

# 色の表現を考慮した粒子・体積モデルに基づく 仮想液体操作システム

Color Representation of Virtual Liquid Manipulation System  
Based on Particle and Volume Model

棚橋拓也<sup>1)</sup>, 蒲将寛<sup>2)</sup>, 舟橋健司<sup>3)</sup>

Takuya TANABASHI, Masahiro KABA and Kenji FUNAHASHI

1) 名古屋工業大学 工学研究科

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

2) トヨタ車体(株)

(〒 448-8666 愛知県刈谷市一里町金山 1 0 0 番地)

3) 名古屋工業大学 情報基板センター

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

**Abstract :** In this paper, a model to realize an interactive manipulation of virtual water using a virtual container is described first. Then, this model is extended to represent the water color. The water have the color value and the water color is spread and blended with diffusion equation. The virtual liquid manipulation system makes it possible to swing the water surface and to spill and/or stir the water. In addition, the representation of water color is realized with this integrated model.

**Key Words:** *virtual liquid, water color, diffusion equation*

## 1. はじめに

バーチャルリアリティの研究として、剛体、弾性体の操作を行う研究がある。一方で医療や産業の分野において、液体を仮想的に扱いたいという要望がある。液体を仮想的に扱うことを考えた際、その手法として流体力学に基づく計算をし、液体の挙動を厳密に再現する手法が考えられる [1][2]。しかし、このような手法では計算に多くの時間がかかってしまい、対話処理に向いているとはいえない。本研究室ではこれまでに、用意に実時間処理が可能な、仮想容器による対話操作モデルを提案している [3][4]。この対話操作モデルでは、液体を自由落下状態と静止状態に分け、前者を粒子、後者を体積として液体を表現している。また液面に、短時間で計算可能な二次元波動方程式を利用し波の挙動を加えることで、処理速度を保ったまま臨場感の向上を行っている。概略を 2 章において述べる。詳しくは文献 [3][4] を参照されたい。本研究では、上記モデルに拡散方程式を用いた液面色の変化モデルを適用し、対話操作可能な仮想液体で色の表現を実現する。具体的な手法を 3 章において述べ、4 章では実験結果について述べる。

## 2. 粒子・体積に基づくモデル

### 2.1 液体のモデル

粒子・体積モデルでは、液体を以下の二つの状態として考える。

- 自由落下状態 (粒子による表現)
- 静止状態 (体積による表現)

本モデルは、対話操作を第一の目的とし厳密な挙動の再現を目指していない。そのため、自由落下状態の液体の粒子表現では、各粒子の大きさは考えず、衝突、干渉に関する処理は行わない。各粒子は、与えられる初速度と、重力、慣性に従って移動する。静止状態の液体については、時刻  $t$  においてある仮想容器に液体が存在する場合に容器内には体積  $V(t)$  の液体が存在する、と表現する。この状態の液体は、流れといった液体内部の挙動は考慮していないが、液面上に波動方程式による波の表現を行い、実時間処理を優先しつつ高い臨場感を実現している。上記二つの状態の液体は、換算比  $N$  [粒子数/体積] によって行われる。

### 2.2 仮想容器のモデル

上記モデルで定義される仮想液体を操作可能な容器について述べる。容器は凸形状 (容器と、容器を内包する凸法が一致する) であると仮定する。

容器より液体が流れ出す点を流出点と呼ぶ。厳密には容器の縁から溢れるという、流出点が線分となることが考えられるが、そういった例は少数であると考え、本モデルでは一点の流出点から溢れるものとしている。この流出点は容器の傾きから与えられ、容器内に液体が存在する際は、液面の高さから流出点を参照することで液体のこぼれを実現する。

### 2.3 波の表現

静止状態の液体の液面において、処理に比較的時間のわからない二次元波動方程式を適用することで、波の表現の付加も行っている。次式に二次元波動方程式を示す。

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \nu^2 \left( \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

この式を差分を用いて近似することで簡単化する。液面を格子状に区切り、各格子点で計算させることで波の伝搬を実現している。

## 3. 色の变化を考慮した粒子・体積モデル

### 3.1 液面のモデル

本研究では、液体の液面にインクなどの色がゆっくりと広がり混ざっていく様子を表現することを目的としている。また、対話操作を第一の目的としているため、従来の粒子法などとは異なる、リアルタイムで用意に計算可能な拡散方程式を用いた新たな手法を提案する。

本モデルで用いる拡散方程式は、平面上のある点における値の変化を計算する式であるため、液面状の波を表現するための格子を基に処理を行う。そして、各格子点に色の情報を持たせることにより液面の色の表現を可能にする。各格子点は、色の情報として色のベクトル値  $C$  (RGBA 値) と、色の伝搬を表現するための重みを表す変数  $P$  (以下、重み  $P$ ) を持つ。なお、色のベクトル値  $C$  (RGBA 値) とは、色の三原色である赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の値に、透明度を表す Alpha 値 (A) を加えた、色を表現する際に用いられる手法の一つである。

### 3.2 拡散方程式

自然界において、液体が他の液体に流入した場合、時間とともに広がりやがて混ざり合い均一な状態となる。このような現象は拡散現象と呼ばれ、拡散方程式という式で数学的に記述されている。次式に、二次元拡散方程式を示す。

$$\frac{\partial Q(x, y, t)}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 Q(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, t)}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

前式はある多量の粒子が時刻とともに拡散していく状態を考えたときの計算式であり、 $Q$  は時刻  $t$  での  $x, y$  平面上における粒子の濃度分布、 $D$  は拡散係数といい、粒子が拡散する速度を調整する係数である。この式 (2) を格子点間隔  $d$  を用いて中央差分で近似することで次式を得る。

$$\begin{aligned} & (Q[i][j](t + t\Delta t) - Q[i][j](t)) / \Delta t \\ & = (Q[i + 1][j](t) + Q[i - 1][j](t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + Q[i][j + 1](t) + Q[i][j - 1](t) \\ & - 4Q[i][j](t)) / D / d^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで  $i, j$  は任意の格子点の座標を表す。また、 $\Delta t$  について、

$$\frac{D\Delta t}{d^2} = D' \quad (4)$$

とおき、簡略化し式を整理することで以下の漸化式を得る。

$$\begin{aligned} & (Q[i][j](t + t\Delta t) \\ & = Q[i][j](t) + (Q[i + 1][j](t) + Q[i - 1][j](t) \\ & + Q[i][j + 1](t) + Q[i][j - 1](t) \\ & - 4Q[i][j](t)) / D' \end{aligned} \quad (5)$$

この  $D'$  の値を調整することで、粒子の濃度分布である  $Q$  の値が拡散する速度を調整することができ、時刻  $t + \Delta t$  における位置  $i, j$  の粒子の濃度を求めることができる。

### 3.3 自由落下状態の液体と液面色の相互作用モデル

各容器内に存在する液体と、自由落下状態の液体との相互作用モデルについて述べる。本モデルの基となる粒子・体積モデルでは自由落下状態の液体は粒子で表現されているため、自由落下状態の液体、すなわち各粒子にも色情報を設定する。その上で、粒子としての液体が容器内の静止状態の液体液面に達する時、体積としての液体に換算されるとともに、液面色についても流入する液体に応じて変化させる。具体的には、流入地点付近の色の重み  $P$  を流入する液体の色の値 (RGBA 値) により更新し、更新された色の重み  $P$  を用いて液面色の値を決定する。この混合された色情報が式 (5) により拡散されることで、液面に流入した液体の色が広がっていく様子を表現する。一方、静止状態の液体が容器からこぼれる、つまり自由落下状態の液体となる際、その粒子としての液体の色は静止状態の液体の色の平均値として設定する。

### 3.4 静止状態の液体の流入における液面色のモデル

本研究の液体操作モデルでは移動可能な容器 (容器 1) によって、他の容器 (容器 2) 内に存在する液体をすくうことができる。このとき、容器 1、容器 2 両方において液体の流入により液面色を変化させる必要がある。しかし本モデルでは、流入に関する厳密な挙動の計算は行わず、簡単な体積の移動で容器間の流入を表現しているため、液面色の混合については前節で述べた自由落下状態の液体との干渉の手法をそのまま用いることができない。そのため、以下の手法により流入時に液面色が変化する表現を行う。

容器 2 内の液体が容器 1 に流入している際、各容器の液面の流入、流出地点間で色の伝搬を行う。つまり、一時的に二つの容器の液面を一つのものとして考えることで、容器間での液体の流入における色の混合の表現を実現する。このとき伝搬は、流入地点およびその近傍点に流出地点の色の値  $C$  を与え、また重み  $P$  として、流入による容器 1 の増

加体積を換算比  $N[\text{粒子数}/\text{体積}]$  で粒子数に直した値を伝搬する格子点数で割った値を与える。

このように容器内に液体が存在している状態で他の容器からの流入があった場合、液面色が混合し拡散する。また、容器内に液体が存在していない状態で他の容器から流入した場合は、流入液体の液面の平均の色を流入後の液面色とすることで、流入による液面色の变化を表現する。

## 4. 実験及び結果

### 4.1 実験システム

上述のモデルに基づいた仮想液体の対話操作のための実験システムを PC (CPU: 1.8GHz、メモリ: 1GByte) 上で C 言語により実装した。

本実験システムでは仮想容器として、操作者が移動可能である移動容器と、移動が不可能な固定容器の 2 種類を実装する。移動容器の位置と傾きは低周波の磁界を利用したモーションセンサを取り付けたコップ型のデバイス、またはマウスにより入力される。モーションセンサとして POLHEMUS 社の 3SPACE ISOTRAK II を用いた。実験システムの操作の様子を図 1 に示す。また、仮想液体操作時の色の变化の様子を図 2、3 に示す。

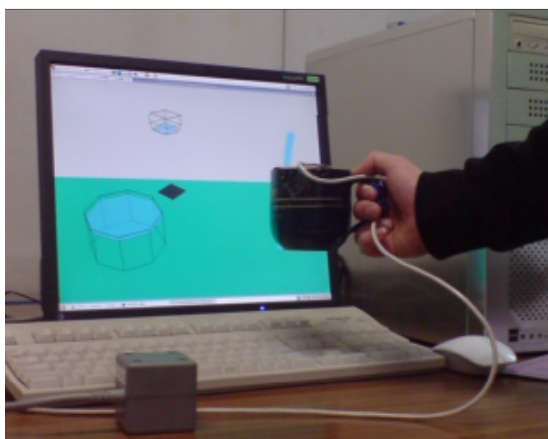


図 1: コップ型のデバイスを用いた際の実験の様子

本モデルの処理速度を描画更新速度 (fps) の観点から計測し、色の变化がない状態 (従来モデル) で描画を行った場合と、色の变化を行う状態 (提案モデル) で描画を行った場合の描画更新速度を計測し比較した。結果を表 1 に示す。

表 1: 描画更新速度による比較

		描画更新速度
マウス使用	色の变化あり	平均 170fps
マウス使用	色の变化なし	平均 130fps
モーションセンサ使用	色の变化あり	平均 30fps
モーションセンサ使用	色の变化なし	平均 25fps

この結果から、本モデルは対話操作を行うのに十分な処

理速度を保っており、また従来研究と比較しても、大幅な処理速度の低下がないことが分かる。また、数名の被験者に協力してもらい本システムを体験してもらったところ、液体が混合する様子を実感でき実際の液体のように扱えるなど積極的な意見を頂いた。違和感なく仮想容器を動かすことができ、実物の容器を操作しているように感じるといった意見も多く得られ、第一の目的である対話操作も実現できたといえる。

## 5. むすび

本研究では、高速な処理速度を維持しつつ、液体の色が混合し拡散する様子を実感可能なモデルを提案した。構築した仮想液体操作システムでは、従来通り自由落下してくる液体を仮想容器で受け止める、他の容器に入っている液体をすくう、容器内の液体をこぼすという操作および操作した際に液面を波立たせるという表現がリアルタイムで可能である。さらに、容器内に液体 (静止状態、自由落下状態ともに) が流入した際に、液面に流入液体の色が自然拡散し色が混合していく様子を実感可能である。色の表現により、より臨場感あふれる液体操作が可能になった。今後の課題として

- 流れの表現
- 液体内部の表現

が挙げられる。また、本モデルを元に VR コンテンツを作成すること、例えば VR 化学実験室システムを実現することも予定している。

## 参考文献

- [1] Matthias Muller, Simon Schirm, Matthias Teschner, Interactive Blood Simulation for Virtual Surgery Based on Smoothed Particle Hydrodynamics, ACM Technology and Health Care, Vol.12, No.1, pp.25-31, 2004
- [2] 井村誠孝, 天田崇, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏, 複合現実感今日に置ける仮想液体とのインタラクション, 日本バーチャルリアリティ学会第 10 回大会論文, pp.549-552, 2005.
- [3] 舟橋健司, 岩堀祐之: 仮想容器による仮想液体の対話操作モデルと一実現法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 4, pp.1087- 1094, 2000.
- [4] Takuya Tanabashi, Hirofumi Itoh, Kenji Funahashi, Yuji Iwahori: Representation of Wave Surface on Virtual Water Manipulation, SCIS & ISIS 2008, pp. 1625-1630, 2008.

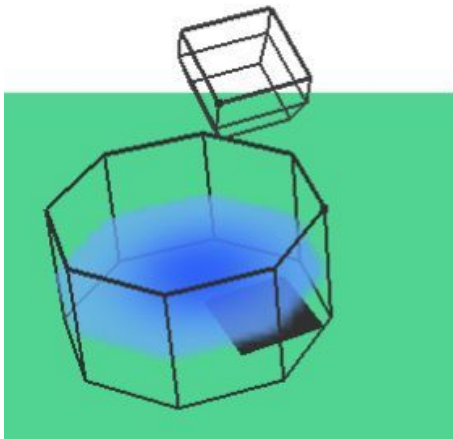
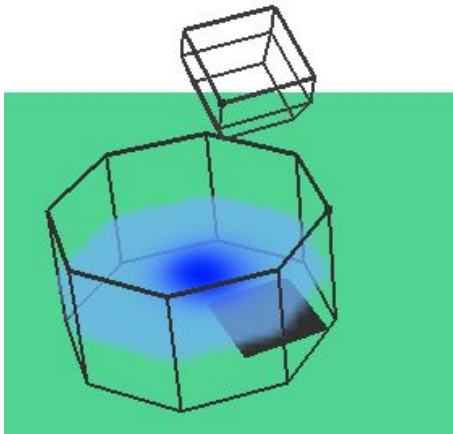
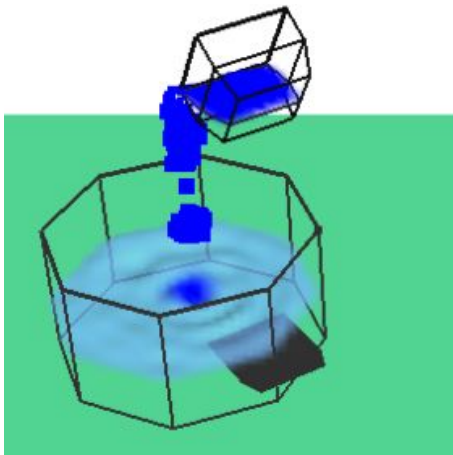


図 2: 自由落下状態の液体と静止状態の液体の相互作用と色の拡散

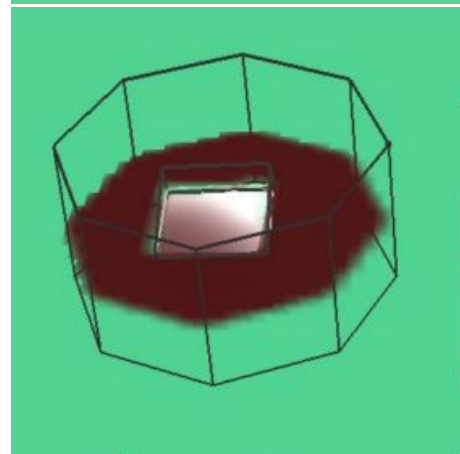
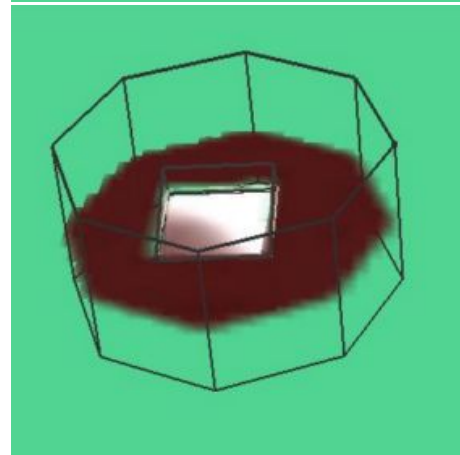
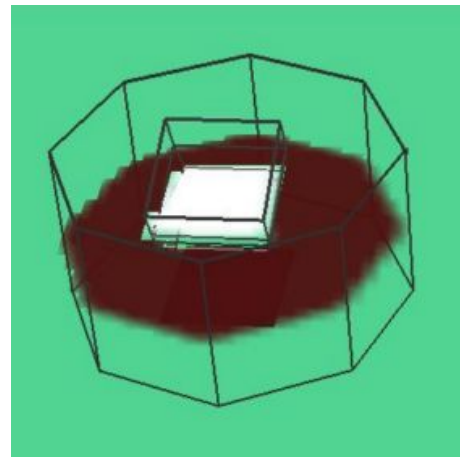


図 3: 静止状態の液体同士の相互作用と色の拡散