

PBF による粒子の状態変化計算を用いた 炭酸水の SSF による実時間描画

箭内一樹[†]
中央大学[†]

牧野光則[‡]
中央大学[‡]

あらまし

本稿では炭酸水の挙動を動的に計算し、その結果を CG で描画する方法を提案する。挙動計算には Position Based Fluids(PBF)を用いて炭酸水の液面と液中を浮上する気泡の挙動を計算し、さらに気泡の発生と消滅を粒子の状態変化によって表現する。本稿が対象とする気泡は、液滴時に水面下に巻き込まれた空気と炭酸水で満たされた容器内で発生する二酸化炭素の 2 種類である。気泡の発生判定には粒子間の速度差や発生点となる粒子を用い、消滅判定には気泡粒子の近傍粒子数を用いる。また、液面は Screen Space Fluid(SSF) Rendering を基に液面を抽出し、その液面と気泡の球面に対し反射と屈折を計算し、その結果を環境マッピングで描画する。本手法は一定の条件下での実時間処理を達成することで Virtual Reality 環境下での使用を可能にする。

キーワード: 炭酸水, PBF

1. 序論

近年、安価な Virtual Reality(VR) 向け Head Mounted Display(HMD)の登場により、個人が VR コンテンツに触れる機会が増えている。そのため、仮想空間において求められる表現の幅が広くなることを考慮すると、仮想空間内の表現の拡張が必要である。特に仮想空間内に配置されるオブジェクトはユーザに対し、その場に存在していると錯覚させなければならない。そのために、それらのオブジェクトはユーザの予想に応じた挙動を示す必要がある。また、VR コンテンツ提示において高いフレームレートを維持することは、ユーザの VR 体験の高い質の維持に必要である。そのため、仮想空間内のオブジェクトの挙動計算や描画は実時間で処理されなければならない。

本研究では表現の拡張の一端として、普段目にするものが珍しくない炭酸水を対象とし、VR 環境での利用に耐えられる CG 表現を目的とする。そこで、本稿では炭酸水の挙動を計算するために流体シミュレーションを用い、対象の特徴である液中を浮上する気泡を表現する。さら

に、VR での利用を可能とするために挙動計算と描画に際し、計算コストの小ささに留意する。これにより、流体シミュレーションと描画を実時間で処理し、リアルタイム性と対話性を実現する。なお、本稿では、対話であることをユーザのオブジェクトへの操作に対し、対象が即座に反応を返すこととする。

2. 提案手法

提案手法では複雑に変化する液面の表現に適した粒子法を、炭酸水の挙動計算に用いる。その中でも非圧縮性流体を低コストで扱える PBF[1]では各粒子の座標を式(1)を満たすように更新する。

$$\rho(\mathbf{p}_i)/\rho_0 - 1 = 0 \quad (1)$$

$\rho(\mathbf{p}_i)$ は粒子 i の密度、 ρ_0 は静止密度である。また粒子の密度は Smoothed Particle Hydrodynamics の離散化式[2]より式(2)で求められる。

$$\rho(\mathbf{p}_i) = \sum_j m_j W(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j, h) \quad (2)$$

m_j は粒子 i の近傍粒子 j の質量、 W は重み関数、 h は W の有効半径である。式(1)を満たすことで炭酸水を密度の変化しない非圧縮性流体として計算する。

気泡に関して、本手法では液体粒子から気泡粒子への状態変化を気泡の発生とし、消滅はその逆と定義する。また、液滴時に水面下に巻き込まれる気泡を気泡 Surface(気泡 S)、炭酸水で満たされた容器内で発生する気泡を気泡 Container(気泡 C)とする。それぞれの気泡の挙動は発生条件のみ異なり、その後の浮上から消滅までの挙動は同じものとして計算する。次にそれぞれの発生と消滅について述べる。

気泡 S の発生判定には液体粒子間の速度差を用いる。注目する液体粒子とその周辺の液体粒子との速度差の和が一定値以上であればその注目した粒子を気泡粒子に変化させる。

現実の炭酸水では気泡 C の核は容器に付着した不純物のエアポケットで生成される[3]。よって、本手法では容器に付着する不純物を不純物粒子として扱い、液体粒子が不純物粒子と接触したとき、一定の確率でその液体粒子を気泡粒子へと変化させる。ただし、不純物粒子は容器に常に付着し、移動も含めて変化しないものとする。

気泡 S と気泡 C の消滅判定には気泡粒子の近傍の粒子

A Real-time Rendering of Carbonated Water
by Screen Space Fluid with Position Based Fluids
[†] KAZUKI YANAI, Chuo University.
[‡] MITSUNORI MAKINO, Chuo University

数を用い、その数が一定値以下の場合に気泡粒子を液体粒子に変化させる。現実世界では、気泡粒子は液中を浮上し液面から空気中に出ることで消滅する。しかし、本手法では気泡の発生を粒子の状態変化によって扱うため、気泡粒子が液面を構成する粒子群から離れれば容器内の炭酸水の容積が減少し、現実と相違する。そこで、本手法では、水面に到達した気泡粒子を液体粒子に転換し、一定の容積を維持する。

以上のシミュレーションによって決定した粒子情報をもとに炭酸水を描画する。液面の描画にはポリゴンを生成せずに液面を抽出する SSF[4]を用い、その液面に対し視点からの反射と屈折のベクトルを計算し、その結果を環境マッピングに用いて描画する。気泡は気泡粒子を球とし、その球面に液面と同様の処理を行う。

3. 実装結果

提案システムを NVIDIA Geforce GTX 980 を搭載した PC に実装した。図 1 に容器に炭酸水を注いでいる様子を、図 2 に気泡が浮上する様子、図 3 に容器内の炭酸水がかき混ぜられている様子をそれぞれ示す。図 1 から、着水する炭酸水の液面と炭酸水の注がれた容器内で気泡が発生していること、図 2 から、液中の気泡が浮上し水面で消滅していること、図 3 から、赤い棒の動きにより炭酸水が影響を受けていることがそれぞれわかる。また、実験では粒子数 20,000 で構成される炭酸水を 1920*1080 のサイズのスクリーンに対し 60fps 速度で描画できた。以上のことから、本手法で表現する炭酸水は図 1 のようなシーンにおいてユーザの VR 体験の品質を維持できると考えられる。(用いた背景画像: "Newport Loft" by Blochi [CC BY-NC-SA] [5])



図 1 : 容器に注がれる炭酸水を表現した CG 画像

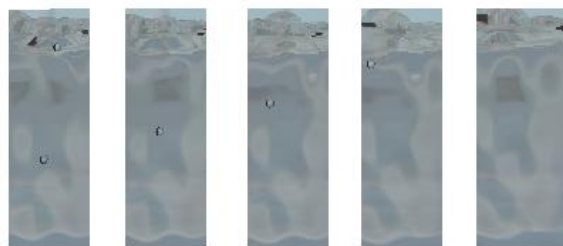


図 2 : 浮上する気泡を表現した CG 画像

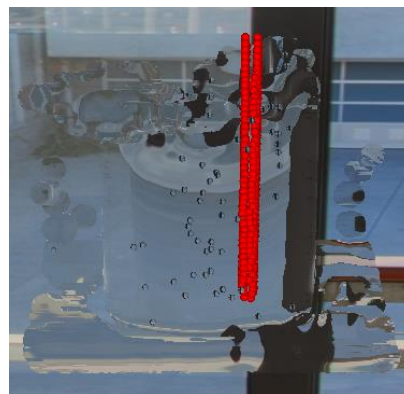


図 3 : 棒にかき混ぜられる炭酸水を表現した CG 画像

4. 結論

本研究では目標を達成するためにシミュレーション結果を用いて、物理法則に基づいた液体と気泡の挙動モデルと描画法を提案した。実験では、気泡の発生から浮上までの挙動が確認できることから、本手法は現実の気泡の特徴を示せたといえる。さらに、本手法では炭酸水の実時間描画を一定の条件下で達成し、容器内の個体の運動に伴う炭酸水の挙動を表現できたことから、VR における炭酸水の表現を現実に近いレベルに近づけられたといえる。また、目標を達成した条件と同程度であれば粒子のスケールを変え、複数のグラスに炭酸水を注ぐシーンを実時間で描ける。よって本研究は仮想空間における表現の拡張に貢献できたと言える。

参考文献

- [1] Miles Macklin, Matthias Müller: Position Based Fluids, ACM Transactions on Graphics, Vol.32(4), No.104, 2013.
- [2] Matthias Müller, David Charypar, Markus Gross: Particle-based Fluid Simulation for Interactive Applications, In Proc. SCA2003, pp.154-159, 2003.
- [3] Liger-Belair, G'erard: シャンパン泡の科学, 立花峰夫訳, 白水社, 2007.
- [4] Wladimir J. van der Laan, Simon Green, Miguel Sainz: Screen Space Fluid Rendering with Curvature Flow, In Proc. the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games, pp.91-98, 2009.
- [5] HDR Labs: sIBL Archive, <http://www.hdrlabs.com/sibl/archive.html> (最終アクセス 2017 年 1 月 11 日).