation is done efficiently on one object. Representation of GIB based on existence probability improves the visualization of GIB's movement realism. One of the goals of this research is to use it for applications such as home VR cooking systems. Interactivity has a priority over correct movement of GIB in this model.

Keywords : VR Cooking System, a Group of Individual Bodies, Existence Probability Particle

1　はじめに

近年、一般家庭で使われている家電機器が高度化し、従来にはなかった家庭向けの新サービスの創出が期待されている。このような状況の中で、現実の調理行動支援を目的としたシステム [1] や、教育、訓練のためのシステム [2] の研究、開発が行われている。我々は、料理の手順ー食材を洗い、切り、また調理用加熱容器に入れて焼く、煮る、炒めるなどし、盛り付ける等の一連の手順ーを学習するためのシステム「バーチャルお料理教室」の開発を行っており、これまでに調理用加熱容器内での食材操作を実現するために固体群操作モデル [3, 4, 5] を提案している。ここで固体群とは、小さな固体の集まりであり、また一見してまとまって扱われる対象とする。例えば砂粒や米の集まりなどは、挙動は個々の固体の干渉によるが、通常、人間はバケツやカップに入れて扱うなど、「一杯」の対象物として捉える。提案システムに適用するこのモデルでは、固体群として「炒飯」などを想定し、フライパンのような容器状のオブジェクト（以下、調理容器、あるいは単に容器、実際には皿なども対象としている）の中に存在する固体群を、容器を移動することにより容器内での操作が可能である。また、ヘラなどの剛体（調理器具）を使用して固体群を操作することも考慮している。

固体の集まりの挙動についての研究は従来から行われており、例えば砂 [6] や溶岩 [7] を対象とした研究があり、臨場感演出のために映画などにも応用されている [8]。このうち、Stora らが提案した溶岩のモデル [7] は粒子法を使ったモデルである。粒子法は、固体を粒子やその集まりで近似して、それぞれの粒子に作用する力を計算する手法である。粒子法は厳密な挙動の再現を目的としており、近年では、複数の GPU を用いた数万個の粒子の衝突判定も実現されている [9, 10]。現状ではまだ家庭で一般的に利用できる機器構成ではないかもしれないが、近い将来、高価な GPU も安価になることも期待できる。しかし、対象物（粒子）の粘性や変形、破壊への対応は単なるハードウェアの進歩のみでは対応できないだろう。尾上らが提案した砂のモデル [6] は粒子法を用いないハイトフィールドに基づくモデルであり比較的高速であるが、挙動を局所的に計算しており、総合的なアプリケーションシステムへ適用した場合に対話操作性を維持できるほど処理速度が高速とは言えない。一方、我々の提案する固体群操作モデル [3, 4] はハイトフィールドに基づき、さらに大域的な挙動計算を行うことにより、GPU を利用することなく、非常に高速な処理速度を実現している。本モデルはそもそも、対象物の厳密な挙動の再現を目的とするものではない。プロの調理人育成のためのシステムや自動調理機器設計における評価のため

[*1]日本信号株式会社
[*2]リンナイ (株)
[*3]名古屋工業大学
[*1]Nippon Signal
[*2]Rinnai Corporation
[*3]Nagoya Institute of Technology

のシミュレーションを想定した場合には厳密な挙動の再現が必要であろう。本研究では調理手順の学習など家庭での利用を想定しており、安価なシステムにおいて本物「らしい」挙動を実現することを目的としている。その上で、対象物の集まりを「固体群」として一元的に扱うことにより、個々の固体同士の粘性や変形をユーザが「感じられる」挙動も、パラメータの調整で醸し出せると考えている。しかし挙動をよりリアルにするために提案した改良型固体群操作モデル [5] は粒子法を限定的に取り入れたモデルであり、結果的に実験システム単体では対話操作が可能であったが、調理学習支援システムとして実現するためには処理速度の面で不十分であると判断した。

本研究では、新たな粒子モデルを提案することにより十分に高速な固体群操作モデルへと改良する。本モデルは元々、容器内の各固体の集合を１つの操作対象（固体群）として扱うことにより高速処理を実現している。そこで、容器の「すぐ上の空間」も容器が支配している空間と考え、調理容器上部においても１つの操作対象として扱うことにより、フライパンを振ることによる「舞い上がり」動作を実現する。具体的には、空間を格子に区切り、各格子において操作対象が存在するか否かの確率を考え、この確率を大域的に遷移させることにより容器上部での挙動を計算し、また確率に基づき粒子を描画することにより移動を視覚的に表現する。粒子と呼んでいるが、個々の粒子は独立して動くものではなく、また単独でも実際には動かない。なお、容器の支配から外れた空間では、互いに干渉せずに自由落下する粒子により表現し、「こぼれ」挙動を実現する。以下、2 節では従来モデルの概要を、3 節ではハイトフィールド表面の粒子および「こぼれ」挙動について、4 節では容器上部空間における粒子および「舞い上がり」挙動について述べる。

2 従来の固体群操作モデル

我々が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し、固体群を構成する個々の固体に作用する力を計算せずに、固体群全体を１つの操作対象として扱うことで高速に固体群挙動を実現している。まず、モデルの簡単化のために固体群を扱う調理容器を次のように定義する。容器の底部: 凸多角形の平面図形、容器の側面: 底部に対して垂直（高さ: h)。また、固体群は調理容器の底部に定義した格子におけるハイトフィールドにより表現する。調理容器 c の内部に存在する固体群の総体積 V_c は以下のように定義する。

$$V_c = \sum_{(x,y)\in c} f(x,y) \tag{1}$$

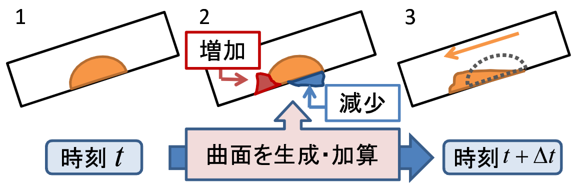

図 1 変形曲面
Fig. 1 Transformation Surface

ここで $f(x,y)$ は格子 (x,y) に設定された値であり、すなわちこの格子における固体の量であり高さを表す。この各格子の値を変化させることにより、調理容器内の固体群挙動を計算し、ハイトフィールド表面にテクスチャマッピングを行うことにより固体群を表示する。

ハイトフィールドで表現された固体群の挙動は、隣接する格子同士で値を増減させるのではなく、以下のように大域的に格子の値を更新することにより実現する。例えば、時刻 t において中央に固体群が存在する容器が傾けられた場合 (図 1-1)、全体における増加分と減少分を求め加算することにより (図 1-2)、時刻 $t+\Delta t$ における固体群の様子を決定する (図 1-3)。この、曲面による増減分を変形曲面と呼ぶこととし、重力と調理容器の並進による慣性力の合力より決定する。実際には、このような変形曲面を正確に求めることは困難であるため、経験的にまず半楕円柱や四角柱により増加分を決定し、その後、全体を同一の割合で減少分を決定することにより体積を一定に保っている。

3 固体群粒子

現実世界における固体群の最小構成要素は、小さな固体であるが有限の大きさである。一方、前節で述べた固体群はハイトフィールドにより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、無限小の固体が存在することになり、液体のように表現されてしまう。そこで固体群の最小構成要素を α とする。ある格子 (x,y) において $f(x,y) < \alpha$ である場合は、存在確率

$$P(x,y) = \frac{f(x,y)}{\alpha} \tag{2}$$

に基づき乱数を利用して描画の有無を決定し、その上で粒子として描画する。なお、計算時間短縮のため α は実際の個々の固体よりも、例えば米粒よりも大きな値として設定し、また描画する粒子は個々の米粒１つ分ではなく、いくつもの固体が集まった「固体群粒子」（存在確率固体群粒子）とする。具体的には、小さじ一杯程度の量を想定している。この粒子も、描画においては粒子表面にテクスチャマッピングを行う。

最小構成要素が定義されていないと液体のように

表現されてしまうのは、$f(x, y) < \alpha$ でなくても同様である。そこで、ある時刻 t、格子 (x, y) において $f^{(t)}(x, y) \geq \alpha$ である場合は、格子における変化量 $f_d^{(t)}(x, y) = |f^{(t)}(x, y) - f^{(t-\Delta t)}(x, y)|$ に基づき存在確率

$$P(x, y) = \begin{cases} f_d/\alpha & (f_d < \alpha) \\ 1 & (f_d \geq \alpha) \end{cases} \tag{3}$$

を算出する。同様に乱数を利用して描画の有無を決定し、固体群粒子を描画する場合には、ハイトフィールド表面の高さを $f(x, y) - \alpha$ と修正した上でテクスチャマッピングを行い、その表面に固体群粒子を描画する。ただしこのままでは、容器が全く動いていない場合にも、粒子の描画、非描画が反転してしまうことがある。そこでハイトフィールドの更新における総量が決められたしきい値以下の場合には、それぞれの格子における粒子描画の有無を反転させないこととする。なお、$f(x, y)$ の値が α 付近でゆるやかに変化した場合、式 (2) と式 (3) の間で存在確率 P の値が急激に変化する場合があるが、固体群粒子の描画には乱数も用いており、液体のように表現されてしまうことを避けるという本来の目的には大きな影響はない。

さらに、調理容器の中から容器外へ固体群が「こぼれ」ていく様子を実現するために、図 2 に示す境界を設定する。まず、容器の傾きなどで固体群に力が作用してこぼれる挙動に対応する A 境界として、容器の縁のうち最も低い点を含み、水平方向との角度が θ の無限平面を定義する。角度 θ は固体を積み上げたときに自発的に崩れることなく安定を保つ斜面の角度である「安息角」とする。格子 (x, y) におけるこの境界面の高さを $a(x, y)$ とする。この境界面は傾けた容器の下側にしか対応していない。一方、「へら」等の調理器具を想定した剛体による押し出しなどでこぼれる挙動に対応する B 境界として、容器の縁を含む平面との角度が上述の θ となる角錐状の境界面を定義する。格子 (x, y) におけるこの境界面の高さを $b(x, y)$ とする。この境界面は容器の傾きに追従し、本来の安息角を意味するものではないが、これにより傾けた容器の上側や横側からのこぼれも少ない処理で実現できる。格子 (x, y) における、これら の境界のうちの低い値 $k(x, y)$ に対して $k(x, y) < f(x, y)$ が成り立つ場合には、$f(x, y) - k(x, y)$ 相当の固体群を「自由落下固体群粒子」へと変換し容器外に落下させ、$f(x, y) = k(x, y)$ と更新する。この自由落下固体群粒子は、同様にいくつかの固体が集まった固体群粒子であるが、存在確率に基づき扱うことはせず、また独立して移動する。ただし、処理の簡略化のため粒子同士の干渉は考慮しない。その上で、自然なこぼれへの遷移を実現するために $f(x, y) \geq k(x, y) - \alpha$ が成り立つ全ての格子においては $P(x, y) = 1$ とし、前述のようにハイトフィールド表面の高さを修正した上で、存在確率（この場合は常に 1）固体群粒子を描画する。

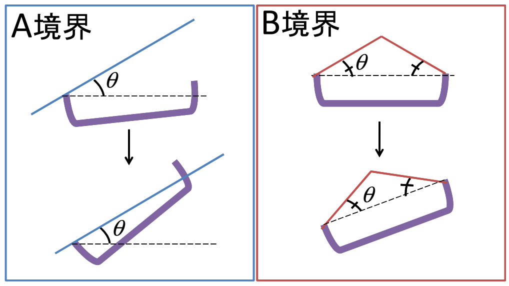

図 2　こぼれの境界
Fig. 2　Spilling Boundary

4　固体群の上下動の表現

4.1　各領域の固体群表現と挙動計算

本節では固体群の上下動を実現するモデルについて説明する。提案モデルでは、実時間処理を維持しつつ高い臨場感を実現するために、調理容器周辺を図 3 のように「調理容器内部領域」、「調理容器上部領域」、「それ以外の領域 (以下、調理容器外部領域)」の 3 つの領域に分けて、それぞれの領域で異なる固体群表現を行うことで固体群挙動を表現する。上部領域は容器の内部ではないが、事実上、容器（操作者）により支配されている空間であると考えることにより、挙動モデルを構築する。各領域の固体群は状況に応じて異なる領域の固体群に変換する。なお、前節の「こぼれ」処理は、図 3 における内部領域 (1) から外部領域 (3) への変換と位置付けられる。

各領域の固体群表現と挙動計算についてまとめた表を表 1 に示す。内部領域の固体群は 2 節、3 節で述べたモデルにより表現する。また、外部領域の固体群は 3 節で述べた、相互干渉を考慮しない自由落下固体群粒子で表現する。上部領域の固体群は、存在確率に基づく表現を行う。上下に動く挙動は、従来モデルの変形曲面を拡張した手法で存在確率を遷移させることで実現する。また、固体群描画は外部固体群と同様に、固体群粒子として描画する。なお、固体群粒子は固体群を構成する 1 つの固体ではなく、ある程度の固体の集合として扱う。以降は、上部領域の固体群表現と挙動計算について詳しく述べる。

4.2　存在確率フィールド

上部領域の固体群 (上部固体群) は、図 4 のように、調理容器を包みこむように配置した三次元格子 (存在確率フィールド) に、各格子ごとの固体群分布状況を確率的に保持させる事で表現する。なお、この格子と、調理容器内部に定義されたハイトフィールドの格子の

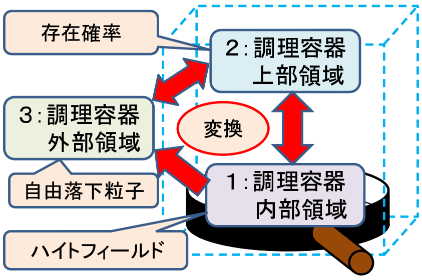

図 3　提案モデルの概要図
Fig. 3　Outline of Manipulation Model

表 1　各領域の固体群表現と挙動計算
Table 1　Representation of GIB and Calculation of Movement in Each Field

領域名	固体群表現	挙動計算
内部領域	ハイトフィールド	変形曲面
上部領域	存在確率フィールド	変形超曲面
外部領域	固体群粒子	自由落下

間隔は等しく l と設定する。また、調理容器の底面を構成する平面図形を、存在確率フィールドの格子点との距離が $l/2$ となるように、かつ、XY 平面（水平面）と平行になるように配置する。さらに、後述する変換領域を設定するために、調理容器から存在確率フィールドの上方を除く外縁まで l 以上の間隔が開くようにする。固体群の挙動計算は、格子が持つ確率に基づく固体群の体積（以下、期待値と呼ぶ）を求めて、さらに、全体で体積が保持されるように存在する体積量を確定する処理を毎フレーム行う。そのため、存在確率フィールドの内容が同一であっても、描画される固体群分布はフレーム毎に異なる。このような確率的な表現 (存在確率に基づく表現) で、上部固体群の挙動表現の自然らしさの向上を図る。

存在確率フィールドの格子 (X,Y,Z) における、上部

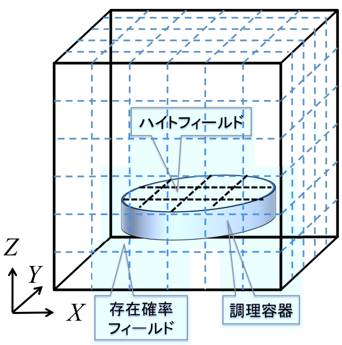

図 4　存在確率フィールド
Fig. 4　Existence Probability Field

固体群体積の期待値 $E(X,Y,Z)$ は次のように求める。

$$E(X,Y,Z) = E_{up} f(X,Y,Z) \tag{4}$$

$f(X,Y,Z)$ は格子 (X,Y,Z) における固体群量（正確には、直前のサンプリング時刻における値）であり、E_{up} は存在確率フィールドの各格子の存在確率から固体群体積の期待値を導出するための、存在確率フィールド C が保持する確率に基づく固体群体積の期待値の総量である。E_{up} と各格子の存在確率に基づく固体群体積の期待値には以下のような関係が成り立つ。実際には直前の時刻における E の値を用いて計算する。

$$E_{up} = \sum_{(X,Y,Z)\in C} E(X,Y,Z) \tag{5}$$

さらに、上部固体群の重心 $\boldsymbol{G}_E$ を以下のように定義する。

$$\boldsymbol{G}_E = \frac{1}{E_{up}} \sum_{(X,Y,Z)\in C} E(X,Y,Z)\boldsymbol{M} \tag{6}$$

ここで $\boldsymbol{M}$ は格子 (X,Y,Z) の座標ベクトルである。存在確率フィールドの格子 (X,Y,Z) に存在する固体群体積 $V(X,Y,Z)$ は以下のように求める。

$$V(X,Y,Z) = \begin{cases} V_{max} \\ \quad (E(X,Y,Z) \geq V_{max}) \\ V'(X,Y,Z) \\ \quad (E(X,Y,Z) < V_{max}) \end{cases} \tag{7}$$

V_{max} は、存在確率フィールドの 1 格子に存在することができる固体群体積の最大値である。V_{max} は、存在確率フィールドの格子間距離 l を用いて以下のように定義する。

$$V_{max} = l^3 \tag{8}$$

$V'(X,Y,Z)$ は確率 $P(X,Y,Z)$ により格子 (X,Y,Z) に存在する固体群体積であり、平均が E となるように以下のように求める。

$$V'(X,Y,Z) = \begin{cases} (d+1)\alpha' \\ \quad (P(X,Y,Z)\ \text{の確率で}) \\ d\alpha' \\ \quad (1-P(X,Y,Z)\ \text{の確率で}) \end{cases} \tag{9}$$

パラメータ d、存在確率 $P(X,Y,Z)$ は以下のように求める。

$$d = \lfloor \frac{E(X,Y,Z)}{\alpha'} \rfloor \tag{10}$$

$$P(X,Y,Z) = \frac{E(X,Y,Z) - d\alpha'}{\alpha'} \tag{11}$$

なお、α' は固体群体積の単位であり、次のように定める。

$$\alpha' = \frac{V_{max}}{D} \tag{12}$$

D は粒子体積詳細度であり、上部固体群、外部固体群として描画される固体群粒子 1 つが持ち得る体積の最小値を設定するパラメータである。

また、上部固体群から外部固体群への変換のために、存在確率フィールドの外縁に位置する格子群によりできる厚さが l となる板状の格子群として変換領域を定義する。この領域を経由することにより、一体的に扱っている上部固体群の一部が外部領域へ移動する場合にも容易な処理を実現する。各変換領域 B_i につき、B_i の中心座標から存在確率フィールドの中心までの相対ベクトル $\boldsymbol{n}_{Bi}$ を以下のように定める。

$$\boldsymbol{n}_{Bi} = \frac{(\boldsymbol{C}' - \boldsymbol{C}_{Bi})}{|\boldsymbol{C}' - \boldsymbol{C}_{Bi}|} \tag{13}$$

$\boldsymbol{C}_{Bi}$ は変換領域 B_i の中心座標、$\boldsymbol{C}'$ は存在確率フィールドの中心座標である。

4.3　変形超曲面を用いた挙動計算

上部固体群挙動は従来モデルの変形曲面を 1 次元拡張して存在確率フィールドに適用することで実現する。本来は個別に挙動している空中の固体も、「1 つの対象物」として扱い、超曲面で一元的に挙動を決定することにより高速に、自然と感じられる挙動を再現する。しかし、図 1-2 のような働きをする超曲面を求める事は困難なため、本モデルでは以下のように代替処理を段階的に行うことで図 1-2 に相当する処理を実現する。まず、図 5-1 のように、時刻 t において、三次元空間に固体群が分布している時に、固体群が移動する方向へ、固体群分布量を増加させる働きをする 4 次元超曲面 (変形超曲面) を生成する (図 5-2)。ここで超曲面は、3 次元空間における座標（格子）に存在する固体群量を変更するための値を第 4 次元成分として表現する。すなわち、超曲面を 3 次元に投影した立体の中に含まれる格子は、その座標における超曲面の第 4 次元成分の値に従って値が加算される (図 5-3)。その後、存在する固体群の総量が超曲面加算前と比べて増加するので、 超曲面を生成する前の固体群総量と等しくなるように全体を修正する (図 5-4)。具体的には、超曲面加算前の固体群の総量を V_{sum}、超曲面加算後の固体群総量を V'_{sum} とすると、ある座標に存在する固体群量 $f(X,Y,Z)$ は以下のように修正をする。

$$f(X,Y,Z) \Leftarrow \frac{V_{sum}}{V'_{sum}} f(X,Y,Z) \tag{14}$$

この手法を存在確率フィールドに適用し、存在確率を遷移することで上部固体群の挙動を表現する。本提案モデルでは三次元空間へ投影した形状が楕円球 (楕円球状変形超曲面)、凸多角柱 (凸多角柱状変形超曲面) となる 2 つの超曲面を利用する。これは、事前の聞き取り調査において、フライパンから舞い上げられた炒

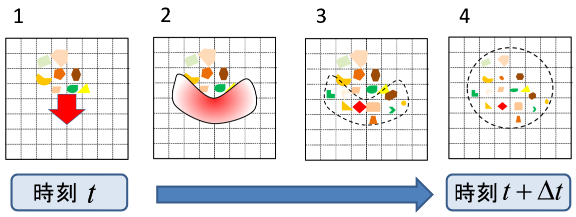

図 5　変形超曲面
Fig. 5　Transformation Hypersurface

飯は球（楕円球）状にまとまっていると感じられ、フライパンを激しく振った場合には円柱状（楕円柱状、加えて自由落下）に斜め横方向に飛び出していくと感じられるとの結果が得られたためである。楕円球状変形超曲面は上部固体群の挙動計算に用いる。また円柱の近似としての凸多角柱状変形超曲面は後述する上部固体群から外部固体群への変換に利用する。以降はこれらの変形超曲面について説明する。

4.4　楕円球状変形超曲面

上部固体群の挙動は楕円球状変形超曲面を用いることで表現する。上部固体群の重心の単位時間あたりの移動量を上部固体群全体の速度と見なし、速度と上部固体群にかかる力から変形超曲面の生成場所を計算する。時刻 t における楕円球状変形超曲面の、3 次元空間中における楕円球の生成位置 $\boldsymbol{O}_e(t)$ は以下のように求める。

$$\boldsymbol{O}_e(t) = \boldsymbol{O}_e(t-\Delta t) + \beta(\boldsymbol{G}_E(t) - \boldsymbol{G}_E(t-\Delta t)) + \gamma \boldsymbol{F}(t) \tag{15}$$

ここで、$\boldsymbol{F}(t)$ は時刻 t における上部固体群にかかる力である。また、β, γ は定数である。楕円球の各軸を $\boldsymbol{e}_a, \boldsymbol{e}_b, \boldsymbol{e}_c$ とし、各軸における半径をそれぞれ a, b, c とする。これらの算出方法は **4.6**,**4.8** 節で述べる。上部固体群の分布密度は、挙動中は変化しないと考え、楕円球状変形超曲面の第 4 次元成分値 $w(X,Y,Z)$ を以下のように設定する。

$$w(X,Y,Z)(t) = \frac{E_{up}(t)}{N_e(t)} \tag{16}$$

$E_{up}(t)$ は時刻 t における、存在確率フィールドが保持する確率に基づく、上部固体群体積の期待値の総量、$N_e(t)$ は、時刻 t における $f(X,Y,Z) > 0$ となる存在確率フィールドの格子の総数である。すなわち、ある時刻 t において投影された楕円球内の第 4 次元成分値 $w(X,Y,Z)$ は一定であり、実際には超平面である。また、調理容器を貫通して上部固体群が挙動しないように、曲面生成点と調理容器との交差判定を行い、交差している時は調理容器を貫通しないように曲面生成点を更新する。さらに、変形超曲面による、調理容器の

面を横断した存在確率フィールドの格子への加算を禁止する。

楕円球状変形超曲面は、上部固体群が存在しない状態で、他の固体群表現から上部固体群への変換が行われたときに初めて生成される。このような状態は、外部固体群が存在確率フィールドに入った時と、内部固体群が容器から離れる力を受けた時の、2 通りの場合が考えられる。生成する楕円球状変形超曲面の初期状態は、変換される固体群表現の分布を楕円球に近似して求める。例えば、前者の時は変換される外部固体群を包含するようにし、後者の時は、ハイトフィールドを包含するようにする。また、第四次元成分値は、変換による上部固体群の体積の期待値の増加量 E_{up}^{inc} と生成された楕円球状変形超曲面の三次元投影形状の体積 V_{elip} を用いて以下のように設定する。

$$w(X,Y,Z)(t) = \frac{E_{up}^{inc}(t)}{V_{elip}} \tag{17}$$

4.5 凸多角柱状変形超曲面

上部固体群は楕円球状変形超曲面によって挙動するが、短い時間の間に調理容器を大きく移動させた場合、楕円球状変形超曲面の生成場所が存在確率フィールドの外に出る時がある。この場合、上部固体群が外部固体群へ変換されるようにする。具体的には、変換領域に凸多角柱状変形超曲面を生成することで、楕円球状変形超曲面が外に出た後に固体群変換が行われるようにする。凸多角柱状変形超曲面は図 6-1 のように、以下のパラメータにより定義する。

- 底面を構成する凸多角平面図形の重心座標 $\boldsymbol{O}_p$
- H_{Bj} を含む無限平面 H'_{Bj} 表面上に存在する凸多角平面図形の頂点群 $\boldsymbol{x}'_{Bjei}$
- 上述の凸多角平面図形の法線 $\boldsymbol{n}_p$
- 凸多角柱の高さ h_p
- 超曲面内の座標 (X,Y,Z) における第 4 次元成分の値 $w_p(X,Y,Z)$

H_{Bj} は変換領域 B_j に接する存在確率フィールドの境界面の 1 面である。以降は変形超曲面の第四次元成分の値を決定する $w_p(X,Y,Z)$ を「密度」と呼ぶ。楕円球状変形超曲面の生成座標 $\boldsymbol{O}_e(t)$ が存在確率フィールドの外に出た時、多角柱状変形超曲面を以下の手順で生成する。

1. 投影する楕円球状変形超曲面表面上の頂点群 $\boldsymbol{x}'_{ei}$ を求める。$\boldsymbol{x}'_{ei}$ は、図 6-2 のように楕円球状変形超曲面の三次元投影時の形状の表面に位置し、 楕円球の芯となる軸の端点 6 点である。

2. $\boldsymbol{n}_{Bj}\cdot\,\boldsymbol{e}' < 0$ となる、変換領域 B_j に接する存在確率フィールドの境界面 H_{Bj} をすべて求め、各 H_{Bj} を含む無限平面を投影先となる無限平面 H'_{Bj} とする。なお、$\boldsymbol{e}'$ は $\boldsymbol{O}_e(t-\Delta t)$ から $\boldsymbol{O}_e(t)$ へ向かうベクトルの単位ベクトルである。

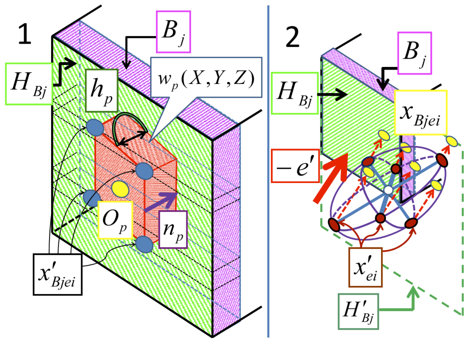

図 6 多角柱状変形超曲面
Fig. 6 Transformation Hypersurface of Polygon Prism

3. 投影ベクトルを $-\boldsymbol{e}'$、または $\boldsymbol{e}'$ に設定し、図 6-2 のように $\boldsymbol{x}'_{ei}$ を各 H'_{Bj} に投影して $\boldsymbol{x}_{Bjei}$ を求める。

4. $\boldsymbol{x}'_{ei}$ を投影した各平面 H'_{Bj} 上に $\boldsymbol{x}_{Bjei}$ から成る凸多角平面図形を二次元凸包により求める。

5. $\boldsymbol{O}_p, h_p, \boldsymbol{n}_p, w_p(X,Y,Z)$ を以下のように設定し、各変換領域 B_j に対応する凸多角柱状変形超曲面を生成する。

$$\boldsymbol{O}_p = \frac{1}{N_{convex}}\sum^{N_{convex}} \boldsymbol{x}'_{Bjei} \tag{18}$$
$$h_p = l \tag{19}$$
$$\boldsymbol{n}_p = \boldsymbol{n}_{Bj} \tag{20}$$
$$w_p(X,Y,Z) = \frac{E_{up}(t)}{N_e(t)} \tag{21}$$

なお、N_{convex} は平面 H'_{Bj} 上の $\boldsymbol{x}_{Bjei}$ から成る凸多角平面図形の頂点数、$\boldsymbol{x}'_{Bjei}$ はその凸多角平面図形を構成する頂点であり、l は存在確率フィールドの格子間距離、$E_{up}(t)$ は時刻 t における存在確率フィールドが保持する確率に基づく上部固体群体積期待値の総量、$N_e(t)$ は時刻 t における $f(X,Y,Z) > 0$ である格子の総数である。実際には $n_p = n_{Bj}$ が成立するとは限らないが、簡略化のために n_p を n_{Bj} と設定する。

4.6 外部固体群から上部固体群への変換

外部固体群から上部固体群への変換は、存在確率フィールドに楕円球状変形超曲面を生成することで実現する。生成する楕円球状変形超曲面の 3 次元投影形状は、存在確率フィールド内に侵入した外部固体群を包含するように設定する。具体的には、楕円球の形状を決定するパラメータは、存在確率フィールドに進入した外部固体群の座標を、それらを平均座標を含む水平な平面に投影し、その平面において凸包を求めたのち、以下の通り決定する。ただし、A, B は経験的に定

めた定数である。

- $\boldsymbol{O}_e$ の初期値＝外部固体群の重心座標の平均
- $a = A\times$ $\boldsymbol{O}_e$ から最も遠い凸包の頂点と $\boldsymbol{O}_e$ との距離
- $b = B\times$ 凸包の面積 $/a$
- $c =$ 進入した外部固体群と投影面との距離の平均
- $\boldsymbol{e}_a = \boldsymbol{O}_e$ から最遠頂点へのベクトル / それらの距離
- $\boldsymbol{e}_b = \boldsymbol{e}_a \times \boldsymbol{e}_c$
- $\boldsymbol{e}_c =$ 鉛直上方向

変換が行われたら、存在確率フィールドが保持する確率に基づく上部固体群体積期待値の総量 $E_{up}(t)$ を次のように更新する。

$$E_{up}(t) = E_{up}(t-\Delta t) + \delta\sum_{i=1}^{n} V_{Qi} \tag{22}$$

ここで、δ は外部固体群と上部固体群の変換率であり、1 格子に存在することができる固体群体積の最大値 V_{max} を参考に経験的に定める。n は変換される外部固体群の総数、V_{Qi} は変換される外部固体群が保持する体積である。

4.7 上部固体群から外部固体群への変換

上部固体群から外部固体群への変換は、存在確率フィールドに定義された変換領域を用いて行う。各変換領域ごとに、領域内に存在する上部固体群を外部固体群に変換する。具体的には、毎フレーム、各変換領域に存在する上部固体群の期待値の総和と変換率の積に等しい量の外部固体群を各変換領域に生成する。この時、変換された外部固体群の速度に上部固体群の速度を適応する。楕円球状変形超曲面が存在する時は、上部固体群の重心の単位時間当たりの移動量 $\boldsymbol{G}_E(t) - \boldsymbol{G}_E(t-\Delta t)$ を上部固体群の速度とし、多角柱状変形超曲面が生成されているときは予測速度 $\boldsymbol{v}_{up}$ とする。$\boldsymbol{v}_{up}$ の初期値 $\boldsymbol{v}^0_{up}$ は以下のように求める。

$$\boldsymbol{v}^0_{up} = \boldsymbol{G}_E(t_{out}) - \boldsymbol{G}_E(t_{out} - \Delta t) \tag{23}$$

ここで t_{out} は、凸多角柱状変形超曲面が生成された時刻である。また、$\boldsymbol{v}_{up}$ の更新は時刻 t に固体群にかかる力 $\boldsymbol{F}(t)$ を用いて以下のようにして行う。

$$\boldsymbol{v}_{up}(t) = \boldsymbol{v}_{up}(t-\Delta t) + \varepsilon\boldsymbol{F}(t) \tag{24}$$

ただし、ε は定数である。変換が行われたら、存在確率フィールドが保持する確率に基づく上部固体群体積期待値の総量 $E_{up}(t)$ を次のように更新する。

$$E_{up}(t) = E_{up}(t-\Delta t) - \delta\sum_{j=0}^{n} E^{Bj}_{up} \tag{25}$$

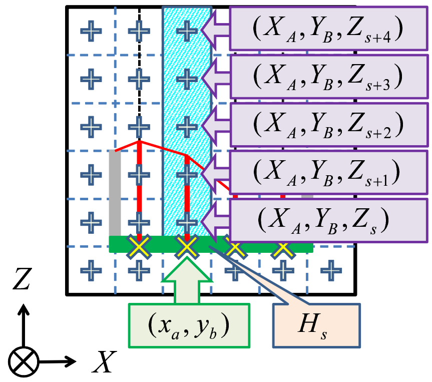

図 7 格子 (x_a, y_b) に XY 平面で一致する存在確率フィールドの格子群
Fig. 7 The Grids of Existence Probability Field Which is Located on Grid (x_a, y_b) in Cross Section of XY

ここで、δ は上部固体群と外部固体群の変換率、E^{Bj}_{up} は、変換領域 B_j（$j = 0 \sim 5$ の 6 領域）に存在する上部固体群体積期待値の総量である。

4.8 内部固体群から上部固体群への変換

内部固体群から上部固体群への変換は、ハイトフィールドを存在確率フィールドの格子に代入し、存在確率フィールドに楕円球状変形超曲面を生成する事で実現する。本モデルでは、2 つの条件 $E_{up}(t) = 0, \boldsymbol{F}(t)\cdot\boldsymbol{n}_s > 0$ を満たす時に、内部固体群が調理容器から離れる挙動をすると判定し、内部固体群を上部固体群に変換する。ただし、$E_{up}(t)$ は時刻 t における、存在確率フィールドが保持する確率に基づく上部固体群体積期待値の総量、$\boldsymbol{F}(t)$ は時刻 t に固体群にかかる力、$\boldsymbol{n}_s$ は調理容器底部を構成する平面の法線である。内部固体群から上部固体群への変換は、具体的には以下の手順で実現する。

1. 存在確率フィールドと容器内に配置されたハイトフィールドの位置関係において、調理容器の底面から、ハイトフィールドの表面付近までに存在する格子に代入を行う。ハイトフィールドの格子 (x_a, y_b) について、格子 (x_a, y_b) に XY 平面で一致する存在確率フィールドの格子群のうち、代入が行われる格子を (X_A, Y_B, Z_{s+n}) $(n = 0, 1, 2 \ldots k_{ab})$ とすると、k_{ab} は以下のように求める。

$$k_{ab} = \lfloor \frac{f(x_a, y_b)}{l} \rfloor \tag{26}$$

格子 (X_A, Y_B, Z_s) は、図 7 のように格子 (x_a, y_b) に一致する存在確率フィールドの格子群のうち、調理容器底面 H_s の法線方向 $\boldsymbol{n}_s$ 側に存在し、H_s との距離が $l/2$ となる格子である。また、l はハイトフィールド、存在確率フィールドの格子間距離であ

る。$k_{ab} > 0$ の時、以下のように代入を行う。

$$f(X_A, Y_B, Z_{s+n}) = \begin{cases} 1/E_{up}^{con} \\ \quad (n = 0, 1, 2 \ldots k_{ab} - 1) \\ p_{ab}/E_{up}^{con} \\ \quad (n = k_{ab}) \end{cases} \tag{27}$$

ここで、E_{up}^{con} は変換によって得られる上部固体群体積の期待値の総量であり、

$$E_{up}^{con} = \delta V_c \tag{28}$$

のように求める。V_c は内部固体群の体積の総量であり、δ は上部固体群と内部固体群の変換率である。また、p_{ab} は以下のように求める。

$$p_{ab} = \frac{f(x_a, y_b)}{l} - k_{ab} \tag{29}$$

$k_{ab} = 0$ の時は、格子 (X_A, Y_B, Z_s) に以下のように代入を行う。

$$f(X_A, Y_B, Z_s) = \frac{f(x_a, y_b)}{E_{up}^{con} l} \tag{30}$$

2. 調理容器内部に存在する固体群、すなわちハイトフィールドを包含する楕円球状変形超曲面を以下のように生成する。

$$\boldsymbol{O}_e = \boldsymbol{G}'_E(t) + \gamma \boldsymbol{F}(t) \tag{31}$$

ここで、$\boldsymbol{G}'_E(t)$ はハイトフィールドを存在確率フィールドに代入した後における上部固体群の重心、$\boldsymbol{F}(t)$ は固体群にかかる力、γ は定数である。また、楕円球の形状を決定するパラメータは、ハイトフィールドにおいて別途定める値を超える格子を内包する凸多角形を求めたのち、以下の通り決定する。ただし、A, B は経験的に定めた定数である。

- $a = A\times$ 凸包の重心と重心から最も遠い凸包の頂点との距離
- $b = B\times$ 凸包の面積 $/a$
- $c =$ ハイトフィールドの格子の最大値 $/2$
- $\boldsymbol{e}_a =$ 凸包の重心から最遠頂点へのベクトル / それらの距離
- $\boldsymbol{e}_b = \boldsymbol{e}_a \times \boldsymbol{e}_c$
- $\boldsymbol{e}_c =$ 調理容器底面の法線

3. 内部固体群の体積の総量 V_c と存在確率フィールドの保持する確率に基づく上部固体群体積期待値の総量 E_{up} を次のように更新する

$$V_c(t) = 0 \tag{32}$$
$$E_{up}(t) = E_{up}^{con} \tag{33}$$

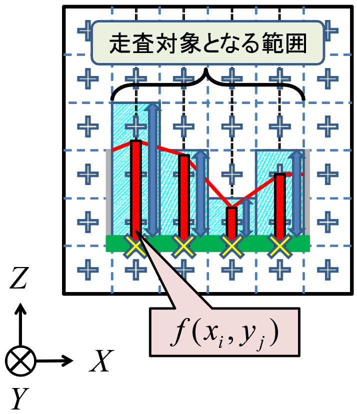

図 8　走査対象となる存在確率フィールドの格子群の範囲例
Fig. 8　Example of Target Grids of Existence Probability Field

4.9　上部固体群から内部固体群への変換

上部固体群から内部固体群への変換は、条件 $\boldsymbol{F}(t)\cdot\boldsymbol{n}_s \le 0$ が満たされる時に行う。この時、上部固体群は調理容器に堆積するとみなし、固体群表現の変換を行う。内部固体群の様子は、**2** 節で述べた、これまでに提案している調理容器内における固体群操作モデルに帰着させることにより表現する。そのため、上部固体群から内部固体群への変換は、調理容器内に定義されたハイトフィールドに変形曲面を生成することで以下の処理により実現する。

1. 変換される固体群量の計算を行う。変換される上部固体群量は存在確率フィールドを走査することにより求める。ハイトフィールドの各格子ごとに、その格子が持つ高さ $f(x_i, y_j)$ から、走査対象となる存在確率フィールドの格子の範囲を計算する。ハイトフィールドの格子 (x_a, y_b) に、XY 平面において一致する存在確率フィールドの格子群のうち、走査対象となる格子を (X_A, Y_B, Z_{s+n}) $(n = 0, 1, 2 \ldots k'_{ab})$ とすると、k'_{ab} は以下のようにして求める。

$$k'_{ab} = \lfloor \frac{f(x_a, y_b)}{l} \rfloor \tag{34}$$

図 8 に、変換量計算のために走査対象となる存在確率フィールドの格子の範囲例を示す。図 8 は XZ 平面における存在確率フィールドの断面図であり、図 8 のようなハイトフィールドの形状では、斜線部の格子群が走査対象となる。走査対象となった格子の存在確率に基づいた上部固体群体積の期待値の合計が変換される固体群量となる。上部固体群から内部固体群へ変換される固体群量 V_{con} は以下のように求める。

$$V_{con} = \sum^{N} \left(\frac{l}{V_{max}} \sum_{n=0}^{k'_{ab}} E(X_A, Y_B, Z_{s+n}) \right) \tag{35}$$

図 9　実験の様子
Fig. 9　Experiment System

N は調理容器内に定義されたハイトフィールドの格子の総数、l はハイトフィールドと存在確率フィールドの格子間距離、V_{max} は存在確率フィールドの 1 格子に存在することができる固体群体積の最大値である。

2. ハイトフィールドに内部固体群を増加させる働きをする変形曲面を生成し、内部固体群の体積の総量 V_c と存在確率フィールドの保持する確率に基づく上部固体群体積期待値の総量 E_{up} を次のように更新する。ただし δ は上部固体群と内部固体群の変換率である。

$$V_c(t) = V_c(t - \Delta t) + V_{con} \tag{36}$$
$$E_{up}(t) = E_{up}(t - \Delta t) - \delta V_{con} \tag{37}$$

5　実験

5.1　実験システム

前述の提案モデルによる実験システムを作成し、実験を行った (図 9)。安価な入力装置として、任天堂株式会社から発売されている “Wii リモコン” と “Wii モーションプラス” を用いた。加速度センサで調理容器の平行移動を、ジャイロセンサで回転を行うように構築した。描画には DirectX を利用し、CPU : Intel(R) Dual-Core E5200 2.50GHz, MEM : 1GB, OS : Microsoft Windows XP の計算機で構築した。実験システムでは、調理容器を直径が 32.5cm、側面の高さが 6.6cm の円柱相当（実際には多角柱）のフライパンと、また、固体群を炒飯と想定している。落下固体群の様子の確認を容易にするために、重力加速度を 1/10 程度に設定している。ハイトフィールド表面と、固体群粒子表面をテクスチャマッピングにより描画している。ハイトフィールドと存在確率フィールドの格子数はそれぞれ、441 (21^2)、12167 (23^3) に設定した。なお、予備実験を行った結果、ハイトフィールドの格子数が 441 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ている。図 10 では、容器を傾けることにより内部固体群が容器端に寄り、その後、こぼれることにより外部固体群に変換されていることが確認できる。図 11、図 12 では、容器を振り上げることにより内部固体群の一部が上部固体群に変換され、舞い上がり、再び内部固体群に変換されている。さらに、図 12 では上部固体群の一部が外部固体群に変換されこぼれている様子が確認できる。

図 10　ハイトフィールド表面の固体群粒子と自由落下固体群粒子
Fig. 10　GIB Particle on Hight-field and Free-fall GIB Particle

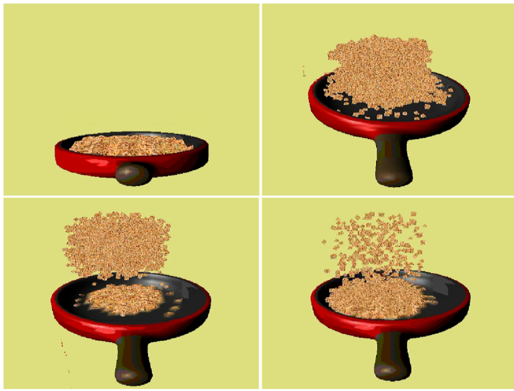

図 11　上部固体群と内部固体群の変換
Fig. 11　Conversion between Inner GIB and Upper GIB

5.2　処理速度についての評価

実験システムを用いて、本提案モデルにおける、ハイトフィールドと存在確率フィールドの格子数と処理速度の関係について調べた。表 2 に各格子数における描画更新速度の平均（小数点以下を四捨五入）を示す。表 2 より、本モデルはハイトフィールドと存在確率フィールドの格子数がそれぞれ 441、12167 において平均 297 FPS である。これは、対話操作を行うには

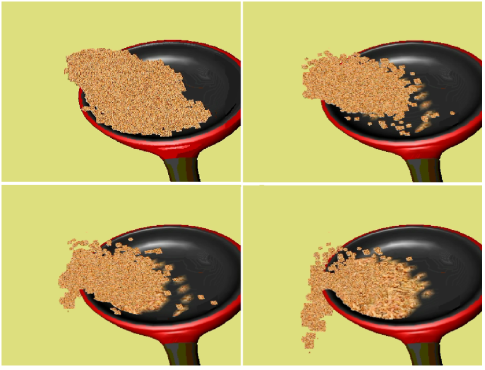

図 12 上部固体群から外部固体群への変換の様子
Fig. 12 Conversion of Upper GIB to Outside GIB

表 2 処理速度についての実験結果
Table 2 Performance Results

ハイトフィールドの格子数	存在確率フィールドの格子数	FPS(平均)
441 (21^2)	12167 (23^3)	297
729 (27^2)	24389 (29^3)	173
1089 (33^2)	42875 (35^3)	108
1521 (39^2)	68921 (41^3)	71

十分な処理速度であり、実験システムにとどまらず、様々な処理が必要となる応用システムにも十分、適用可能であるといえる。

5.3 固体群挙動の自然さについての評価

本提案モデルの固体群挙動について評価するため、被験者 15 人に実験システムを体験してもらい、簡単なアンケートを行った。ハイトフィールドと存在確率フィールドの格子数はそれぞれ、441、17986 ($23 \times 23 \times 34$) に設定し、「舞い上がり」や「全体的な固体群挙動」について 7 段階評価のアンケートに答えてもらった。処理速度に十分な余裕が確認できたため、ここでは存在確率フィールドを立方体とせずに上方向に長い直方体としている。評価の目安は、評価点 1 で「全く自然に見えない」、評価点 7 で「現実と同程度」とした。図 13 に実験結果を示す。双方の項目とも、3 分の 2 の被験者から評価点 4 よりも高い評価が得られている。このことから、本提案モデルではある程度の固体群挙動の自然らしさを体験者に与える事ができると言える。しかし、フライパンを素早く傾けた際などに固体群が不自然に消えるような状況もあり、やや低い評価も無視できない。パラメータの調整だけでなく、確率的に処理することによる問題点も合わせて精査する必要がある。

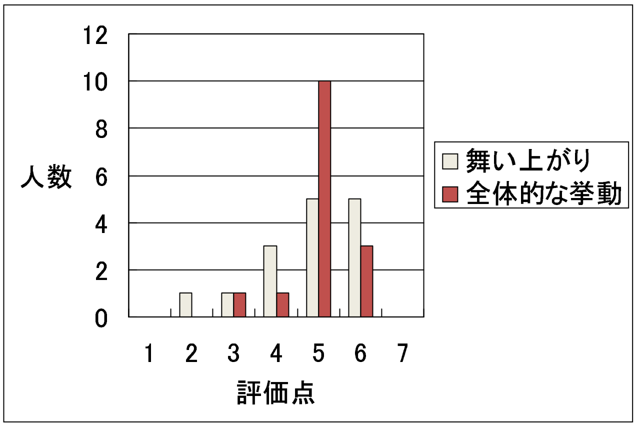

図 13 固体群挙動についての評価
Fig. 13 Evaluation result of GIB movement's realism

5.4 上部領域の固体群表現の評価

本モデルにおける外部固体群と上部固体群はともに計算量の削減のため、固体群同士の衝突は考慮していない。そのため、外部固体群と上部固体群を区別せずに、容器内部ではない空間においては全て、相互干渉を考慮しない自由落下粒子 (無干渉粒子) で表現することも考えられる。そこで、提案モデルの固体群表現法の有効性を評価するため、同一量に相互変換できる外部固体群 (無干渉粒子表現の固体群) と上部固体群 (存在確立に基づく表現の固体群) を用意し、それぞれの挙動計算 (1 フレーム) にかかる時間の平均を計測した。なお、無干渉粒子の挙動計算は、物理量の更新と調理容器との衝突判定の計算と考え、存在確率に基づく固体群の挙動計算は、調理容器を考慮した変形超曲面の生成と超曲面による存在確率の遷移とした。実験結果を表 3 に示す。無干渉粒子 2,000 個に相当する固体群量では、存在確率に基づく表現の方が挙動計算に時間がかかるが、4,000 個の時は存在確率に基づく表現の方が計算時間が若干短い。それぞれの量は、炒飯 2 人前、4 人前を想定したものである（一般に茶碗 1 膳のご飯は 150g 程度、米 3,000 粒程度と考え、炒飯 1 人前は茶碗 2 膳程度とした）。実際の応用システム作成時には炒飯に限らず野菜などを含めた様々な料理を対象とすることも考えられ、また、調理以外のシステムへの応用も考えられる。そのため、粒子同士の干渉を考慮する必要もあるかもしれない。本手法では変形超曲面を適切に設定することにより、干渉を考慮した挙動にも対応できる。計算時間が固体群量に依存しない本手法は有効であると言える。

表 3　挙動計算にかかった平均時間
Table 3　Average Time of Motion Calculation of Outside GIB and Upper GIB

固体群量 (無干渉粒子換算)	無干渉粒子	存在確率
2,000 個	約 3.4×10^{-4}sec	約 7.2×10^{-4}sec
4,000 個	約 7.3×10^{-4}sec	約 7.2×10^{-4}sec

6　むすび

本研究では、従来の固体群操作モデルでは困難であった「固体群を舞いあげて再び受け止める」、というような調理容器外における固体群上下動を、対話操作性を維持しながら行うことができる固体群操作モデルを提案した。本モデルでは、調理容器周辺の空間を 3 つの領域に分割し、それぞれの領域に異なる固体群表現を定義した。そして、異なる領域の固体群を組み合わせたり、状況に応じて固体群の変換を行うことにより、調理容器外での上下動を表現した。また、3 つに分割した領域のうち、調理容器上部領域の固体群の挙動計算に、格子法モデルで用いた変形曲面を拡張して取り入れることにより、高速な挙動計算を実現した。さらに、調理容器上部領域の固体群表現に、格子法モデルで用いている確率的な固体群表現を取り入れる事により、視覚的な固体群挙動の自然らしさの向上を図った。今後の課題点としては、「中華鍋」などを想定した丸みを帯びた形状の調理容器への拡張、存在確率固体群粒子と「ヘラ」などの調理器具間の干渉モデルを提案することが挙げられる。また、VR 調理学習システムの実現により様々な VR システムの家庭への普及が期待できる。

参考文献

[1] 椎尾一郎, 浜田玲子, 美馬のゆり: “Kitchen of the Future: コンピュータ強化キッチンとその応用”, 日本ソフトウェア科学会誌コンピュータソフトウェア Vol.23, No.4, pp36-46, 2006.

[2] 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, pp.390-393, 2010.

[3] 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.

[4] 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, pp.346-349, 2010.

[5] Morii, A., Yamamoto, D., Funahashi, K: “Interactive Manipulation Model of Group of Individual Bodies for VR Cooking System”, In: Proc. of the ICEC2010, pp484-486, 2010.

[6] Onoue, K., and Nishita, T: “Virtual Sandbox”, In: Proc. of the 11th Pacific Graphics, pp.252-259, 2003.

[7] Stora D., Agliati P.O., Cani M.P., Neyret F., and Gascuel, J.D: “Animating lava flows”, In: Proc. of the Graphics Interface, pp.203-210, 1999.

[8] Amman C., Bloom D., Cohen J. M., Courte J., Flores L., Hasegawa S., Kalaitzidis N., Tornberg T., Treweek L., Winter B., and Yang C: “The Birth of Sandman”, In: SIGGRAPH 2007 sketches, 2007.

[9] Harada T., Masaie I., Koshizuka S., Kawaguchi Y.,: “Massive Particles: Particle-based Simulations on Multiple GPUs”, In: SIGGRAPH 2008 Talks, 2008.

[10] Liu F., Harada T., Lee Y., Kim Y.J.,: “Real-time collision culling of a million bodies on graphics processing units”, In: SIGGRAPH Asia 2010, 2010.

(2011 年 5 月 27 日受付)

［著 者 紹 介］

森井 敦士　（学生会員）

2011 年名古屋工業大学大学院工学研究科修了。同年日本信号株式会社入社、現在に至る。在学中、バーチャルリアリティに関する研究に従事。

上垣内　翔太

2011 年名古屋工業大学工学部卒業。同年、リンナイ (株) 入社、現在に至る。在学中、バーチャルリアリティに関する研究に従事。

山本　大介

2003 年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業、2008 年同大学大学院情報科学研究科博士課程修了。同年、名古屋工業大学情報基盤センター助教、現在に至る。Web サービスとマルチメディア、e-Learning に関する研究に従事。情報処理学会、日本データベース学会、人工知能学会、IEEE 各会員。博士 (情報科学)。

舟橋 健司　（正会員）

1993 年岐阜大学工学部卒業、1995 年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了、1998 年同博士後期課程修了。同年名古屋工業大学助手、講師、助教授を経て、現在、同大学情報基盤センター准教授。バーチャルリアリティ、コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。バーチャルリアリティ学会、電子情報通信学会、IEEE 各会員。博士 (工学)。