

仮想液体操作モデルにおける 落下液体の鍵粒子と包絡面による表現

Representation of Falling Water with Key Particle and Envelopment Surface
for Virtual Liquid Manipulation Model

宮下隼輔¹⁾, 舟橋健司²⁾

Shunsuke MIYASHITA 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, miyasita@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 proposed the model for virtual liquid manipulation which focuses on interactive manipulation. Our proposed model represents the water as following two conditions to simplify calculation; the stay condition which exists in a container and the free fall condition which flows from/to container. To simplify calculation, the free fall condition water is treated as a simple particle system that particles do not interfere each other. And each particles is rendered as a simple square transparent polygon. In this paper, we propose the new model which calculate the behavior of free fall condition water with key-particles instead of conventional particles. In addition, we render an envelopment surface around the key-particles as a surface of the water. Using this model, it becomes possible to make more realistic sensation with more high processing speed.

Key Words: *virtual liquid, interactive manipulation, key-particle, envelopment surface, e-learning*

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティやコンピュータグラフィックスの分野において、計算機上で固体、液体、気体などの挙動を再現する研究が盛んに行われている。これらの研究は、厳密な挙動の再現に重点をおくか対話操作に重点をおくかのどちらかに大別できるだろう。液体に関する研究の場合、前者では SPH 法などの粒子法を用いて表現する研究がある [1]。この手法では、液体全体の挙動を粒子により計算しているため、液体の自然な挙動が再現できる。しかし計算量が膨大になるため対話操作には向かない。並列計算によるリアルタイム処理も試みられているが、実用的なシステムへの応用には至っていない。一方、当研究室では対話操作に重点をおき、挙動に関しては厳密性ではなく操作者の印象に注目した、粒子・体積ベース仮想液体操作モデルを提案している [2][3]。本手法では、あらゆる状態の液体を対象とするのではなく、人が容器などを用いて操作する液体を対象とする。液体の状態を自由落下状態と容器内の状態の 2 つに分けて考え、前者を粒子に基づき表現し、後者は体積を基準に表現する。液体は固体のような 1 つの対象ではないが、容器内においては 1 つの対象として扱うことによ

り高速処理を可能とし、対話操作を実現している。しかし、本モデルでは落下液体を、互いに干渉しない粒子により挙動を計算することで処理を高速化している。また描画においては、簡易的なスプラッティング法として、単純に粒子の位置に四角形の半透明ポリゴンを表示しているが、描画の質が不十分である問題がある。

そこで本論文では、処理時間を抑えつつ、落下液体の描画の質を向上するための新たなモデルを提案する。本モデルでは落下液体も、あるまとまりにおいて 1 つの操作対象と考え、従来モデルにおける自由落下液体粒子に代えて新たに導入する少数の鍵粒子により落下液体の挙動を計算する。そして、その鍵粒子の影響範囲に対する包絡面を落下液体の表面として描画する。本モデルにより、従来よりも高速に、液体の自然な挙動と質の高い描画が実現できる。

以下 2 章では当研究室が提案する仮想液体操作モデルの概要、3 章では自由落下液体の鍵粒子と包絡面による表現方法、4 章では実験とその結果を述べる。

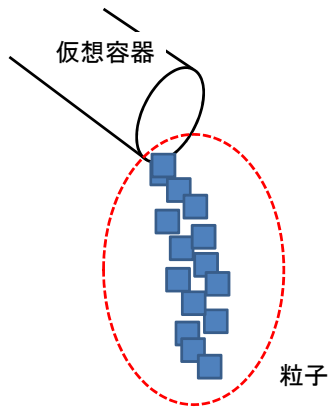


図 1: 従来の自由落下液体モデル

2. 仮想液体操作モデル

当研究室が提案する仮想液体操作モデルでは、液体を以下の2つの状態に分けて考える。

- 自由落下状態 (水道や蛇口などから落ちる液体)
- 容器内の状態 (コップなどの容器に溜まる液体)

自由落下状態の液体は粒子に基づいて表現する。本モデルでは対話操作に重点をおいているため、各粒子の大きさは考慮せず、粒子間での衝突や分子間力による影響はおこらないものとする。各粒子の3次元仮想空間上での時刻 t における座標を $P_i(t) (i = 1, 2, \dots, N; N: \text{粒子数})$ とし、それぞれの粒子は重力および慣性に従い移動する。移動量と重力による加速を考慮すると、 $P_i(t)$ は次式により決定される。

$$P_i(t) = 2P_i(t - \Delta t) - P_i(t - 2\Delta t) + g\Delta t^2 \quad (1)$$

ここで、 g は下向きの重力ベクトルであり、 Δt は描画更新間隔、すなわち描画更新レート (frames/sec.) の逆数である。空気抵抗による広がり表現する場合、式 (1) 右辺に微小乱数値 $R_i(t)$ を加える。上記手法により、一般利用される粒子法と比べて計算量を抑えることができるため、対話操作に適したモデルといえる。

また、これら自由落下状態の液体は、図1のように、式 (1) により求めた粒子の位置 $P_i(t)$ に単純に四角形の半透明ポリゴンとして描画する。

一方、静止状態の液体は体積に基づいて表現する。この状態では容器内の対流などは考慮しない。すなわち、ある時刻 t において、仮想空間上に定義された容器内に液体が存在する場合、その容器内には体積 $V(t)$ の液体が存在していると表現する。また、先述した粒子としての性質は一切考慮しない。ただし、液体表面に波や渦を表現し、また色の異なる液体を混ぜ合わせた場合に表面や側面に簡易的な色の拡散を表現することで、臨場感を高めている。上記2つの状態間での状態の遷移があった場合には、換算比 N [粒子数/体積] により換算を行う。そのため、各粒子が保持する体積 $V_i(t) (i = 1, 2, \dots, N; N: \text{粒子数})$ は一律である。例えば容器内に体積 V の静止状態の液体が存在するとし、それをすべて容器外へ落下させた場合は、容器内の液体体積は0になり、自由落下状態の液体の粒子数は NV 増加する。

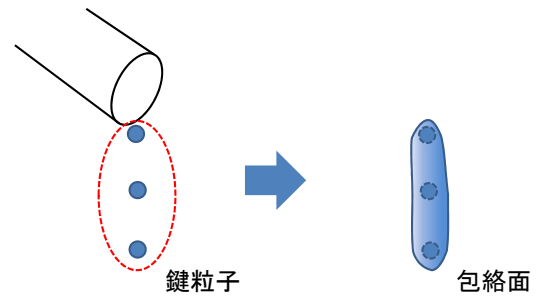


図 2: 提案手法の概要

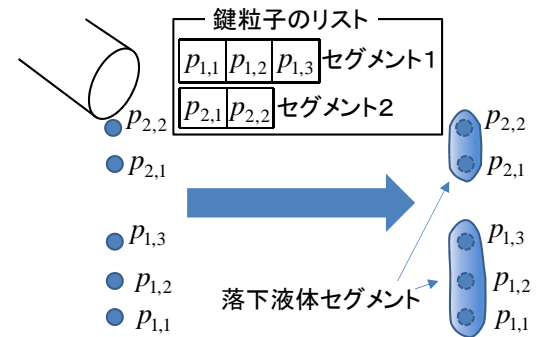


図 3: 鍵粒子のリスト管理

3. 鍵粒子と包絡面による落下液体の表現

3.1 落下液体鍵粒子

これまで、当研究室が提案する仮想液体モデルでは自由落下状態の液体を互いに干渉しない多数の粒子により挙動を計算し、描画においては単純に粒子の位置に四角形の半透明ポリゴンを表示するのみであった。そのため、図1のように液体らしさが十分ではない。そこで、本節では計算量を抑えつつ描画の質を向上するための新しい手法を提案する。

まず落下液体の挙動に関しては、従来の自由落下液体粒子に代えて、新たに少数の鍵粒子を用いて計算する (図2左)。そして、それらの鍵粒子の影響範囲に対して包絡面を描画することで落下液体を表現する (図2右)。ここで、時刻 t における各鍵粒子 i のパラメータは、鍵粒子の位置座標 $P_i(t)$ 、その鍵粒子の管理する液体体積 $V_i(t)$ および色 $C_i(t) (i = 1, 2, \dots, N; N: \text{鍵粒子数})$ である。鍵粒子発生時の $P_i(t)$ は液体の流出座標により決定し、時間経過により式 (1) に従って座標は変化する。 $V_i(t)$ と $C_i(t)$ の初期値は鍵粒子の発生時に流出した液体の体積および液体の色情報である。従来手法では各粒子が保持する体積は一律であったのに対し、提案手法の鍵粒子では一律とは限らない。体積 $V_i(t)$ は3.2節で示すように落下の過程で増減することもある。

本手法では、鍵粒子をセグメントごとに管理する。これは、包絡面を描画する際にどの鍵粒子同士をひとまとまりの液体として包絡するかの判断を容易にするためである。例えば図3のように落下液体が発生した場合、鍵粒子を2つのセグメントに分け、そのセグメントごとに包絡面で覆うことで2つの途切れた液体を表現することができる。

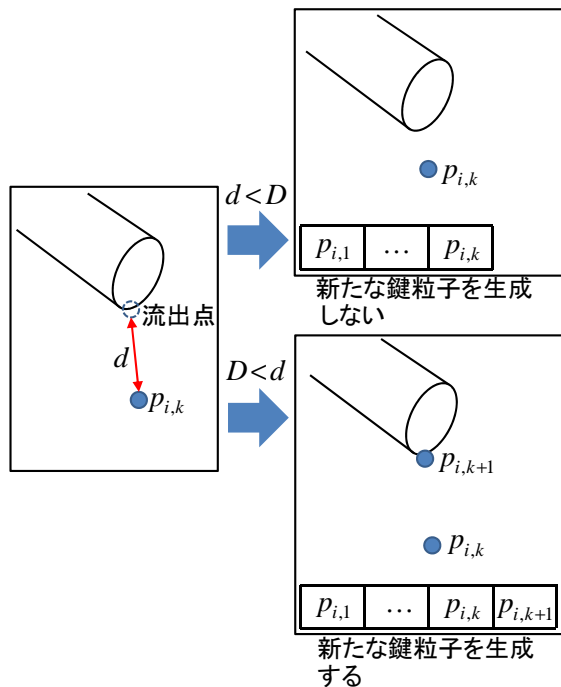


図 4: 閾値による鍵粒子生成の判定

3.2 鍵粒子の生成

本手法では鍵粒子数を最低限に抑えるために、液体が継続して容器などから流出、落下している場合にも、各処理フレームにおいて鍵粒子を生成するか否かの判定を行う。

具体的には、次の手順により新たな鍵粒子を生成する。ある時刻 t において、鍵粒子 $p_{i,k}$ (セグメント i の最も新しい鍵粒子) の座標 $P_{i,k}(t)$ を求める。また、時刻 t で流出する液体の量を f とする。続いて $P_{i,k}(t)$ と液体の流出点との距離 d を求める。この距離 d が閾値 D を越えていない場合には $V_{i,k}(t) = V_{i,k}(t - \Delta t) + f$ とし、新たな鍵粒子は生成しない (図 4 右上)。閾値 D を越えた場合には新たな $p_{i,k+1}$ を生成し、 $V_{i,k+1}(t) = f$ と設定する (図 4 右下)。ただし新たな鍵粒子を生成する場合において、時刻 $t - \Delta t$ における液体の流出がなかった場合には、別のセグメントとして新たな鍵粒子 $p_{i+1,1}$ を生成し、 $V_{i+1,1}(t) = f$ と設定する。なお、後述の実験システムでは閾値 D は経験的に定めている。

3.3 包絡面の描画方法

鍵粒子セグメントに対して包絡面を描画することでセグメント毎に落下液体を表示する。包絡面を作成する手順を図 5 に示す。まず各セグメントにおいて先頭の進行方向と末尾の逆方向に、落下液体の両端に丸みを持たせるために、描画制御粒子を設定する。そして各鍵粒子を起点にして多角柱を生成する。その際、落下液体セグメントの各部分で太さの違いを出すために、各鍵粒子が管理する体積 $V_i(t)$ に応じて多角柱の太さを変化させる。また、描画制御粒子を頂点とする角錐を各落下液体セグメントの両端に生成する。そして最後に多角柱および角錐に対してスムーズシェーディングを行う。

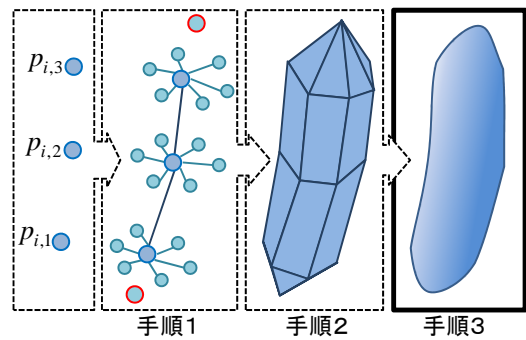


図 5: 包絡面の作成手順

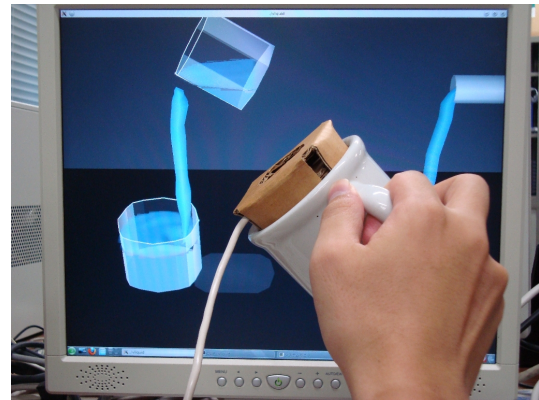


図 6: 実験環境

4. 実験と結果

提案モデルに基づく仮想液体の対話操作の為の実験システムを計算機 (Pentium(R) Dual-Core CPU E5200 2.50GHz) 上に C 言語により実装した (図 6)。本実験システムでは仮想容器として 2 つの容器を用意し、それらは POLHEMUS 社のモーションセンサ 3SPACE ISOTRAK II を用いることで、操作者によるデバイスの操作に合わせて容器を移動、回転させることが可能である。また仮想空間中に水源を設け (実験システム右端)、そこから液体を無限に流出させる。

上記の環境下で従来の粒子による落下液体描画モデルと本提案手法の鍵粒子によるモデルの比較実験を行った (図 7, 8)。各図の左側は従来モデルであり右側が本提案モデルである。まず図 7 右側の提案モデルより、セグメントごとに包絡面を描画することで落下液体の途切れが表現できていることが分かる。また、従来手法と比較するとより瑞々しくなっている。図 8 より、従来手法と比べて提案手法ではより液体らしい質感やひとまとまりの液体としての表現ができていることが確認できる。

さらに、従来手法と提案手法で粒子数、鍵粒子数と処理速度の比較を行った結果、表 1 の通りになった。なお、処理速度に関してはマウスによる操作時のものである。

少ない粒子数で、高速に、効果的な表現ができていることが分かる。なお、本処理速度は一般的な対話操作には十分過ぎるものだが、更なるモデルの拡張や、後述するような速度の望めない環境も想定した場合には必要となるものである。

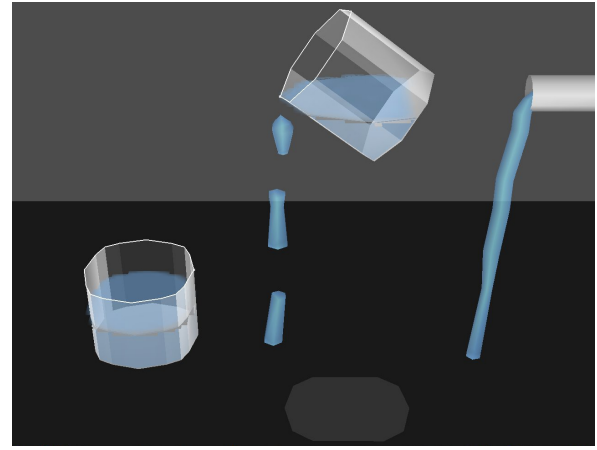
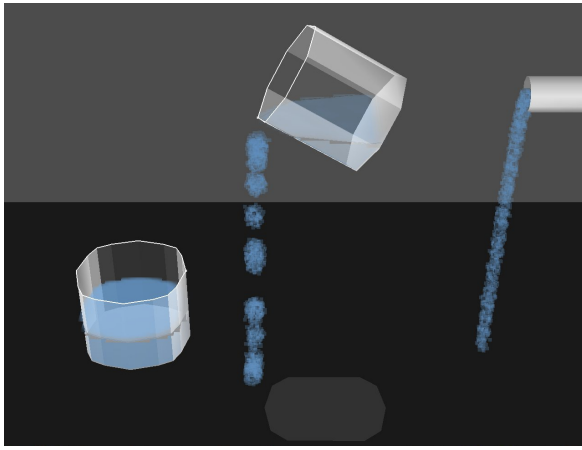


図 7: 遠くから確認した様子

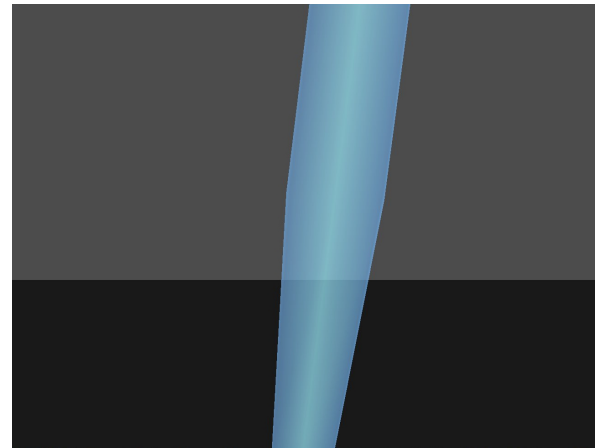
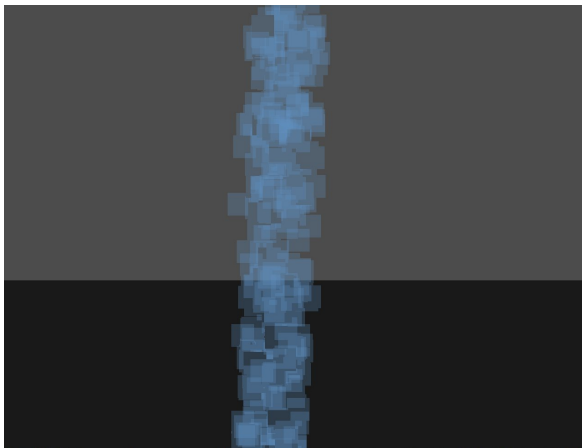


図 8: 近くから確認した様子

表 1: 処理速度の比較

	粒子数, 鍵粒子数	処理速度
従来モデル	3170 個	65fps
提案モデル	9 個	110fps

5. むすび

本論文では、当研究室が提案している液体操作モデルにおける、従来の粒子に基づいて扱っていた自由落下液体に代わる手法として、少数の鍵粒子と包絡面による落下液体の表現方法を提案した。本手法により描画の質を向上した上で処理速度が格段に速くなったため、今後、液体操作モデルを拡張する為の下地ができたといえる。今後は、さらなる液体の臨場感を出すために、落下液体が液面や地面に衝突する際に起こる水しぶきの表現などを実現する予定である。また、Web ベースアプリケーションや低スペックなモバイル端末で液体をリアルタイムに表現する際にも本手法は有用であると考えられる。当研究室では e-learning コンテンツの一つとして液体操作モデルを基に VR 化学実験体験システムの開発を進めている [4]。さらに現在、一般への普及を目指して Web ベースアプリケーションや携帯端末などへ

の導入を視野に入れて研究を行っている。

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] F. Losasso, J.O. Talton, N. Kwatra and R. Fedkiw, “Two-Way Coupled SPH and Particle Level Set Fluid Simulation”, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.14, No.4, pp.797–804, 2008.
- [2] Kenji FUNAHASHI, Yuji IWAHORI, “Representation of Swinging Liquid on Virtual Liquid Manipulation”, Proc. ICAT2001, pp.179–184, 2001.
- [3] Takuya Tanabashi, Hirotaka Itoh, Kenji Funahashi, Yuji Iwahori, “Representation of Wave Surface on Virtual Water Manipulation”, SCIS & ISIS 2008, pp.1460–1465, 2008.
- [4] Yuki Natsume, Andreas Lindroos, Hirotaka Itoh, Kenji Funahashi, “The Virtual Chemical Laboratory Using Particle and Volume Based Liquid Model”, Proc. SCIS & ISIS 2010, pp.1354–1359, 2010.