

SPH法を用いた流体シミュレーションによる 仮想液体ARシステムの開発

漆原航平¹ 高井昌彰² 飯田勝吉² 高井那美³

概要: 拡張現実(AR)システムで描画される仮想物体として、複雑な物理的挙動と光学的特性をもつ液体を対象に加えることにより、新たなインタラクションを可能にするARコンテンツの展開が期待できる。本研究では実世界に重畳された仮想の液体にユーザが触れることで、液体表面の波動や破碎現象を生じさせるARシステムを開発する。液体表面における屈折と反射の描画に加え、流体の物理的振る舞いを実時間で表現するため、計算コストを可能な限り削減する必要がある。本研究では粒子法の一つであるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を用いた流体シミュレーション及びマーチングキューブ法による抽出面を実時間で描画し、AR空間での仮想液体とのインタラクションを実現する。

キーワード: 拡張現実感, 流体シミュレーション, SPH法, マーチングキューブ法

AR system for interactive virtual water by SPH fluid simulation

KOHEI URUSHIHARA^{†1} YOSHIAKI TAKAI^{†2}
KATSUYOSI IIDA^{†2} NAMI TAKAI^{†3}

1. はじめに

実世界のリアルタイム映像に拡張現実(AR)で表示された仮想物体を重畳表示させる場合、実世界の背景と幾何学的、時間的、光学的整合性を十分に保つことで、仮想物体の視覚的な実在感を得ることができる。さらに物理的整合性の観点も考慮し、実世界と仮想世界の間で双方向のインタラクションを実現することで、仮想物体の実在感を更に向上させることも可能である[1, 2, 3]。

しかしこれまで多くのARコンテンツでは、表示される仮想物体のモデルは剛体を基本要素とするものが主であり、より複雑な物理的挙動と光学的特性をもつ液体の振る舞いを3次元空間で直接扱った事例は未だ少ない。流動性の高い液状物を仮想物体のモデルに加えることによって、仮想と現実の新たなインタラクションを可能にするARコンテンツの新展開が期待できる。

著者らの先行研究[4, 5]では、ハイトフィールドモデル上で2次元波動方程式を数値計算で解くことでインタラクティブなAR仮想水面の挙動を可視化しているが、水しぶきの発生はシミュレーションとは独立のエフェクトの重畳に過ぎず、不自然さや実在感に問題がある。

本研究では液体の仮想空間における複雑な挙動を実時間の3次元数値シミュレーションで導出する。具体には流体

シミュレーションの粒子法の一つであるSPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)[6]を用い、粒子が形成する流体表面の抽出と描画にマーチングキューブ法[7]で用いる。GPUを活用した処理時間の高速化により、AR表示された仮想水面にユーザが触れることで発生する複雑な波動や破碎・水しぶきを実時間で可視化するARシステムを開発する。

2. システムの概要

仮想液体とのインタラクションにおいて、ユーザの手指をインタフェースに直接用いることは対象との接触判定処理を複雑化させるため、最初のアプローチとして、形状がシンプルで認識が容易な道具を想定し、これをインタフェースとしてユーザが操作する。図1に仮想液体ARシステムの概要を示す。インタフェースとして棒の先端にARマーカを取り付けたパドル(水掻き)を用いる。仮想水面を表示するため水面用マーカを付したプール(箱型の容器)を設置し、これら2つのARマーカをカメラで認識する。

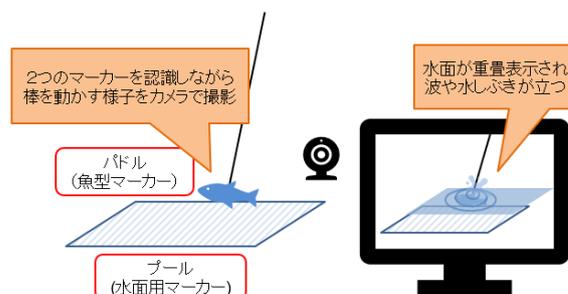


図1 仮想液体ARシステムの概要

1 北海道大学大学院情報科学院
Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University
2 北海道大学情報基盤センター
Information Initiative Center, Hokkaido University
3 北海道情報大学経営情報学部
Hokkaido Information University

システムのPCではSPH法の流体シミュレーションが繰り返し行われ、粒子密度分布からマーチングキューブ法で抽出された液体表面に対して屈折・反射などの光学的特性を再現したレンダリングを施し、仮想液体を描画する。ARカメラ越しに見えるパドルとプールの画像には仮想水面が重畳され、ユーザの操作によってパドルが水面に接触して移動したり、水中をパドルで掻くことにより、波や水しぶきが描画される。

本システムはゲームエンジンであるUnityをプラットフォームとし、AR開発ライブラリVuforiaを用いてマーカの認識と仮想液体の重量を実現する。

3. システムの設計と実装

流体のモデリングは剛体と比べ一般に膨大な計算コストを要するため、結果の可視化に要する処理時間を含め、インタラクティブなARコンテンツとしての実時間性を十分に担保できるアプローチをとる必要がある。

3.1 SPH法

流体シミュレーションを効率的に行う手法は多岐にわたるが、本システムではより計算コストを抑えながら忠実に流体の振る舞いをシミュレートすることができるSPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics)を採用した。SPH法とは流体の挙動を数千から数万の粒子の集合と見立て、各粒子のある時刻の座標・速度を場の支配方程式にあてはめ逐次更新してゆく手法である。以下に方程式の詳細を示す。

$$\frac{Dv}{Dt} = u\nabla^2 v - \frac{1}{\rho}\nabla p + f \quad (1)$$

式(1)はSPH法で流体現象をシミュレートする際に用いられる非圧縮粘性流体のナビエーストックス方程式である。ここで v は粒子の速度であり、 ρ , p , u , f はそれぞれ流体密度、圧力、粘性係数、外力である。左辺は各粒子の速度変化を表している。すなわち、粒子の速度変化を求めるためには物理量である流体密度や圧力の勾配とラプラシアンを計算すればよいことがわかる。任意の粒子の物理量は以下の式(2)によって求められる。

$$\phi(x) = \sum_{j \in N} m_j \frac{\phi_j}{\rho_j} W(x_j - x, h) \quad (2)$$

各粒子は自身の有効半径 h 内の近傍粒子を探索し、各々が持つ物理量から次の時間ステップの物理量へと更新される。 N は近傍粒子の集合であり、 m_j と ρ_j は粒子質量と粒子密度である。 W はカーネル関数であり、粒子間距離が近ければ大きな値を返し、距離が h 以上ならば0を返すスカラー関数である。密度及び圧力などの詳細な物理量の導出については参考文献に説明を任せる[8]。

3.2 シミュレーション空間の分割

SPH法のシミュレーションにおいては、各粒子の物理量算出のための近傍粒子探索がボトルネックになる。効率的に近傍粒子を探索するためにはシミュレーション空間を分割することが必要である。

シミュレーション空間を分割して近傍探索処理を最適化した場合と最適化しない場合の違いを、わかりやすさのため2次元で模式的に図2に示す。まずシミュレーション空間を一定間隔で格子状に分割し、分割された個々の部分空間(ボクセル)ごとに順に番号を割り振る。粒子の位置座標から、その粒子が所属するボクセルがわかるので、粒子の座標を更新した時点で、ボクセルごとにどの粒子が属するかを記録しておく。特定の座標の近傍粒子を探索する際、その粒子が属するボクセルがわかれば一意に近傍ボクセルが求まり、ボクセルごとに記録した粒子データを参照して効率的に近傍粒子を探索することができる。シミュレーション空間内の粒子総数を N とすると、全探索の場合 $O(N^2)$ の計算コストに対し、空間分割による最適化を施すことによって $O(N)$ にコストを抑えることができる。

- 最適化なし
- 最適化あり

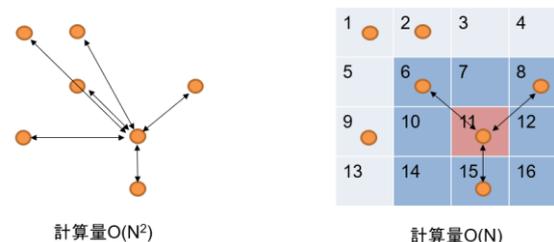


図2 近傍粒子探索方法の比較

3.3 マーチングキューブ法

個々の粒子を点あるいは微小な球体として単純に表現すると、流体全体は図3(a)のように離散的な点群のようにレンダリングされることになる。連続的で滑らかな流体表面に加え、表面から飛散する微小な流体の塊まで統一的に表現するには、個々の粒子の空間密度分布をもとに等値面を抽出し、そのポリゴンパッチを描画する必要がある。本システムではマーチングキューブ法を用いて液体表面(水面)を描画した(図3(b))。

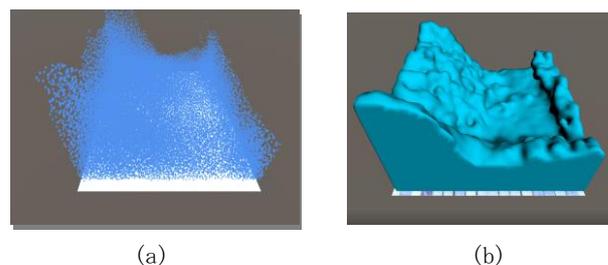


図3 粒子の描画 ((a)単純な点群, (b)マーチングキューブ法で描画された水面)

マーチングキューブ法とはボリュームレンダリング法の一つであり、3次元空間のボクセルデータをポリゴンパッチに変換するアルゴリズムである。本システムでは3.2節で述べた近傍探索のためボクセル構造をマーチングキューブ法にもそのまま適用している(図4)。頂点近傍の粒子密度をボクセル値として等値面を抽出し、水面に対応するポリゴンパッチを生成する。

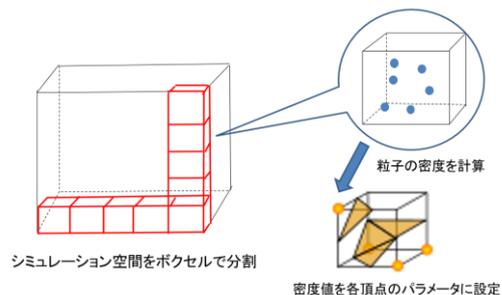


図4 マーチングキューブ法による水面の抽出

3.4 液面の屈折・反射と光源モデル

ポリゴンパッチのシェーディングにおいては、UnityのHLSLシェーダーを利用して液面のテクスチャを描画し、低負荷でリアリティの高い流体レンダリングを実現する。液面の座標と背景領域の座標の位置関係を合わせ、液面テクスチャに背景領域の画像をマッピングする。これにより背景の底面が透けて見える透明感を表現できる(図5(a))。さらに、液面を形成するポリゴンパッチの法線ベクトルを考慮したマッピングを施すことで液面の局所的勾配変化に応じた光の屈折現象を表現することができる(図5(b))。

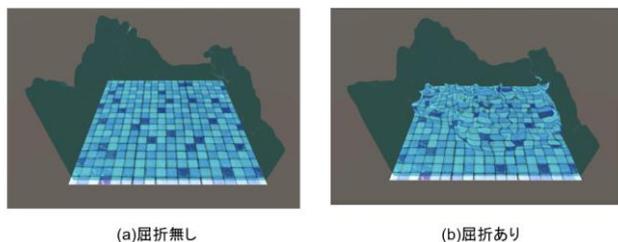


図5 マッピングによる屈折表現

現実の水面色は光の反射と周囲の色彩環境によって変化する。本システムでは計算負荷の観点からスカイボックスを光源モデルに用いる方法を採用した。Unityのスカイボックスは立方体形状の6枚の壁紙で構成される。図6にUnityのデフォルトのスカイボックスを示す。水面のポリゴンの法線ベクトルと視線ベクトルから反射ベクトルを求め、これをスカイボックスにぶつかるまで伸ばして衝突したスカイボックス上の点の色を光源色として採用し、反射点の輝度に反映させる。図7はスカイボックスを用いた水面の描画結果である。スカイボックスの上部は明るい空色のため、図5(b)と比較して水面が明るく描画されている。

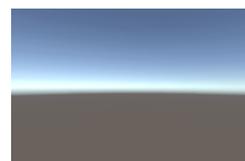


図6 スカイボックス画像

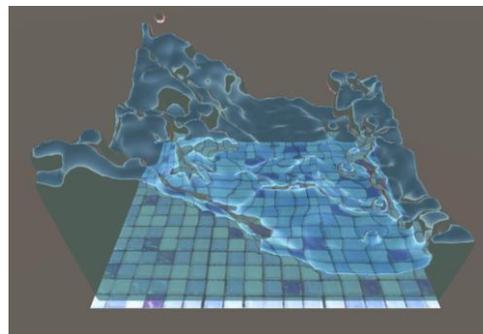


図7 スカイボックスを用いた水面の描画

4. 仮想液体の描画結果

SPH法による流体シミュレーションのリアリティは、用いられる粒子数に大きく依存する。より多くの粒子を用いれば流体の挙動のリアリティは向上するが、計算コストも増大する。仮想液体とのリアルタイムのインタラクションが可能なARアプリケーションとして実装するには、最低でも20fpsで描画する必要がある。

本システムをハイエンドのGPUを搭載したPC(スペックを表1示す)に実装し、仮想液体の振る舞いをレンダリングした結果を図8に示す。粒子数135,000個、ボクセル空間 $64 \times 64 \times 64$ において、フレームレート30fpsを達成しており、滑らかな映像を実時間で生成することができた。粒子数65,000個では40~45fpsに達する。先に示した図5、図7のシミュレーションでは粒子数8,000個であり、これらに比べよりきめ細かな水しぶきを描画できていることが分かる。なお現時点のレンダリング結果にはアーチファクトが残っており、改善が必要である。図9は図8と同環境で仮想液体の時間経過による変化の一例を示したものである。

また、異なるCPU/GPUを搭載したミドルクラスのPC(CPU:Xeon W-2135, memory 16GM, GPU:NVIDIA Quadro P1000/4GB)で本システムを動作させた場合では、粒子数65,000個でも20fps程度の描画速度である。レンダリング速度はPCのハードスペックに依存する部分が多い。

OS	Windows10 Pro for Workstations 64bit
CPU	Inel Xenon Silver 4210R
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3080, 10GB
Memory	96 GB
HDD/SSD	480 GB

表1 本システムを実装したPCのスペック

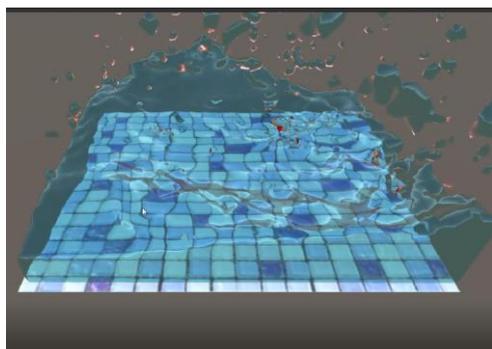


図8 仮想液体の実時間レンダリングの結果

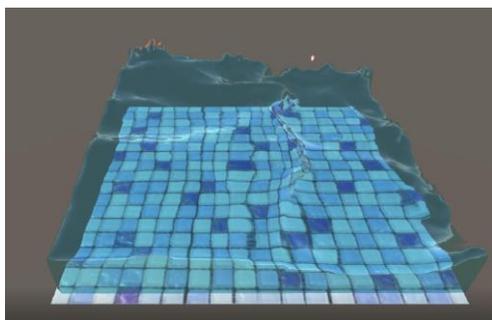
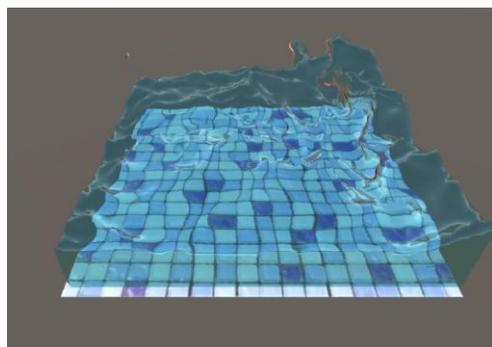
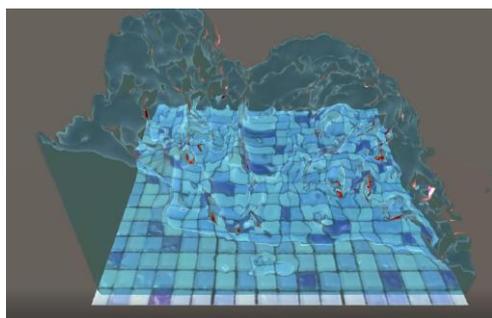
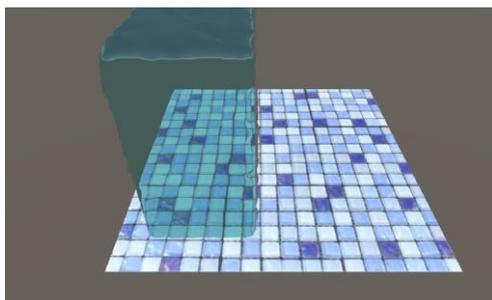


図9 仮想液体の時間経過による変化

5. 仮想液体とのインタラクション

5.1 剛体シミュレーション

仮想液体とのインタラクションは、ユーザが持つパドルの動きによる仮想液体への干渉を反映させた結果を AR 表示することで実現される。流体シミュレーション空間においてパドルは剛体であり、そのためパドルの物理的形状を流体シミュレーションに反映させる剛体シミュレーション実装する必要がある。

SPH 法における剛体シミュレーションの実装手法として、剛体粒子を用いて流体粒子との衝突を計算する手法[9]と、剛体表面を形成するポリゴンと流体粒子の衝突を計算する手法[10]がある。本システムでは後者の剛体ポリゴンを用いる手法を採用する。これは、本システムで想定する剛体（パドル）は少ないポリゴン数で構築できる単純な形状であり、粒子との衝突・干渉の計算コストを削減することができるためである。

剛体ポリゴンを用いる衝突処理の概略は以下の通りである。まず、ナビエストークス方程式（式(1)）の外力 f を求める際に、粒子近傍の剛体ポリゴンを探索する。次に最近傍のポリゴンと粒子間のユークリッド距離に応じて剛体ポリゴンの法線ベクトル方向へ粒子に外力を加えることで剛体との衝突を表現する。

5.2 パドルの認識 AR 機能の実装

ユーザが操作するパドルの挙動を Unity 内の流体シミュレーションに反映させるため、現実世界のパドルと形状が同一のオブジェクトを Unity 内の 3D オブジェクトとして管理し、実世界の動きと仮想世界の動きを関連付ける。

図 10 は実世界のパドル及びそれと同一形状のパドルオブジェクトの輪郭画像である。パドルに装着した魚型マーカ画像を Vuforia に予め登録し、これを AR カメラで認識することで、流体シミュレーション空間におけるパドルオブジェクトの位置・方向を同定する。パドルの認識および仮想液体のオクルージョン処理（隠面消去）については著者らの先の研究[4, 5]と同様である。

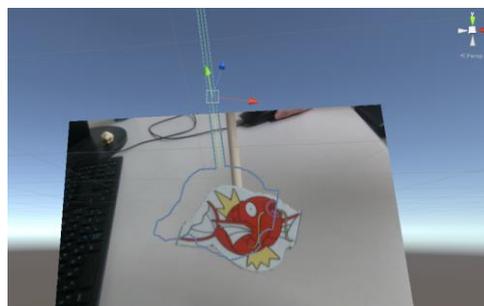


図10 パドルのマーカ認識とパドルオブジェクト
(魚型マーカ画像：コイキング©株式会社ポケモン)

6. まとめと今後の課題

本稿では、AR空間での仮想液体とのインタラクションを実現するため、粒子法の一つであるSPH法を用いた実時間の流体シミュレーションをもとにマーチングキューブ法による表面抽出と屈折・反射を考慮したシェーディングを施し、リアリティのある仮想液体を可視化するシステムの構築について述べた。ゲームエンジンUnityをプラットフォームとしてハイエンドクラスPC上に本システムを実装し、仮想液体のレンダリング速度を検証したところ、粒子数13.5万の流体シミュレーションにおいて30fpsの描画速度を達成できることがわかった。

ユーザが操作するパドルによる仮想液体の攪拌などを実現する剛体シミュレーション部分については、本稿執筆時点においてシステム実装の途上にある。仮想液体とのインタラクション機能を含めた本システムの動作検証は今後の課題である。

参考文献

- [1] 吉崎翔大, 飯田勝吉, 高井昌彰: “顔認識と拡張現実を用いたキャラクターフィギュアの表情変化とその応用”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2018-DCC-18, No. 17, pp. 1-7 (2018)
- [2] 福山裕幸, 飯田勝吉, 高井昌彰: “仮想と現実の相互作用を実現するAR紙相撲対戦システム”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2018-EC-50, No. 4, pp. 1-5 (2018)
- [3] 森 友己, 高井昌彰, 飯田勝吉: “実世界へ干渉可能な仮想キャラクターとのインタラクションを実現するARシステム”, 情報処理学会第82回全国大会論文集, pp. 563-564 (2020)
- [4] 漆原航平, 高井昌彰, 飯田勝吉: “インタラクティブな仮想水面波を可視化するARコンテンツ”, 第19回情報科学技術フォーラム (FIT2020) 論文集, I-027, Vol. 3, pp. 225-226 (2020)
- [5] 漆原航平, 高井昌彰, 飯田勝吉, 高井那美: “シミュレーションによる仮想水面の波動を可視化するARシステムの開発”, 情報処理学会第83回全国大会論文集, 4Y-02 (2021)
- [6] M. Müller, D. Charypar and M. Gross “Particle-based fluid simulation for interactive applications” *Proc. of ACM/Eurographics Symp. on Computer Animation 2003*, pp. 154-159 (2003)
- [7] William E. Lorensen and Harvey E. Cline: “Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm”, *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169 (1987)
- [8] 天田 崇: “水の実時間アニメーション”, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文 (2005)
- [9] 田中正幸, 酒井幹夫, 越塚誠一: “粒子ベース剛体シミュレーションと流体との連成”, 日本計算工学会論文集, Trans. of JSCES, Vol. 2007, No. 20070007 (2007)
- [10] 原田隆宏, 越塚誠一: “SPHにおける壁計算手法の改良”, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 4, pp. 1838-1845 (2007)