筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

立体図形学習のための
タブレットコンピュータ用
ARアプリケーションの教育効果

本田 佳杏樹

指導教員　志築 文太郎，川口 一画

2025年2月

概要

本研究では，中等教育における立体図形学習を支援する目的に，タブレットコンピュータ上にて動作する拡張現実（AR）アプリケーションを開発した．ユーザは，人差し指の先端を用いて現実空間に重ね合わせた AR 上の立方体を選択し，断面図を描画することにより，三次元空間の構造を視覚的に理解できる．本アプリケーションの教育効果を検証するため，本アプリケーションを AR 条件，既存のツールを 2D 条件として比較する参加者間実験を実施し，正答率，解答に要した時間，ユーザビリティ，および作業負荷を測定した．その結果，正答率では両条件に有意差が認められなかった一方，操作時間および作業負荷において AR 条件は課題が残ることが判明した．しかし，AR 条件でも 2D 条件と同等の学習効果が期待されるほか，空間認識の向上および学習意欲の喚起といった利点が見込まれる．今後は，本アプリケーションの改善を通じ，より安定した AR 学習環境の構築を目指す．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　目的およびアプローチ 1
1.2　貢献 2
1.3　本論文の構成 2

第 2 章　関連研究 **4**
2.1　既存の図形学習ツール 4
2.2　数学学習への AR の活用 5

第 3 章　アプリケーション **6**
3.1　実装 6
3.2　操作方法 7

第 4 章　実験 **10**
4.1　実験装置および環境 10
4.2　参加者 11
4.3　実験条件 11
4.4　実験手順および演習タスク 12
4.5　評価項目 17
4.6　実験前アンケート 18

第 5 章　実験結果および考察 **19**
5.1　正答数 19
5.2　解答時間 20
5.3　ユーザビリティ 25
5.4　作業負荷 26
5.5　フィードバック 27
5.5.1　AR 条件 27
5.5.2　2D 条件 28
5.5.3　参加者の好み 29
5.5.4　AR 条件の改善点 29
5.6　考察 29

第 6 章　今後の課題 **31**

第 7 章　まとめ **32**

謝辞 **33**

参考文献 **34**

付 録 A　実験において用いたアンケート **37**
A.1 実験前アンケート 38
A.2 SUS アンケート 39
A.3 NASA-TLX アンケート 41

図 目 次

1.1 本アプリケーションを操作している様子. 2

3.1 平面を検出している様子. 7
3.2 AR 上に立方体を配置している様子. 8
3.3 人差し指の先端の滞留にて点を選択している様子. 8
3.4 選択された 3 点の同一平面が描画されている様子. 9

4.1 参加者が本アプリケーションを使用している様子. 10
4.2 参加者が既存ツールを使用している様子. 11
4.3 例題. 13
4.4 問題 A 立方体の断面図の形状を問う問題. 14
4.5 問題 B 立方体の断面図の形状を問う問題. 15
4.6 AR 条件を用いた解答の作成. 16
4.7 2D 条件を用いた解答の作成. 17

5.1 各条件における正答数の平均値. 19
5.2 各条件における操作時間の平均値. 21
5.3 各条件における思考時間の平均値. 21
5.4 各条件における合計時間の平均値. 22
5.5 数学ソフトウェア利用経験別の操作時間の平均値. 23
5.6 数学ソフトウェア利用経験別の思考時間の平均値. 23
5.7 数学ソフトウェア利用経験別の合計時間の平均値. 24
5.8 各条件における SUS スコアの平均値. 25
5.9 各条件における NASA-TLX 総合スコアの平均値. 26
5.10 各条件における NASA-TLX 下位尺度の平均値. 27

A.1 実験前アンケート．実験の説明を受けたのち，参加者情報，数学ソフトウェアの利用経験に関する質問に回答する. 38
A.2 SUS アンケート-Part 1．条件のユーザビリティに関する質問に 5 段階尺度にて評価する. 39
A.3 SUS アンケート-Part 2. 40
A.4 NASA-TLX アンケート-Part 1．6 つの項目に対する回答を行う. 41

A.5 NASA-TLX アンケート-Part 2．Part 1 に示した 6 つの項目のうち，ランダムに表示される 2 つの項目のどちらが重要な要因であるかを選択する. この選択を，全通りに対して行う. 例として,「作業成績」および「フラストレーション」が表示された場合の画面を示す. 42

第1章　序論

近年，タブレットコンピュータおよびパソコン等の電子端末が教育現場に浸透し，学習者の視覚的および容易な理解を助ける教材の開発が進んでいる．特に AR 技術は，現実空間および AR オブジェクトを重ね合わせることにより，二次元画面では捉えにくい三次元情報をわかりやすく提示できる可能性がある．しかし，AR 環境下での立体図形学習に着目した研究はまだ十分とは言えず，現実空間との重なりおよび操作手法が学習効率および理解度にどのような影響を及ぼすかは明確ではない．本章では，本研究の目的およびアプローチを述べるとともに，本研究の貢献および本論文の構成を示す．

1.1　目的およびアプローチ

中等教育における数学の図形単元では，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指摘されている [1]．既存のツール（例：GeoGebra [2]，Desmos [3]）は，二次元画面上にて図形の操作およびグラフの描画を容易に行えるため，学習者にとって有用な手段の一つと考えられる．しかし，三次元立体を扱う場合，立体図形の奥行きおよび立体感の把握が困難であるという課題が残る [4]．本研究では，立体図形学習のためのタブレットコンピュータ用 AR アプリケーションを開発した．本アプリケーションは，ARKit および SceneKit を用いて現実空間および立体図形を重ね合わせ，ユーザが立方体の頂点を直接触れているかのような選択および操作できる環境を提供する（図 1.1）．AR による現実空間との操作性により，立体図形の奥行きおよび構造を容易に理解できることを目指す．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．さらに，本アプリケーションの教育効果を検証するため，二次元画面上での既存のツールとの比較実験を実施し，正答数，解答時間，ユーザビリティ，作業負荷，およびインタビューによる定性評価を行った．

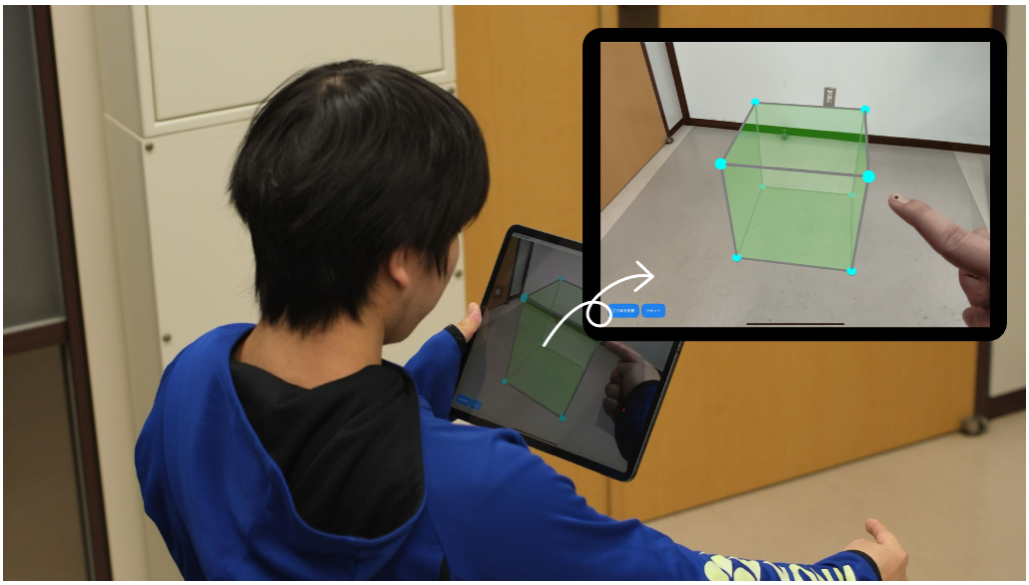


図 1.1: 本アプリケーションを操作している様子.

1.2 貢献

本研究の主な貢献は以下の 3 点に要約される．1 つ目は，立体図形学習のためのタブレットコンピュータ用 AR アプリケーションの開発である．中等教育の立体図形学習を対象として，iPad 上にて手指の動きを用いた直感的操作を可能にした本アプリケーションを開発した．立方体の頂点および中点を選択し，断面図を描画する機能により，三次元空間の概念を視覚的かつ体感的に理解できるよう設計している．

2 つ目は，実験による本アプリケーションの教育効果の評価である．既存のツールと比較する実験を行い，正答率および解答時間の差異，主観的なユーザビリティおよび作業負荷を統計的に解析した．その結果，正答率および思考時間には有意差がなかったものの，AR 条件の操作時間の増加および身体的負荷が顕在化し，安定性の改善が必要であることが示唆された．

3 つ目は，定性評価を通じて得られた本アプリケーションの改善点および設計指針の提示である．インタビューによって，本アプリケーションの新規性および楽しさを評価する参加者がいる一方，操作精度および身体的負担の軽減を求める声が多数挙がった．これらの意見を踏まえ，本アプリケーションが教育現場において効果的に機能するための改善点および設計指針を示した．

1.3 本論文の構成

まず，第 1 章では，背景, 本研究の目的，および貢献を示した．第 2 章では，既存の図形学習ツールおよび AR を活用した数学教育の関連研究を概観し，本研究の立ち位置を明らかに

する．第 3 章では，本アプリケーションの実装手法および操作方法を詳述する．第 4 章では，提案手法の評価実験を紹介し，実験条件および評価項目を説明する．第 5 章では，実験結果を示すとともに考察を加え，AR 環境における利点および課題を議論する．第 6 章では，今後の課題および本アプリケーションの拡張の可能性について述べる．第 7 章では，本研究のまとめを行う．

第2章　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

Desmos [3] は, 関数グラフの描画に特化したオンラインツールであり, 簡潔なインターフェースおよびリアルタイムでの描画機能によって，多様な関数の変化を即座に視覚化できる．ブラウザ上にて動作するためインストールが不要であり，教育現場での導入が容易である．しかし，一方，三次元図形の取り扱いは可能であるが，主として二次元画面に投影された形にて操作するため，三次元的な概念の学習には限界がある．Mathway [5] は，数学の問題を入力すると解答および解法を提示するオンライン計算ツールである．代数，幾何，微積分などの分野に幅広く対応し，詳細な解法を示すことによって学習者の理解を支援する．ただし，主に計算を補助する目的のために設計されており，図形の動的操作および三次元の学習支援は提供されていない．

GRAPES [6] は, 関数グラフの描画および解析を行う教育用ソフトウェアであり, 日本の教育課程に沿った機能が充実している．二次元平面上での描画を中心に設計されているため，使いやすさおよび即時性に優れている一方，三次元図形の可視化に関する機能は備わっていない．GC/html5 [7] は，ブラウザ上にて動作する動的幾何学ソフトウェアであり，インストール不要のため手軽に利用できる点が特徴である．点，直線，円などの二次元の図形を描画および操作でき，学習者が幾何の基礎概念を視覚的に理解するのに有用である．しかし，三次元の立体図形を直接扱う機能はなく，空間的な思考を深めるための支援は限定的である．PointLine [8] は，二次元の幾何学的図形を正確に作図・操作できるソフトウェアであり，教育現場における図形作図の学習を支援する．基礎的な幾何の性質を視覚的に把握しやすいが，三次元の立体図形を扱うための機能は実装されていない．

Cinderella [9] は，動的幾何学ソフトウェアとして二次元だけでなく三次元図形の描画・操作も可能であり，物理シミュレーション機能を用いて数理的法則を直感的に学ぶことができる．一方，操作は主にマウスおよびキーボードによって行われ，現実空間および図形を統合した対話的な学習環境は提供されていない．GeoGebra [2] は，幾何，代数，統計，および微積分など幅広い分野を対象とする動的数学ソフトウェアであり，二次元平面上での図形の操作および関数の変形を直感的に学習できる点が強みである．パラメータを変更するとグラフが即座に変化するため，視覚的かつ動的に数学的概念を理解しやすい．一方，三次元図形の

取り扱いは可能であるが，主として二次元画面に投影された形にて操作するため，空間的な把握には限界がある．

これらの既存のツールはいずれも数学教育において重要な役割を果たしており，二次元平面上での動的操作および関数の可視化など，有用な機能を備えている．しかし，多くは二次元上の操作を中心に設計されており，三次元的な空間認識を深めるための学習支援が十分ではない．特に，三次元空間の概念を初めて学ぶ段階にて，立体図形の性質および奥行きを直感的に理解することは難易度が高いと指摘されている [10]．本研究では，AR 技術を活用して現実空間および仮想の立体図形を重ね合わせることにより，ユーザが三次元の立体図形を理解できる立体図形学習のためのタブレットコンピュータ用 AR アプリケーションを開発する．マウスおよびキーボードを用いて立体図形を操作する従来の二次元ベースの学習ツールでは得られにくい空間認識および操作感覚を，現実の空間および図形を連携したインタラクションを通して促進する点が本研究の特徴である．

2.2 数学学習への AR の活用

Augmented Math [11] は，数学教材を AR を用いて拡張することにより，動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．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，既存の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．

第3章　アプリケーション

本章では，まず，本研究にて実装したアプリケーションの概要を解説する．次に，本アプリケーションの実際の操作手順を取り上げ，ユーザがどのように立方体を配置し，どのように点を選択して平面を描画するかを示す．

3.1　実装

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 アプリケーションを実装した．実装環境の詳細は以下の通りである．

- MacBook Air（13-inch, 2024）
  - OS：macOS Sonoma 14.6
  - プロセッサ：8 コア CPU，10 コア GPU，16 コア Neural Engine 搭載 Apple M3 チップ
  - RAM：16 GB ユニファイドメモリ
- iPad Pro（12.9 インチ, 第 3 世代）
  - OS：iPadOS 18.1.1
  - 画面サイズ：12.9 インチ（対角）
  - 画面解像度：2,732 × 2,048 ピクセル
- Xcode 16.2
- Swift

本アプリケーションでは，AR 上に配置した立方体を三次元の視点から観察および操作できるように設計し，ユーザが立体図形をより直感的に理解できる環境を提供する．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．開発言語およびフレームワークとしては，Apple が提供する Swift および SwiftUI を用い，現実空間上の平面検出および AR オブジェクトの配置などには ARKit [16] および SceneKit [17] を活用した．また，iPad 内蔵のリアカメラ映像から人差し指の先端の位置を認

識するため，Vision Framework [18] を利用して画像処理を行った．AR 上に配置した立体図形の各点を二次元座標へ投影し，そこにユーザの検出された人差し指先端の座標を照合することにより衝突判定を実装した．さらに，立方体の点および人差し指の先端の距離があらかじめ設定した閾値（40 mm）未満の状態にて 0.5 秒間継続した場合，その点をユーザが選択したと判定する仕組みを実装している．この仕組みにより，ユーザは AR 空間内にて立方体の頂点および中点を直接触れて操作する感覚を得られるように設計した．

3.2 操作方法

ユーザは，iPad を把持した状態にて本アプリケーションを使用する．ユーザが，iPad のリアカメラを床あるいは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 3.1）．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 3.2）．この立方体には，頂点および中点に選択可能な球オブジェクトが配置されている．ユーザは AR 上の球に対して，カメラ越しに人差し指の先端を球オブジェクトに滞留させることによって，点を選択する（図 3.3）．立体図形の点の位置は二次元座標へ投影されているため，人差し指の先端の深度は参照されない．3 つの点を選択することにより，画面上に 3 点を含む同一平面が描画される（図 3.4）．

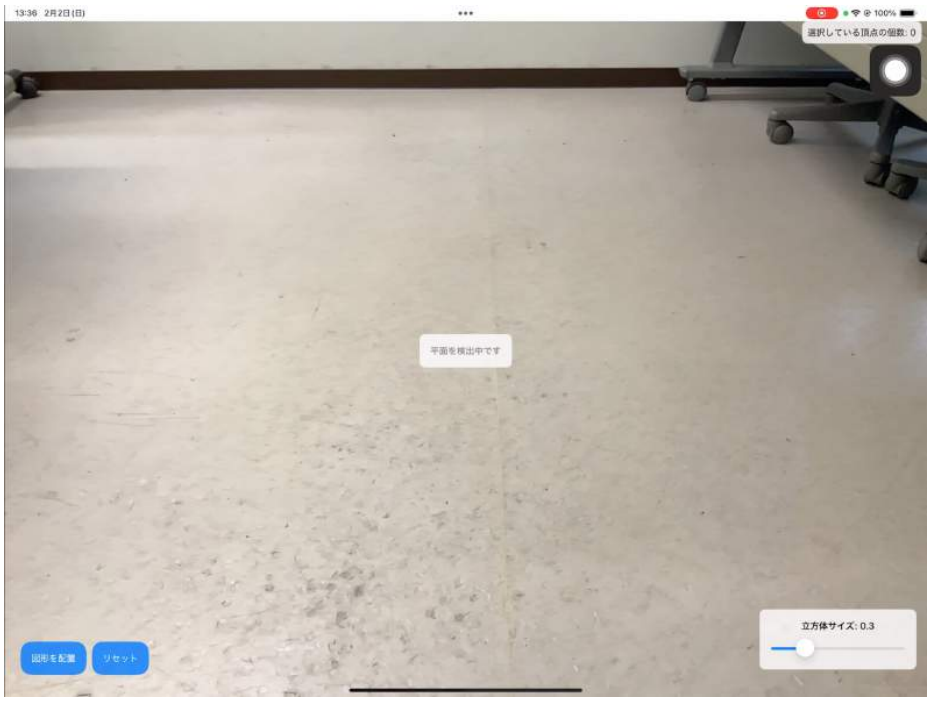


図 3.1: 平面を検出している様子．

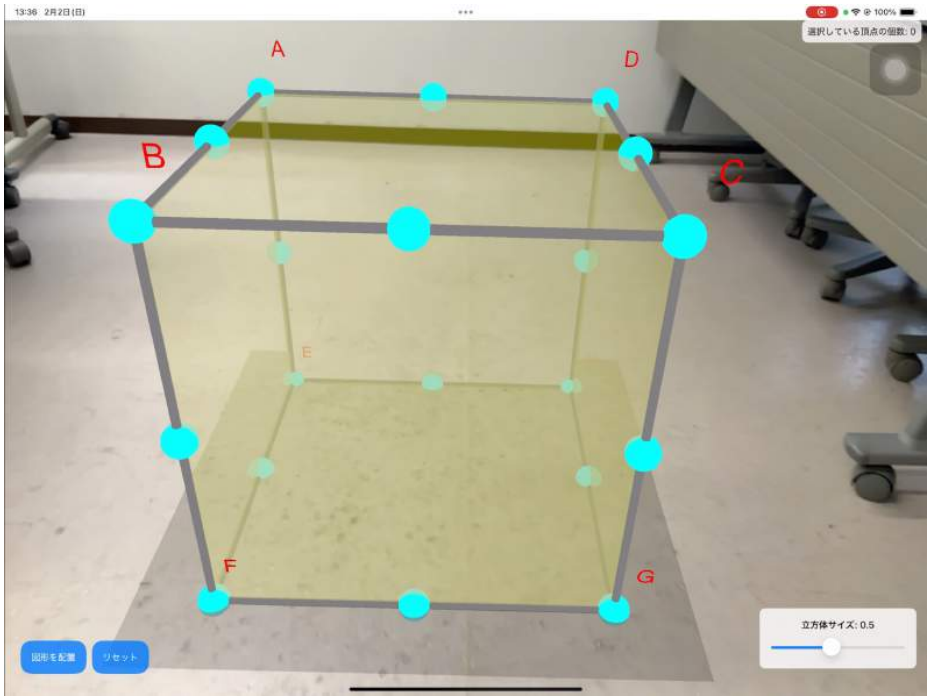


図 3.2: AR 上に立方体を配置している様子.

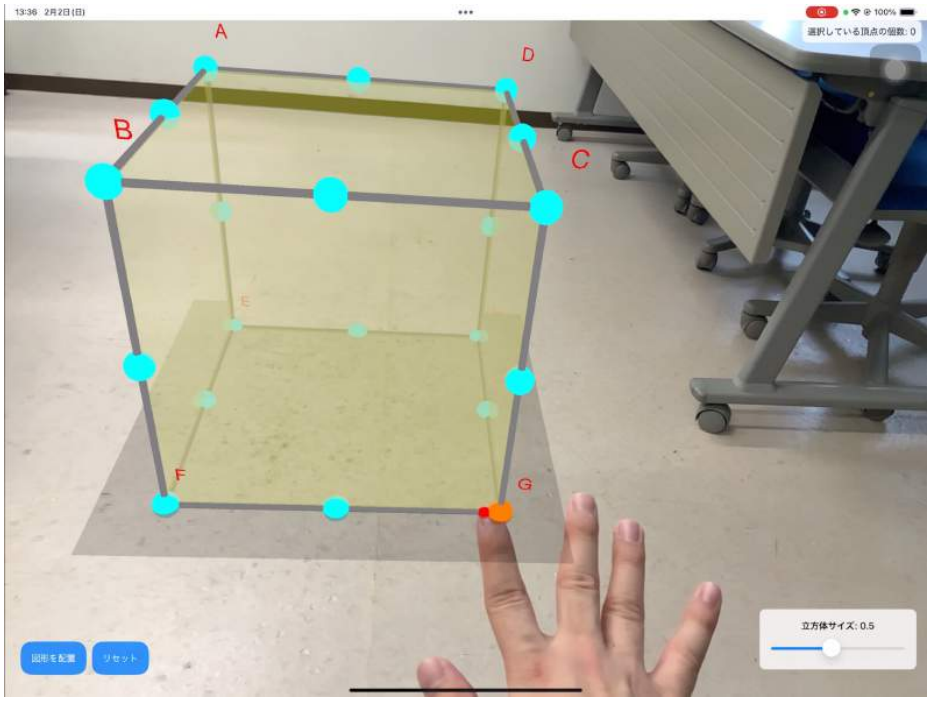


図 3.3: 人差し指の先端の滞留にて点を選択している様子.

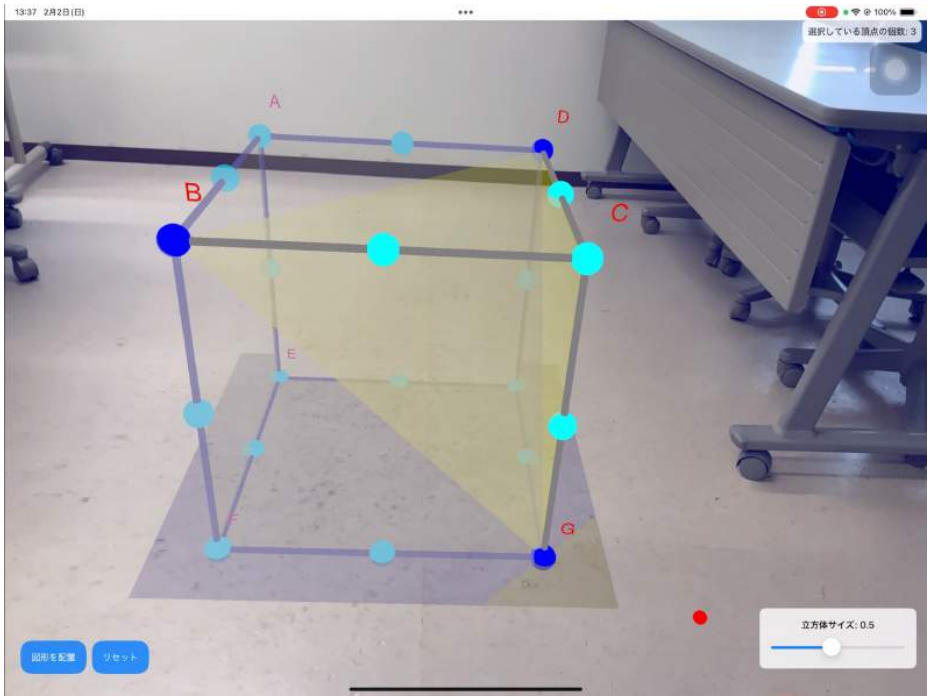


図 3.4: 選択された 3 点の同一平面が描画されている様子.

第4章　実験

3 章にて述べた本アプリケーションを用いた評価実験を実施した．評価実験において，参加者は，演習タスクを行う．演習タスクの実施によって得られたデータを基に，正答数および解答に要した時間を計測および比較することにより，本アプリケーションの性能を評価する．加えて，参加者には，主観的評価としてユーザビリティおよび作業負荷に関するアンケートを実施した．さらに，インタビューを行うことによりフィードバックを収集した．本アプリケーションの使用感および改善点の知見を得た．本章では，実験の内容を述べる．

4.1　実験装置および環境

演習タスクには，3.1 節にて述べた iPad を用いる．参加者は，図 4.1 に示すように iPad を把持する状態にて本アプリケーションを使用し，図 4.2 に示すように机に置いた状態にて既存のツールを使用して演習タスクを行った．本アプリケーションを使用する際に，AR オブジェクトを，床を平面として配置するように指示した．参加者が AR オブジェクトを観察するために，自由に動けるよう，動きを阻害しない十分な広さの空間を確保した．



図 4.1: 参加者が本アプリケーションを使用している様子.



図 4.2: 参加者が既存ツールを使用している様子.

4.2 参加者

参加者は，研究室内の大学生および大学院生 10 名（男性 8 名，女性 2 名，平均年齢 23.6 歳）であった．数学ソフトウェアの利用頻度を，5 段階評価（5：毎日使用する，4：週に 1 度使用する，3：月に 1 度使用する，2：年に 1 度使用する，1：全く使ったことがない）にて集計した．その結果，数学ソフトウェアの利用頻度に，6 名が年に 1 度使用する，3 名が全く使ったことがない，1 名が月に 1 度使用すると回答した．

4.3 実験条件

本実験では，問題を解く際の操作環境として 2D 条件および AR 条件の 2 条件である．2D 条件は，既存のソフトウェアを用いて二次元画面上にて立体図形を操作する環境である．既存のソフトウェアには GeoGebra [2] が採用された．GeoGebra は，空間図形の可視化および操作を支援する豊富な機能を備え，教育現場でも広く利用されているため，比較対象に適切であると判断した．一方，AR 条件は，本アプリケーションを用いて，AR 上にて立体図形を操作する環境を指す．

4.4 実験手順および演習タスク

本実験のはじめに，参加者に実験の概要および目的を説明した後，実験前アンケートへの回答を求めた．次に，参加者に演習タスクを提示し，練習セッションおよび本番セッションに分けて実施した．練習セッションの開始時には，演習タスクにて使用する条件の操作方法を説明した．具体的には，あらかじめアプリケーションを使用している様子を録画した動画および，定型的な口頭説明を併用することにより提示した．続いて，図 4.3 に示す例題を提示し，参加者の目の前にて，各条件のアプリケーションを使用している様子を実演した．その後，参加者に試用時間を与え，アプリケーションの操作に習熟する機会を提供した．参加者の試用が終了した後，iPad の画面の録画を開始し，参加者に本番セッションを実施させた．演習タスクに用いる問題には，独自に作成した立体図形の問題を使用した（図 4.4，図 4.5）．

ID：

例題

立方体ABCD - EFGHがある.
以下の3点を通る平面で立方体を切断した時の断面図の図形の厳密な名前を答えてください.

(i) 頂点B, 頂点D, 頂点G

A. 正三角形

図 4.3: 例題.

ID：＿＿＿

演習タスクA

問題
立方体ABCD - EFGHがある.
以下の3点を通る平面で立方体を切断した時の断面図の図形の厳密な名前を答えてください.

(i) 辺BCの中点，辺CDの中点，辺CGの中点

A.＿＿＿＿＿＿＿＿

(ii) 頂点B，辺ADの中点，辺EHの中点

A.＿＿＿＿＿＿＿＿

(iii) 頂点A，辺BFの中点，頂点G

A.＿＿＿＿＿＿＿＿

(iv) 辺ABの中点，辺ADの中点，頂点F

A.＿＿＿＿＿＿＿＿

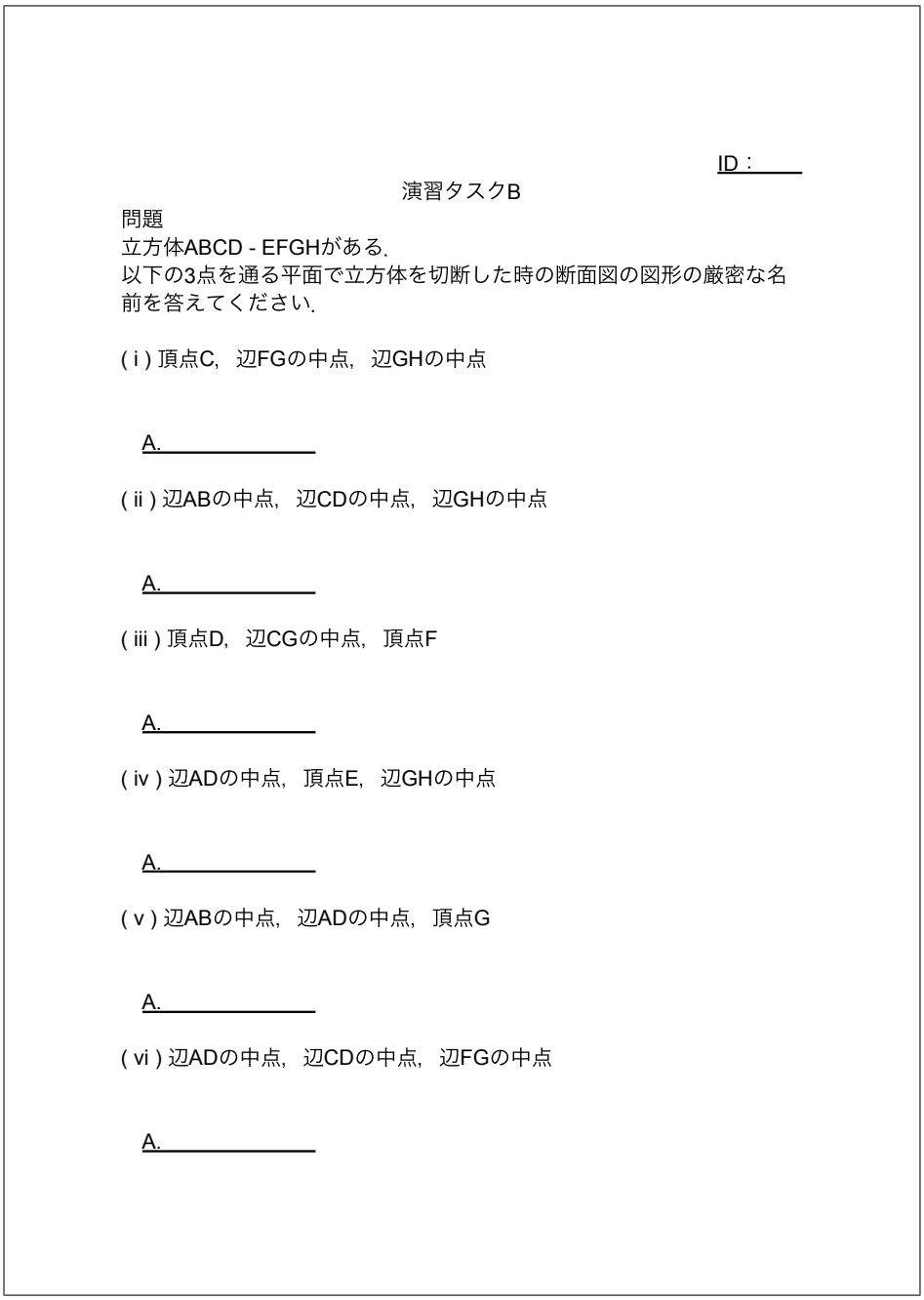
(v) 頂点A，辺FGの中点，辺GHの中点

A.＿＿＿＿＿＿＿＿

(vi) 辺ABの中点，辺DHの中点，辺GHの中点

A.＿＿＿＿＿＿＿＿

図 4.4: 問題 A 立方体の断面図の形状を問う問題.


ID：

演習タスクB

問題
立方体ABCD - EFGHがある.
以下の3点を通る平面で立方体を切断した時の断面図の図形の厳密な名前を答えてください.

(i) 頂点C，辺FGの中点，辺GHの中点

A.

(ii) 辺ABの中点，辺CDの中点，辺GHの中点

A.

(iii) 頂点D，辺CGの中点，頂点F

A.

(iv) 辺ADの中点，頂点E，辺GHの中点

A.

(v) 辺ABの中点，辺ADの中点，頂点G

A.

(vi) 辺ADの中点，辺CDの中点，辺FGの中点

A.

図 4.5: 問題 B 立方体の断面図の形状を問う問題.

この問題は，中学校学習指導要領の数学編 [19] から図形の単元における空間図形を題材とした，立方体の断面図の形状を問う問題である．本問題の作成意図には，立方体の断面図を求める過程を通じて，空間図形の性質および平面図形の関係性を理解し，図形に関する基礎的な知識および技能を身に付けられたかどうかを判断することにある．また，問題を見た時

に断面図の形状を推測し，AR 条件を用いて実際に断面図を描く作業を通じることにより論理的な思考力および判断力が養われたかどうかを判断することもある．これらの意図は，中学校学習指導要領の数学編に示されている「基礎的・基本的な知識・技能の習得」および「思考力・判断力・表現力等の育成」といった教育目標に合致しており，本問題は教育効果を測定する上において十分な有用性を持つと考えた．問題は紙にて配布し，参加者には解答を紙に書くように指示した．問題用紙の余白にメモ書きは禁止し，条件を用いて解答を導出し，解答のみを記入するように指示した．参加者が各条件を用いて解答を導出している様子を図 4.6, 4.7 に示す．また，問題にはできるだけ早く，答えを求めるように指示した．本番セッション終了後は録画を停止し，参加者には，主観的評価のためにユーザビリティおよび作業負荷に関するアンケートへの回答を求めた．2 問目の演習タスクも，同様の手順によって実施した．すべての条件にて，演習タスクを終えた後，インタビューを行った．

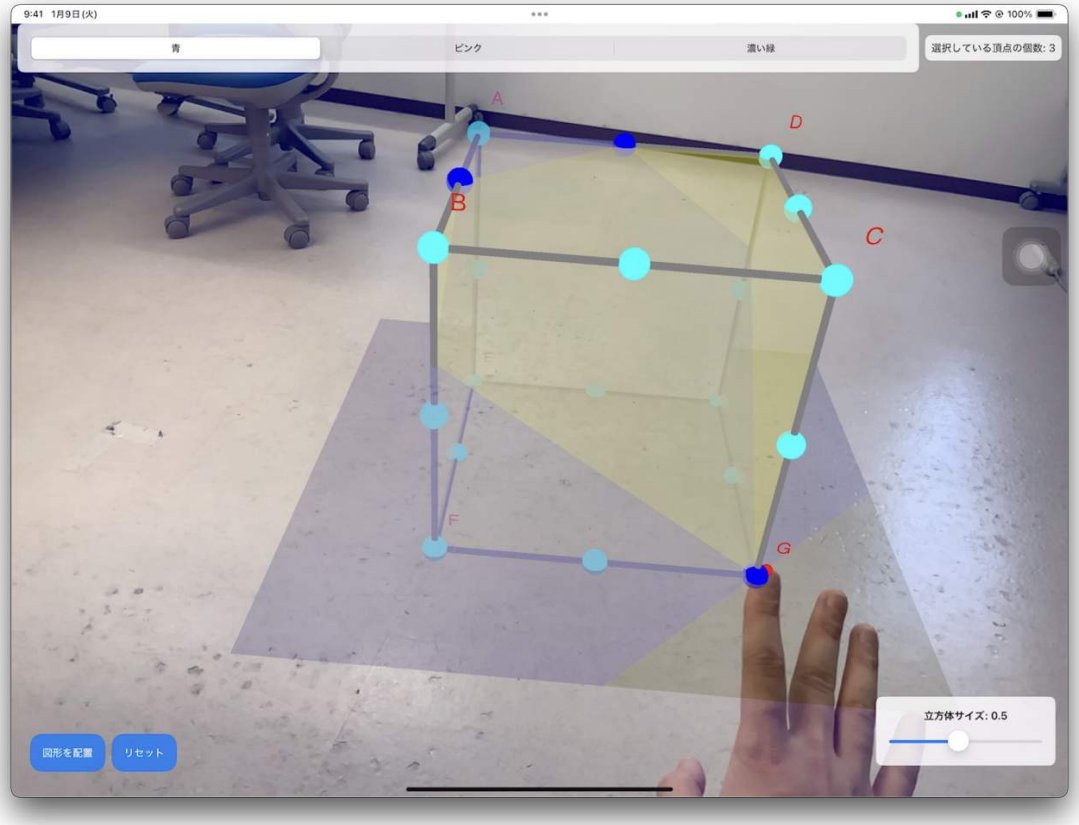


図 4.6: AR 条件を用いた解答の作成.

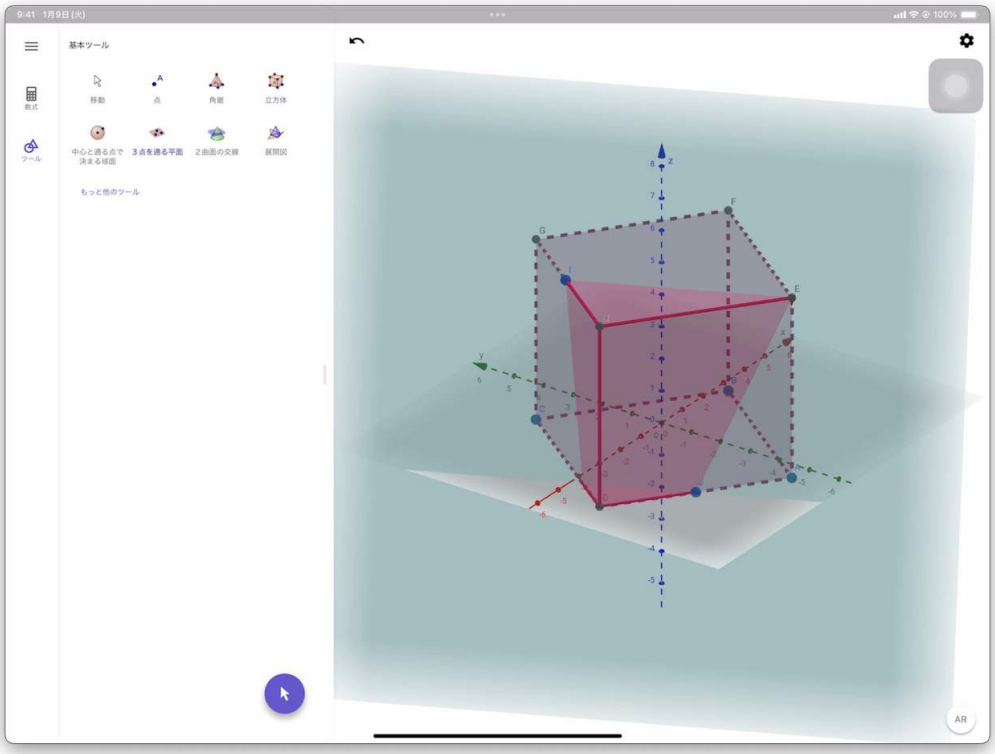


図 4.7: 2D 条件を用いた解答の作成.

4.5 評価項目

本研究における評価指標には，定量評価および定性評価を用いる．定量評価では，正答数，解答時間，ユーザビリティに関して System Usability Scale（SUS）[20]，および作業負荷に関して NASA-Task Load Index（NASA-TLX） [21] を採用する．SUS は，10 項目の質問から構成され，ユーザビリティを 0 から 100 のスケールにて測定するものであり，数値が高いほどユーザビリティが高いことを示す．NASA-TLX は知的・知覚的要求，身体的要求，タイムプレッシャー，作業成績，努力およびフラストレーションの 6 項目によって構成され，主観的な作業負荷を 0 から 100 のスコアにて測定するものであり，数値が低いほど作業負荷がかからないことを示す．本研究では，これら 4 つの指標を用いて定量的な評価を実施する．定性評価では，インタビューを行い，以下の項目について参加者から詳細な意見を収集する．

- AR 条件の良かった点
- AR 条件の悪かった点
- 2D 条件の良かった点

- 2D 条件の悪かった点
- どちらの条件を好むか
- 好みの理由
- AR 条件に関する改善点
- 実験全体に関する意見

インタビューを採用した理由は，アンケート形式および文章での回答に比べ，短時間かつ具体的なフィードバックを得られるためである．また，取得した情報を正確に分析するため，本研究ではインタビュー内容を録音し，その後の解析に用いる．これらの定量評価および定性評価を組み合わせることにより，AR 条件の有効性および改善点を包括的に検討する．

4.6 実験前アンケート

事前アンケートの質問項目を以下に示す．

- 年齢
- 性別
- 数学ソフトウェアの利用頻度

数学ソフトウェアの利用頻度については，参加者がアプリケーションを操作する際の慣れおよび経験を示す指標として重要であると判断したため，質問項目に採用した．利用経験の多寡がタスク遂行に影響を与える可能性があり，この情報を収集することによって，結果の解釈において重要な要因として考慮できる．また，参加者間においてタスク成績に著しい差異が認められた場合，その要因として利用頻度の差が関連している可能性もある．

第5章　実験結果および考察

本節では，実験によって得られた各条件における正答数，解答時間，SUS，NASA-TLX のスコア，および統計解析の結果を示す．また，それらの結果から得られる考察を述べる．なお，統計解析において，有意水準を 0.05 とした．

5.1　正答数

各条件ごとの全参加者の正答数の平均値を図 5.1 に示す．4.4 節に示す通り，問題数は全 6 問である．AR 条件では，5.7 問（$SD = 0.48$ 問），2D 条件では，5.2 問（$SD = 1.87$ 問）であった．1 つの要因（AR 条件および 2D 条件）が正答数に影響を及ぼすかどうかを調査するために，それぞれの条件に対して正規性が認められなかったため，ウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ，有意差は見られなかった．（$p = 0.75 > 0.05$）

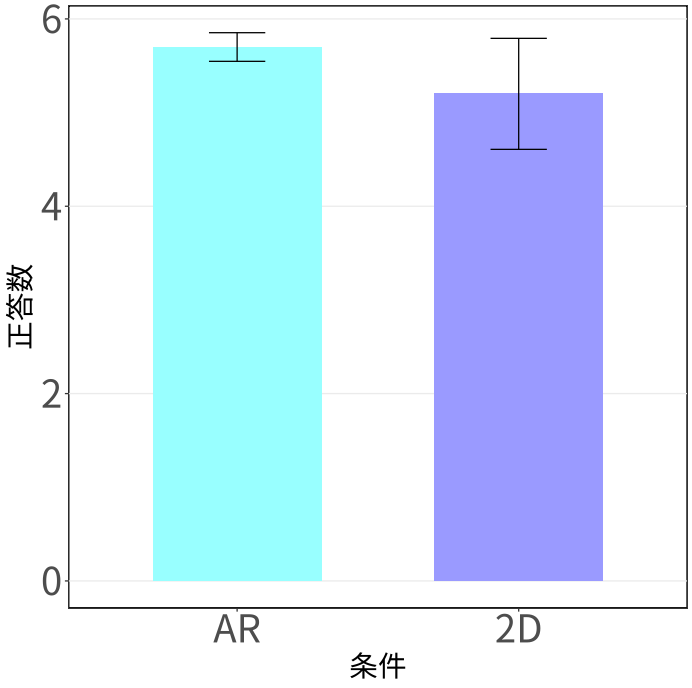


図 5.1: 各条件における正答数の平均値.

この結果から，AR 条件および 2D 条件を比べて有意に高い正答数が得られることは示されなかった．その要因としては，参加者の人数，参加者の偏り，および問題の難易度などが考えられる．しかし，AR 条件においても 2D 条件と同等の学習効果が得られることが示唆される．2D 条件に比べ，AR 条件は現実空間に重ね合わせた立体図形を直接操作できるため，空間認識能力の育成および学習のモチベーション向上といった付加的な利点が期待できる．

5.2 解答時間

参加者の解答における以下の 3 つの時間を用いることにより，本アプリケーションを評価する．

- 操作時間：アプリケーションを操作している時間
- 思考時間：問題の解答を思考している時間および問題用紙に解答を記入している時間
- 合計時間：上記 2 つを合計した時間

各条件の全参加者の操作時間，思考時間，および合計時間の平均値を図 5.2，図 5.3，および図 5.4 に示す．操作時間において，AR 条件では，408.5 秒（SD = 205.53 秒），2D 条件では，221.5 秒（SD = 89.81 秒）であった．思考時間において，AR 条件では，160.3 秒（SD = 49.83 秒），2D 条件では，157.9 秒（SD = 42.70 秒）であった．合計時間において，AR 条件では，543.1 秒（SD = 212.19 秒），2D 条件では，365.6 秒（SD = 98.43 秒）であった．1 つの要因（AR 条件および 2D 条件）がそれぞれの時間に影響を及ぼすかどうかを調査するために，操作時間における AR 条件&2D 条件，思考時間における AR 条件&2D 条件，および合計時間における AR 条件&2D 条件に対して，正規性のある条件に対応のある t 検定，正規性のない条件にウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ，操作時間および合計時間において有意差があった．（操作時間：$p = 0.04 < 0.05$，合計時間：$p = 0.04 < 0.05$）思考時間においては，有意差は見られなかった．（$p = 0.87 > 0.05$）

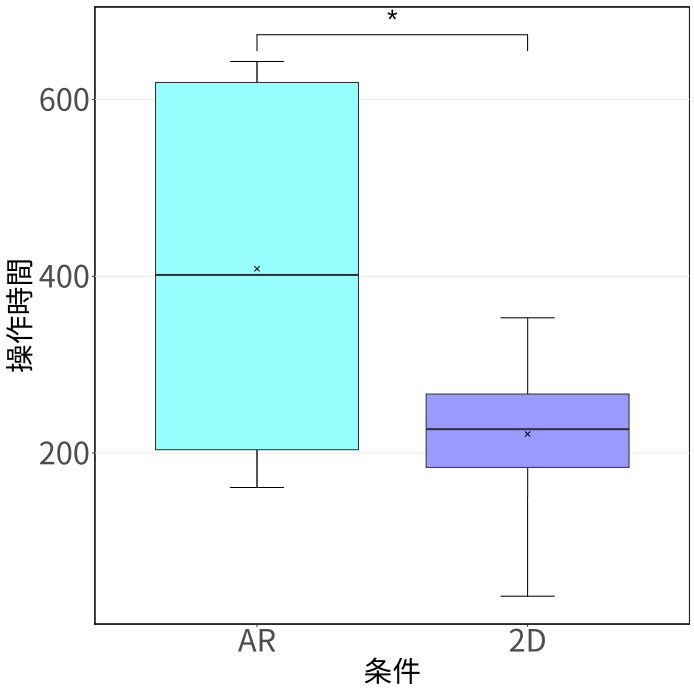


図 5.2: 各条件における操作時間の平均値.

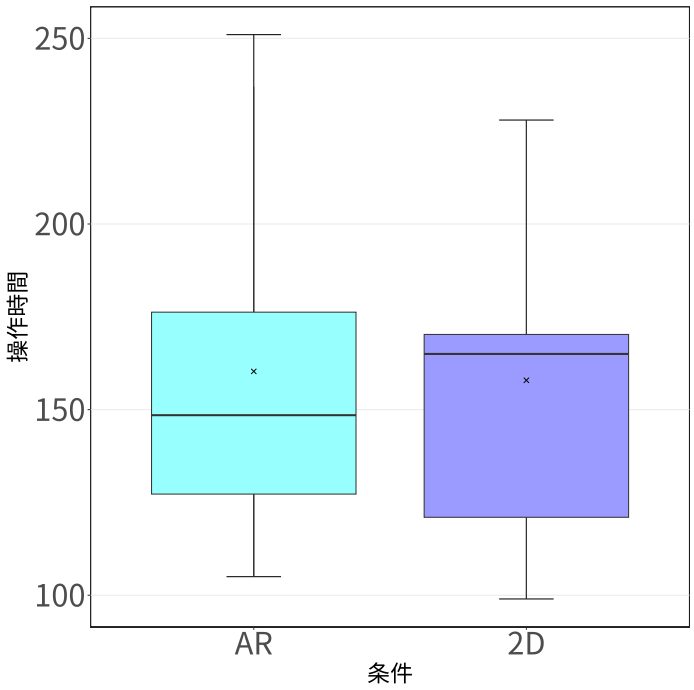


図 5.3: 各条件における思考時間の平均値.

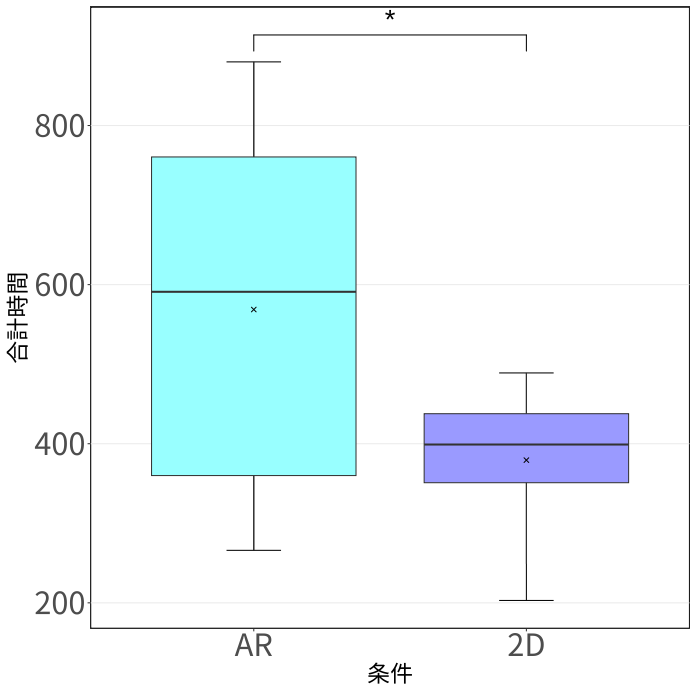


図 5.4: 各条件における合計時間の平均値.

また，AR 条件において数学ソフトウェアの利用経験の多寡がタスク遂行に影響するかどうかを調べるために，事前アンケートの際に数学ソフトウェアの利用頻度に対して，全く使ったことがないと回答した 3 名を A 群，年に 1 度使用すると回答した 6 名を B 群，月に 1 度使用すると回答した 1 名を C 群に分類した．各群の操作時間，思考時間，および合計時間の平均値を図 5.5，図 5.6，および図 5.7 に示す．操作時間において，A 群では，431.3 秒（$SD = 219.92$ 秒），B 群では，420.3 秒（$SD = 223.68$ 秒），C 群では，236.0 秒，であった．思考時間において，A 群では，175.2 秒（$SD = 60.53$ 秒），B 群では，130.7 秒（$SD = 5.51$ 秒），C 群では，160.0 秒，であった．合計時間において，A 群では，606.5 秒（$SD = 248.31$ 秒），B 群では，550.7 秒（$SD = 224.30$ 秒），C 群では，396.0 秒，であった．1 つの要因（A 群，B 群，および C 群）がそれぞれの時間に影響を及ぼすかどうかを調査するために，操作時間における A 群&B 群&C 群，思考時間における A 群&B 群&C 群，および合計時間における A 群&B 群&C 群に対して，等分散性が認められたため，クラスカル・ウォリス検定を行ったところ，有意差は見られなかった．（操作時間：$p = 0.85 > 0.05$，思考時間：$p = 0.59 > 0.05$，合計時間：$p = 0.78 > 0.05$）

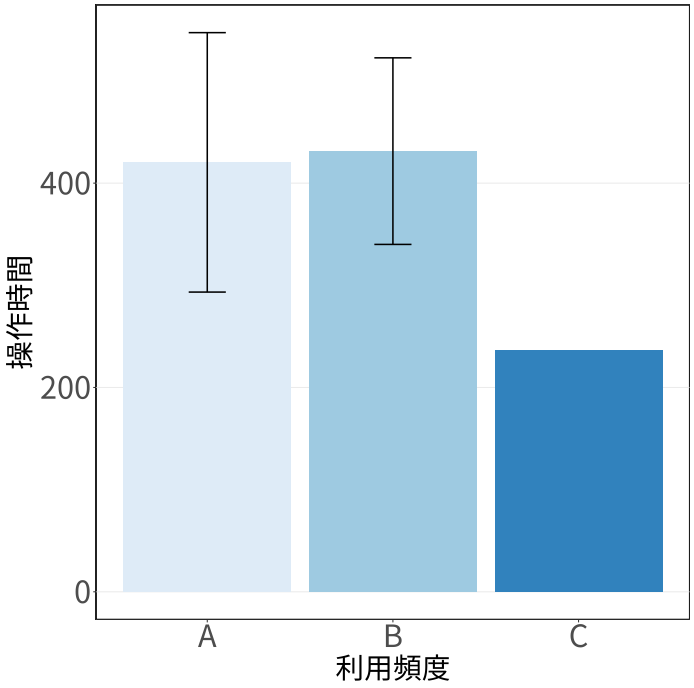


図 5.5: 数学ソフトウェア利用経験別の操作時間の平均値.

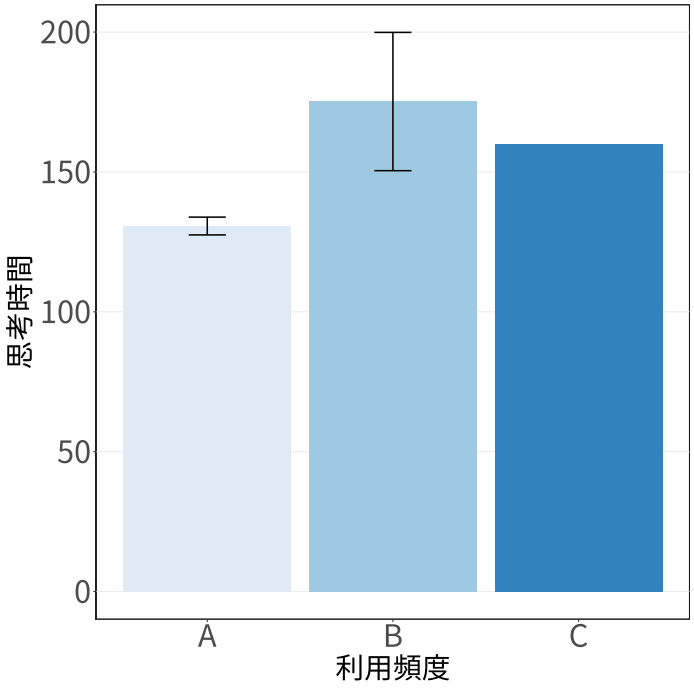


図 5.6: 数学ソフトウェア利用経験別の思考時間の平均値.

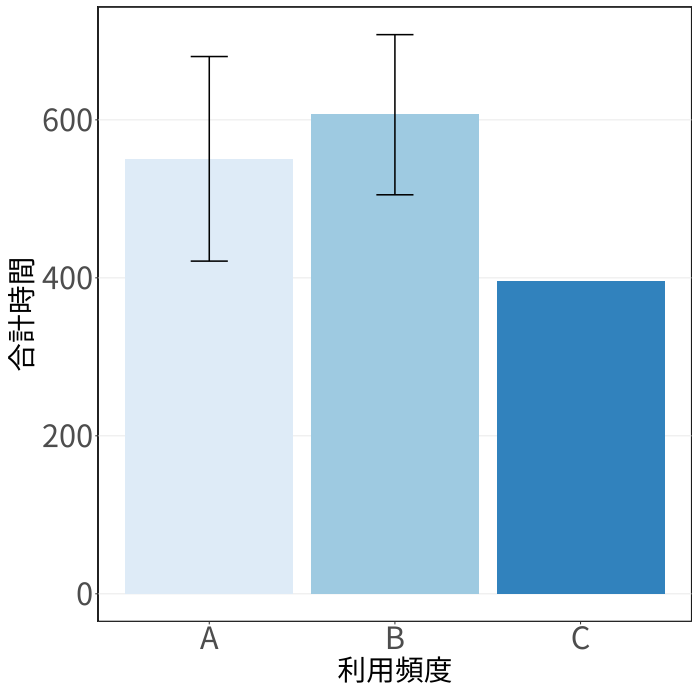


図 5.7: 数学ソフトウェア利用経験別の合計時間の平均値.

本実験では，AR 条件の操作時間が 2D 条件に比べて大幅に長く，それに伴い合計時間も長くなったことが明らかになった．この原因には，AR 環境の構築および平面の検出に時間を要することに加え，本アプリケーションに不具合が多く，複数回の再起動が必要になった点が大きく影響していると考えられる．特に AR は，カメラ映像の取得および空間認識の処理など，2D ソフトウェアにはない追加の処理が存在するため，これらの要因が操作時間を押し上げた可能性が高い．一方，思考時間には有意差がみられなかったことから，AR 環境上にて立体図形を操作することが学習者の思考過程および問題の理解に要する時間を増やすわけではないと考えられる．すなわち，AR 条件および 2D 条件は，同程度の時間にて解答に至ることが示唆される．これは，AR 条件であっても学習者が問題を把握および理解するプロセスに大きな差異は生じず，2D 条件と同等の教育効果を発揮していることを示すものである．今後，本アプリケーションの不具合および動作安定性を改善し，AR 環境下でのシステム操作に要する時間を削減できれば，操作時間および合計時間は 2D 条件に近づく可能性がある．加えて，AR 特有の立体的な操作感および空間認識の促進効果を活かすことにより，さらに深い学習効果が期待され，思考時間も短くなる可能性がある．したがって，システムの安定性向上および操作性の向上が課題であり，これらが達成されれば AR 条件による学習支援がより効果的に機能する可能性があると考えられる．

5.3 ユーザビリティ

各条件の全参加者の SUS スコアの平均値を図 5.8 に示す．AR 条件では，50.75（$SD = 19.33$），2D 条件では，70.00（$SD = 19.80$）であった．2 つの条件がユーザビリティに影響を及ぼすかどうかを調査するために，それぞれの条件に対して正規性が認められたため，対応のある t 検定を行ったところ，有意差が見られた．（$p = 0.04 < 0.05$）

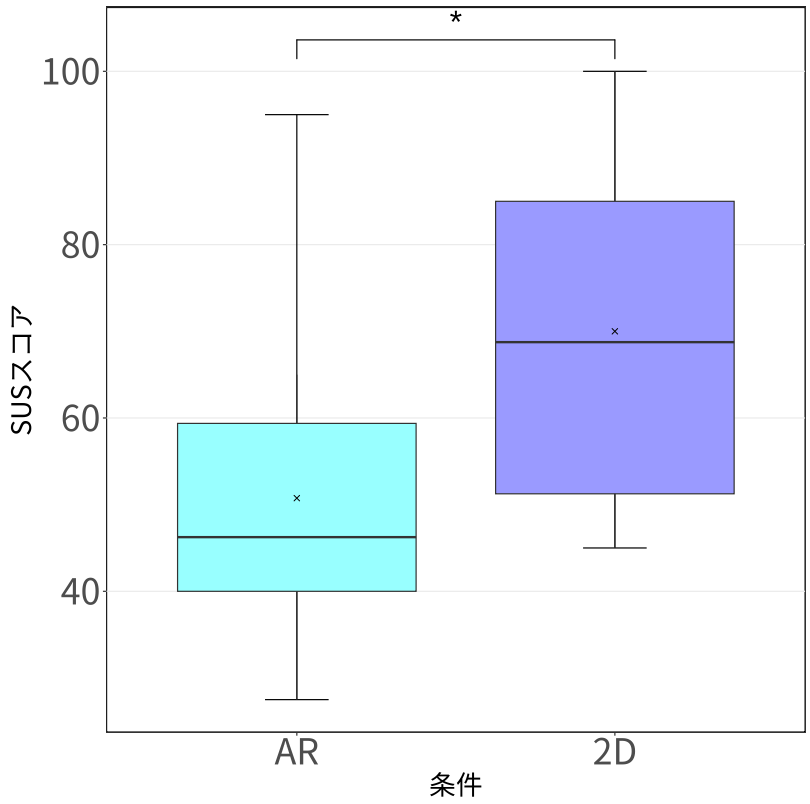


図 5.8: 各条件における SUS スコアの平均値.

SUS スコアに関して，2 つの条件の相互作用における有意差が見られ，AR 条件および 2D 条件を比べて有意にスコアが低いことが示唆された．これは，AR 条件におけるハンドトラッキングの精度が不安定であることから，参加者が立方体の点を選択するのに苦労したためと考えられる．また，SUS スコアの解釈として，平均的な SUS スコアは約 70 であり，70 を超えると一般的に良好であり，50 以下のスコアは，SUS スコアが低く，ユーザビリティに潜在的に深刻な欠陥があるとみなされる [22]．したがって，AR 条件では，ユーザの満足度を高めるために大幅な改善が必要であることが示唆された．

5.4 作業負荷

各条件の NASA-TLX の総合スコアにおける平均値のグラフを図 5.9 に示す．AR 条件では，65.33（*SD* = 17.16），2D 条件では，40.67（*SD* = 17.35）であった．2 つの条件がユーザビリティに影響を及ぼすかどうかを調査するために，それぞれの条件に対して正規性が認められたため，対応のある t 検定を行ったところ，有意差が見られた．（$p = 8.32 \times 10^{-5} < 0.05$）加えて，下位尺度のスコアのグラフを図 5.10 に示す．下位尺度それぞれに対して，正規性のある条件に対応のある t 検定，正規性のない条件にウィルコクソンの符号付順位和検定を行ったところ，身体的要求，フラストレーション，および努力において，有意差が見られた．（身体的要求：$p = 1.63 \times 10^{-5} < 0.05$，フラストレーション：$p = 3.90 \times 10^{-3} < 0.05$，努力：$p$ =$4.27 \times 10^{-3} < 0.05$）知的・知覚的要求，タイムプレッシャー，および作業成績においては，有意差は見られなかった．（知的・知覚的要求：p =0.13 > 0.05，タイムプレッシャー：p =0.07 > 0.05，作業成績：p =0.13 > 0.05）

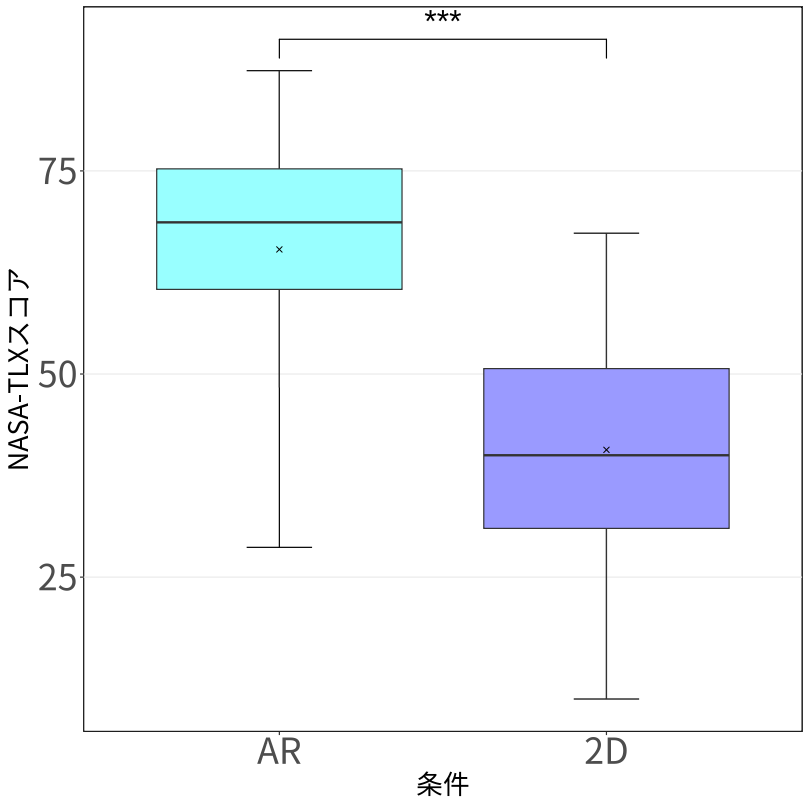


図 5.9: 各条件における NASA-TLX 総合スコアの平均値.

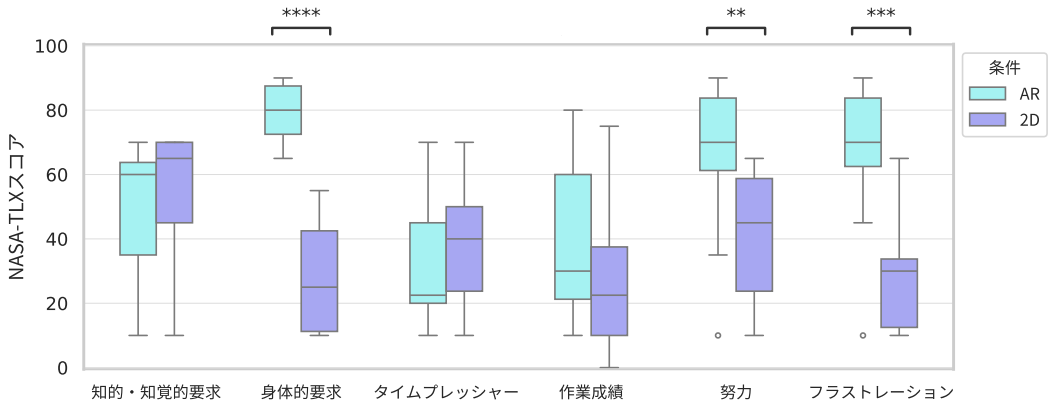


図 5.10: 各条件における NASA-TLX 下位尺度の平均値.

この結果から，作業負荷に関して，AR 条件および 2D 条件を比べて身体的要求，フラストレーション，および努力の項目において，有意に高い作業負荷がかかっていることが示された．これは，2D 条件と比較して，AR 条件では iPad を把持した状態にて使用するため，腕の疲労が身体的要求に及ぼす影響が大きかったためと考えられる．また，AR 条件におけるハンドトラッキングが不安定であることおよび不具合によって，参加者が点の選択に苦労したことがフラストレーションの項目に大きな影響を及ぼしたためと考えられる．

5.5 フィードバック

4.5 節にて述べたインタビューの結果を示す．

5.5.1 AR 条件

インタビューにおける AR 条件に対するフィードバックを示す．AR 条件の利点には，直感的な操作感および学習の楽しさに関する肯定的な意見があった．操作面において「選択できる点が決まっていて厳密に選択できる」（P1, P9, P10），「自分が動くことでいろいろな角度から見られる」（P2, P3, P7），「AR ならではの現実空間と重ねた観察ができる」（P3, P5），「指を近づけるだけという直感的な操作が良かった」（P3），「思ったより使いやすかった」（P4），「選択メニューがなくシンプル」（P6）といった評価があった．感覚的な面では，「使っていて楽しく，そこに実物があるような感覚が味わえる」（P5, P8），「複数人で同時に使う場合に良さそう」（P3）という意見が見られた．これらの発言からは，現実空間および AR 空間の重なり合う感覚ならびに AR による新鮮な操作体験が，多くの参加者にとって魅力的に映ったことがうかがえる．

一方，AR 条件の欠点には，多くの意見が挙げられた．特に技術的課題および身体的負担に関する懸念が多く示されていた．身体的な面では「操作時に iPad が重くて手首や腕が疲れる」（P1, P2, P4, P5, P6, P8, P9, P10）「背後に回り込むのが大変」（P4），「画面を近くで見ていたため目が疲れる」（P8）といった意見があった．システム面では「不具合が多い」（P1, P2, P7），「機能が少なく，メニュー選択のような UI がない」（P6）「人差し指の先端および表示される赤い点が一致しないので，どちらを信用すればいいかわからない」（P8），「ハンドトラッキングの精度が怪しい」（P10）といった問題が示された．操作面では「真横から見た時に座標が重なるため誤選択が起きやすい」（P2），「操作性が低い」（P7），という批判があった．図形の理解という観点では「色の問題かもしれないが，断面がわかりにくかった」（P1, P4）という指摘があった．その他に「使用している間に問題を忘れてしまう」（P1）というコメントも見られた．こうした意見を踏まえると，AR による新たな学習体験を提供する一方，ハードウェアの重量，操作精度，および UI 設計などの改善が強く求められていると考えられる．特に，長時間での使用時の疲労感および視認性の問題は，学習効果を損ねるリスクになりうるため，今後の改良において優先的に対策を検討すべきである．

5.5.2　2D 条件

インタビューにおける 2D 条件に対するフィードバックを示す．2D 条件の利点には，操作性の高さ，視覚的理解のしやすさ，さらに身体的負担の軽さに関する肯定的な評価が見られた．操作の容易さという観点から「単純な操作のためにわかりやすい」（P1, P2, P4, P7, P9），「機能が充実していてその場で回転できる」（P3, P4, P10），「万能に使えそう」（P3），「立方体の辺上に中点を追加できる機能が便利だった」（P4）といった好意的なコメントが示されている．図形の理解の面では「立体図形を自由に動かせるので視覚的に理解しやすい」（P1），「奥行きも特に課題は感じなかった」（P8），「選択するとすぐ平面が確認できる」（P10）といった評価が挙がった．さらに，「持たなくて良いため身体的負担が少ない」（P1, P9），「図形を回す時も負担が少ない」（P5），「最小限の労力で使える」（P6）という声も多く，身体的負荷を感じにくい点が評価された．これらの意見から，2D 条件が持つ操作上の安定性および豊富な機能が，ユーザにとって十分な利点として捉えられていることがわかった．また，机上で操作できるという環境的な要因が，身体的負担の軽減にも大きく貢献していると推察される．

一方，2D 条件の欠点では，機能過多による複雑さ等に関して懸念が示されていた．操作に関しては「図形を回転や移動させるたびに操作モードを切り替える必要があって面倒」（P4），「自由度が高すぎて中点を厳密に取りにくい」（P9），「奥の点を選択しづらい」（P9），「A を選ぼうとしたら，A 付近の異なる位置を選択してしまい，正確に点を選ぶのが難しい」（P10）という不満が示された．図形の理解の面では「点を作った時に本当に中点かどうかがわかりにくい」（P1），「テストのときに iPad がないと解けないかもしれない」（P2）「奥行きがわかりにくいかもしれない」（P6）という声が上がった．システム的な側面には「機能が多すぎて逆に複雑に感じる」（P3, P5），「最初の立方体の位置が座標軸中心になるため重要になる」（P7）といったコメントもあった．これらの指摘からは，2D 条件が豊富な機能ゆえに操作が煩雑化

しやすい傾向が見受けられる．また，操作モードの切り替えおよび自由度の高さが，本来の目的とは逆に混乱を招く可能性があると考えられる．

5.5.3 参加者の好み

好みに関しては，参加者 10 名のうち，6 名が「2D 条件が良い」と答えた．2D 条件を好む理由には，「操作性に優れている」（P1, P7, P10），「身体的負担が少なく問題に集中しやすい」（P1, P5），「今回の問題なら 2D 条件の機能で十分であり，AR の必要性を感じなかった」（P2），「視点移動が楽で軸の表示もあり直感的に理解しやすい」（P4）が挙げられた．一方，1 名は「AR 条件が良い」と答えた．AR 条件を好む理由には，「新しくてわくわく感がある」（P6）と述べていた．残りの 3 名は，場面による使い分けを提案し，「複数人で共有し，楽しみながらの学習には，AR 条件が向いている」（P3, P8），「真面目に勉強するときは 2D 条件が良い」（P3, P8），「システム設計の方向性としては AR 条件の方が好みだが，安定性に優れているのは 2D 条件だった」（P9）とコメントした．これらの意見から，操作性および安定性を重視する参加者ほど 2D 条件を支持していた．新鮮さおよび学習の楽しさを求める参加者は，AR 条件に魅力を感じたことが窺える．

5.5.4 AR 条件の改善点

AR 条件の改善点として，多くの意見があった．身体的負担に関して「スマホ版で軽量化を図りたい」（P1, P2, P8），「片手で持たずに済むようスタンドやアームなどの利用も考慮すべき」（P9, P10）といった改善案が挙げられた．また，「立方体をディスプレイ上にて移動と拡大縮小する機能」（P1, P4, P8, P9），「立方体をディスプレイ上にて回転する機能」（P4, P5, P9），「不具合を修正する」（P1, P2），「指の認識精度を上げる」（P7, P8），「メニュー選択の UI が欲しい」（P6），「中点以外の点も自由に打てるようにしたい」（P9）などのシステム面での要望が挙げられた．操作面に関して「選択しやすさを向上させる」（P3, P4, P7, P8, P9, P10）という声が強く示された．さらに，「断面の色の差を明確にする」（P1, P4, P5）といった視覚的把握の改善や，「HMD を用いた完全な 3 次元操作」（P2），「複数デバイスでの同時共有」（P3）といった拡張的な提案もあった．これらの意見から，UI およびユーザエクスペリエンスの充実を図るとともに，ハードウェア的な制約をどう克服するかが大きな課題であることがわかった．機能追加および精度向上のみならず，ユーザが長時間使用してもストレスなく利用できるシステム設計が，AR 条件に不可欠になると考えられる．

5.6 考察

本研究の実験結果を基に考察を述べる．AR 条件および 2D 条件を比べて正答数および思考時間において有意差が見られなかった一方，操作時間と合計時間においては有意に長く，NASA-TLX の身体的要求およびフラストレーションが高まることが明らかとなった．これは，

AR 環境特有のカメラ映像処理およびハンドトラッキングの不安定さに起因すると推察される．特に，AR 条件では iPad を持ちながら操作する必要があり，長時間の使用に伴い身体への負担が増加した可能性がある．さらに，ハンドトラッキングの精度が低く，点の選択に試行錯誤を要したことが操作時間の延長につながったと考えられる．また，思考時間に有意差が見られなかったことから，AR 環境上での図形操作が課題解決の思考プロセスに大きな影響を及ぼすわけではないことが示唆される．すなわち，AR 条件であっても 2D 条件と同様に，空間的な問題に対して論理的にアプローチできる可能性がある．このことは，操作の安定性が向上すれば，AR の特性を活かしたより効果的な学習支援が実現できると考えられる．一方，ユーザビリティの面では，AR 条件は 2D 条件に比べて低く評価されたが，インタビューでは「iPad および体を動かしながら理解を深められる」「断面の形状をイメージしやすい」などの肯定的意見を得られたことから，操作精度およびシステム安定性が向上すれば，AR の空間的操作が学習効果をさらに高める可能性が示唆される．

また，本研究にて扱った立方体の断面図を問う問題は，中学校学習指導要領 [19] に示される空間図形単元の教育目標，すなわち「基礎的・基本的な知識・技能の習得」および「思考力・判断力・表現力等の育成」に合致するよう作成している．実験の中で，参加者が AR 上にて断面図を描画しながら「どのように平面が切れるか」を論理的に推測する様子が観察され，空間図形の性質を自ら確かめる学習意欲に寄与する可能性が示された．また，AR 条件において数学ソフトウェアの利用経験の多寡およびタスク遂行時間の間に有意差は見られず，AR の操作に大きな違いは生じなかった．本システムの今後の改良により身体的負担およびトラッキング誤差が軽減されれば，より幅広い学習者に対して，思考力および立体図形の理解を促進する有効な手段になりうると考えられる．

第6章　今後の課題

本研究では，中等教育の数学学習を支援する立体図形学習のためのタブレットコンピュータ用 AR アプリケーションの教育効果を開発し，2D 条件との比較実験を通じて教育効果を検証した．実験の結果，AR 条件は 2D 条件と同等の正答率を示した一方，デバイスを長時間手で保持し続けることによる腕の疲労および，ハンドトラッキングが不安定な場面での誤操作に関する問題が明らかとなった．さらに，NASA-TLX による作業負荷の評価でも，身体的要求およびフラストレーションが増大している傾向が示され，これらが学習効率およびモチベーションに影響を与える可能性が示唆された．加えて，不具合が発生した際の再起動が操作時間の増大につながるなど，学習効果を安定的に得るためのシステム信頼性および操作性に関しても課題が確認された．

操作面においては，立方体の頂点および中点を直接選択する機能の実装など，AR 特有のインタラクションを導入したものの，参加者からは機能およびメニューが少なく操作性が限定的であるとの指摘があった．また，「他の立体図形も扱いたい」「中点以外の任意の点を打ちたい」などの要望も寄せられ，今後は球および錐体などの多様な立体図形への対応，補助線および垂線の可視化機能を含めた拡張の必要性が高いことが分かった．立体図形を移動および回転する際のモード切り替えを直感的に操作できる UI 設計が求められる．こうした改善に加え，デバイスを長時間保持しなくてもよいスタンドの導入，ハンドトラッキングの精度向上，およびユーザへのフィードバック手段の検討が，学習者の身体的および心理的負担を軽減するために重要な課題となる．

今後は，より多様な学習者（中学生および高校生など）を対象とし，タスクの難易度および立体図形の種類を増やすことによって，さらなる実践的なデータ収集および学習効果の検証を行う必要がある．また，学校現場での活用を見据えた場合，複数のデバイス間において同一の立体図形をリアルタイムに共有できる機能および教師が生成した図形を生徒と共有できる機能を整備することにより，指導者の負担を軽減しながら学習効果を高めることが期待される．最終的には，アプリケーションの安定性および機能性をさらに向上させ，指導方法およびカリキュラムとの連携を図りながら，AR を活用した空間図形学習の可能性をより広げていくことが本研究の大きな目標となる．

第7章　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，立体図形学習のためのタブレットコンピュータ用 AR アプリケーションの教育効果の開発を行った．具体的には，ARKit および 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に設計した．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．例として，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，空間の構造および関係性をより深く理解することができる．AR 上の三次元のような体験によって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の理解が，促進されることを期待できる．

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，川口一画先生，高橋伸先生には多大なご意見とご指導を頂きました．心から感謝いたします．特に，志築文太郎先生には，研究の進め方，論文執筆をはじめとした研究の基礎をご指導いただきました．さらに，研究の相談および研究生活に関して多くのご助言を頂きました．ここに深く感謝の意を表します．

インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には研究生活においてお世話になりました．また，WAVE チームの皆様にはチームゼミにおけるご意見および論文の添削といった研究に関する多くの支援だけでなく，研究室においても多くのご助言を頂きました．深く感謝いたします．特に，佐藤玲生氏には研究方針および論文執筆など本研究における重要な部分において多くのアドバイスを頂き大変お世話になりました．多大なご協力に心からお礼申し上げます．

最後に，学生生活においてお世話になった皆様，そして，学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝申し上げます．

参考文献

[1] Mark H. Ashcraft and Alex M. Moore. Mathematics Anxiety and the Affective Drop in Performance. *Journal of Psychoeducational Assessment*, Vol. 27, No. 3, pp. 197–205, 2009.

[2] Markus Hohenwarter and GeoGebra Team. GeoGebra - the world’s favorite, free math tools used by over 100 million students and teachers, 2001. https://www.geogebra.org/?lang=ja 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[3] Desmos Studio PBC. Desmos — 美しい無料の数学ツール, 2011. https://www.desmos.com/calculator 参照: 2025 年 02 月 02 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, 2019.

[5] Frank Balcavage and Jake Kuehner. Mathway — グラフ作成計算機, 2002. https://www.mathway.com/ja/Graph 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[6] 友田勝久. WelCome to GRAPES, 2021. https://tomodak.com/grapes/ 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[7] 飯島康之. GC/html5, 2024. https://www.yiijima-gc.org/ 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[8] 阿原一志. PointLine - Dynamic Geometry Software With Bidirectional Modules, 2018. https://aharalab.sakura.ne.jp/PointLine/index.html 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[9] Jürgen Richter-Gebert and Ulrich Kortenkamp. Cinderella: Cinderella, 1998. https://cinderella.de/tiki-index.php 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[10] Keith Jones and Marianna Tzekaki. *Research on the Teaching and Learning of Geometry*, pp. 109–149. SensePublishers, Rotterdam, 2016.

[11] Neil Chulpongsatorn, Mille Skovhus Lunding, Nishan Soni, and Ryo Suzuki. Augmented Math: Authoring AR-Based Explorable Explanations by Augmenting Static Math Textbooks.

In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, No. 92 in UIST '23, pp. 1–16, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.

[12] GeoGebra Team. GeoGebra 3D Calculator. *Android App*, version 5.0, 2024. https://play.google.com/store/apps/details?id=org.geogebra.android.g3d 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[13] Murat Perit Yağmur, Serapband Çakır. Usability Evaluation of a Dynamic Geometry Software Mobile Interface Through Eye Tracking. In Panayiotis Zaphiris and Andri Ioannou, editors, *Learning and Collaboration Technologies*, pp. 391–402, Cham, 2016. Springer International Publishing.

[14] 文部科学省. GIGA 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 参照: 2025 年 02 月 02 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 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[16] Apple Inc. ARKit 6 - Apple Developer, 2024. https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/arkit/ 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[17] Apple Inc. SceneKit — Apple Developer Documentation, 2024. https://developer.apple.com/documentation/scenekit 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[18] Apple Inc. Vision — Apple Developer Documentation, 2024. https://developer.apple.com/documentation/vision 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[19] 文部科学省. 中学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説 数学編, 2019. https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2019/03/18/1387018_004.pdf 参照: 2025 年 02 月 02 日.

[20] John Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.

[21] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Advances in Psychology*, Vol. 52, pp. 139–183. North-Holland, 1988.

[22] Rebecca Grier, Aaron Bangor, Phil Kortum, and S. Peres. The System Usability Scale. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 57, pp. 187–191, 09 2013.

付 録A　実験において用いたアンケート

本研究にて用いた，実験前アンケート，SUS アンケート，NASA-TLX アンケートを示す.

A.1　実験前アンケート

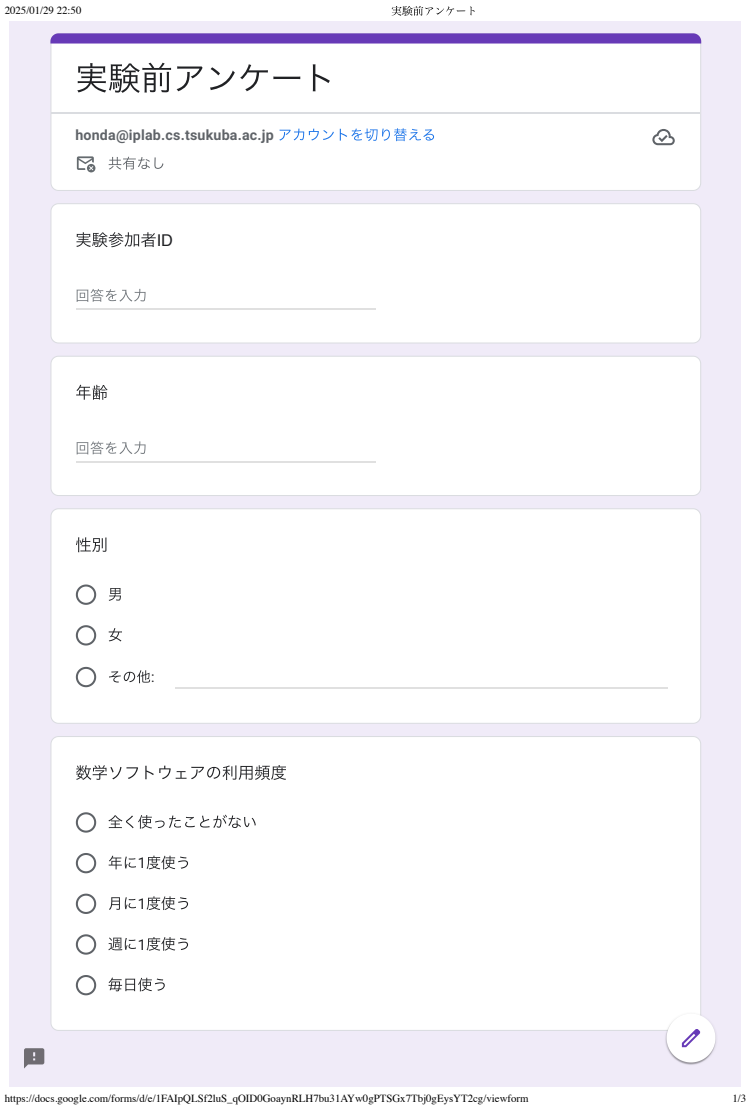


図 A.1: 実験前アンケート．実験の説明を受けたのち，参加者情報，数学ソフトウェアの利用経験に関する質問に回答する．

A.2　SUS アンケート



図 A.2: SUS アンケート-Part 1．条件のユーザビリティに関する質問に 5 段階尺度にて評価する．



図 A.3: SUS アンケート-Part 2.

A.3　NASA-TLX アンケート

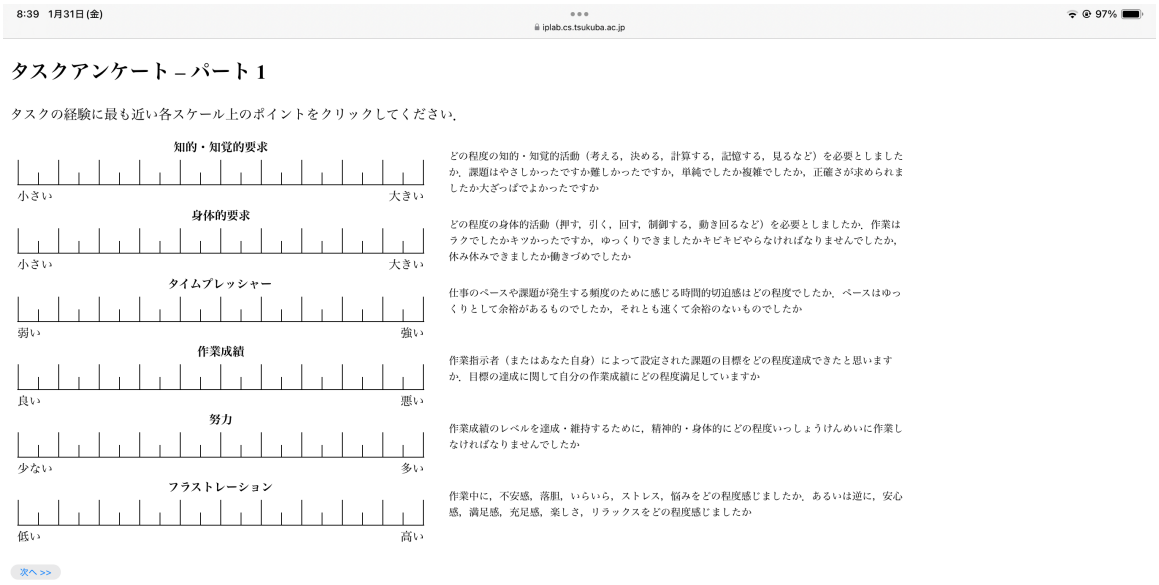


図 A.4: NASA-TLX アンケート-Part 1．6 つの項目に対する回答を行う．

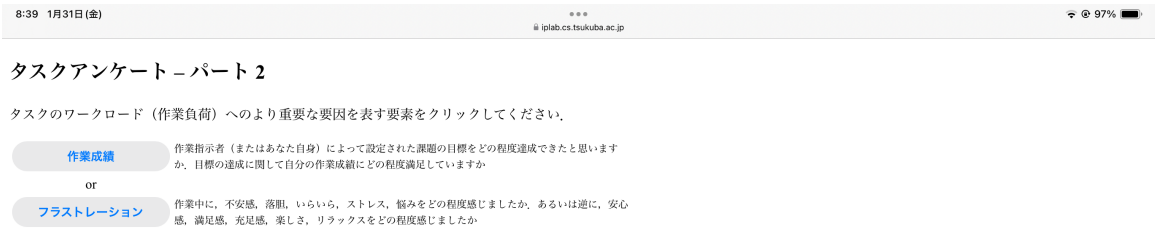


図 A.5: NASA-TLX アンケート-Part 2. Part 1 に示した 6 つの項目のうち，ランダムに表示される 2 つの項目のどちらが重要な要因であるかを選択する. この選択を，全通りに対して行う. 例として,「作業成績」および「フラストレーション」が表示された場合の画面を示す.