

CARAMEL：電子ブロックと投影型 AR を用いて電気の基礎を学ぶインタラクティブ理科教材の研究

渡邊 竜^{†1} 大島 登志一^{†1}

概要：本研究では、電子ブロック式のユーザインタフェースと机上への投影を組み合わせることで、ユーザが電子回路を組んで、その電流や電圧の挙動を視覚的に学べる教材として MR 型電子ブロック『CARAMEL』の開発を行った。この教材では、回路内での電圧の変化や電流の量、方向といった実際には見ることができない現象を可視化することにより、理解を促進させる教材の実現を目的としている。ユーザは、市販のレゴブロックに電子部品を組み込んだブロックを並べることで実際に電子回路を組むことができる。さらに、組んだ電子回路と同期して電流と電圧の挙動をシミュレーションし、ブロックの上にその状況を投影する。

1. はじめに

本研究では、電子ブロック式のユーザインタフェースと机上への投影を組み合わせることで、ユーザが電子回路を組んで、その電流や電圧の挙動を視覚的に学べる教材の試作に取り組んでいる。近年、STEAM 教育に代表されるように科学教育を重視する動きにある。その中で、ICT やデジタルテクノロジーがとりわけ注目されているが、アナログの電子技術がこれらの技術の基礎として非常に重要である。

平成 29 年に告示された学習指導要領[1]には以下のような目標及び内容が挙げられている。

「回路を作り、回路の電流や電圧の測定する実験を行い、回路の各点を流れる電流や各部に加わる電圧についての規則性を見いだして理解すること」

しかし、電流や電圧、抵抗の諸概念の理解、規則性の理解が困難であることが様々な先行研究にたびたび指摘されてきた。その原因の 1 つとして、電流や電圧が目に見えない物理的概念であるために生徒が直感的に理解しにくいと考え、電流や電圧のイメージづくりに関する研究がいくつもなされている[2][3]。そこで、本研究でも、回路内での電圧の変化や電流の量、方向といった実際には見ることができないものを可視化することにより、理解を促進させる教材の実現を目的とした。

そこで、本研究では、MR 型電子ブロック『CARAMEL』を開発した。図 1 には、電子ブロック式のユーザインタフェースと机上への投影を組み合わせた様子を示す。これは、電子ブロック型インタフェースによって並列回路を組んでおり、同じ電子回路のシミュレーションによって得られた電流、電圧の動きが電子回路に投影されている。

ユーザは、市販のレゴブロックに電子部品を組み込んだブロックを並べることで実際に電子回路を組むことができる。さらに、組んだ電子回路と同期して電流と電圧の挙動

をシミュレーションし、電圧は色で表現し、電流はパーティクルの移動方向と移動量により電流の向きと量を表現する。そして、ブロックの上にその状況を投影する。本研究では、本システムを用いることでユーザは回路と電流・電圧の規則性を体感的に理解することを目指している。

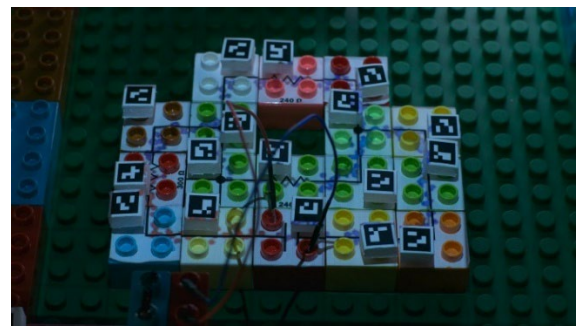


図 1 CARAMEL のユーザ視点の様子

2. 電気分野の学習に関する課題

2.1 電気分野の学習の実態

平成 15 年度小・中学校教育課程実施状況調査[4]では、教師と生徒に対して、各科目や単元に対する理解の難易度や、興味の有無、好き嫌いが調査した。その結果、「電流（静電気の性質、直列回路や並列回路、電流や電圧、電気抵抗など）」に対して、苦手意識を持つ生徒や嫌いな分野と感じている生徒が理科の分野の中で多いことが明らかになった。

古屋らは、電気回路の学習が終了した中学 3 年生が内容をどのように把握しているかを調査している[5]。この研究では、直列回路、並列回路での電流について、抵抗 1 つの単純回路との比較で予想すると、抵抗が増えると電流が減るといった予想ではなく、単純回路と同じ量の電流が流れると予想する生徒が多いことを明らかにしている。こうした誤った考え方を「交通流モデル」と呼んでいる。さらに、この研究では、オームの法則を使うと電流の計算は正しく

^{†1} 立命館大学 映像学部
College of Image Arts and Sciences, Ritsumeikan University

求めることができることがわかっていながらも、科学的に正しい知識と回路のイメージが矛盾していることに気付いていない生徒がほとんどであることを指摘している。

また、古屋らでは、課題を生徒に課し、電流の流れ方の認識について調査を行い、電流の流れ方の誤ったイメージを持つ傾向が中学2年生から中学校3年生になるときに急激に増加していることを明らかにしている[6]。これは、中学2年生の理科で電気回路を学ぶ時期と重なっており、「回路に対する知識、例えばキルヒホッフの第1法則やオームの法則に関する知識は中学3年生以降増えているが、こうした知識が、回路を適切にとらえることにつながっていない」ことが課題として挙げられている。

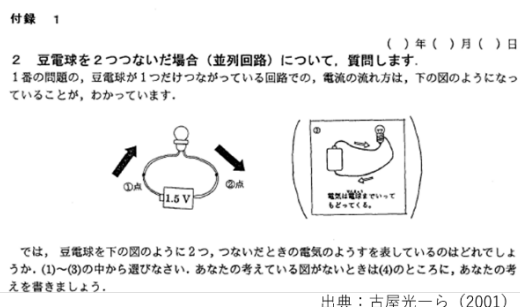


図 2 生徒に出された課題の例[7]

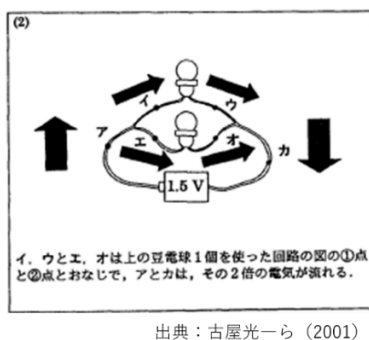


図 3 課題の選択肢の例[7]

2.2 電気回路の水 flow や粒子を使った教材研究

電気回路での電流や電圧の諸概念の理解が難しいため、電流や電圧を可視化することで理解を促そうとするアプローチが試みられている。

本間では、ゲル粒子をパイプの中に循環させ、パイプの太さによって抵抗を表している装置を用いた実験授業を行っている[2]。この装置はゲル粒子が単位時間にどれほど通過したかを生徒が見ることで確認もでき、個数をリアルタイムに計算することで電流を視覚的にとらえることを可能にし、学習効果が上がることを明らかにした。

倉信らでは、ポンプと2つの水槽、水槽と水槽をつなぐ桶からなるモデルを開発している[3]。このモデルでは、桶の中を通る水の単位時間の量を電流として表現するといったように水の流れによって電流、電圧、電気抵抗を表現した。その研究のまとめでは、以下のように結んでいる。

「自作した「水流モデル」を用いた授業によって、学習

者が自身の内面に電気回路の物理量を「水流モデル」の物理量に置き換えてメンタルモデルを構成し、且つそれを外化できれば、回路を流れる電流や各区間に加わる電圧への理解を促すことが分かった」

これによれば、可視化による表現が電気分野の学習を促す可能性を示している。

2.3 電子回路シミュレーションと電気ブロック

定松らの研究は、電圧を高さで表現した電子回路シミュレータと電子ブロックと連動させている[7]。この研究では、回路シミュレータ上で回路図や各素子の電圧を表現し、それをディスプレイ上に表示している。また、電子ブロックを Arduino で PC と有線で接続している。この研究では、課題としてインタフェースの改良や回路の無線化などを挙げている。図 7 は、定松らが開発した電子ブロックとシミュレーションの様子を示しているものである[7]。

2.4 本研究でのシステム要件

以上の従来研究から、電気回路の学習に対して苦手意識を持つ生徒がほかの分野とくらべて多くいることが推測される。また、オームの法則の理解はできているが電気回路内での電流・電圧の挙動といった現象の理解とは一致しない傾向がある。さらに、電流や電圧を視覚的に表現することで理解の助けになることも明らかになっている。

そこで、本研究では、以下を要件として開発を行った。

- A) 電流や電圧を視覚的に表現されている
- B) 視覚表現がオームの法則などと矛盾がないこと
- C) ユーザが自然とシミュレーション結果と回路を対応付けられること

3. MR 型電子ブロック CARMEL のデザイン

3.1 システム構成

図 4 には、システムの全体像を示す。

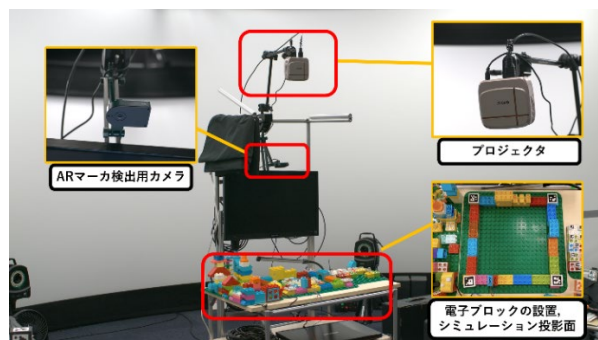


図 4 CARMEL の全体像

CARMEL は、以下のような4つの要素によって構成している。

- ① ユーザが直接操作する電子ブロック
- ② 電子ブロックの回路の状態を認識するモジュール
- ③ 認識した電子回路のシミュレーション
- ④ シミュレーション結果を投影するプロジェクタ

ユーザは手元で電子ブロックを組むことができる。そこで組んだ回路状態を認識し、開発した回路シミュレータによって実際に組んだ電子ブロック回路と同じ回路のシミュレーションを行う。このシミュレーションで求めた各点の電流の量と向き、各部の電圧が色やパーティクルで表現し、電子ブロックに投影するシステムとしている。

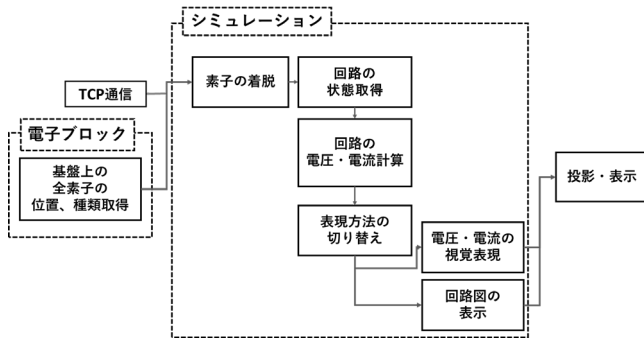


図 5 機能ブロック図

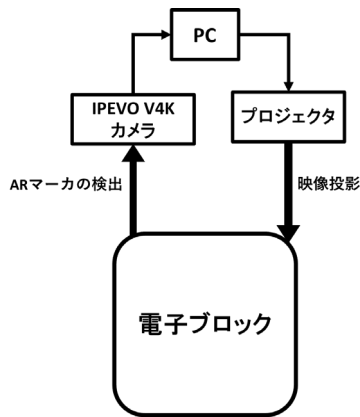


図 6 評価実験時のシステム構成図

本研究は、CAMEL を利用し、ユーザが中学 2 年生の学習範囲である「電流とその利用」において回路の概念から始まり、電流と電圧、およびオームの法則までのイメージが体感的に形成されることを目標とする。中学理科教科書[8][9]によると、中学 2 年生が習う基本的な回路は、電球 1 つを光らせる回路や直列回路、並列回路といった回路となっている。そのため、本システムで扱う素子は、電球、抵抗、LED を扱うことにした。また、ユーザに諸概念の理解を促すためにワークブックを用意する。ワークブックに登場する回路や学習の流れについても、中学理科教科書を参考にしている。

CAMEL は、電子ブロックを用いて任意の回路を作ることができる。そして、シミュレーションについても電子ブロックを使って作成できる回路はすべてシミュレーション可能となっている。

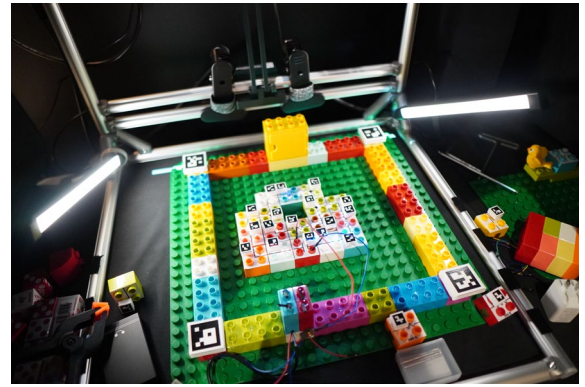


図 7 CAMEL の回路部分の様子

4. 電子ブロックの試作

電子ブロックは、LEGO デュプロを元に制作している。熊谷の研究[10]において、「LEGO ブロックの特徴は、多様な大きさ／形状があるにも関わらず、接合部の構造が一定であるため、あらゆるブロック同士を接合できる点にある。」という理由から LEGO ブロックの構造が採用されている。電子ブロックを制作するにあたってこのあらゆるブロック同士を接合できる特性は、重要な点である。そのため本研究で採用することにした。

また、採用した LEGO デュプロは、通常の LEGO ブロックに比べて縦横高さが 2 倍と大きく、シミュレーションを投影する際に電流・電圧を表すオブジェクトのサイズも大きくすることができる。それによって、電子回路の状態がどのようになっているかをユーザが確認しやすくなる。さらに、ブロックが大きいことで素子を封入するための空間などに余裕ができるようになる。これらの理由から、本研究で開発する電子ブロック部分には LEGO デュプロを採用した。

本システムでは、2 種類の電子ブロックを制作した。電子回路の素子を取り換えられる汎用的な電子ブロックと特定の素子としての機能しか持たない電子ブロックの 2 種類である。汎用的な電子ブロックは、電子ブロック制作中に容易に電子ブロックの素子を変えるために制作した[11]。

現在の CAMEL には、抵抗、電球、LED、電池、導線、といった機能を固定した電子ブロックを実装している。これらのブロックの内部には、抵抗用ブロックであれば抵抗が、導線用のブロックであれば、導線の両端と銅箔テープをはんだで付け合わせ銅箔テープ部分をブロック底の辺が通電するように貼り、導線部分はブロック内部の天井に沿わせるように配置している（図 8）。



図 8 電子ブロックの内部構造の例

そして、機能が固定されているためにブロック 1 つ 1 つがどのような部品なのか回路図と照らし合わせて電子ブロック回路を組むことができるようにするために、図 9 に示すように、ブロックに、それぞれの素子の電気用図記号を印刷したシールを貼りつけている。さらに、LEGO デュプロだとプロジェクトで投影した際の色が見えづらい問題がある。そこで、シールの記号部分を黒色でその他の背景部分を白色にすることで電流や電圧のシミュレーションを投影する際のスクリーンとしての役割も担い、この問題も解消している。



図 9 ブロックの外観

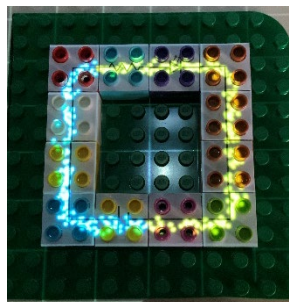


図 10 投影の様子

5. 電子回路シミュレータ

5.1 シミュレータの概要

CAMEL で実装した回路シミュレータは、電子ブロックを用いて組んだ電気回路と連動してシミュレーションをすることが特徴である。一方で、電子ブロックがなくても GUI でシミュレーションを行えるように実装している。この機能によって、電子ブロックが手元にない状態や、電子ブロックでは作成することができない回路の学習でも、PC があれば、電子ブロックを用いた体験と似たユーザインタフェースを用いた学習を行える。

本システムで対象としているのが中学 2 年生であり、交流回路や時間変化によって各部に流れる電流や電圧が変化する回路は習わない。そのため、本シミュレータでは、現状、直流回路の解析を実装している。

ユーザが設置できるブロックは、中学 2 年生の扱う素子の抵抗ブロック、電池ブロック、電球ブロック、LED ブロックとそれらの素子を繋ぐための導線ブロック 4 種がある。また、ユーザが任意の点を GND にすることができる GND ブロックもある。各種ブロックの役割は実際の回路での役

割と基本的に相違ないが、GND ブロックと電圧源ブロックは、回路方程式を立式する際に回路状態の起点の役目も担っている。

また、ユーザはブロックをグリッド上に自由に設置できるようにしている。グリッドの範囲は、プログラム上任意に変更することができるが基本的には 8x8 のグリッドでシミュレーションを行う。範囲制限を上記のようにしたのは、投影する際に大きすぎるのは不適であることと、中学 2 年生の履修範囲の回路を電子ブロックによって組むのに十分な広さとなるためである。ブロックを用いずにシミュレータとして活用する際には、より大きなグリッドを設定することで制作可能な回路の幅を広げることも可能である

5.2 シミュレータの実装

回路解析の方法は、節点解析や修正節点解析法、閉路解析法といったように種類があり、詳しいアルゴリズムは、「電子回路シミュレーション」や城所の研究によって知ることができる[12][13]。今日では、修正節点法が回路解析に利用されていることは広く知られており、節点解析法と違い電圧源も素子として直接扱うことができる。中学 2 年の学習で触れる回路は電池がほとんどであり、電圧源を扱えることが望ましい。そのため、本シミュレータでもこの解析手法に従って実装を行っている。

5.3 シミュレーションの表現

本シミュレーションでは、電流や電圧を数値の情報として提示するのではなく、色や動き、密度といった視覚的な表現で提示している。こうすることで、ユーザは、電気回路で電流や電圧がどのように変わっていったのかの理解を促そうとしている。

電流の表現は、移動するパーティクルで表している。パーティクルは、電池の+極から-極へと移動している。そして、電流の大きさは、単位時間にブロックの中を通過するパーティクルの量によって表現している。電流の流れる方向は、ブロックごとにデータを保持しているため、パーティクルの移動方向が決定できる。枝分かれになるところでは、電流の大きさによってパーティクルの移動方向が分けられて密度が変わるようになっている。また、回路全体に流れる電流の大きさが変わったときは、パーティクルの移動速度を変更する。このように実装することで、電流の大きさに従ってパーティクルの密度や速さが変わり結果的に単位時間にブロックを通過する量が変わるようになっている。

また、電圧は、色によって表現している。回路全体で最も電圧が大きいときの色と回路全体で最も電圧が小さいときの色が決められている。電圧の値によって最小値の時の色と最大値の時の色で線形補間を行って色を決定する。抵抗ブロックや電源ブロックといった電圧が変わる部分では、パーティクルの色は、離散的に変わるのではなく、連続的に変化するようにしている (図 11)

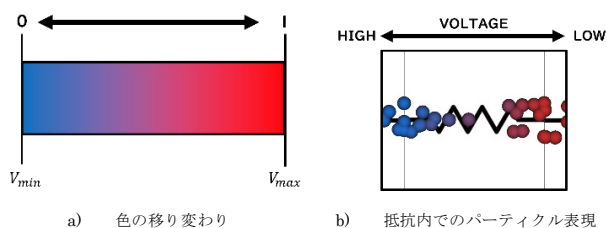


図 11 電圧の表現

回路シミュレーションの表示方法は、さまざまな種類がある。パーティクルのみの表示、パーティクルとブロック電圧の色が表示されているブロックとの表示、パーティクルと回路図が表示されているブロックとの表示といった表示方法が可能である[11]。

本シミュレータで行ったシミュレーションの例を以下に提示する（図 12）。これらのように、中学 2 年生の範囲で習う電気回路のシミュレーションが行えることがわかる。また、電圧の表示色は自由に変更できる。

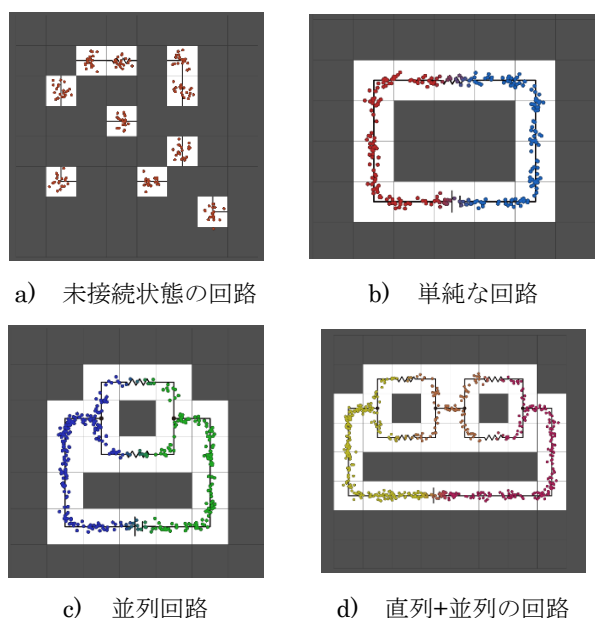


図 12 シミュレーションの例

6. 電子ブロック回路の状態認識

LEGO デュプロを基に作られた電子ブロックで組んだ電子回路と電子回路シミュレーションが連動するために、電子ブロックがどのように配置されているのかの認識をしなければならない。そこで、本研究では、電子回路を用いた回路の識別方法を提案する。電子回路を用いるのは、ブロックにシミュレーションを投影するためプロジェクションの光などに認識方法が影響を受けない方法であることが望ましかったためである。

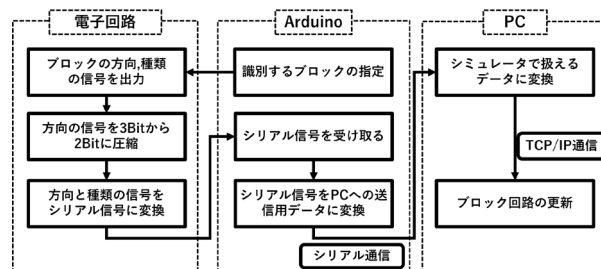


図 13 電子ブロック回路の状態認識の処理の流れ

提案する手法は、図 13 のような流れで電子ブロック回路の状態認識をしている。単体のブロックを識別するための回路の試作品が図 14 である。この回路は、ブロックの設置した方向と種類のデジタル信号をシリアル出力するようになっている。ここで、出力される信号をスイッチング回路で制御し、Arduino に送信している。Arduino で受け取った信号を処理し、ブロックのデータ配列を作り、シリアル通信でインタフェース用プログラムに送信している。インタフェース用プログラムは、Arduino とシミュレータをつなぐためのプログラムでインタフェース部分のみで構成されている。そのため、インタフェースの変更は、用意となっている。

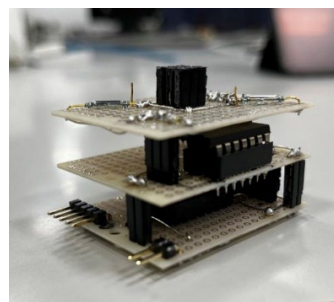


図 14 ブロックの識別回路の試作品

このように、行うことで電子ブロック回路の状態認識が可能となる。しかし、実装する回路の数が膨大なため官僚に時間を要することになる。そこで OpenCV ベースの AR マーカ「ArUco」[14][15]を用いた電子ブロック回路の状態認識方法も実装した。この方法での実装は、評価実験や SIGGRAPH ASIA での展示で実際に運用した。

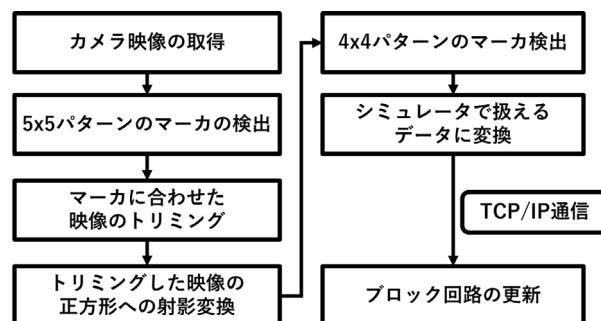


図 15 AR マーカの識別のフロー

この識別方法の処理の流れは、図 15 のようになる。大きなマーカによって、ブロックの置く範囲を指定しカメラ映像をトリミング、射影変換を行う。その加工された画像

からブロックそれぞれのマーカを認識し、ブロックのデータ配列を作成する。そして、シミュレータで回路の状態が更新されると計算しなおされる。

7. 実験とその考察

CARMEL を用いて電気回路を学習することでどの程度の効果があるのかを検証するために、立命館大学映像学部映像学科に所属する男女 18 人を対象に評価実験を行った。当該学部は、文理融合型であることから、必ずしも理科系の分野が得意ではない学生の割合が多いと推測される。本実験では、体験の前後で電流や電圧が電気回路内でどのように変化するのかを図示する課題に取り組んでもらった。実験を通して、CARMEL は電流が抵抗で消費されるや電圧の変化が導線の枝分かれの部分で起こるといった誤った概念ではなく、電流は抵抗器の両端で同じ量であること、電圧の変化は抵抗で起こることといった正しい概念が得られていることを一定程度観測することができた。

また、SIGGRAPH ASIA 2021 においても展示を行い、一般ユーザを対象とした運用実験も行った。ここでは、200 名以上の体験者があった。電子ブロックは小さな子供向けのレゴデュプロを用いていることもあり、子供の興味を惹く様子も見られた。

両方の実験を通して、電子ブロックによって実際に電子回路を組むことができ、そのシミュレーションが視覚的な表現として提示されていることには、おおむね良好な反応が得られた。しかし、現状の電流や電圧の表現方法では、電流・電圧の細かな変化を感じることは難しく、概念の細かな部分の理解を促すことは難しいことがわかった。また、AR マーカで回路状態を認識していることで生じている不安定さや回路の更新までのラグは、ユーザ体験に大きな影響を与えていることがわかった。

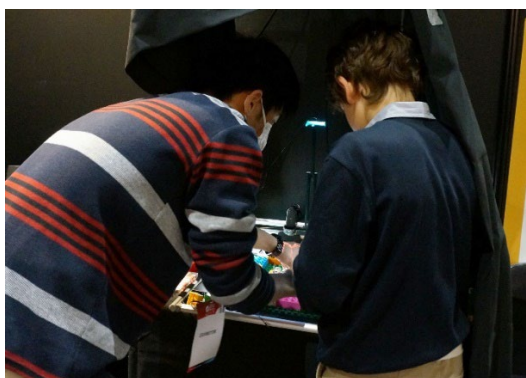


図 16 SIGGRAPH ASIA 2021 でのデモ展示の様子

8. まとめ

本研究で開発した MR 型電子ブロックが電子回路の目で見ることではできない電流や電圧の概念理解を促進させる効果が一定程度あることが評価実験を通してみることができた。一方で、インタフェースの使い勝手や視覚表現の部分

で改善点が見つかった。また、回路状態の認識方法は、AR マーカの方法でも運用ができることは確認できているものの、投影像との干渉や照明の影響が大きく、ユーザ体験の質を下げていることもわかった。

今後は、電子回路による回路状態の認識方法を実装し、ユーザ体験の底上げを行う必要がある。また、電流や電圧の表現方法についても再度検討を行い改善していく必要がある。これらの改善を行うことで CARMEL の学習の現場での運用を視野に入れた 使いやすさやわかりやすさを目指していく。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 21K12004 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 文部科学省. (2008). 中学校学習指導要領解説理科編.
- [2] 本間翔志. & 定本嘉郎. (2010). 小学校の電流学習における粒子水流模型を用いた授業実践. 物理教育, 58(3), 143-146.
- [3] 倉信充人, 栢野彰秀, & 塚田真也. (2015). 自作「水流モデル」による中学校理科「電流」単元の授業実践. 島根大学教育臨床総合研究, 14, 141-155.
- [4] 国立教育政策研究所教育課程研究センター. (2005). 平成 15 年度小・中学校教育課程実施状況調査.
- [5] 古屋光一. & 戸北凱惟. (2000). 電磁気学の概念形成を支援するための指導方略に関する実践的研究: 子どもの知識の豊富化と再構造化を通して. 科学教育研究, 24(4), 202-216.
- [6] 古屋光一. & 戸北凱惟. (2001). 並列・直列回路における電流の流れ方の認識に関する実態調査: 誤概念としての交通流モデルが高学年ほど増加していくことについて. 科学教育研究, 25(2), 90-101.
- [7] 定松澄, 梅田貴士. & 前原俊信. (2015, August). B9b-1 電気回路シミュレータと連動した電子ブロック教材の開発 (原著講演 (B9b), 大会テーマ「物理教育で大学と小・中・高校教育をどうつなぐか」). In 物理教育学会年会物理教育研究大会予稿集 32 (2015) (pp. 117-118). 日本物理教育学会.
- [8] 大矢禎一. (2021). 未来へひろがるサイエンス 2.(啓林館)
- [9] 岡村定矩. (2012). 新しい科学.(東京書籍)
- [10] 熊谷明音, 沖真帆. & 塚田浩二. (2015). LEGOOrics: 外観を保ちつつ電氣的に拡張した LEGO ブロックの提案. インタラクシオン, 2015, 598-601.
- [11] 渡邊竜, & 大島登志一. (2021). 電子ブロックと投影型 AR を用いた「電流・電圧」分野のインタラクティブ理科教材の研究. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム論文集, 2021, 381-384.
- [12] 牛田明夫. & 田中衛. (2002). 電子回路シミュレーション. (コロナ社)
- [13] 城所仁. (2014). パワーエレクトロニクスを対象としたリアルタイム・シミュレータに関する研究 (Doctoral dissertation, 崇城大学).
- [14] Garrido-Jurado, S., Munoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., & Medina-Carnicer, R. (2016). Generation of fiducial marker dictionaries using mixed integer linear programming. Pattern Recognition, 51, 481-491.
- [15] Romero-Ramirez, F. J., Muñoz-Salinas, R., & Medina-Carnicer, R. (2018). Speeded up detection of squared fiducial markers. Image and vision Computing, 76, 38-47.