

仮想と現実をつなぐジェネラティブアート体験： 複合現実を活用した学び

古市駿^{†1}

公立はこだて未来大学^{†1}

角薫^{‡2}

公立はこだて未来大学^{‡2}

1. はじめに

本研究では、複合現実 (Mixed Reality, MR) 技術を活用し、仮想空間に表示された「ジェネラティブアート」を操作・体験することで、数学やプログラミングへの学習意識の向上を目指す。ジェネラティブアートとは、コンピュータソフトウェアのアルゴリズムや数学的手法を用いて生成されるデジタルアートであり、数学の応用例の一つとして注目されている[1][2]。ジェネラティブアートは、数学的アルゴリズムやフラクタル構造を活用し、計算過程を視覚化することで、数学教育への応用が期待される。

MR 技術は、現実世界と仮想世界をリアルタイムで融合・表示する技術であり、従来のバーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) の限界を打破する新しい情報提示手段として注目を集めている。MR の特長は、現実空間と仮想空間を統合する点にある。本研究では、この特性を活かし、ユーザが現実空間から物理的に操作できる装置を導入し、仮想空間と現実空間を組み合わせたインタラクティブな体験を提供するシステムを開発する。このような体験を通じて、仮想空間のみで操作するシステムと比較した際の違いを調査し、MR ならではの教育的・体験的効果を明らかにすることを目指す。

さらに、MR を活用することで、ユーザはジェネラティブアートを様々な角度から観察することが可能となる。数学的構造を持つジェネラティブアートを、下から、上から、側面からといった自由な視点で三次元的に観測することは、通常の学習環境では得がたい体験である。本研究では、この特性を活かし、数学的概念の理解を直感的に促す教育システムの構築を試みる。

現在、日本の学習環境には改善の余地がある。文部科学省によると、「算数・数学の勉強は楽しい」と答えた日本の小学生は 77%、中学生は 56% であり、国際平均 (小学生: 84%、中学生: 70%) を下回っている[3]。さらに、日本の生徒は OECD 平均と比較して、数学を実生活に応用する自信が低いと報告されている[4]。この要因の一つとして、数学と日常生活との結びつきを実感する機会の不足が挙げられる。

数学教育において、AR (拡張現実) や VR (仮想現実) を

活用した学習支援システムの研究が進められている。生物学の授業に AR を導入することで、学生の学業成績やモチベーションに与える影響を調査した研究では、AR が学生のモチベーション向上に寄与することが示されている[5]。一方、VR を用いた科学教育に関する研究では、VR レッスンが学生の興味や関与を高める可能性があることが報告されている[6]。また、ポストコロナ時代における教育の新しい形態として、メタバースを活用したバーチャルとフィジカルを融合した教育環境の構築が重要であるとされている[7]。遠隔学習の普及を受け、従来の対面授業の利点とオンライン教育の柔軟性を組み合わせたハイブリッドな学習環境が求められている。メタバースを活用することで、学習者は物理的な距離に関係なく、リアルタイムでインタラクティブな教育体験を共有できるようになり、教育の公平性やアクセシビリティの向上につながると考えられる。

本研究では、MR 技術を活用し、教育現場やミュージアムにおけるインタラクティブな展示としての応用も視野に入れたシステムの開発を行う。このシステムを通じて、学習者が数学的概念を直感的かつ多角的に理解できる環境を提供し、学習意欲や関心の向上に寄与することを期待する。

2. 複合現実を活用したジェネラティブアート体験システム

本研究では、複合現実 (Mixed Reality, MR) を活用し、ユーザが直感的に操作しながら数学的概念を学習できる体験型システムを開発する。本章では、システムの構成と主要な機能について説明し、ジェネラティブアートの学習体験を促進するための設計思想を示す。

2.1 相似・比を用いたジェネラティブアート

本システムでは、Microsoft の HoloLens 2 を使用する。HoloLens 2 は、現実世界と仮想空間をリアルタイムで融合し、ハンドトラッキング、視線追跡、音声認識を通じて直感的な操作を可能にするヘッドマウントディスプレイ (HMD) 型 MR デバイスである[8]。本研究では、HoloLens 2 の以下の機能を活用する：

- ハンドトラッキング：ユーザがジェスチャーを用いて仮想オブジェクトを操作可能。
- 視線追跡：注視する位置を認識し、システムとインタラクティブな関係を構築可能。
- 空間マッピング：周囲の物理環境を認識し、現実空間

Bridging Real and Virtual Worlds: A Mixed Reality System for Generative Art and Mathematical Learning

^{†1} SHUN FURUICHI, Future University Hakodate

^{‡2} KAORU SUMI, Future University Hakodate

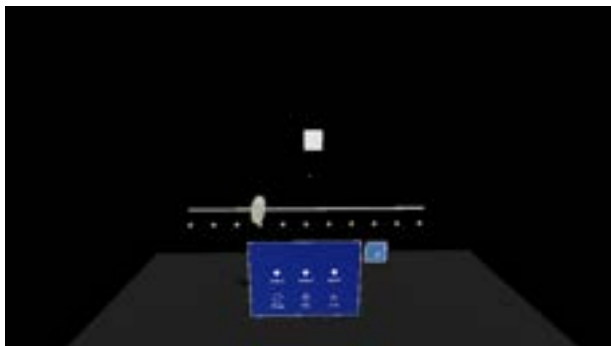


図 1 相似・比を用いたジェネラティブアート（変更前）

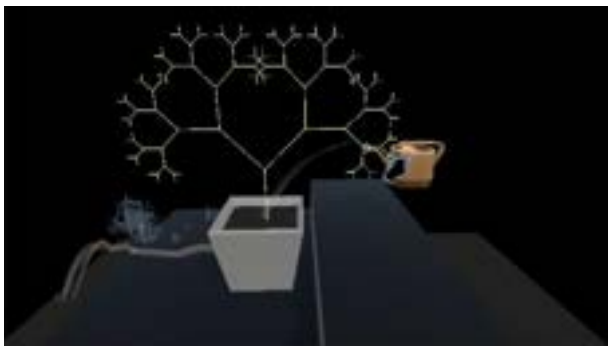


図 3 フラクタルツリーを用いたジェネラティブアート

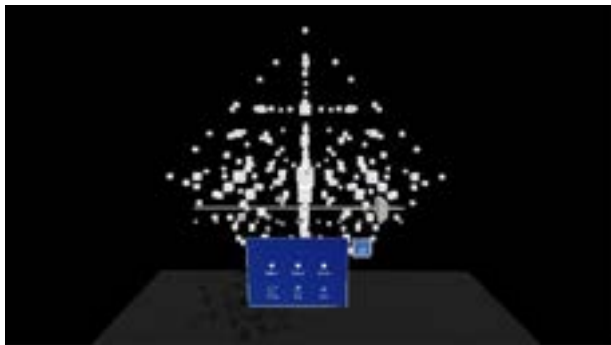


図 2 相似・比を用いたジェネラティブアート（変更後）

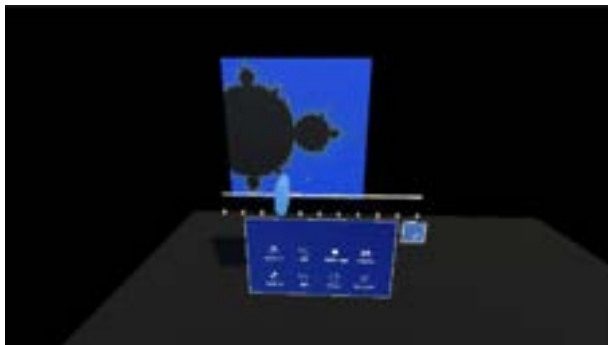


図 4 マンデルブロ集合を用いたジェネラティブアート

に適応したオブジェクト配置が可能。

これらの機能を活用することで、従来の 2D スクリーン上での操作と異なり、空間的な体験を重視した直感的な学習環境を提供する。

2.2 ジェネラティブアート体験システムの概要

本システムでは、ユーザが MR 空間内で数学的概念を視覚的に体験できるよう、異なる数学的手法を基にした 3 種類のジェネラティブアートを提供する。各システムは、数学的原理を理解しやすくするためのインタラクティブな操作機能を備えており、ユーザが能動的に探求できる設計となっている。

2.2.1 相似・比を用いたジェネラティブアート

このシステムでは、目の前に表示されたメニュー画面を操作することで、ジェネラティブアートを制御することができる（図 1）。操作項目は以下の 3 つに分けられる：

1. 表示するキューブ数の変更
2. 中心のキューブとの相似比の変更
3. 表示しているキューブ間の距離比の変更

システムの起動直後は、図 1 のように一つのキューブのみが表示される。ここで、ユーザが操作を行うことで、図 2 のようにキューブが等間隔で増えたり、追加されたキューブが指定した相似比で配置されるなどの変化が起こる。

まず、ユーザには操作方法を説明せずにシステムを体験し

てもらい、変化するオブジェクトを観察しながら規則性を発見することを促す。その後、各操作の数学的背景（相似や比の概念）について説明し、今度は関係性を確かめる視点でアートを操作する。このような段階的な学習体験により、数学的概念の理解を深めることを目指す。

2.2.2 フラクタルツリーを用いたジェネラティブアート

このシステムでは、図 1 のように目の前に出現した「じょうろ」を持ち、鉢に水をやることでジェネラティブアートが出現する構造を採用している。このデザインは、フラクタルツリーの性質を直感的に学習することを目的としている。

成長プロセス：

- 初期状態では、鉢に 1 本の幹が表示される（図 1）。
- じょうろで水をやる、試行回数に応じて枝が増えていく（図 2）。
- 各試行ごとに 1 本の幹が 2 本の枝に分岐し、このプロセスを繰り返すことで自己相似的なフラクタル構造が形成される。

ユーザが水をやる行為が試行回数の増加とリンクしており、フラクタル成長の規則性を視覚的に体験できる。また、枝分かれの角度や分岐率を調整する機能を追加し、ユーザが試行錯誤しながら数学的法則を探究できる環境を提供する。

2.2.3 マンデルブロ集合を用いたジェネラティブアート

このシステムでは、目の前に出現したパネルに表示されたマンデルブロ集合を操作することができる (図 1)。具体的には、パネル手前に操作メニューが表示されており、「横移動」、「縦移動」、「拡大」、「縮小」、「停止・再生」、「リセット」、「三次元版の表示」の 7 つの操作が可能である。

これらの操作を通じて、ユーザはマンデルブロ集合の詳細な構造を観察し、その数学的特性を体験することができる。特定の領域を拡大すると、拡大前と類似した形状が出現する自己相似性を確認できる。例えば、図 2 に示すように、拡大を続けることで同様のパターンが繰り返し現れ、数学的な無限の概念を視覚的に捉えることが可能となる。また、三次元版の表示を用いることで、マンデルブロ集合の構造を立体的に観察し、新たな視点から数学的規則性を探ることができる。

このように、マンデルブロ集合の操作を通じて、算数・数学と密接な関係にあるジェネラティブアートを体験的に鑑賞しながら、数学の特徴を発見し、認識することができる。また、この体験を通じて、数学が実生活の中でどのように活用されているかを理解し、日常に潜むフラクタル構造や相似の概念に気づく機会を増やすことを目的としている。

2.3 仮想空間と現実空間を融合したインタラクションの特長

本システムの特長の一つは、仮想空間と現実空間の統合による体験型学習環境を提供する点にある。従来の VR ベースの学習システムでは、仮想空間のみでの操作に制限されることが多かったが、本システムでは、ユーザが現実空間の動作 (例: 手のジェスチャーや視線の動き) を活用してインタラクティブに仮想オブジェクトを操作できる。特に、HoloLens 2 のハンドトラッキング機能を利用することで、実世界の動作と仮想世界の変化が直感的に結びつくため、学習者の没入感を高めることができる。

また、仮想空間内での観察視点を自由に変更できる点も重要な要素である。例えば、ジェネラティブアートを上方や側面から観察することで、三次元的な構造の理解が深まる。このように、MR の特性を活かした多角的な視点の提供は、数学的概念の理解を促進する上で有効な手段となる。

3. まとめと今後の展望

本研究では、HoloLens 2 を用いた複合現実 (MR) 環境において、ユーザがジェネラティブアートを直感的に操作・観察できる体験型システムを開発した。本システムは、「相似・比を用いたジェネラティブアート」「フラクタルツリーを用いたジェネラティブアート」「マンデルブロ集合を用いたジェネラティブアート」の 3 種類のアート体験を提供し、数学的概念を視覚的かつ体験的に学習できる環境を構築している。特に、HoloLens 2 のハンドトラッキングや視線追

跡機能を活用し、従来のスクリーンベースのインタラクションとは異なる、没入感のある学習体験を提供することを目的とした。

本システムでは、仮想空間内のオブジェクト操作を通じて数学的規則性を探求できるだけでなく、現実空間での物理的操作と連動させることにより、MR の特性を最大限に活かした学習体験を提供する。たとえば、フラクタル構造を学習するために「じょうろで水をやる」という物理的な動作を導入し、試行回数の増加がフラクタル成長と直感的に結びつくように設計されている。また、マンデルブロ集合の操作においては、三次元的な視点変更を可能にすることで、数学的パターンの視覚的理解を促進する工夫を施した。

今後の展望として、ユーザの体験をより没入感のあるものにするため、操作性に関する実験を実施する予定である。具体的には、インターフェースの配置について、仮想空間と現実空間を複合した環境に置くべきか、あるいは現実空間側に統一するべきかを検討する。この検証のため、HoloLens 2 向けのアプリケーション開発において標準的に用いられる MRTK (Mixed Reality Toolkit) のボタンやスライドバーを活用し、複合空間での操作性を評価する。また、現実空間側のインターフェースとして、センサを用いた物理的な制御装置や、キーボード・マウスによる制御などの手法を導入し、異なるインターフェースの比較調査を行う。

さらに、本システムの教育現場やミュージアムでの応用可能性についても検討を進める。特に、MR 技術を活用することで、数学的概念を理論的な学習だけでなく、視覚的・体験的に学ぶことができる新しい学習環境の構築が期待される。今後の研究では、このシステムが数学教育に与える影響を検証し、MR を活用した体験型学習の可能性をより深く探究していく予定である。

参考文献

- [1] "McCormack, J., Dorin, A., & Innocent, T. (2004). Generative design: A paradigm for design research. *Digital Creativity*, 15(1), 55-64.
- [2] Galanter, P. (2003). What is generative art? Complexity theory as a context for art theory. *Proceedings of the International Conference on Generative Art*.
- [3] 文部科学省. "国際数学・理科教育動向調査(TIMSS2019)のポイント", p.1.
- [4] 文部科学省・国立教育政策研究所. "OECD 生徒の学習到達度調査 PISA2022 のポイント", p.7.
- [5] Erbas, C., & Demirel, V. (2019). "The effects of augmented reality on students' academic achievement and motivation in a biology course." *Journal of Computer Assisted Learning*, 35(3), 450-458.
- [6] Parong, J., & Mayer, R. E. (2018). "Learning science in immersive virtual reality." *Journal of Educational Psychology*, 110(6), 785.
- [7] Wang, Y., Lee, L.-H., Braud, T., & Hui, P. (2022). "Re-shaping Post-COVID-19 Teaching and Learning: A Blueprint of Virtual-Physical Blended Classrooms in the Metaverse Era." *arXiv preprint arXiv:2203.09228*.
- [8] Microsoft. HoloLens 2: Overview and Features. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>, Accessed 2024-02-27.