

立体図形学習のための タブレットコンピュータ用 AR アプリケーション

本田 佳杏樹^{1,a)} 佐藤 玲生^{2,b)} 和田 優斗^{1,c)} 志築 文太郎^{3,d)}

概要：本研究では、中等教育における数学の立体図形の学習支援を目的に、拡張現実（AR）を活用したタブレットコンピュータ用アプリケーションを開発した。一部の中高生は立体図形の学習に困難を感じているため、立体図形の学習を支援するツールが求められている。一方、既存のツールでは、二次元画面上での操作に限られるため、立体感および奥行き理解に課題が残っている。本アプリケーションでは、現実の三次元空間に立方体を配置し、立方体の頂点に対して指を用いて頂点を直接タップすることによって、図形の断面を可視化することができる。これにより、画面上での操作に加えて、現実空間における図形的位置関係を体感しながら学べる。さらに、単なる視覚的な認識に留まらず、動的な観察を通じて空間的な思考力の向上が期待される。

1. はじめに

中等教育における数学の図形の単元に対する先行研究には、一部の中高生が立体図形の学習に困難を感じていることが示されており [1]、生徒は教材以外の補助ツールおよびアプリケーションを活用する傾向にある。既存の補助ツールおよびアプリケーションとしては、GeoGebra[2] および Desmos[3] 等がある。これらのツールを用いることにより、ユーザは、図形およびグラフの素早い描画、変数の設定、およびグラフの変容を視覚的に確認できるという利点がある。しかし、これらのツールでは二次元の画面上にて三次元の立体図形を扱うため、特に立体図形の奥行きおよび立体感の理解が難しいという課題が残る [4]。

そこで本研究では、AR 技術を活用し、立体図形を現実の三次元空間にて操作可能な iPad 用アプリケーション（図 1）を開発した。本アプリケーションでは、ユーザは三次元空間上に立体図形を直接配置する。配置した立体図形には、頂点をタップすることによって、図形の断面図を可視化可能である。これにより、ただ画面を操作するだけではなく、現実空間上に図形を操作することによって、現実世界および AR 上の図形的位置関係を深く学ぶことが出来るため、三次元空間の理解を促進することが期待される。

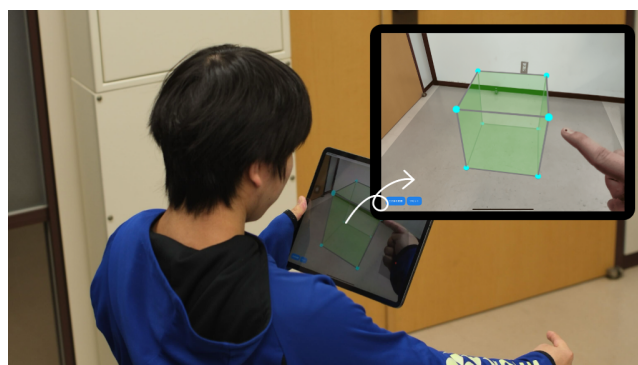


図 1 ユーザが本アプリケーションを操作している様子

特に、中学校および高等学校の学習指導要領における「空間図形」および「図形の性質」の学習の際に、問題の内容を本アプリケーションにて再現しながら使用することにより、生徒は図形の構造および空間関係を視覚的かつ体感的に学べる。

2. 関連研究

以下に、既存の図形学習ツールおよび数学学習における AR の活用の関連研究を示す。また、関連研究および本研究の立ち位置を述べる。

2.1 既存の図形学習ツール

GeoGebra[2], Desmos[3], Mathway[5], GRAPES[6], GC/html5[7], PointLine[8] および Cinderella[9] では、ユーザは、点、直線、および円などの基本的な図形を簡単に描画できる。これにより、抽象的な数式および関数の概

¹ 筑波大学 情報メディア創成学類

² 筑波大学 情報理工学プログラム

³ 筑波大学 システム情報系

a) honda@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) rsato@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

c) wada@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

d) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

念を具体的な形にて学ぶことができる。しかし、これらのツールでは、基本的に二次元平面上にて平面的に操作することを前提としているため、三次元空間に立体を投影して操作するような学習環境と比較すると、立体図形の操作および理解に限界がある。特に三次元空間を初めて学ぶ生徒には、立体図形の奥行きを把握することが困難になるため、空間的な認識が不十分になる可能性が指摘されている[10]。この課題を解決するために、我々は、現実空間および立体図形を視覚的に重ね合わせられるARを用いることにより、立体図形の学習支援を目指した新たなアプローチを提案する。

2.2 数学学習へのARの活用

Augmented Math[11]は、数学教材をARで拡張することにより、動机的かつ探究的な学習体験を提供するシステムである。光学文字認識およびコンピュータビジョン技術を用いて数式および図を抽出する。また、抽出した内容をインタラクティブなアニメーションとして表示することにより、中高生でも教材を活用することを容易にした。さらに、ARを用いた図形学習アプリケーションとして、GeoGebra Augmented Reality[12]がある。これは、三次元の図形をARを用いて現実空間に視覚化できるアプリケーションである。ユーザは、スマートフォンおよびタブレット型端末のリアカメラを通じて様々な角度から立体図形を観察することにより、図形の形状および位置を容易に理解可能である。しかし、AR表示を行うのみでは、画面にて立体図形を操作した際に、奥行きの把握が難しく、立体構造の理解に課題が残る[13]。これに対し、本研究では、既存ツールの課題を解決するために、AR上に立体図形を表示し、かつ、ユーザがカメラ越しに現実の三次元空間上にて直接操作できるアプリケーションを提案する。このアプローチにより、効果的に立体図形を理解できる。

3. アプリケーション

我々は、中等教育における数学の立体図形の学習支援を目的に、iPadOS上にて作動する学習用アプリケーションを実装した(図2)。ユーザはiPad上のARにて表示された立方体に対して、三次元の視点からの観察および現実空間上での操作を行うことにより、立体図形への理解が促進されると考えられる。プラットフォームにiPadOSを用いた理由は、近年の教育現場にて推進されているGIGAスクール構想[14]の一環として、タブレット型端末の中でもiPadOSを導入する事例が多くみられる[15]ためである。

3.1 実装

実装には、Appleが提供する開発言語およびフレームワークであるSwiftおよびSwiftUIを使用した。空間上の平面検出および仮想オブジェクトの配置等のAR機能の実

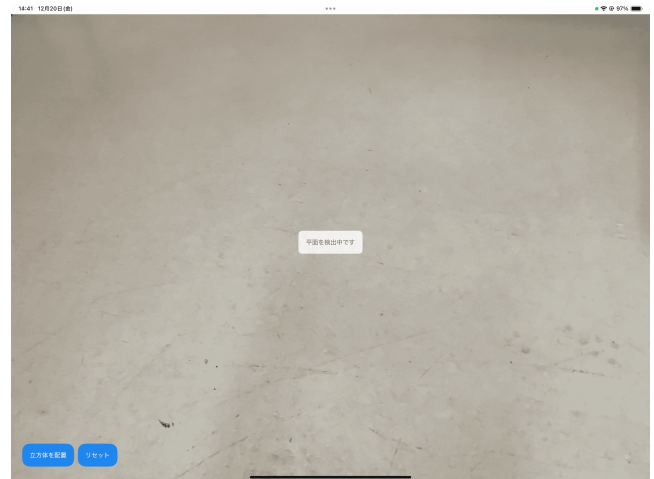


図2 平面を検出している様子

現には、ARKit^{*1}およびSceneKit^{*2}を使用した。また、Vision Framework^{*3}を使用して、iPadに内蔵されるリアカメラの映像から、人差し指の位置を画像認識によって検出した。本アプリケーションは、3次元空間上にARにて配置された頂点の位置を2次元座標へと投影した後、投影された座標および検出された指の座標の重畳を判定する。さらに、頂点および指の衝突を検出し、特定の頂点の選択を実現する。ユーザの人差し指および頂点の距離が、設定された閾値(20mm)未満になった場合、選択操作を開始したとみなし、選択開始から1秒間選択し続けることによってその頂点に対する選択を確定する。これにより、ユーザはAR空間内において立体図形に対して直接的に平面を描画しながら、立体図形を視覚的に操作することができる。

3.2 操作方法

ユーザは、iPadを把持もしくは机に置いた状態にて本アプリケーションを使用する。ユーザが、iPadのリアカメラを机等の平面に向けると、平面が検出され、画面上に灰色の平面が図示される(図2)。続いて、ユーザは本アプリケーション上のボタンを押して、検出された平面上に立方体を配置する(図3)。さらに、ユーザはAR上の立方体の頂点に対して、カメラ越しに手を滞留させることによって、頂点を選択する(図4)。3つの頂点を選択することにより、画面上に3つの点を含む同一平面が描画される(図5)。

4. 今後の課題

現状のアプリケーションでは、中学校および高等学校の学習指導要領における「空間図形」および「図形の性質」の単元において、最も基本的な図形である立方体に限定されているため、立体図形の基礎的な理解を深められるもの

^{*1} <https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/arkit>

^{*2} <https://developer.apple.com/documentation/scenekit>

^{*3} <https://developer.apple.com/documentation/vision>

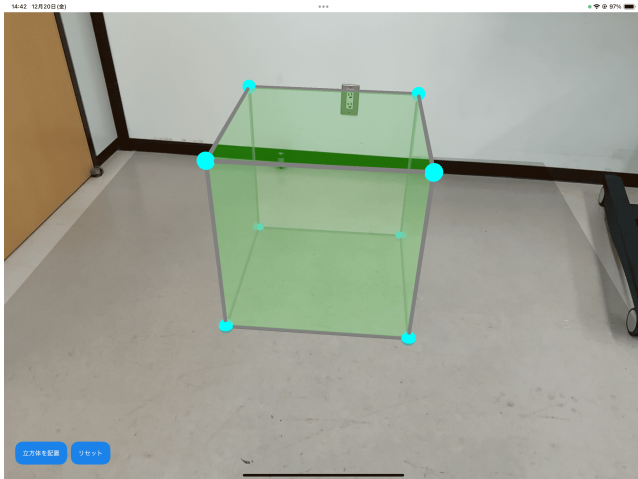


図 3 立方体を配置している様子

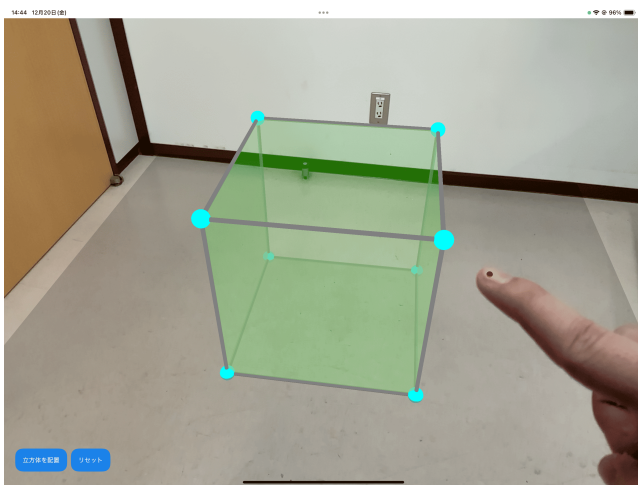


図 4 頂点を選択している様子

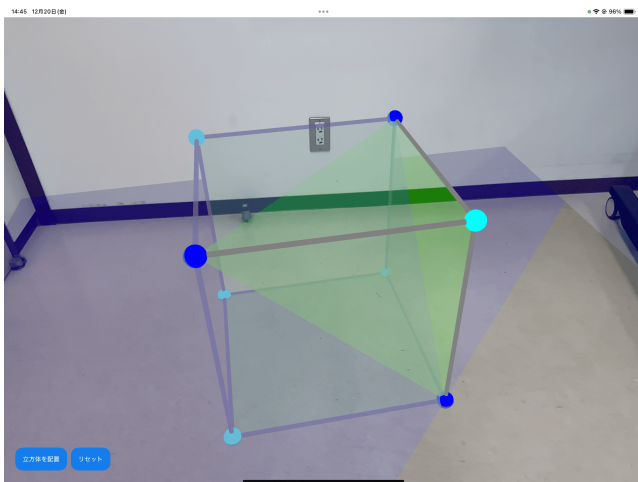


図 5 選択された 3 点の同一平面を描画している様子

の、複雑な立体図形および発展的な概念には対応していない。また、選択可能な対象が立方体の頂点に限定されているため、図形の辺および面の選択機能を拡充する必要がある。これらに対応することにより、球および錐体等の複雑な図形に対する支援可能である。また、これらの単元に

おいて重要である垂線および補助線の可視化が実現される。加えて、手の認識精度の向上も重要な課題である。現状のアプリケーションでは、手の認識精度が十分ではないため、ユーザーが意図する選択を正確に行うことが困難である。この問題により、ユーザビリティの低下が生じている。今後、認識精度を向上させることにより、ユーザビリティを改善する。ならびに、フィードバック機能の強化も重要な課題である。現状のアプリケーションでは、ユーザは何もない現実空間に手をかざしているのみになっている。そこで、ユーザ体験には振動フィードバックが重要となる。例えば、iPad とともに使用されるデバイスとして、Apple Pencil があるが、これには振動の機能が備わっている。手ではなく、Apple Pencil を用いて図形を選択可能になれば、ユーザに振動フィードバックを与えられる。これにより、ユーザーの操作体験の向上が期待される。

今後、以上の課題を解決するためのさらなる実装に取り組む。また、実際の教育現場での利用を想定したユーザ調査を実施することにより、学習効果の検証を行う。具体的に、生徒が、どのように本アプリケーションを用いて立体図形の理解を深めるかを観察する。また、ユーザインターフェースの改善および機能の最適化を図る。これらの取り組みにより、効果的かつ実践的な学習支援でき、かつ立体図形教育における新たな可能性を切り開くことを目指す。

5. まとめ

本研究では、現実の三次元空間において操作を可能にした、AR を用いた立体図形の学習支援アプリケーションの開発を行った。具体的には、ARKit と SceneKit を用いて空間上の平面を検出した後、立方体を配置することにより、ユーザがカメラ越しに立方体を視覚的に把握しながら、手の動きによる操作できるよう設計した。ユーザは、描画された同一平面および立方体を観察する。これにより、立方体の断面に対する理解の促進が期待される。例えば、ユーザは自ら視点を移動し、異なる角度および断面から図形を観察することにより、空間の構造や関係性をより深く理解することができる。従来の平面的な操作では困難であった立体図形の奥行き理解が、AR 空間での実体験によって促進されることを期待できる。

参考文献

- [1] Ashcraft, M. H. and Moore, A. M.: Mathematics Anxiety and the Affective Drop in Performance, *Journal of Psychoeducational Assessment*, Vol. 27, No. 3, pp. 197–205 (online), DOI: 10.1177/0734282908330580 (2009).
- [2] Hohenwarter, M. and Team, G.: GeoGebra - the world's favorite, free math tools used by over 100 million students and teachers (2001). <https://www.geogebra.org/?lang=ja> 最終アクセス: 2024 年 10 月 29 日.
- [3] PBC, D. S.: Desmos — 美しい無料の数学ツール。(2011). <https://www.desmos.com/calculator> 最終ア

セス: 2024 年 12 月 21 日.

- [4] 辻宏子: 動的幾何環境 GeoGebra における作図活動に関する考察—「点の自由度」の概念に焦点をあてた分類枠組みの提案と検証—, 科学教育研究, Vol. 43, No. 2, pp. 104–114 (オンライン), DOI: 10.14935/jssej.43.104 (2019).
- [5] Balcavage, F. and Kuehner, J.: Mathway — グラフ作成 計算機 (2002). <https://www.mathway.com/ja/Graph> 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.
- [6] 友田勝久: WelCome to GRAPES (2021). <https://tomodak.com/grapes/> 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.
- [7] 飯島康之: GC/html5 (2024). <https://www.yiijima-gc.org/> 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.
- [8] 阿原一志: PointLine - Dynamic Geometry Software With Bidirectional Modules (2018). <https://aharalab.sakura.ne.jp/PointLine/index.html> 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.
- [9] Richter-Gebert, J. and Kortenkamp, U.: Cinderella: Cinderella (1998). <https://cinderella.de/tiki-index.php> 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.
- [10] Jones, K. and Tzekaki, M.: *Research on the Teaching and Learning of Geometry*, pp. 109–149 (online), DOI: 10.1007/978-94-6300-561-6_4, SensePublishers (2016).
- [11] Chulpongsatorn, N., Lunding, M. S., Soni, N. and Suzuki, R.: Augmented Math: Authoring AR-Based Explorable Explanations by Augmenting Static Math Textbooks, *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '23, No. 92, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–16 (online), DOI: 10.1145/3586183.3606827 (2023).
- [12] Team, G.: GeoGebra 3D Calculator, *Android App*, version 5.0 (2024). <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.geogebra.android.g3d> 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.
- [13] Yağmur, Serapband Çakır, M. P.: Usability Evaluation of a Dynamic Geometry Software Mobile Interface Through Eye Tracking, *Learning and Collaboration Technologies* (Zaphiris, P. and Ioannou, A., eds.), Cham, Springer International Publishing, pp. 391–402 (2016).
- [14] 文部科学省: G I G A スクール構想の実現 学習者用コンピュータ最低スペック基準 (2024). https://www.mext.go.jp/content/20240417-mxt_jogai02-000033777_3.pdf.pdf 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.
- [15] 文部科学省: GIGA スクール構想の実現に向けた整備・利活用等に関する状況について: 文部科学省 (2020). https://www.mext.go.jp/a_menu/other/mext_00921.html 最終アクセス: 2024 年 12 月 21 日.