

電気回路実験を対象としたプロトタイプ複合現実教材の一提案

丸子兼成*¹ · 金惠鎭*² · 金義鎭*¹

Email: s266521004@g.tohoku-gakuin.ac.jp

*1: 東北学院大学工学研究科

*2: 日本大学商学部

©Key Words

電氣回路、複合現実、学習教材、回路構築、可視化

1. はじめに

教育機関では、実験的な学習による体験学習が重要視されている⁽¹⁾。例えば、大学における電気回路分野の学習では、座学で学習した内容について実験を通じて自身の手で体験することが挙げられる。このような学習では理論的な理解を促進する学習形態が望ましいが、回路の誤接続により正しい測定ができない場合や、機器の損傷や学習の中断といった問題が生じる。そのため、実験環境では安全性や再現性を確保しつつ、試行錯誤を伴う実験的学習の支援が求められる。近年では、実験的学習を支援するアプローチの一つとして、デジタル教材の活用が挙げられる⁽²⁾。電気回路学習に関する研究として、XR 技術を用いた学習環境も提案されており⁽³⁾⁽⁴⁾、実験学習における電圧や電流などの物理量の可視化が試みられている。しかし、これらの教材では複数人での実験学習への対応、直接的な相互作用の不足、機器損傷への対応は十分でない。

我々は、先行研究としてこれまで Mixed Reality (以降 MR と略す) 技術を活用した電気回路学習教材の開発を行っている⁶⁾。先行研究では、ヘッドマウントディスプレイ上に回路模型を表示し、物理量を変更できる教材を提案している。この教材は複数の学習者による利用を想定し、学習者が自身の手を用いて物理量を操作し学習できる環境に調整している。また、実験は仮想空間で行うため、実験用具の損傷に関する問題は発生しない。一方で、先行研究では既に構築された回路模型を対象としており、学習者自身が回路を構築する学習を行うことは難しい。加えて、先行研究では物理量を直接表示していたため、測定器を用いた測定体験までは至っていない。さらに、学習者は必要な支援内容に個人差が存在するため、理解状況に応じて利用できる学習支援機能も必要である。

そこで本研究では、MR 空間上で回路構成から測定までの一連の学習を体験できる電気回路学習教材を提案する。この提案により、学習者は自ら回路を構築し、測定器を用いて物理量を取得するとともに、可視化によって回路構造と物理量との関係について学習できる。本研究では、提案手法および動作検証について述べる。

2. 先行研究における課題点

本章では、先行研究の概要および課題について述べる。

我々は、電気回路学習を対象とした複合現実教材の開発を行っている。先行研究では、MR デバイスとして Microsoft HoloLens 2（以降 HoloLens 2）を用い、学習者がハンドトラッキング機能によって回路模型中の物理量を

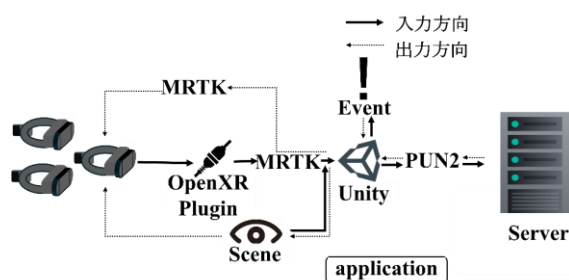


図1. 本教材のシステムデザイン

操作する教材を提案している。開発は Unity を使用し、MR 機能の実装には Mixed Reality Toolkit (以降 MRTK と略す) を用いる。また、状態同期機能の実装には、Photon Unity Networking 2 (以降 PUN2 と略す) を使用している。図 1 に、先行研究で使用するシステムデザインを示す。

先行研究における教材では、電圧源および抵抗から構成される回路模型を MR 空間上に表示し、学習者が回路上の素子进行操作しながら学習を行う。実装した回路は単純な直列回路や並列回路だけでなく、複数の素子および閉ループを含む構成とし、キルヒホッフの法則を扱う学習に対応する。また、回路は自身の電圧および電流を算出し、導線や素子上に表示する機能を実装している。さらに、教材では学習者が素子进行操作することで物理量を変更できるようにし、回路状態の変化に伴う物理量の変化を観察できる環境を実現している。また、複数の学習者間では回路状態を共有しながら学習できることを確認している。一方で、先行研究では以下の課題が残されている。

【課題 1】 は回路構築過程を扱うことができないことである。先行研究では、あらかじめ構築された回路模型を対象としていたため、学習者は完成した回路を操作することはできるものの、回路図を基に素子や導線を配置し、回路を構築することができない。しかし、実際の電気回路実験では、回路図を確認し、回路を構成する作業そのものが重要な学習である。そのため、実験学習では回路構築過程を含めた学習環境が求められる。

【課題 2】 は測定操作を再現することができないことである。先行研究では、回路中の電圧および電流を素子や導線上に数字として直接表示しており、物理量の変化を容易に観察できた。一方で、教材では実際の電気回路実験で行われる電圧計や電流計を

用いた測定操作は再現されていない。測定器の接続方法や測定箇所を選択は電気回路実験における重要な学習内容であるため、測定操作を含めた学習環境が必要である。

【課題3】は回路構成と物理量の関係を把握しにくいことである。先行研究では、回路中の物理量を数値として表示していた。しかし、電流や電位差は本来直接観察できない物理量であり、数値情報のみでは回路内で生じている現象を直感的に理解することが難しい場合がある。また、回路図と実際の回路との対応関係を把握することは初学者にとって難しい場合がある。そのため、教材では学習者が回路構成と物理量との関係を理解するための支援機能が求められる。

本研究では、これらの課題の解決を目的として、回路構築機能、測定機能および学習支援機能を備えたMR教材を提案する。

3. 提案手法

提案手法では、2章で提示した【課題1】から【課題3】への対応を示す。3.1では【課題1】、3.2では【課題2】、3.3では【課題3】への対応について述べる。

2章では、学習者が回路構築過程を体験できないこと、測定操作を再現できないこと、および回路構成と物理量との関係を把握しにくいことを3つの課題として整理した。これらの課題は独立したものではなく、相互に関連している。例えば、実験学習では回路構築過程を扱うことができれば、回路図と実際の回路構造との対応を理解することが難しい。また、学習者は測定操作を再現することができない場合には、物理量の位置を意識する機会が失われ、回路構造と物理量の関係を理解することも困難となる。したがって、これらの課題は個別に扱うのではなく、相互の関係性を踏まえた学習支援として設計することが望ましい。そこで本研究では、共通の回路解析結果を基盤として学習環境を設計し、回路構築、測定および学習支援を機能として実装する。学習者は回路を構築し、測定器を用いて物理量を確認しながら学習を進めることができる。

3.1 体験型実験の設計

ここでは【課題1】への対応として、学習者が回路構築過程を体験できる学習環境を設計する。電気回路実験では、学習者自身が回路図を基に回路を構築する過程そのものが重要な学習内容となる。学習者は回路構築を通して、回路図と実際の回路構造との対応関係を理解することが期待される。本システムでは、学習者が回路素子および導線をMR空間上に直接配置し、回路を構築できるよう設計する。また、提案システムでは、構築された回路に対して物理量を算出する回路解析機能を備える。回路の接続情報を基に各節点電位および各素子を通る電流を算出することで、学習者は回路構造と物理現象との対応関係を確認できる。

3.2 測定体験

ここでは【課題2】への対応として、回路中の物理量を測定操作で取得する学習環境を設計する。電気回路実験では、回路構築後に電圧計や電流計を用いて物理量を測

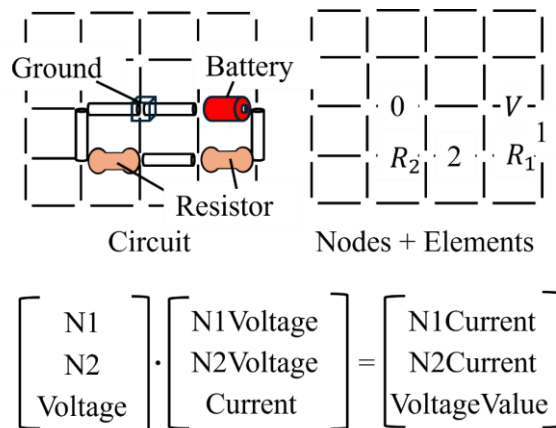


図2. 回路解析処理による物理量導出の流れ

定する過程が含まれ、測定対象の選択や接続方法そのものが重要な学習内容となる。一方、物理量を直接表示する方式では結果のみを確認することになり、測定操作を学習することはできない。そのため本システムでは、学習者が回路中の任意の位置に測定器を接続することで、電圧および電流を取得できるよう設計する。電圧計は二点間の電位差を取得するために用いられ、電流計は回路経路における電流を取得するために用いられる。また、実際の実験環境との対応を図るため、実験環境では測定器の特性も考慮した測定環境を提供する。さらに、測定結果は測定器の接続状態に応じて変化するため、学習者は接続方法の違いが測定結果へ与える影響についても確認できる。これにより、本研究では測定結果だけでなく測定過程そのものを学習対象として扱うことを目指す。

3.3 学習支援

ここでは【課題3】への対応として、回路構造と物理量の関係を視覚的に理解するための学習支援機能を設計する。電気回路の学習では、電流や電位差といった物理量を直接観察することができないため、学習者は理論と現象を対応付けて理解することが難しい場合がある。また、電気回路は図上では理解できる内容であっても、実際の回路構造との対応関係を把握することが困難な場合がある。そのため本システムでは、回路構造および解析結果に基づき、電圧分布、電子可視化および回路図表示を行う。電圧分布表示では、回路中の各位置における電位の変化を視覚的に提示し、電子可視化では、回路中を流れる電子の移動を表現する。さらに、構築される回路は回路図を生成し、MR空間上に提示する。学習者は自ら構築した回路と生成された回路図を比較しながら学習を進めることができるため、回路図上の接続関係と実際の回路構造との対応関係を理解しやすくなる。これにより、本研究では抽象的な記号表現と物理的な回路構造を関連付けた学習を支援する。これらの機能は補助的な学習支援として位置付ける。学習者によって必要な支援の程度は異なるため、各機能は個別に表示および非表示を切り替えられるようにし、理解段階に応じた利用を可能とする。

4. システム開発

システム開発では、提案手法に基づいて実装したMR学習支援システムの構成および実現方法について述べる。開発では図1に示す先行研究と同様のシステムを用いた。

本システムは、MR 空間上における回路構築から物理量の算出、測定操作および可視化表示までを一連の処理として扱う構成となっている。図 2 に回路解析処理の流れを示す。教材は学習者による素子配置から回路構造を生成し、その接続情報を基に回路解析を行うことで電圧および電流を算出する。算出結果は測定機能および学習支援機能で共通して利用される。

4.1 回路構築および回路解析機能

本システムでは、学習者が MR 空間上において電圧源や抵抗などの素子および導線を配置することで回路を構築する機能を実装した。素子はグリッド状の配置領域に基づいて配置される。各回路素子は複数の接続端を有しており、各端子には対応するノードを割り当てる。導線が配置された場合には、接続されたノード同士を統合することで回路全体の接続関係を表現する。このように生成したノード情報は、回路解析および回路図生成の基礎データとして利用される。

構築された回路は、生成されたノード情報を基に回路解析処理へ入力される。本システムでは、学習者によって構築される回路構造が一定ではなく、素子の追加や接続変更に応じて回路構成が変化する。そのため、ここではあらかじめ回路ごとの計算式を設定する方式ではなく、構築された回路から自動的に物理量を算出できる手法が必要となる。そこで、本システムでは修正節点解析（以降 MNA と略す）を採用した。MNA は回路の接続情報から回路方程式を構築できるため、回路構成が動的に変化する環境との親和性が高い。そのため、学習者が構築した任意の回路に対して物理量を自動的に求めることが可能となる。本システムでは、生成されたノード情報を基に、各素子の接続関係を反映した回路方程式を構築する。各素子の接続端を節点として扱い、導線によって接続された端子を同一節点として統合することで、学習者が構築した回路を MNA で扱うことのできる回路表現へ変換する。システムは構築した回路方程式に MNA を適用することで、各節点電位および各素子を通る電流を算出する。また、素子の追加や削除、接続変更が行われた場合には回路解析を再実行し、回路状態に応じた物理量を更新する。

算出された節点電位および電流値は、測定機能および学習支援機能の基礎データとして利用される。算出結果は電圧計および電流計による測定結果の表示に加え、電圧グラフ表示や電子可視化機能の更新にも利用される。

4.2 測定機能

本システムでは、学習者が回路中に測定器を接続することで電圧および電流を取得できる測定機能を実装した。電圧計は二点間に接続することで電位差を測定し、電流計は回路経路に直列接続することで電流値を取得する。測定結果は回路解析によって算出された節点電位および電流値を基に表示される。電圧計では接続された二点の節点電位差を計算することで測定値を求める。一方、電流計では接続箇所を流れる電流値を取得し表示する。これにより、学習者が構築した回路構成に応じた測定結果を提示できる。また、本システムでは測定器に内部抵抗を設定した。実際の電圧計および電流計には内部抵抗が存在し、測定器の接続によって回路状態に影響を与える場合がある。そのため、本システムでは実際の測定器同様に内

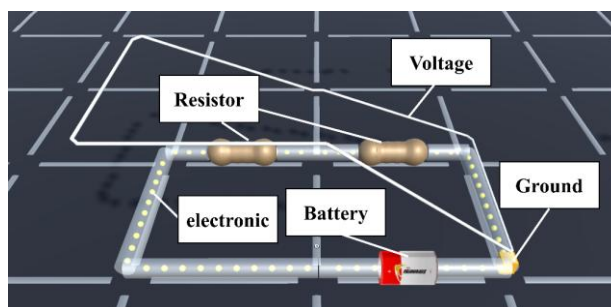


図 3. 回路中の電圧および電子可視化例

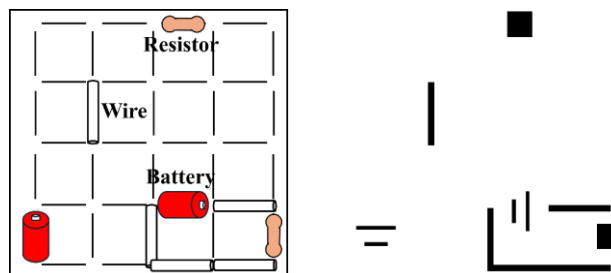


図 4. 構築回路と生成回路図の対応例

部抵抗を考慮した回路解析を行うことで、実際の測定器に近い挙動を再現している。

さらに、測定結果は測定器を接続した時点で再解析を行い、最新の回路状態を反映した値を表示し、値は測定器の接続状態に応じて変化する。これにより、学習者は目的とする物理量を取得するために適切な測定箇所や接続方法を考えながら操作を行う必要がある。このように、測定機能は測定器の接続方法と測定結果との関係を理解しながら学習を進められる構成とした。

4.3 可視化および回路図生成機能

本システムでは、回路中の物理量を直感的に理解するための可視化機能を実装した。ここでは回路解析によって算出された物理量を視覚的に提示し、回路構造と物理量との関係を理解しやすくすることを目的とした。

電圧表示では、各節点電位を基準電位との差分として算出し、回路上に電圧分布として表示した。具体的には、算出した節点電位を用いて電圧グラフを生成することで、回路全体における電位変化を確認できるようにした。これにより、学習者は電源による電位上昇や抵抗による電圧降下を視覚的に把握できる。

また、電流表示では、電子を表す球状オブジェクトを導線上で移動させることで、回路中を流れる電流の経路を視覚的に表現した。電流は直接観察できない物理量であるため、本機能により電流の方向や経路を直感的に理解できる。図 3 に回路中の電圧および電子可視化例を示す。

さらに、本システムでは、構築された回路の接続情報を用いて回路図を生成する機能を実装した。本機能では、グリッド上に配置された素子の種類および接続情報を取得し、素子に対応する回路記号と接続線を描画することで回路図を生成する。生成された回路図は、学習者が構築した回路に対応しており、回路図と構築した回路を比較しながら学習を進めることができる。回路図は回路構築後に自動更新されるため、学習者は回路を変更するたびに最新の回路図を確認できる。これにより、学習者は回路図と構築した回路との対応関係を確認しながら理解を深め



図 5. 提案システムの利用風景

られる。図 4 に構築回路と生成回路図の対応例を示す。また、これらの可視化機能は学習者ごとに表示方法を切り替えられる構成とした。表示状態は各学習者の端末で個別に管理され、共有される回路状態には影響しない。

5. 動作確認

動作確認では、提案システムに実装した回路構築機能、回路解析機能、測定機能および学習支援機能についてそれぞれ確認した。

動作確認では、3 名でそれぞれ HoloLens 2 を装着し、同一の MR 空間を共有した状態でシステムを利用した。ここでは、回路構築機能、回路解析機能、測定機能および学習支援機能について、各機能がそれぞれの視点で正常に動作することを確認した。また、実験者らはマルチユーザー間で回路状態および測定結果が共有されることを確認した。図 5 に動作確認時の様子を示す。

回路構築機能では、学習者が回路素子および導線を実験台上に配置し、任意の回路を構築できることを確認した。また、格子状の配置領域を用いることで、素子および導線を近くに移動し離すと所定の位置へ配置され、接続情報が正しく取得されることを確認した。さらに、素子や導線の追加、削除および再配置を行った場合にも接続情報が適切に更新され、回路構成の変化に対応できることを確認した。

回路解析機能では、学習者によって構築された回路の接続情報を基に回路解析が行われ、各節点電位および各素子を流れる電流が算出されることを確認した。また、回路構成を変更した場合には解析結果が自動的に更新されることを確認した。さらに、回路構成に用いる抵抗値や電源電圧などのパラメータを変更した場合にも、再計算された結果が反映され、回路状態に応じて物理量が変化することを確認した。

測定機能では、電圧計および電流計を用いて回路中の物理量を取得できることを確認した。電圧計は測定対象の両端へ接続することで電圧値を表示し、電流計は回路経路へ接続することで電流値を表示した。また、測定器の接続位置や接続方法に応じて表示される測定結果が変化することを確認した。これにより、測定器では適切な接続によって目的とする物理量を取得できるだけでなく、不適切な接続を行った場合には異なる測定結果が得られることを確認した。

学習支援機能では、回路図表示機能、電圧表示機能および電子可視化機能について確認した。回路図表示機能では、学習者が構築した回路の接続情報に基づいて対応する回路図が生成されることを確認した。また、回路構成の変更に応じて回路図が更新されることを確認した。電圧表示機能では、回路中の各位置における電位がグラフとして表示され、電源による電位上昇や抵抗による電圧降下が確認できることを確認した。さらに、電子可視化機能では、電子を表す球状オブジェクトが導線上を移動することで回路中の電流経路を表現できることを確認した。これにより、学習者は回路中を流れる電流の様子を視覚的に把握できることを確認した。また、各学習支援機能について表示および非表示の切り替えは正常に動作することを確認した。

また、以上の機能はマルチユーザーによる利用環境においても、各利用者が同一の回路状態を共有できることを確認した。利用者による素子配置や測定結果は他の利用者にも反映され、共通の回路状態を参照しながら学習できることを確認した。これにより、本システムが協調学習環境として利用可能であることを確認した。

以上の結果より、提案システムに実装した回路構築機能、回路解析機能、測定機能および学習支援機能が正常に動作することを確認した。これにより、学習者が回路構築から測定までの一連の学習活動を MR 環境上で実施できることが確認された。

6. まとめ

本研究では、電気回路実験を対象とした MR 教材を提案した。提案手法およびシステム開発で、先行研究の課題に対応するシステムを実装し、動作確認では各機能が動作することを確認した。今後は、電気回路学習を対象とした評価実験を実施し、本システムの有効性について検討する予定である。

参考文献

- (1) 文部科学省:“高等学校指導要領(平成 30 年告示)”,平成 29・30・31 年改訂学習指導要領(本文、解説),文部科学省, pp.103 (2018).
- (2) 文部科学省:“デジタルを活用した大学・高専教育高度化プラン”,令和 2 年度第 3 次補正予算(案) 当日説明資料,文部科学省, pp.4 (2020).
- (3) 馬文鵬, 伊藤陽介:“電気回路を対象とする拡張現実技術を用いた実験学習支援システムの有用性”,日本産業技術教育学会誌, vol.59, no.1, pp.9-18 (2017).
- (4) Elliott Wolbach, Michael Hempel, Hamid Sharif:“Leveraging Virtual Reality for the Visualization of Non-Observable Electrical Circuit Principles in Engineering Education”, Virtual Worlds, vol.3, no.3, pp.303-318 (2024).
- (5) 丸子兼成, 金恵嶺, 金義嶺:“キルヒホッフの法則を題材とした複合現実教材の実装と検証”,令和 8 年東北地区若手研究者研究発表, pp.63-64 (2026).