

拡張現実感技術を用いた気象現象学習教材の研究

WANG DAYI^{†1} 望月 茂徳^{†2} 大島 登志一^{†2}

概要: この研究は、直観的な気象知識の展示を学生に示すため、ユーザが仮想地形を操作によって生成し、その地形における気象現象のシミュレーション結果を観察できるシステムを開発する。シミュレーション対象となる気象現象は、海陸風、山谷風、ヒートアイランド現象などである。地形とシミュレーション結果の生成プロセスは完全に自動化されており、AR (Augmented Reality) デバイスによりユーザに提示される。加えて、知識を理解しやすくする紹介パネルなどの機能も実装する。ユーザ体験とフィードバックによる学習効果と学習意欲向上に対する有効性の検証を行う。

1. はじめに

メディア技術の発展に伴い、教育分野において多くの国々が新たなメディア技術の教育への応用と、それがもたらす教育方法の大きな変革を重視し始めている。日本の例を挙げると、文部科学省が2009年に実施した「教育の情報化に関する手引」に関する検討会[1]において、ICT (Information and Computer Technology) 技術の教育展開における活用のプラスの効果を分析して、ICT技術の教育分野における活用の重要性が明確に指摘され、情報化推進とICT活用が重要な発展方向として位置付けられた。その後も環境整備と関連研究が継続的に推進されている。

AR (Augmented Reality) 技術を含む複合現実感技術は最先端のICT技術と映像技術の重要な構成要素として、教育分野でも同様に重視されている。複合現実感技術を教育プロセスに導入し、インタラクティブ教育や没入型教育の効果を実現しようとする研究は、すでに複数の方向で試みられており、その全体的な有効性が実証されている。AR技術は学習分野における指向性効果分析において、学習効果に中程度の影響を与えることが示されており、最も報告されている利点は「学習効果」と「動機付け」である[2]。山元は複合現実感技術が学習に与える肯定的影響の分析においてAR技術の利用意義は、「現実のオブジェクトの操作による認知負荷の低減」「現実のオブジェクトの学習のための情報拡張」「ロールプレイングにおける現実感の増強」の三点と「全方位から対象オブジェクトを確認できるため、協調学習において有用である」ことにあると指摘している[3]。先端技術の利点を活用できれば、教育方法に新たな変革をもたらし、効率と体験の向上を実現できる。

様々な知識を対象とした新型教育インタラクティブ装置やプログラムの研究が進む一方で、地学教育分野では比較的伝統的な教学方法が普遍的に維持されている。この傾向は気象現象関連の学習においてより顕著である。全国学力学習状況調査によると、近年の理科に関する調査結果に

おいて、地学・気象関連の調査問題の正答率は全体的に低い傾向にある[4]。一方、気象現象は地理的位置や現在の天候などと強く関連しており、学生の実践的学習は経験や現在の環境に限定される。また、気象現象は一般的に規模が大きく、物理化学現象のように実験を行うことが困難である。地学の授業では、気象現象はそのスケールの大きさや相互作用の関係から、多くの場合模式図を教育材料として使って授業を行う。この科学モデル式教育方法は、特に中学生に対し、理解は表面的なものに留まりやすく、深く認識したり応用したりすることが難しいと論述されている[5]。また、各気象現象の知識が分かれていて、生徒が気象現象を関連付けて理解しにくいと考えられる。

先行研究に関して、先端メディア技術やインタラクティブ技術を教育実践に導入する研究は数多く存在し、それぞれが使用する技術の特性に合わせ、体験者の知識理解を強化したり、技術を活用して体験者に新たな視点からの観察方法を提供したりしている。瀬戸崎典夫らは、天体の運動に関する授業にVR (Virtual Reality) 技術を搭載したインタラクティブ教材を使用し、生徒の応用問題の理解を深めることができた[6]。

一色正晴らは、インタラクティブ装置を用いて言語学習教材を開発し、実験を通じてユーザの自律性を高める効果があると結論づけられた[7]。地学の教育分野では、災害予測や現実地形再現に関連する研究が多く行われている一方で、現象の理解に焦点を当てた研究は比較的少ない。例えば五十嵐健夫らは、グラフィックソフトを使って、手書きの地形図を3Dの地形モデルに変換する技術を地学の授業に導入し、生徒が地形をより直感的かつ立体的に理解できるように提示した[8]。これらの先行研究と比べて、このプロジェクトはユーザ自分の自主性を重視し、ユーザが自分の興味から引き出した疑問に対する検証方法を提供して、予想を自分の手で確認できるインタラクティブ性はこの研究の特徴があるところである。また、この研究はAR技術を利用するので、より直感的にユーザに知識と情報を表すことができるし、配列という操作もより簡単に実行でき、装置

^{†1} 立命館大学大学院映像研究科

^{†2} 立命館大学映像学部

の使用法の習得コストと負担が少ないという効果を目指している。

2. 本研究のアプローチ

2.1 概論

この作品は小中学生を主なターゲットとして地学補助教材装置を開発する。地形デバイス、地形カード、AR 装置などの構造とアルゴリズムを含めたインタラクティブ装置を作る。ユーザは、まず自分から予想を行って装置で観察や実験を行う体験を通じて、「海陸風」「山谷風」「ヒートアイランド現象」などの地学・気象に関する知識を身につける。



図 1 本装置の外観

2.2 装置の構造

インタラクティブ装置のハードウェア部分は、地形デバイス、ボタンコンポーネント、AR 装置、パソコンと各地形を代表する地形カードから構成されている（図 2）。

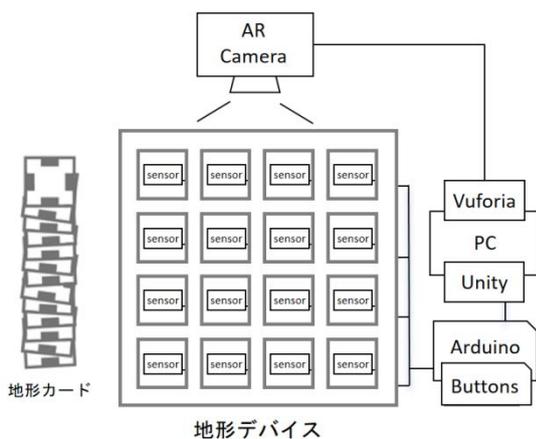


図 2 本装置の構造

地形カードは識別素子があって、地形デバイスには識別機能が実装されている。マイクロコントローラーは各センサが読み取った地形情報を統合して、PC プログラムに送信

する。プログラムは地形データによって仮想地形を生成し、このプロセスで山・水・平原などの地形を代表する地形カードを地形デバイスの溝に入れることで、仮想地形内の対応しているエリアがその地形になれる。そして、生成した仮想地形の中に発生する可能性がある気象現象に対して自作の簡単気象シミュレーションを行い、仮想地形のモデルとシミュレーションの結果を組み合わせることで AR デバイスを通じてユーザに示す。AR 機能の識別マークは、AR 装置を一旦設置する役割もあるフレームに付けるシナリオそのものが担当する。インターフェースに関して、ユーザはボタンコンポーネントを利用して、「昼夜変換」「AR 機能設定」などの機能を制御できる。また、知識を文字で直接教えるため、常にユーザに向けて各現象の定義が書いてある知識紹介パネルも実装する。

シミュレーションアルゴリズムと本研究で伝授する知識内容は、「海陸風」「山谷風」「ヒートアイランド現象」「森林の役割」および「都市緑化」などの現象に関わる。地形の種類設計において、標高の低い順から高い順に 5 種類の基本地形（水面、平原、高原、山原、山頂）を設計した。これらはユーザが地形カードを配置する形式で地形生成に必要なデータを入力する。さらに「都市」と「森林」の 2 種類の追加地形があり、これらは他のインターフェースを通じて生成または削除され、基本地形の地表に生成される。

2.3 体験の流れ

体験の流れは図 3 のように示している。ユーザは、まず頭の中にある地形を想像し、その地形の中で気流がどのように動くかを大まかにイメージする。「地形にはどのような種類があり、それらの特徴や環境への影響は何か」を総合的に想像して、あいまいな予測をする。そして体験が始まって、ユーザは地形カードを配列して地形情報を入力し、仮想地形を作成する。装置は仮想地形とシミュレーションの結果を作成して、結果は AR デバイスを通してユーザに表示する。ユーザはその結果をよく観察し、事前の推測を検証・確認する。こんな流れで地形情報を繰り返して任意に変更し、シミュレーション結果の変化を観察することで、気象学の知識を深めることができる。また、プロジェクトには学習進展確認システムも実装されて、実績をシナリオと利用して、各種現象の習得度を一つずつ確認して、すべての現象に関する知識を習得することとすべての実績を達成することを目標として、このプロジェクトを体験するのも良い方法である。

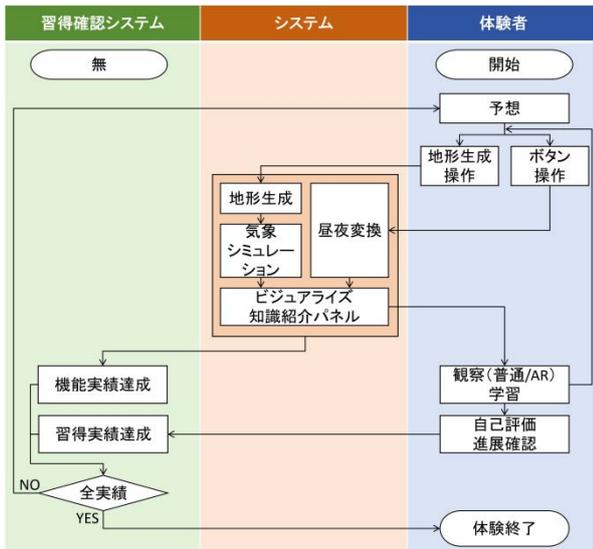


図 3 体験の流れ

3. システム構成

3.1 システムの概要

システム構成は主に四つに分類できる。(図 4)

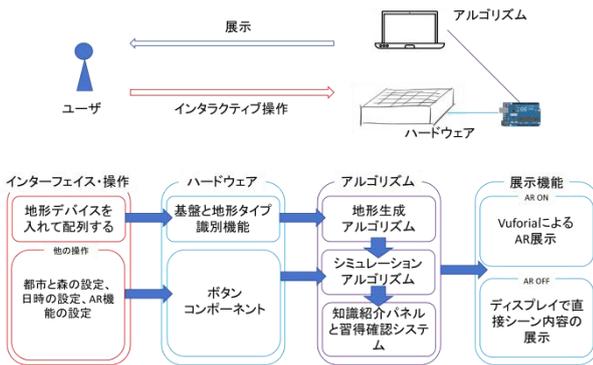


図 4 システム構成

まずはユーザーのインタフェースと操作の部分、地形カードを配列すること以外、他の機能に対する制御操作もある。そして、ユーザーの操作情報を集める、マイクロコンピュータがあるハードウェアの部分がある。集めた情報を処理して仮想地形の生成とシミュレーションを行うアルゴリズムもあって、最後はユーザーにかえして展示する機能がある。各カテゴリには複数の機能の実装が含まれている。

3.2 地形生成アルゴリズム

地形生成アルゴリズムは、ユーザーの配列操作からもらった地形のデータを用いて仮想的な地形を生成するアルゴリズムである。地形生成機能の実現は Sebastian Lague の地形生成動画チュートリアル[9]を参照した。まず、Perlin 関数[10]を使ってランダムな地形を生成する。次に、収集した地形情報に基づいてチェス盤状のフィルタ関数を生成し、これを用いてランダム地形における各領域の高さ値を調整

する。最後に、ガウスぼかし[11]を用いて各領域の境界を柔らかくし、生成された地形に色を付けて美化する(図 5)。都市や森林の地形を生成する際、対象となる基本地形が水面や山頂でないことを確認した上で、レイ検出を実行して対応する位置の地表高さを取得し、その場所に都市や森林を表すプレハブを生成する。これにより、生成された地形がより自然に見えるようになり、気象シミュレーション結果の表示も容易になる。

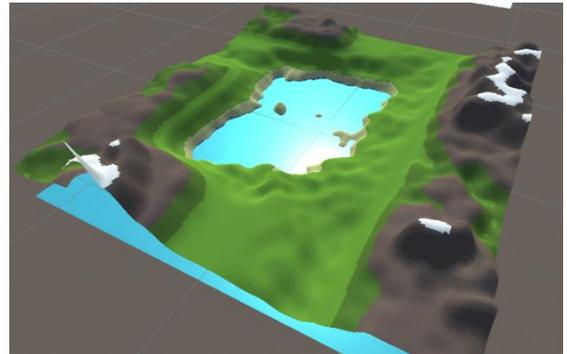


図 5 生成された仮想地形

3.3 気象シミュレーションアルゴリズム

気象シミュレーションアルゴリズムは、必要な計算量と実装の難しさを配慮し、専門的な高精度気象シミュレーションではなく、自作のボリュームデータ[12]アルゴリズムを用いている。このアルゴリズムは、仮想地形内の合計 64 個のボクセルの温度変化と相対気圧値を計算し、気圧値の差から風の方向を求めて、ビジュアライズしてユーザーに表示す。計算流れの構想は以下の点に沿っている。

- 全てのボクセルを判断し、仮想地形の地下に対応しているボクセルは後の計算に参加しない。
- 特殊地形ボクセル(水面、都市、山など)の位置を確認し、そのボクセルと周りのボクセルの相対温度値を変える。
- 相対温度値によって相対気圧値を変える。温度が高くなったら空気が移動や上昇しやすいので、温度値が高くなったら気圧値が低くなる。
- 相対気圧値によって各ボクセルの気流移動方向を計算する。同一高さでは空気が高い気圧値があるボクセルから低いボクセルに移行し、垂直方向では「熱い空気が上昇する」という形で計算を行う。

3.4 ビジュアライゼーション

ビジュアライゼーションは、3つの構想を検討し、検討結果は表 1 ビジュアライズ方法の比較と採用のよう示している。最後はパーティクルエフェクトと移動線路の 2つの表示方法で行う。

表 1 ビジュアルライズ方法の比較と採用

| 方法 | メリット | デメリット | 採用状況 |
|-------------|------------------------------|--------------------------------------|------|
| 矢印 | 単一のボクセルのすべてのターゲット方向がはっきりと見える | 空気の流れが見えにくい アニメーションがないため、注目を集めにくい | 不採用 |
| パーティクルエフェクト | 全体的な空気の動きの傾向がわかる | 空気の動きの細部が見えにくい、目が疲れる | 採用 |
| 長い移動線路 | 教科書の例図のような、空気の流れの一貫した見方 | データの処理が難しく、あまり重要でない空気の動きが無視される | 採用 |

パーティクルエフェクトは、隣接するボクセル間のすべての空気移動現象を最も直感的な方法で表現できる。その利点は、風の存在と大まかの方向をユーザに最も直接的に観察させられる点にある。赤色の粒子は比較的暖かい空気を、青色の粒子は比較的冷たい空気を表し、風が強いほど粒子のサイズが大きくなり、移動速度も速くなる。

アルゴリズムが複数のボクセルを通過する連続した風を認識した場合、ベジエ曲線を用いて一貫した風の流れを表現する。長い線の着想は教科書でよく使われる模式図に由来し、この方法を使うことでユーザはより明確な一貫性のある風の動きを観察できると同時に、学習した知識との記憶を結びつけ、親しみやすさを増すことができる。

地形生成とシミュレーションとビジュアルライズの最終的効果は図 6 である。

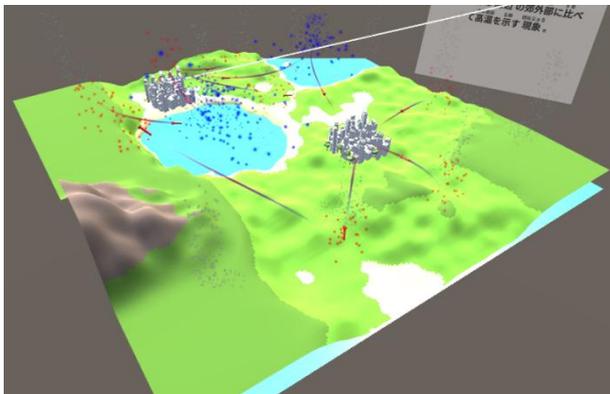


図 6 シミュレーションの結果

3.5 ハードウェア

ハードウェアの地形デバイス部分において、最も重要な機能は、ユーザが地形カードを簡単かつ直接的に出し入れできることと、地形カードが表す地形タイプを正確に識別することである。この目標に向けて識別方法を検討した結果、抵抗器と分圧回路を用いた手法を採用することにした。3Dプリンタとレーザカッターで部品を製作し、回路と電子部品をハンダ付けして Arduino マイコンに接続。マイコンプログラムを作成してデータの予備処理を行い、または Unity プログラムとのデータ通信用シリアルポートを構築する。

3.5.1 地形識別機能

識別機能は、「各セルの地形を識別する」と「操作完了したことを判明する」二つの役割がある。認識結果は正確であることが保証されなければならない。部品の差異によって認識結果に変動が生じないことが要求される。地形カードは軽量であることが望ましく、ユーザの操作によって容易に変化や誤差が生じないことが望ましい。

識別方法の選択について、主に4つの方法に対する検討と実験を行って、結果の整理と比較は表 2 のように示している。

表 2 識別方法の比較

| 方法 | 色センサ (グレースケール) | リードスイッチ (磁気) | 抵抗器 (抵抗値) | 赤外線フォトフレクタ (距離) |
|-------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------|
| 紹介 | カードに色をつけてセンサで読み取る | 磁気スイッチと磁石を使って開閉状態で判別 | カードに抵抗器を内装して、読み取る分圧電圧値で識別 | カードの底面からセンサまでの距離で識別 |
| メリット | •部品数が少ない、構造簡単 | •デジタルピン •一番精確 | •部品数が少ない | •デバイス一体化 |
| デメリット | •環境から影響されやすい •識別精度低い | •カード 90 度回転不可 •部品と線とピン大量必要 | •ハンダ付け必要 | •デバイスの特別処理や再製造が必要 |

より早くプロトタイプを作るため、プロジェクトでは「グレースケールセンサで色を識別する」という方法を選択した。公開展示と実験によって、この方法は識別精度が

低いという問題があるので、実装の難易度を配慮し、ユーザ操作をより直観的になるため、最後は抵抗器を使う方法に変えることを決めた。実験の結果、抵抗法は構造が安定しており、識別結果が正確で、異なる部品間の誤差が小さいなどの利点があり、識別方法に関する研究の要求を満たしている。認識方法の更新に伴い、新たに製作した地形カードはレーザカッターで加工したベニアパネルを使用し、ハンダ付けで磁気ポゴピンと抵抗器と組み合わせて内装して製作や他の処理をより迅速に完了できるようにした。地形カードの構造と表面の図のデザインは図 7 のように構成されている。

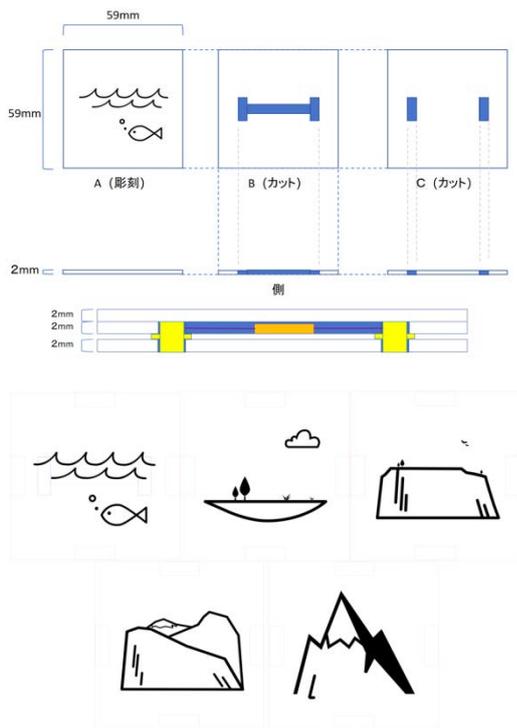


図 7 地形カードの構造とデザイン

3.5.2 部品の制作とマイコン機能の実現

Blender で装置をモデリングし、ELEGOO CURA にインポートしてスライスし、その後 3D プリントする。構造の更新プロセスは図 8 に示す通りである。プリントされたパーツを組み立て、センサなどを中に取り付ける。センサはすべて Arduino と繋げて、すべての溝が地形カードに配置されると、Arduino が地形データを整理し、地形生成アルゴリズムに一回送信する。地形情報を受信するたびに、地形生成アルゴリズムはそれを読み取り、地形生成プロセスを実行する。これにより「地形カードを配置することで任意の仮想地形を生成する」機能が実現される。

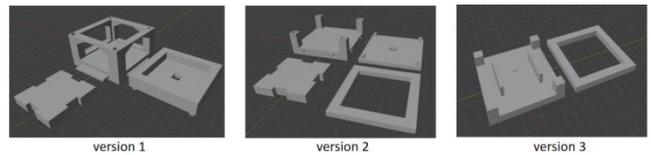


図 8 3D プリントモデル

3.6 展示方法と他の機能

仮想地形と気象シミュレーションのビジュアライズされた結果は、AR 装置を通してユーザに表示される。AR 機能の実現は Vuforia という SDK を利用し、設置されたマーカを識別できたら地形デバイスの上に各地形エリアの位置を対応しながら仮想地形を展示する。AR 装置 (図 9) は外部接続の小型ディスプレイとカメラで構成され、カメラはディスプレイ背面に設置されている。さらに、ユーザが AR 装置を手を持った状態での操作が困難であることを考慮し、表示内容を AR 画面と UNITY シーン内の画面間で切り替え可能な制御機能を実装した。



図 9 AR 装置

ユーザにより専門的な知識を正しく伝えるため、テキストで知識の紹介を行う「知識紹介パネル」機能も実装したユーザの閲覧利便性を考慮し、知識紹介パネルにはビルボード機能とタグアロング機能が実装されている。前者はパネルを常にユーザの方を向かせ、後者はパネルを常にユーザインターフェースの視野内に保持する。さらに都市と森林という二種類の特殊地形を生成・削除させる機能を制御するため、プレイヤーが操作・制御できる適切なインターフェース設計が求められる。検討と実験を重ねた結果、マイコンに接続する自作ボタンコンポーネントの使用を最終的に決定した。

ボタンコンポーネントを使い、「昼夜変換機能」「習得確認機能」などの機能も実装し、ユーザにより良い学習効果を提供することができた。習得確認機能に実績リストがあり、複数の実績が含まれている。実績には操作系実績と習得評価系実績が含まれる。前者はユーザが指定された行動を達成すると自動的に達成され、プロジェクトの全機能を試行・習得するよう促すことを目的とする。後者はユーザ自身が実績リストで確認する必要があり、「特定の気象

現象に関する知識を習得した」といった実績を含み、装置を通じて関連する気象現象の知識習得度を自己チェックするために用いられる。実績が達成されるたびに、プログラムは明るい効果音を鳴らし、画面上部で次の達成推奨実績の内容が切り替わる際に星の飛散エフェクトを表示し、ユーザにフィードバック感を与える。

4. 実験と評価

評価は二つの部分に分かれる：シミュレーション結果の正確性に対する評価と研究効果に対する評価である。

シミュレーション結果の正確性を評価する方法は、専門的な気象シミュレーションアルゴリズムを用いてほぼ同一の仮想地形環境における気流運動状態を計算し、研究で使用した自作シミュレーションアルゴリズムの同一入力条件下での結果と比較し、類似度によって正確性を判断する。最終的に採用した専門気象アルゴリズムは「ENVI-met」であり、ユーザが仮想地形を構築することを可能とし、建物と地表面や植物と環境空気との相互作用をシミュレートすることに優れている。

体験に関する検証の方法は、学会やオープンキャンパスで人々を体験させて有効性の検証をする。体験の間、ユーザの行動と反応を観察し、主にユーザの積極的な対話や体験への意欲の度合いに焦点を置く。体験後には、ユーザからのフィードバックを集めるためにアンケートやインタビューを通じて、研究に対する体験や意見をユーザに質問する。また、ユーザが体験前後同じ質問の簡単なクイズを行

い、正答数の前後差で効果を分析する。

実験と効果評価はまだ推進中であり、現在収集済みの実験データに基づく T 検定の結果、本プロジェクトはテストの正解数を向上させる効果において、比較的明らかな相関性を示している。

5. むすび～今後の計画

本研究の成果は、複合現実感技術を組み合わせたこの新型教育装置の体験を通じて、ユーザの関連気象現象に関する知識の理解と習得が促進されると同時に、地学や気象への興味が高まることを示している。本研究が教育補助ツールとして、教育方法と装置体験の両面で有効であることを実証した。このインタラクティブ装置による体験を授業での知識教授や教師の指導解説と組み合わせることで、新興映像技術を活用した教育実践の可能性を拡大している。

いま本研究は実験と効果検証を行う途中である。また、本研究の初期段階では、多人数体験と内容の豊富さに関してより多くの構想が検討された。最初は複数の AR 装置を用いて多人数が同時に同一仮想地形状態を観察できる機能を計画し、教員の操作・指導のもとで学生グループが集中学習できるようにしたが、現在の時点では時間の不足、および関連専門知識の欠如により実現できなかった。内容面では、対象となる気象現象の知識が少なく、降雨現象や前線現象などの内容と、これらに関連するインタラクティブ体験の構想は実装に至らなかった。今後はこれらの分野で展開していく予定である。

参考文献

- [1] “文部科学省「教育の情報化に関する手引」作成検討会（第5回）配付資料”。
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shotou/056/gijigaiyou/1259388.htm. (参照 2025-11-26).
- [2] Garzón, J., Pavón, J. and Baldiris, S.. Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings. *Virtual Reality*, 2019, vol. 23, pp. 447 - 459.
- [3] 山元翔. AR/VR の教育・学習支援システムへの利用と課題. *教育システム情報学会誌*, 2019, 36 巻, 2 号, pp. 49 - 56.
- [4] “教育課程研究センター「全国学力・学習状況調査」”.
<https://www.nier.go.jp/kaihatsu/zenkokugakuryoku.html>, (参照 2025-11-28).
- [5] 雲財寛, 松浦拓也. 中学生の科学的モデルに対するメタ的な認識の実態. *理科教育学研究*, 2016, 57 巻, 1 号, pp. 1 - 10.
- [6] 瀬戸崎典夫ほか. 多視点型インタラクティブ教材を用いた能動的学習による理解度の評価. *日本科学教育学会年会論文集*, 2010, 34 巻, pp. 289 - 290.
- [7] 一色正晴ほか. 力覚インタラクションを用いた文強勢学習支援システムの開発について. *映像情報メディア学会技術報告*, 2009, 33 巻, pp. 49 - 54.
- [8] 五十嵐健夫ほか. 地形学習における手書き 3 次元モデリングの利用. *図学研究*, 2004, 38 巻, pp. 103 - 106.
- [9] “Procedural-Landmass-Generation”.
<https://github.com/SebLague/Procedural-Landmass-Generation>, (参照 2025-06-08).
- [10] Ken Perlin. 2002. Improving noise. In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '02)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp.681 - 682.
- [11] コンピュータグラフィックス「改訂新版」画像情報教育振興協会, p.273, 2016.
- [12] コンピュータグラフィックス「改訂新版」画像情報教育振興協会, p.101, 2016.