

# 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 (2) 電気回路認識インタフェースの試作

室井克仁<sup>†1</sup> 渡邊竜<sup>†2</sup> 大島登志一<sup>†1</sup>

**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そのデバイス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フィジカル 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。第1報では、電子ブロックで構成する電気回路の認識を AR マーカで仮に実装をおこなった。本第2報では、認識精度の問題を解決するため、電気回路の認識をデジタル電子回路とするインタフェースの試作をおこなった。

## 1. はじめに

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。一方で、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られることから、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[1][2][3]。

本研究では、実際には見ることのできない回路内での電圧の変化や電流の挙動を可視化することにより、その理解を促進する教材の実現を目的として、電子ブロック式のユーザインタフェースで電子回路を組んで、その上に電流や電圧の挙動を投影しインタラクティブに学べる MR 型電子ブロック教材『CARAMEL』を開発した[4]。図1に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。

第1報では、試作したプロトタイプシステムについて報告をおこなった。そこでは、電子ブロックで構成する電気回路の認識を AR マーカで仮に実装をおこなっていたが、照明環境の影響により認識が不安定となる課題があった。本第2報では、これを解決するため、電気回路の認識部をデジタル回路化してインタフェースの試作をおこなったことについて説明する。なお、電子ブロック 8 列×8 行のレイアウトの自由度を想定しているが、今回試作したデジタル回路による電気回路認識部は、モジュールとしての機能試作であり、システム全体の開発は完了していない。

本報では、第1報でも説明したシステム全体について改めて整理し、試作したモジュールについて報告する。

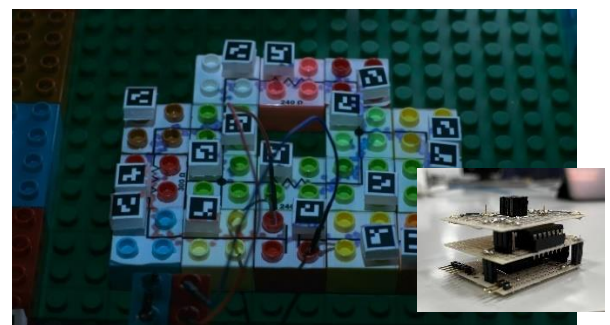


図1 試作した CARAMEL システムの様子と  
今回試作した電子回路モジュール

## 2. フィジカル MR 型教材の利点

本研究では、レゴブロックを実際の回路に見立て、見えない電子の流れや電圧を可視化し手に触れられるという観点から、タンジブル・ユーザインターフェース (TUI) [5]に着目した。TUI はとりわけ教育分野においての活用が多く

<sup>†1</sup> 立命館大学 映像学部  
College of Image Arts and Sciences, Ritsumeikan University  
<sup>†2</sup> 株式会社カブコン

提案されている。その理由として、実際にブロックを組み立てるなど、遊びを通じながら学ぶことで、学びに対する動機づけを高めることができると述べられている[6]。また、レゴのように身近な素材を使うことでユーザに受け入れられやすく、学習に対する負担軽減ができるとも述べられている[7]。レゴブロックを用いてコンピュータに計算をさせ、計算によって導き出された結果をレゴブロックに投影するというシミュレーションの研究もある。またこの利点は、数学的知識のない人でも数学ツールを利用することができるようになり、複数のユーザと直感的かつ協力的に体験を行うことができる点である[8]。著者らは、こうした利点をもつ TUI と MR(MR; Mixed Reality, 複合現実感) とを融合した「フィジカル MR ディスプレイ」の教材としての活用に着目した研究をおこなっており[9]、その一環として本研究を進めている。

### 3. MR 型電子ブロック CAMEL の実装

#### 3.1 システム構成

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

図には、システムの全体像を示す。



図2 CAMEL の全体像

CAMEL 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。

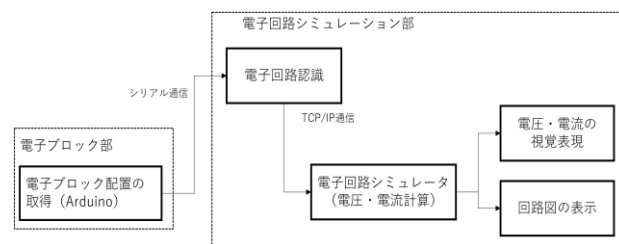


図3 機能ブロック図

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。

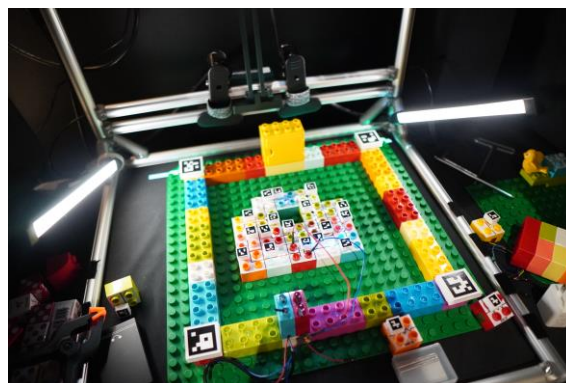


図4 CAMEL の回路部分の様子

### 4. 電子回路シミュレータ

回路解析の手法の種類は、修正接点解析法、接点解析法、閉路解析法といった種類がある。その中でも修正接点解析法は回路解析によく使われており、また、接点解析法と違い、電源圧も素子として扱うことができる。学習対象者である中学2年生の範囲で触れる回路は主に電池を扱っている回路であることから、電源圧を扱えることが望ましい。これらの理由より、本シミュレータでは、修正接点解析法を用いる。

#### 4.1 修正接点解析法

修正接点解析法では、電気回路の中に接点と枝を設定する。ここでは、接点を素子と素子でつないでいる接続点、

枝を節点と節点の間のことを指す。また、各節点での電圧を節点電圧と呼び、各枝に流れる電流を枝電流と呼んでいる。この節点電圧と任意の素子に流れる電流の大きさを未知数とし、回路方程式を立てて方程式を解く。

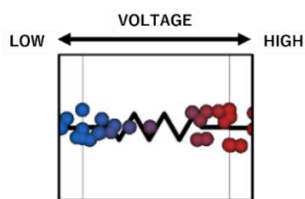
回路方程式を立てるために、各節点でキルヒホッフの第1法則を用いて式を立てて、電源電圧とその周囲の節点電圧の関係式を立てる。このようにして立てた回路方程式を解くことで、接点電圧と素子に流れる電流を求めることができる。また、これによって抵抗に流れる電流を求めることができるため、回路内のすべての電流を求めることができる。この回路方程式は、機械的に構成することができる。回路方程式を立てる際には、回路内のすべての抵抗で接続している節点番号と抵抗値の組み合わせを求める。また、電源についても接続している節点番号と起電力の組み合わせを求める。これらの組み合わせに従って、行列を構成していく。修正節点解析法は、プログラミングでの実装と相性が良い方法となっている。

#### 4.2 電流・電圧の表現方法

電子回路シミュレータ部分も第1報と同様に、電流や電圧を数値情報として提示するのではなく、パーティクルの色、動き、密度といった視覚情報で提示する。

電流の表現は、移動するパーティクルで表している。パーティクルの動いている方向で電流の向きを表しており、パーティクルの速さで電流の大きさを表している。

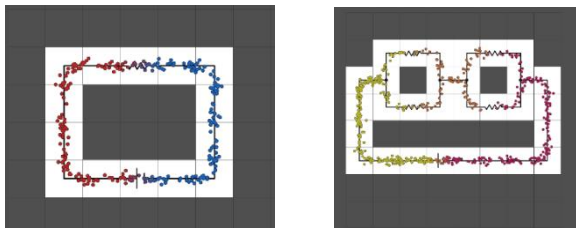
また、色によって表現している。回路の中の一番電圧の大きいときと小さい時の色を決める。そして、電圧の最小値と最大値の色で線形保管を行い、色を決定する。また、抵抗ブロックや電源ブロックといった電圧が変わる部分では、パーティクルの色を分かりやすさのため連続的に変化させている。



a) 抵抗内でのパーティクル表現

図5 電圧の表現

本シミュレーションの例を図6で提示する。



a) 単純な回路

b) 直列+並列の回路

図6 シミュレーションの例

### 5. 電子ブロックと回路の状態認識

本デバイスに用いられる電子ブロックは、LEGO デュプロを採用している。その理由として、次の点が挙げられる。まず、LEGO ブロックはブロック同時の接合を容易にでき、電子ブロックに適している。また、LEGO デュプロは、通常のLEGO ブロックと比較し、縦横比が二倍大きく、電子回路の状態のシミュレーションを投影する際、ユーザが確認しやすくなる。これらの理由から本研究に用いられる電子ブロックはLEGO デュプロを採用する。

ブロック部の構造はこれまでのCAMELと同様に、ブロックの内部に銅線を配置し、ブロック側面に貼られた銅箔テープと半田付けし、通電するようにしてある[4]。

第1報では、OpenCV ベースのAR マーカを用いて、ブロックの種類、位置、回転を識別していた。第2報では、デジタル回路とArduinoの組み合わせを用いて、ブロックの位置、種類、回転を識別する。

図9は、1つのブロックを識別するための電子ブロック認識モジュールである。この回路は3つの機能構成をしており、三層構造の回路にしている。図9では、ユニバーサル基板によるプロトタイプを示しており、現在図10に示すように、プリント基板として製作を進めている。3つの各層の回路図を図11、図12、図14に示す。



導線ブロック 抵抗ブロック 電池ブロック LEDブロック

図7 電子ブロックの構造

(画像はマーカによるプロトタイプ版)

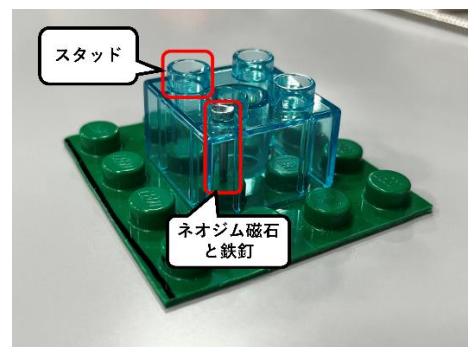
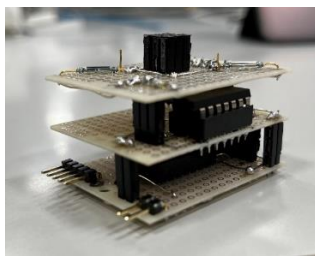
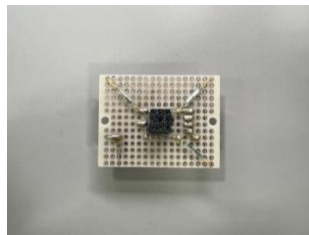


図8 改良版電子ブロック

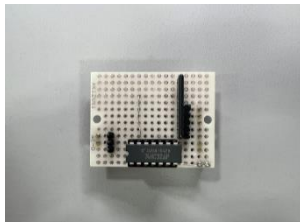




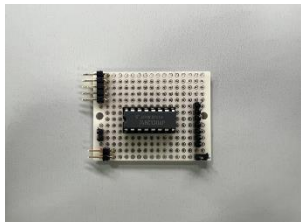
(a) 積層状態



(b) 上層

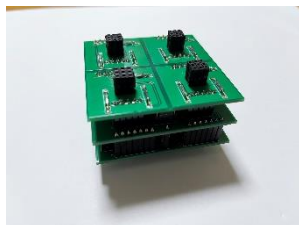


(c) 中段

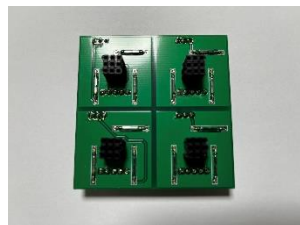


(d) 下段

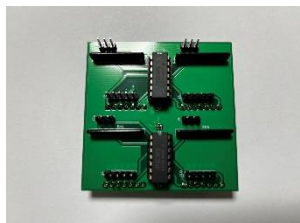
図9 ユニバーサル基板による試作回路



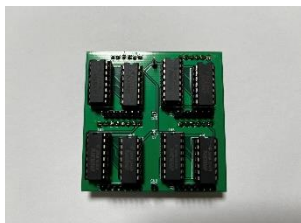
(a) 積層状態



(b) 上層



(c) 中段



(d) 下段

図10 試作したプリント基板

### 5.1 電子ブロックとのインタフェース部

ブロックの上層部の回路図を図11に示す。リードスイッチとヘッダピンで実装している。この層は、直接ブロックと接触する部分であり、ブロックの識別をするためのスイッチとなっている。また、ブロックの方向を判別するためにリードスイッチを用いている。ブロックの4つあるスタットのうち一つに磁石を取り付けることで、ブロックを置いた方向によってリードスイッチの接続状態を変えるようにしている。

また、回路の中央部には3x3のヘッダピンを配置している。4隅のピンとその間のピンの4つのピンが電気的に接続されているかどうかによってブロックの種類を識別している。ブロックの回転も考慮に入れて、使用可能な8つの

ピンをそれぞれ4つずつに分けている。

ブロックに取り付けられる部品の接続パターンによってそれぞれの接続状態が変化し、別するための信号が異なる。ブロックは回転するため、ピンの接続パターンは5種類のみしか存在しないが、方向の状態も認識しているため、それぞれのピンの回転を考慮した解析も行える。そのため、16種類のブロックの判別を行える。

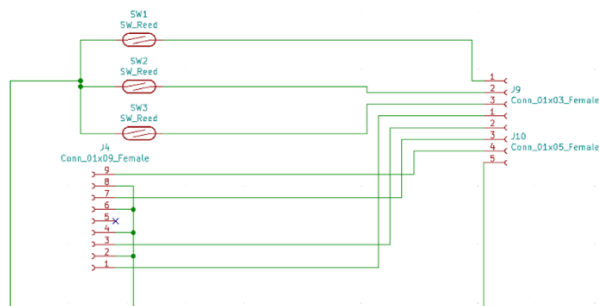


図11 モジュール上層部回路図

### 5.2 電子ブロック状態信号変換部

中層部の回路図を図12に示す。中層部では上層部で作られた上記の信号を受け取り、上層部でリードスイッチを通じてできたブロックの方向の情報を2Bitのデジタル信号で表している。また、この層には10KΩの集合抵抗とロジックICのOR回路が配置されており、リードスイッチから送られてくる3Bitの信号を2Bitのデジタル信号へと変換している。このようにブロックの方向を6Bitデジタル信号として表現し、これらの信号を下層部へと伝達する。リードスイッチの状態とブロックの方向との対応を図13に示す。

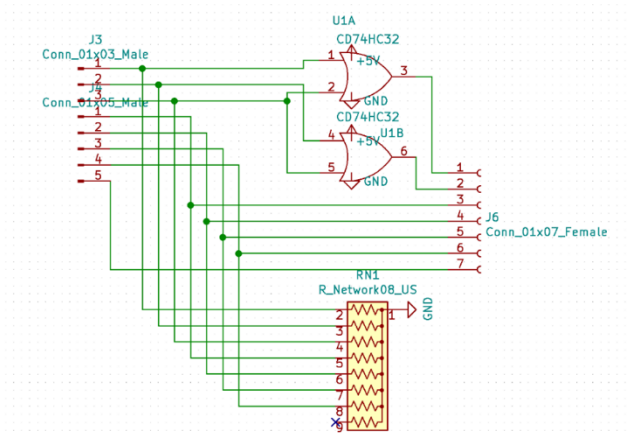


図12 モジュール中層部回路図

















ブロック の方向	リードスイッチの状態			デジタル 番号
				00
				01
				10
				11

図 13 方向の信号対応図

### 5.3 通信回路部

下層部の回路図を図 14 に示す。下層部には、中層部で作られた 6Bit のデジタル信号を Arduino に送るために 8Bit のシフトレジスタとスイッチングするための AND 回路を配置しているほか、上層部の回路と接続するためのピンと、外部からの信号を受けとるためのピン、GND や 5V のピンが配置されているシフトレジスタの動作制御信号を受け取るためのピンを配置している。

シフトレジスタによってパラレル信号からシリアル信号へと変換することで、ピンの使用本数を節約している。AND 回路は、外部からの信号によって上層部のスイッチ部に電気を通すかどうかを制御するために用いている。外部からの 2 つのデジタル信号がともに HIGH のときにのみ電気を通すことでブロックの識別するタイミングを制御することができる。このように、回路を構成することで回路が 1 つずつでも機能するようにでき、数を増やした際にも信号を外部から与えることで連動しやすくなっている。

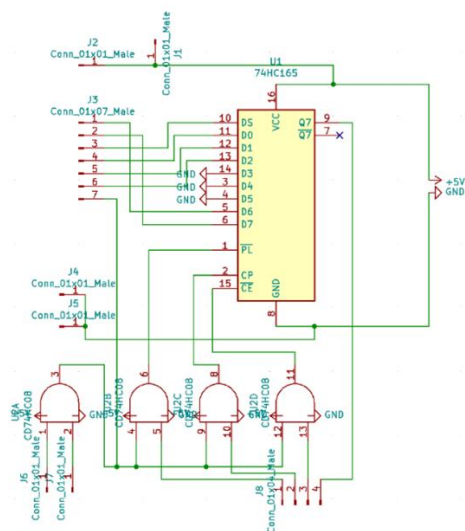


図 14 モジュール下層部回路図

## 5.4 電子回路の反映

前節でのブロック識別回路では, 1 つのブロックの方向,

種類を識別できたが、本研究の回路は、8x8 のグリッド上の電子ブロックをそれぞれ識別する必要がある．そのため、識別する対象のブロックを変更する仕組みを作った．この仕組みでは、ブロック識別回路にデジタル信号を受け取れるようにし、その信号によって、回路上でブロックを識別するか否かを変更できるようにしている．識別するためのデジタル信号は **Arduino** によって制御している．**Arduino** では、ブロックの座標を指定するために、3bit のデジタル信号を出力している．このデジタル信号を 8x8 グリッド座標に適応させるために 3to8 ラインデコーダを用いて、回路上で 8 つの出力チャンネルへとデジタル信号を割り振る．今回は、出力信号をすべて反転し、**Arduino** で指定された一つの出力チャンネルのみ HIGH にし、そのほかを LOW になるように設定している．x軸、y軸の各軸の出力信号は 8 つのうちのいずれか 1 つのみが HIGH となる．この信号を、グリッド上のブロック識別回路へと入力する．これによって、x軸、y軸双方からのブロック識別回路の入力が 2 つとも HIGH になっているのは、回路全体で 1 つの回路のみとなっている．5.3 で述べられているように、入力信号によってブロックの識別が行えるため、64 個のブロック識別回路のうち 1 つの回路だけが信号を出力する．

よって識別回路は、ブロックの状態に応じたシリアル信号を出力し、ブロック識別総数の 64 個のデジタル信号を Arduino へ入力する。しかし、この 64 個の信号は 1 つのデジタル信号へとまとめる必要がある。本デバイスでは、MOSFET が 4 つまとめられている MP4401 を用いて 1 つのデジタル信号をまとめる設計をした。また、MP4401 はプルアップ抵抗を取り付けたため、デジタル信号がすべて反転している。これを元に戻すため、NOT 回路を使用する。

## 5.5 シミュレータへのブロックデータの送信

回路に設置されたブロックは Arduino 内の処理によってブロックの位置を指定し、その位置にあるブロックの状態を外部からデジタル信号として受け取る。受け取った信号を解析し、ブロックの位置、方向、種類を含んだデータを形成する。このデータをグリッドの個数分読み取り解析し、シリアル通信を用いて、電子ブロックインターフェースへと送信する。

ブロックの状態のデータを受け取った電子ブロックインターフェースは、電子回路シミュレーションプログラムと TCP/IC 通信を用いて、データを送信する。また、シミュレーションプログラムはフラグによって回路ブロックのデータの受信をするかを選択することができる。この時、シミュレーションプログラムはマルチスレッドで動作する。メインスレッドでは、シミュレーションプログラムが動作し続けており、別のスレッドで TCP/IP 通信の受信待機を行っている。これによってブロック型インタフェースのブロック回路識別アルゴリズムを変更しても、シミュレーションプログラムへの影響が少なく、変更が容易になる。

## 5.6 シミュレーションプログラムの構造

ここでは、Arduino から送信されたブロックの位置の座標をブロックデータの配列で表現する。ブロック位置を配列として表現することで、配列の要素番号から座標の復元、また、逆に座標から配列の要素へのアクセスが可能となる。また、Arduino からはブロックの位置、方向、種類のデータが送られてくる。位置のデータは配列の要素に適応させるために、方向データは、それぞれの方向を特定させるため、ブロックの種類は、Arduino からの種類データと比較し確定させるために、形成しなおす。また、Arduino からの種類データとブロックの種類を対応付けするために、CSV データとして一覧表を書き出し、インタフェース用データに読み込んでいる。

このように、Arduino から受信したデータをブロックデータとして形成しなおし、変数に代入する。変数に代入する際に、各要素と代入するデータに変化があるかどうかを調べる。1 つでも変更があった場合、TCP/IP 通信で受信するデータのフラグが TRUE になり、回路が更新する。Arduino から受信したデータを以上の処理を行い、シミュレーションプログラムに送信するデータを形成し、送信するという処理を行い続けるようになっている。

## 6. まとめ

本研究では、目では見ることはできない電流や電圧の概念理解を促進させる目的とした、タンジブルユーザーインターフェースのデバイスの開発を目指している。本報では、前報からの課題であった、環境的要因によって AR マーカが正しく認識されないことによるユーザの体験の質の低下の問題を解決すべく、電子基板を用いたデバイスの開発を行った。それに伴い、改良したデバイスのシステム内部の構造、電子基板の構造説明を述べた。電子基板での CARMEL によって本研究の目的である学習の現場での運用を視野に入れた使いやすさという面において前報より、さらに向上したデバイスになった。システム全体の開発は未完成であるが、ユニバーサル基板でのプロトタイプでの稼働を確認している。現在、デバイスの完成に向けて、プリント基板でのデバイスの量産を行っている。量産が完了し次第、電子基板での CARMEL の可能性と活用に関する評価と検証を適宜行っていく。

## 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] 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
- [2] 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.

[3] 岡村定矩.(2012). 新しい科学.(東京書籍)

[4] 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.

[5] 石井裕. "仮想と現実の融合: 3. タンジブル・ビット-情報と物理世界を融合する, 新しいユーザ・インタフェース・デザイン." 情報処理 43.3 (2002): 222-229.

[6] Krestanova, Alice, Martin Cerny, and Martin Augustynek. "Development and technical design of tangible user interfaces in wide-field areas of application." Sensors 21.13 (2021): 4258.

[7] Gohlke, Kristian, Michael Hlatky, and Bram de Jong. "Physical construction toys for rapid sketching of tangible user interfaces." Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. 2015.

[8] Winder, James Ira, and Kent Larson. "Bits and Bricks Tangible Interactive Matrix for Real-time Computation and 3 D Projection Mapping." Proceedings of the 2017 Future Technologies Conference (FTC), The Science and Information (SAI) Organization. 2017.

[9] Toshikazu Ohshima (2018). Tactile MicRocosm of ALife: Haptic Interaction with Artificial Life by Aerial Mixed Reality Display. VRIC '18: Proceedings of the Virtual Reality International Conference - Laval Virtual. April 2018, Article No.: 30, pp 1-4. <https://doi.org/10.1145/3234253.3234320>