

パールエアレーションにおける気泡制御のための 3DCG シミュレーションの開発

梶田朋花^{†1} 宮崎直樹^{†2} 深野富士恵^{†2} 中安翌^{†1}

概要：本研究は、パールエアレーション技術における気泡制御の高度化を目的とした 3DCG シミュレーション手法を提案する。VR 技術の発展やプロジェクションマッピングの普及に伴い、視覚体験の多様化が進む中、水を用いた表現技術の新たな可能性を追求した。コンピューター上で気泡の挙動を詳細に再現し、リアルタイムでの制御と 2D 画像入力による自動シミュレーション生成を実現。水中での泡の浮力や上昇速度を考慮したモデルを構築し、実機開発前の効果的な検証を可能にした。本手法により、アートやエンターテインメント分野における新しい視覚体験の創出に貢献し、パールエアレーション技術の実装プロセスを改善する。

1. はじめに

現代の視覚体験は、VR 技術やプロジェクションマッピングの発展により、二次元的な平面から、空間的な奥行きとインタラク션을重視する三次元的な領域へと拡大している。こうした変化は、従来の静的な表現方法から脱却し、動的で没入感のある表現手法の探求が求められている。その中でも、水を用いた表現技術は、流動性や透明性といった特性を活かし、独自の創造的可能性を秘めている[1][2]。

本研究では特に株式会社ウォーターパールのパールエアレーション[3]に着目した。パールエアレーションは気泡を制御して水中に特定の形状を作り出す技術として注目されるが、実装段階では試行錯誤を要し、多くの課題が残されている。

本研究では、パールエアレーション技術の特性と課題を明らかにし、3DCG シミュレーションを用いることでこれらの課題解決を図る。実装の効率化と表現可能性の拡大を通じて、水を用いた新たな視覚表現の開拓を目指す。

2. パールエアレーション技術

2.1. 現行システムの特徴

パールエアレーションは、アクリル製の水槽内で気泡を上昇させることで、空間に動きと透明感を演出する水景設備である。このシステムは、エアーポンプと照明を組み合わせて使用し、気泡が上昇する様子を照明で照らすことで、さまざまな表情を作り出す。特に、インテリアの雰囲気や空間のイメージに合わせて照明の色を調整することで、多彩な演出が可能である。この技術では、腐食・劣化しにくい専用の水を使用するため、水交換が不要であり、給排水設備の設置も不要である。電源のみで稼働可能なため、設置性に優れ、維持管理も蒸発分の定期的な水補充のみで容易に行える。

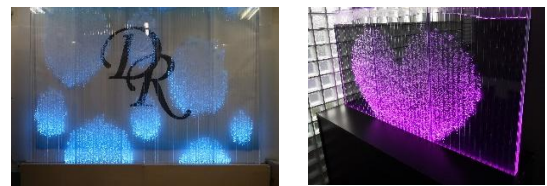


図1 パールエアレーション

2.2. 現状の技術的課題

パールエアレーション技術には、実装および技術的検証の双方において、課題が存在する。新しい気泡パターンを開発するには、実機を用いた繰り返しの試行錯誤が不可欠であり、この過程は高コストにつながる。また、現行の開発プロセスでは気泡挙動を事前にシミュレーションする技術が存在しないため、設計段階から物理環境で直接的に検証する必要がある。このような状況は、設備投資や開発時間の負担を増大させると同時に、効率的な開発を阻害する要因となっている。

3. 本研究の目的

本研究の目的は、パールエアレーションにおける効率的な実装支援を実現するため、3DCG シミュレーションの開発である。気泡の発生を再現可能なシミュレーターを構築し、試行錯誤をシミュレーション上で行える環境を提供することで、物理的な実機開発における課題を軽減しつつ、新たな表現方法を探索することを目指す。

4. シミュレーターの作成

4.1 水中での気泡の動きの計算

水中を上昇する気泡の運動は流体力学から考えることができる。無限に広い媒体中を自由に上昇もしくは下降する気泡および液滴の形状は、球状、回転楕円体、もしくは冠球状に大別される。これらの形状を推定する線図として図

^{†1} 東京都立大学

^{†2} 株式会社ウォーターパール

1 が用いられる．運動中の気泡の形状は，レイノルズ数と Eotvos 数の値から判断することができる．[2]

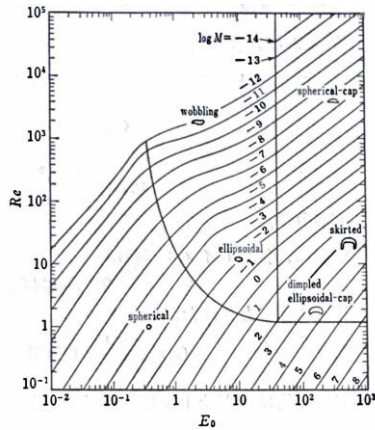


図1 気泡と液滴の形状[2]

レイノルズ数は流体の慣性力と粘性力の比を表し，以下の式で定義される． ρ は空気 の密度， u は物体の流れに対する相対的な平均速度， μ は粘性係数を示し， d_e は球相当径を示し，粒子の体積と同じ体積を持つ球の直径のことを指す．

$$Re = \frac{\rho_{air} d_e u}{\mu} \quad (1)$$

次に，Eotvos 数は浮力と表面張力の比を表し，以下の式で定義される． σ は表面張力である．

$$E_o = \frac{g \Delta \rho d_e^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

本研究では気泡の形状は球状となる．また，Peebles と Garber による気泡の終端速度の式より，終端速度に至るまでの気泡の速度は以下のように求まる． τ は時間定数を表し，気泡が終端速度に至るまでの時間の目安である．

$$v(t) = v_{B\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3)$$

この式より，気泡の速度は時間の経過とともに指数関数的に増加し，終端速度に達することがいえる．

以上の気泡の形状と上昇速度を考慮し，水中での挙動の再現を行った．

4.2 ジオメトリートードでの再現

Blender のジオメトリートードを使用し，水中における気泡の動きを視覚化した．シミュレーションノードを用いることで，フレームごとに繰り返される操作を可能にし，気泡の物理的な挙動を再現した．気泡の垂直方向の運

動は，初速度 0 から開始し，水中での実測上昇速度

(280mm/s～400mm/s) を基にランダムな係数を適用することで，現実に近い上昇挙動をモデル化した．さらに，スイッチノードを活用することで，フレームごとに気泡の発生および停止のタイミングを制御可能にした．また，気泡が上昇する過程での拡散プロセスもシミュレーションに組み込み，動きの自然さを向上させた．水中での気泡の挙動を図 2 に示す．

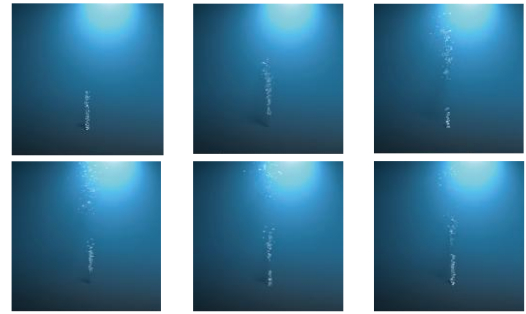


図2 スイッチによる気泡制御

開発した気泡発生装置は，スイッチ操作による動的な泡の制御，水中での浮力と上昇速度を反映した現実的な挙動再現，そしてリアルタイムでの動作を特徴としており，パールエアレーション技術における気泡挙動のシミュレーション精度を向上させる．

4.3 シミュレーションの構築

4.2 で作成した泡発生装置を配列し，2D 画像から自動的にシミュレーション動画を生成するアルゴリズムを開発した．アルゴリズムの流れを図 3 に示す．

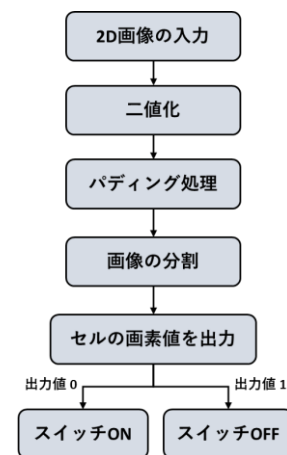


図3 アルゴリズム

まず，入力された 2D 画像は二値化処理され，各画素が 0 または 1 に判別される．画像は 48 列に分割され，各セルの画素値が出力される．48 列を採用した理由は，パールエアレーションの実機における気孔が水槽に 48 個並んでいるためである．出力された画素値は，泡発生スイッ

チの制御信号として直接適用される。画素値が1の場合はスイッチがOFF, 0の場合はONとなり、それに応じて泡の発生が制御される。これにより、入力画像のパターンが忠実にシミュレーション動画として再現される。図4(a)に入力画像, 図4(b)に自動生成されたシミュレーション画像を示す。



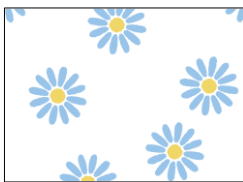
(a)入力画像



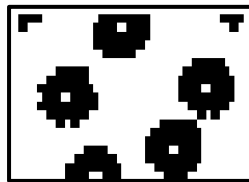
(b)シミュレーション動画

図4 シミュレーション

異なる入力画像による検証も行い、図5(a), 図5(b)にその結果を提示している。この結果から、図5のような細かいパターンについては、画素値出力の段階で識別が困難であることがわかる。



(a)入力画像



(b)出力結果

図5 識別が難しいパターン

5. 考察

図4に示すように、本研究で開発したシミュレーターは、入力画像からパールエアレーションの挙動を再現することに成功した。図5のシミュレーション結果は、実機での実現が困難な気泡パターンを識別できることを示している。したがって、本研究で開発したシミュレーターは、パールエアレーションの実装支援において有用であること

が示された。

シミュレーターを用いることで、空間に合わせた完成形を高品質で提示することが可能である。これにより、設計段階から具体的かつ最適化された提案が行えるため、設計精度の向上が期待される。また、視覚的に明確な完成イメージを事前に共有できることから、関係者間での設計目標に対する合意形成が容易になると考えられる。さらに、本シミュレーターは実機の仕様を反映した動作を再現するため、現実的で実現可能な設計案の検討を支援する。実機を用いずに試行錯誤が可能となることで、従来の開発手法と比較して費用と時間を大幅に節約できる。

一方で、シミュレーターの現状では、単層の気泡制御に限定されているため、さらなる精度向上や多層的な気泡表現の実現が今後の課題として挙げられる。これらを解決することで、より高度なインタラクションや複雑な演出が可能になると考えられる。

6. 今後の展望

本研究で開発したシミュレーターは、パールエアレーションの設計支援において有用であることを示した。しかし、現在のシミュレーターは平面的な表現に限定されており、さらなる発展が求められる。今後は、3次元への拡張を通じて、より立体的な水中表現を可能にするシステムの構築を目指す。また、インタラクティブ性を追加することで、気泡の動きをユーザーが操作できる仕組みを実現し、視覚表現の可能性を広げることを目指す。このような動的な演出は、アートやエンターテインメントの分野で新たな価値を提供できると考えられる。さらに、シミュレーター自体の精度や柔軟性を向上させることで、より実機に近い動作を再現し、実装プロセスを効率化することが可能となる。これにより、応用範囲を広げるための基盤を強化できる。

これらの取り組みを通じて、3次元表現とインタラクティブ性を兼ね備えた新しい視覚体験の創出を目指し、パールエアレーション技術が持つ可能性をさらに追求していきたい。

参考文献

- [1] Sadam Fujioka. 2021. Drop: An Interactive Art Installation with Waterdrop Projection-Mapping. Proc. ACM Comput. Graph. Interact. Tech. 4, 2, Article 27 (July 2021), 8 pages. <https://doi.org/10.1145/3465613>
- [2] 松村 誠一郎, 鈴木 太朗, 荒川 忠一, 伊藤 隆道. 気泡と音響を用いたインタラクティブアート：インタラクティブアートとインターフェイスの新たな可能性. 環境芸術学会論文集, 環境芸術学会, 2002, Vol. 2, p.29-36
- [3] 株式会社ウォーターパール「パールエアレーション」
<https://www.waterpearl.co.jp/airation.html>, (参照 2024-12-10)