

粒子・体積ベース仮想液体操作モデルにおける 流れる液体の表現

Representation of Trickle Water on Particle and Volume Based Liquid Model for Interactive Manipulation

夏目祐樹¹⁾, 伊藤宏隆²⁾, 舟橋健司³⁾

Yuki NATSUME, Hirotaka ITOH and Kenji FUNAHASHI

1) 名古屋工業大学 大学院工学研究科 情報工学専攻

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

2) 名古屋工業大学 情報基盤センター

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

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 : We have proposed the model for virtual liquid manipulation based on particle and volume. This model enables us to manipulate virtual liquid interactively with very high processing speed. Although the flow of the liquid, e.g. trickle water, is not represented. In this paper, we propose a method for representing the flow with low calculation cost. We regard flowing liquid as the condition in between free fall condition and stay condition, and represent it based on the transition of volume. Using this model, it becomes possible to represent trickle water running down on the inside surface of the container. It enables us to manipulate virtual liquid in higher realism.

Key Words: *virtual liquid, interactive manipulation, trickle water*

1. はじめに

近年のバーチャルリアリティの研究は、固体や弾性体、液体と様々な物質を対象としている。一般的に液体は固体や弾性体と比較してその挙動が複雑である。そのため液体を扱う場合には、厳密な挙動の再現もしくは対話操作のどちらかに重点をおく必要がある。前者では主に流体力学に基づいて計算するので計算量が非常に多く、シミュレーションなどで有用であるが、対話操作には向いていない。一方で、対話操作を目的とした研究としては SPH 法を用いたものがある [1][2]。SPH 法は比較的、自然な挙動を再現しつつ、実験システムにおいては対話操作が可能であるが、最低限の処理速度を保っている程度である。そのため、何らかのアプリケーションに適用するために他物体との相互作用のための計算処理などを追加することは難しい。そこで、当研究室ではより対話操作性に重点をおいた粒子・体積ベース仮想液体操作モデルを提案している [3]。このモデルでは液体を自由落下状態と静止状態の 2 つの状態に分けて処理することにより非常に高速な処理速度を実現している。液体を容器で受け止める、容器からこぼす、他の容器からすくうといった操作が可能であり、人間が無意識に期待している液体の挙動の特徴を重点的に表現しているため、操作者は確

かに液体を扱っていると実感できる。ところで、このモデルは当初、凸形状の容器を想定し、体積に基づいて決定した位置に液面を描くことにより容器内の液体を表現することで計算を簡略化している。それゆえ容器を伝うなどの液体の流れは考慮していなかった。しかしその後、液体を対象とするアプリケーションを開発するために凹形状の容器にも拡張し、流れる液体の表現も必要となってきた。そこで本論文では、対話操作に重点を置き、少ない計算量で実現可能な液体の流れの表現手法について述べる。流体挙動の一つである流れは、流体力学に基づく厳密な挙動の再現が試みられているが多くの計算時間が必要となるため対話操作には向かない。そこで本研究では流れる液体を静止と自由落下の中間的な状態として考え、運動する液体を体積の変化に基づいて表現する。本モデルを用いることで、容器内側の側面を液体が伝い流れるなどの様子も表現可能となり、より高い臨場感での仮想液体の対話操作の実現に繋がると考えられる。また当研究室で提案している VR 化学実験体験システムなどの VR コンテンツの構築にも利用できる。以下 2 章では粒子・体積モデルの概要、3 章では流れの表現方法、4 章では実験とその結果について述べる。

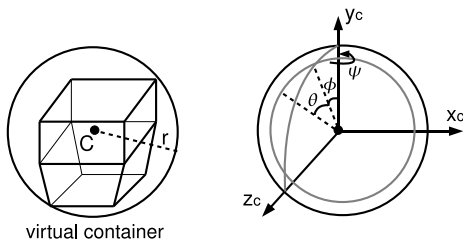


図 1: 仮想容器を内包する球と傾きの表現

2. 粒子・体積ベース仮想液体操作モデル

2.1 仮想液体のモデル

まずこのモデルでは、液体を自由落下状態と静止状態の2つの状態に分けて考える。自由落下状態の液体は粒子に基づいて表現する。ただし対話操作を第一目的としているため、粒子の大きさや粒子同士の衝突は考慮しない。粒子は重力および慣性に従い3次元空間内を移動し、時刻 t における座標 $P_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$; N は粒子数) は次式 (1) 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 は下向きの重力加速度ベクトルであり、 Δt は描画更新間隔である。静止状態の液体は体積に基づいて表現する。時刻 t においてある容器内に存在する液体は $V(t)$ で表す。二つの状態間での液体の遷移は、換算比 N [粒子数/体積] によって行う。

2.2 仮想容器のモデル

仮想空間内に存在する容器はモデルの上では全て平行移動、回転可能なものである。容器を内包する球を考え、その中心を C 、半径を r とし、容器の位置はベクトル C により表現する。容器座標系 (軸 X_c, Y_c, Z_c) を設定し、 X_c を軸とした回転角 ϕ および Z_c を軸とした回転角 θ により容器の傾きを表現する。また、 Y_c を軸とした回転角 ψ により容器の方向の変化を表現する (図 1)。

容器から液体が流出する場合、ある1点よりこぼれ出すものとしてその点を流出点と呼ぶこととする。また、ある時刻での容器内に入りうる液体の最大量を最大容積 V_m とする。 $V > V_m$ であれば、 $V - V_m$ の液体を粒子に換算して流出させる。これら流出点および最大容積は容器の傾きとともに変化する。

2.3 液位および液面の描画

ある容器において、液面の存在する位置を液位とし、容器の内包球の中心 C から H の位置にあるとする。液位 H は容器の回転角 θ, ϕ および容器内液体体積 V を用いて次式 (2) で表す。

$$H = h(\theta, \phi, V) \quad (2)$$

求めた位置に液面を描画することで容器内の液体を表現する。容器の基本形状を凸とし、ある体積の液体の様子を一意に決定することによりモデルを簡略化している。容器が

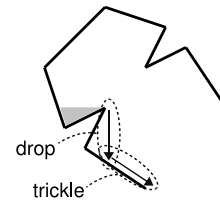


図 2: 伝い流れ (trickle) と落下流れ (drop)

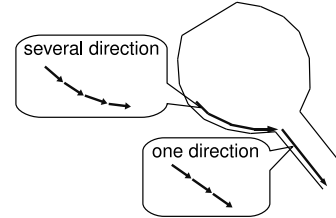


図 3: 伝い流れ液体の運動方向の違い

凹形状の場合、各領域が凸形状となるように分割し、それら領域間での液体の移動を考えることにより全体の挙動を表現する。領域間で液体が流れ出す点を流出点と区別して接続面流出点と呼ぶこととする。このような方法により非常に高速な処理速度での対話操作を実現している。

3. 流れる液体の表現モデル

本研究の目的は、高速な処理速度を保ちつつ、流れる液体の表現を可能とすることである。容器を伝い流れる液体を表現できれば、より高い臨場感での液体操作が可能になると考えられる。少ない計算量での実現のため、流れる液体を前述の静止状態と自由落下状態の中間的な状態として考え、運動する液体を体積の変化に基づいて表現する。蛇口から流れ出した自由落下状態にある水も流れる液体であると言えるが、本研究においては人が日常生活で用いる容器内での液体の運動の流れとして扱うこととする。

3.1 流れについて

流れる液体を二つに分けて考える (図 2)。一つ目は容器の壁面に沿って伝い流れる液体である。伝い流れと定義する。現段階では計算時間の観点から、液体の運動方向が常に一定となる場合のみを考えるが、一定とならない流れについても本モデルを拡張することで表現可能である (図 3)。二つ目は容器内で自由落下する液体である。容器外での自由落下状態にある液体と区別し、こちらは流れる液体として扱い、落下流れと定義する。静止状態およびこれら二つの流れの間での遷移、およびその表現方法について以下で述べる。

3.2 領域から領域への液体流出時の処理

ある領域から別の領域への液体の流出があったとする。流出先の最大容積が0より大きければ再び領域内で静止状態として留まるが、そのような場合は従来どおり静止状態の

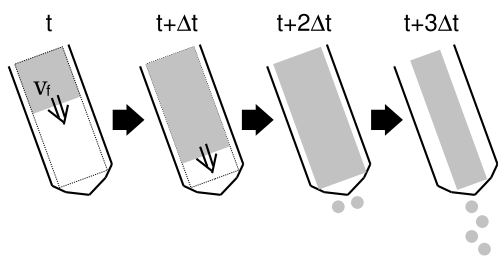


図 4: 容器断面図, 流れる液体のイメージ

液体体積へと加算することで液体の移動を表現し, 流れの表現は行わない. 流れの生じる範囲が狭くなり, その時間も短くなるため, 操作者が流れよりも液体の移動に意識を置くと考えられるためである. 最大容積が 0 であるならば流れの表現を行う. 接続面流出点から鉛直下方向に辿り, 接続する領域の壁面と接触する場合には, 落下流れの様子を表現する. 接触した点を落下点と呼ぶこととする. 落下点が求まらない場合, その時刻で流出した液体は伝い流れの液体として表現する. ただし, 落下流れ液体がそのまま容器外へ流出する場合は流れの表現は行わず, 従来通り直接容器外へと自由落下させる. 落下点に到達した落下液体は, 伝い流れ液体に遷移させ, 落下点と流出点もしくは接続面流出点を用いて伝い流れの液体を表現する.

3.3 遷移時の体積の換算

ある時刻において, 体積 $V - V_m$ の静止状態の液体が流れの液体へと遷移した場合, 流れ液体体積 V_f に $V - V_m$ を加算する. 伝い流れ, 落下流れ間ではそれぞれの流れ液体体積を互いに増減させることで換算する. 伝い流れ液体から容器外への自由落下液体への換算は従来どおり換算比 N により行う.

3.4 液体の流れの表現方法

ここでは液体の流れの表現の具体的な方法を, 伝い流れを例に挙げて説明する. 伝い流れにおいては, 流れ液体体積 V_f , 容器斜面の傾き θ' , 流れ液体の容器外への流出が継続する時間 (以下, 流れ時間) t_f よりその時刻における流れの様子を決定して描画する. 具体的な計算手順を以下に示す. まず, 流れ時間 t_f は V_f, θ' より決定する. 容器斜面の傾き θ' は流出点および接続面流出点の座標から求める. 流れの途中で容器を操作, もしくは新たに液体が流出した場合, 前時刻までの流れ液体体積および現時刻での各パラメータを用いて再計算を行う. 液体の運動する速度 v_f は斜面の傾き θ' から, 重力加速度をもとに決定する. 容器内での液体の運動についてはその範囲が非常に狭く短時間であるため, モデル簡略化のため等速運動を行うものとする. 単位時間の液体流出量は $\alpha V_f / t_f$ とする. α は変数であり, 流れの経過時間によって変化する値である. 流れが流出点に到達した時刻より, 単位時間に流出すべき量の液体を粒子に換算して容器外へ自由落下させ, それに伴い流れ液体体積を減少させる.

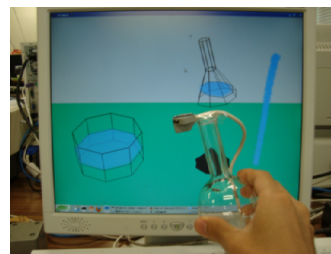


図 5: フラスコ型デバイスを用いた仮想液体操作の様子

このような計算方法により, 少ない計算量で液体の自然な流れを表現する.

4. 実験および結果

以上のモデルに基づいた仮想液体の対話操作の実験システムを以下の環境で実装した.

CPU: Dual-Core AMD Opteron(tm)

Processor 1210 1.8GHz

本実験システムでは, 操作者が自由に移動, 回転操作可能な移動容器と移動不可能な固定容器の二つの仮想容器を用いる. 移動容器はモーションセンサを用いたフラスコ型デバイスまたはマウスにより操作する. モーションセンサには POLHEMUS 社の 3SPACE ISOTRAK II を用いた. まずは実験時の全体の様子を図 5 に示す. 次に液体が容器内側を伝い流れ, 容器外へと流出していく様子を図 6, 7 に示す. 図 6 では静止状態の液体が流れの液体へと遷移し, 容器を徐々に伝い流れていく様子が確認できる. 図 7 では流れの液体が自由落下状態の液体へと遷移し, 容器外へと流出している. また, 単位時間の流出量および流れの液体の体積が次第に減少していく様子を確認できる. 従来の流れを考慮しない仮想液体操作モデルと処理速度について比較することで, 本研究におけるモデルの有用性を検証する. それぞれについて描画更新速度を計測した結果を表 1 に示す. ただし, この結果はマウスによる操作時のものである.

表 1: 提案モデルでの描画更新速度についての実験結果

描画更新速度	
流れの表現なし	平均約 105fps
流れの表現あり	平均約 87fps

この結果より, 非常に高速な処理速度を維持したまま, 容器を伝い落ちるような液体の流れの表現が実現されたと言える. フラスコ型デバイスを使用した際には描画更新速度が 30fps 程度となるが, これはモーションセンサの更新速度の制限によるものである. また, 実際に数名の被験者にも体験してもらったところ, 違和感なく液体の流れを確認でき, また, より高い臨場感での仮想液体操作を実感できたという評価が得られた.

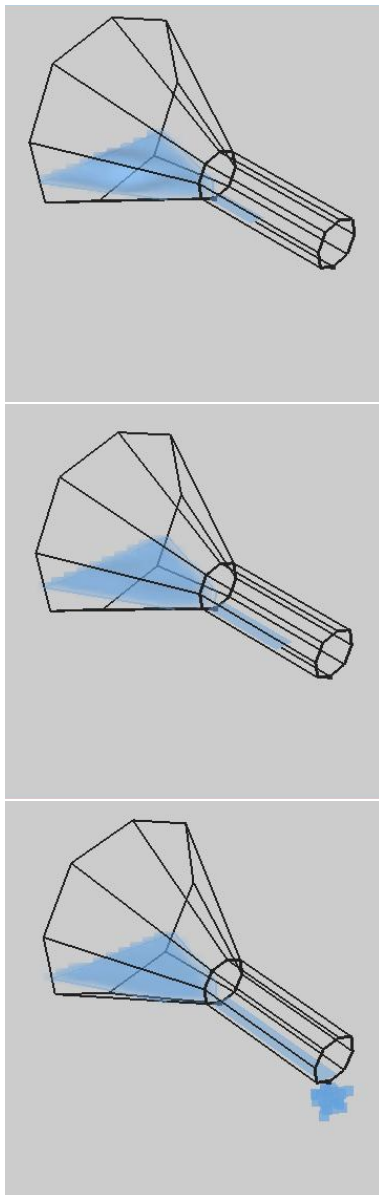


図 6: 容器内側を液体が伝い落ちる様子

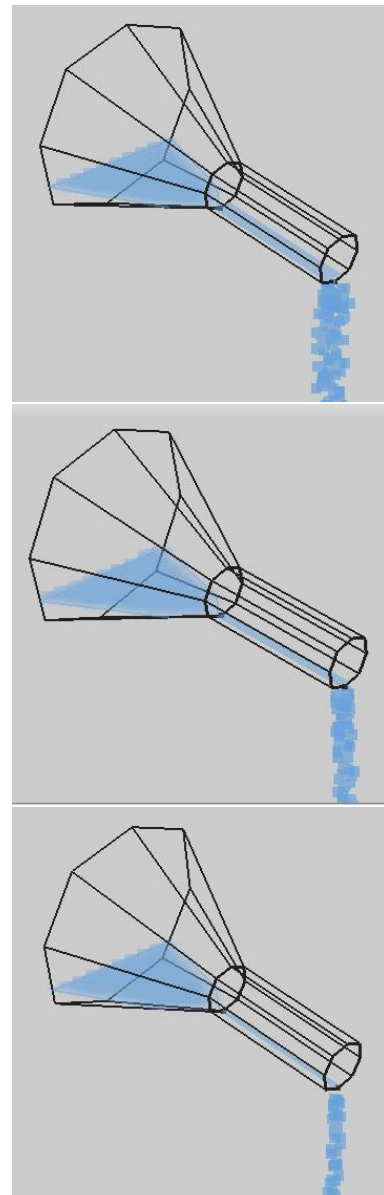


図 7: 流れ液体の容器外への流出とその様子の推移

5. むすび

本研究では処理速度に重点をおきつつ、液体挙動の一つである流れに注目し、仮想液体操作モデルにおけるより液体らしい自然な挙動の表現と臨場感の向上を図った。実験結果からわかるように非常に高速な処理速度での対話操作が可能であり、液体と他物体との干渉などの実装も十分可能であると考えられる。今後の課題としては、

- 運動方向が一定でない流れの少ない計算量での表現
- 剛体との干渉やそれに伴う水しぶきの表現
- 本モデルの自由落下液体への応用

などがある。また、現在は本モデルや、複数色の液体が混ざり合う様子を簡易的に表現する手法を用いて、VR 化学実験体験システムといった臨場感の高い VR コンテンツの構築を行っている。

参考文献

- [1] Matthias Muller, David Charypar, Markus Gross, “Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications”, Proceedings of Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation(2003), pp. 154-159, 2003.
- [2] Masataka Imura, Takashi Amada, Yoshihiro Yasumuro, Yoshitsugu Manabe, Kunihiro Chihara, “Synthetic Representation of Virtual Fluid for Mixed Reality”, Proceedings of 8th International Conference on Virtual Reality, pp. 135-142, 2006
- [3] Takuya Tanabashi, Hiroataka Itoh, Kenji Funahashi, Yuji Iwahori. Representation of Wave Surface on Virtual Water Manipulation, *SCIS & ISIS 2008*, pp. 1460-1465, 2008.