

# R-V 空間相互間で物理現象を伝達する 複合現実遷移モジュールの開発(2)

—電圧・電流と磁力を伝達するモジュール群—

敷島 歩<sup>\*1</sup>, 福田 裕美<sup>\*1</sup>, 木村 朝子<sup>\*1</sup>, 柴田 史久<sup>\*1</sup>

Development of Mixed Reality Transition Modules Transmitting Physical Phenomena  
between Real and Virtual Spaces, Part II

- A Set of Modules Transmitting Voltage/current and Magnetic Force -

Ayumu Shikishima<sup>\*1</sup>, Yumi Fukuda<sup>\*1</sup>, Asako Kimura<sup>\*1</sup> and Fumihisa Shibata<sup>\*1</sup>

**Abstract --- In this paper, we propose a general-purpose toolkit for transmitting electrical and magnetic phenomena between the real and virtual spaces. So far, we have proposed mixed reality transition modules, called “RV-XoverKit,” for interactions related to the motion of objects and mechanical phenomena. In this research, we extend RV-XoverKit to the field of electricity and magnetism and propose “RV-XoverKit for EM” to transmit voltage, current and magnetic force between real and virtual spaces. Regarding voltage, current, and magnetic force, after sorting out the items to be transmitted and interacted between the real and the virtual spaces, we designed and implemented modules for each item.**

**Keywords: Mixed reality, RV-XoverKit for EM, Voltage, Current, Magnetic force**

## 1 はじめに

近年、複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術への関心が高まり、教育や医療、エンターテインメントといった様々な分野で活用が期待されている。MR 技術を活用する上で、さらなる表現力の向上は重要な課題である[1]。その 1 つの方向性として、現実 (R) 空間と仮想 (V) 空間相互の関係性を高めるといった考え方がある。両空間を連携させた研究には、例えば、Leitner らの研究[2]や青木らの研究[3]がある。前者では、現実のドミノとテーブルトップに投影された仮想のドミノが連携して動作するものとなっているが、現実と仮想が入れ替わる部分についてはポータルと呼ばれる装置で隠されており、両空間が相互に作用しあっているとまでは言い難い。一方、青木らの研究は、V 空間に存在する小人が R 空間に存在する物体を動かしたり、R 空間に存在する物体に V 空間の小人が動かされたりするものであり、現実と仮想の相互作用が行われているが、両者の相互作用には専用の装置が必要となり、汎用的なものとはなっていない。我々もかつて「ドミノ倒

し」を題材とした MR アトラクション「DOMINO Topping」[4]を開発したが、ドミノ牌の傾きを小型スイッチで検出する、ドミノ牌の底面をアクチュエータで押し出して倒す、というように「ドミノ倒し」に特化した仕組みで実現していた。

このような背景から我々は、R 空間と V 空間の境界における相互作用を「R-V 越境転移」と呼び、これを実現するための仕組みを一般化した技術体系の構築を目指してきた[5-10]。これまでの研究では、物体が倒れる等の力学的な物理現象を対象に、R-V 空間相互間において伝達する現象を整理し、それを実現するモジュール群の設計および実装について検討してきた。その応用先としては、エンターテインメント分野や教育分野から産業応用まで幅広い。例えば、工場などでの利用を想定すると、既存設備の一部を新しい設備へと更新する際に、導入予定の新規設備を V 空間で設計・シミュレーションした上で、それを R-V 越境転移を利用して既存設備に繋いでその効果を検討する、といった使い方が考えられる。しかし、力学的な物理現象のみでは、R 空間と V 空間を繋げる部分が制限されてしまう。

そこで本研究では、力学的な物理現象を対象とした R-V 越境転移という考え方を、電気や磁気によ

\*1 立命館大学大学院情報理工学研究科

\*1 Graduate School of Information Science & Engineering, Ritsumeikan University

る物理現象へと展開し、電圧や電流、磁力などの物理現象を R 空間と V 空間の間で相互に伝達する仕組みについて検討する。検討にあたっては、電気や磁気による物理現象を R-V 境界において相互に作用させるといった仕組みを理解する上で、わかりやすい題材として電気回路を取り上げ、R-V 両空間の間でどのような情報を伝達すべきか、伝達に際してどのような仕組みを用いるか、などを検討した。本論文では、これらの設計および実装した結果について述べる。

## 2 複合現実空間における現実と仮想の相互作用

### 2.1 RV 越境転移と RV-XoverKit

MR においては、R 空間と V 空間のそれぞれに実物体と仮想物体が存在する。我々は、現実と仮想の境界を「R-V 境界」と定義し、R 空間の実物体から V 空間の仮想物体へ何かしらの作用をさせること、およびその逆を「R-V 越境転移」と総称している。R-V 越境転移はさらに、両空間の間で状態がそのまま引き継がれるように情報を伝達する「R-V 遷移」と、その補集合で情報の伝達に際して簡略化や変換などを許容する「R-V 情報伝達」から成る[6, 10]。各概念を具現化するには、現実の物理現象を計測するセンサや現実の物体に対して作用するアクチュエータなどのモジュール群とそれを制御するプログラムが必要となる。本研究ではこれらをまとめてツールキットと呼び、R-V 遷移を実現するものは RV-TransitionKit、R-V 情報伝達を実現するものは RV-MessengerKit、両者をまとめて RV-XoverKit と呼ぶ。各ツールキットはセンサやアクチュエータ、小型コンピュータから成るハードウェアユニットと、それらを制御するソフトウェアモジュールから構成される。

### 2.2 研究課題と関連研究

これまでの研究[5-10]では、物体が倒れる、物体が転がるといった力学的な現象を対象として、R 空間と V 空間の間で伝達すべき情報を分類し、RV-XoverKit として提案してきた。しかし R 空間には、例えば、電気や磁気、温度、音など様々な現象や事象が存在し、R-V 越境転移の概念としてはこれらを伝達の対象とすることが考えられる。そこで本研究では、これらの中から電気と磁気に着目し、これを伝達する仕組みの実現について検討することとした。

本研究が目指すのは、例えば、R 空間の電気回路に電流を流すとそこにつながる V 空間の仮想の電気回路の LED が点灯する、V 空間に仮想の磁石を配置するとその影響を受けて R 空間の磁石が動く、といった両空間相互における電気や磁気に関連した

情報伝達の仕組みの実現である。電気や磁気に関連したあらゆる情報を扱える仕組みを実現するのは難しいため、本研究では端緒として、電気については中学校程度で扱う直流の電気回路を対象とし、磁力についてもそれに見合った現象を扱うこととし、そのための RV-XoverKit for EM を設計、実装する。

MR 技術と電気や磁気に関連付けた研究例がいくつか存在する。小林らは手袋型の触覚ディスプレイとタブレット PC を組み合わせて、磁束分布を可視化するとともに磁場エネルギーを触覚に変換する磁場体験システムを提案している[11]。この研究は、目に見えない磁場というものの理解や学習サポートのために、AR による可視化と触覚提示を組み合わせたシステムの提案であり、R 空間と V 空間を相互作用させるという我々の研究とは目的が異なっている。田中らは電氣的ノイズの測定結果を AR グラスによって可視化するツールを提案している[12]。この研究では、AR 技術を利用しているが、測定結果の可視化に重点が置かれており、MR 技術によって仮想の回路を配置するようなものとは異なる。程らは電気回路における電位や電流の時間的変化を MR 技術で可視化する MR 電気回路システムを提案した[13]。この研究は、電気回路を対象に、回路を AR マーカに対応させた仮想オブジェクトで組み上げるといった点において本研究と似ている。しかしながら、回路の組み合わせの自由度はある一方、すべての回路が AR マーカを使った仮想の回路で組み形となっており、現実の回路と仮想の回路を繋いでそ

表 1 RtoV 越境転移の伝達項目

Table 1 RtoV Transmission Items

分類	伝達項目	計測装置
電気	電流	電流計
	電圧	電圧計
電磁気	電磁誘導	コイル, 電流計 リニアホール IC
	相互誘導	コイル, 電流計 リニアホール IC
	電磁場	リニアホール IC
磁気	磁場	リニアホール IC

表 2 VtoR 越境転移の伝達項目

Table 2 VtoR Transmission Items

分類	伝達項目	伝達装置
電気	電流	電源
	電圧	電源
電磁気	電磁誘導	電磁石, 電源
	相互誘導	電磁石, 電源
	電磁場	電磁石, モータ
磁気	磁場	電磁石, モータ

の挙動を確認できる本研究とは異なる。

AR/MR 技術を教育へ応用するという研究例も存在する。Suzuki らの研究[14]では、AR 画面上にグラフィカルな要素を描くとそれがリアルタイムで物理的な動きをするというインタフェースを提案している。この研究は我々がこれまで進めてきた検討[5-10]に関連したものであるが、画面上におけるグラフィカルな要素のインタラクティブ性を重視したものとなっており、R 空間と V 空間を繋ぐという我々のコンセプトとは異なっている。Javaheri らは、初等物理学教育において AR によるインタラクティブな環境を提供することで電気回路の学習をサポートするシステムを提案している[15]。このシステムは、スマートボックス、スマートケーブル、可視化アプリから構成されており、スマートボックスに電気部品を接続した上でボックス同士をスマートケーブルで接続して回路を構成する。可視化アプリでは、マーカによってスマートボックスを追跡し、それに基づいて電気部品がどのように接続されているのかを AR によって可視化している。R 空間において予め準備した電気部品を接続して回路を構成し、それをマーカで認識して AR で可視化するというアプローチは本研究と同様であるが、R 空間のみで回路を構成しているという点は本研究と異なっており、文献[13]に近い研究である。本研究のように R 空間と V 空間を繋げることで、V 空間でのシミュレーションの結果を R 空間と連動させるなど、応用の幅が広がると考えられる。Wu らによる研究[16]では、ブレッドボード上に構成された回路の電流や電圧を可視化する試みがなされている。回路の目に見えない挙動を可視化することで、回路に関するユーザの学習や理解を促進し、デバッグにも効果がある。さらに Wu らは文献[17]において、ユーザがプロキシを使用して仮想回路を物理世界に拡張できる回路プロトタイピング環境を提案している。この研究では、現実世界の部品（モータや光センサ等）を、ソフトウェアで設計された回路とともに使用することができ、仮想回路と物理世界を繋げるという観点では本研究と同様であるが、回路のプロトタイピングを重視した設計となっており、MR 技術による R 空間と V 空間の融合といった考え方は含まれていない。

以降では、まず R 空間と V 空間の間でどのような情報を伝達するかを検討し、その結果に基づいて情報の伝達方法を設計、実装した結果について述べる。さらに、現実の回路と仮想の回路が組み合わさった回路における伝達判定機能について説明する。その後、実際に製作したモジュールについて、R 空間と V 空間の間でスムーズな情報伝達の実現可能

かについて、その性能評価を行った結果について考察する。

### 3 RV-XoverKit for EM の設計

#### 3.1 伝達する情報および伝達方法

R 空間から V 空間へと情報を伝達する場合、何らかの方法で R 空間での現象を計測する必要がある。逆に V 空間から R 空間へと情報を伝達する場合についても、何らかの仕組みを用いて R 空間側に物理的な現象を発生させる必要がある。本研究で対象とする電気や磁気の場合、R 空間での現象を計測するセンサや R 空間へと影響を与える仕組みはある程度限られているため、先にどのようなセンサや仕組みが利用できるかを考えた上で、両空間の間で伝達する情報を整理した（表 1 および表 2）。

表 1 は R 空間の実物体から V 空間の仮想物体へ伝達する情報とその手段（以降では、計測装置と呼ぶ）をまとめたもので、以降では R 空間から V 空間へ情報を伝達することを「RtoV (Real to Virtual)」と呼び、その際に伝達する情報を RtoV 伝達項目と呼ぶ。表 2 は V 空間の仮想物体から R 空間の実物体へ伝達する情報とその手段（以降では、伝達装置と呼ぶ）をまとめたもので、以降では V 空間から R 空間へ情報を伝達することを「VtoR (Virtual to Real)」と呼び、その際に伝達する情報を VtoR 伝達項目と呼ぶ。表 1、表 2 における電磁誘導とは、コイルに磁石を近づけたり遠ざけたりしてコイル内の磁場が変化するとコイルに電流が流れる現象のことである。相互誘導とは、片方のコイルの電流が流れると、コイル内部に磁場が発生し、もう片方のコイルに電磁誘導が発生することである。電磁場とは、電流が生み出す磁場のことである。

R 空間と V 空間の間での具体的な伝達方法は伝達項目に依る。例えば、R 空間から V 空間へ電圧を伝達する場合は、R 空間の電気回路に電圧計を接続し、電圧を計測してその値を V 空間の電気回路へ伝達し反映させる。V 空間から R 空間へ電圧を伝達する場合には、V 空間の電気回路における電圧の値を元に R 空間の電気回路に電源を使用して電圧を与える。

伝達項目によっては、複数の実現方法が考えられる場合もある。例えば、現実の磁石と仮想のコイルが存在するという状況において、R 空間の磁石を V 空間のコイルに近づける場合を考える。この場合に伝達する情報は RtoV 電磁誘導に該当し、伝達する方法は 2 種類考えられる。1 つ目は、コイルを使用して伝達する方法である。コイルを使用して電磁誘導を発生させ電流を計測し、その値を V 空間へ伝達し反映させる。2 つ目は、リニアホール IC とい

うセンサを使用する方法である。リニアホール IC とは磁場を計測するセンサで磁場の強さや S 極か N 極かの判別ができる。これを用いて磁石が発生させている磁場を計測し、その値から電磁誘導で生じると推測できる電流を計算し、計算した値を V 空間へ反映させる方法である。ただし前者については、V 空間において再現したいものを R 空間においても準備することになる点に留意すべきである。

### 3.2 設計上の留意点

RV-XoverKit は、特定のシステム専用ではなく様々な状況や環境で利用できる汎用的なモジュールを目指している。そのためには、ソフトウェアモジュールをハードウェアに依存しない形で抽象化して設計し、個々のハードウェアの差異を吸収する仕組みを実現する必要がある。そこで、ソフトウェアモジュールには、本モジュールの使用者がプログラムを作成する上で必要な API (Application Programming Interface) を定義し、個々のハードウェアの差異は、ハードウェアごとに準備するコンフィグレーションファイルから必要な情報を読み込むことで吸収する設計とする。

### 3.3 R-V 境界における接続判定

RV-XoverKit において V 空間の仮想物体の配置は、コンテンツ開発者にゆだねられている。V 空間に存在する仮想物体が正しく R-V 越境転移される位置に配置されていれば問題ないが、そうではない場合、本来は繋がるべきではない R-V 境界が繋がってしまうという問題が発生し得る[8]。例えば、R 空間と V 空間にそれぞれ電気回路が存在し、両空間の電気回路が繋がることで閉回路が構成できる場合を考える。V 空間の電気回路が R 空間の電気回路と繋がる位置に配置されていれば問題はないが、そうでない場合、閉回路が構成されていないにもかかわらず電気回路として動作するという矛盾が発生する。この問題を解決するためには、V 空間の物体が意図した位置に正しく配置されているのかの判定を行う必要がある。力学的現象を扱う先行研究[6, 10]では、両空間の物体の位置・姿勢のみを考慮すればよかったが、電気や磁気の伝達に関しては、電気回路としての整合性についても考える必要がある。本研究では、これらを R-V 境界接続判定機能と呼ぶ。

## 4 RV-XoverKit for EM の実装

### 4.1 システム構成

前章の方針にそって RV-XoverKit for EM を実装するには、そこで利用する計測装置や伝達装置、およびそれらを制御するコンピュータと制御用プロ

ラムについて検討する必要がある。力学的現象を扱うこれまでの RV-XoverKit では、計測装置がセンサに、伝達装置がアクチュエータに該当し、センサやアクチュエータ、小型コンピュータから構成されるものをハードウェアユニット、それらを制御するプログラムをソフトウェアモジュールと呼んでいたため、RV-XoverKit for EM でもこの呼称を用いる。さらに、3.3 節で述べた R-V 境界接続判定機能を実現するには、R 空間において電気回路がどのように繋がっているかをシステムが把握する必要がある。そのため、本研究では R 空間において電気回路を構成する部品をハードウェアブロックと定義し、ハードウェアブロックのみを用いて電気回路を組みここととした。ハードウェアブロックは、物理実験の学習キット等に含まれる電気回路のパーツと同様のものであるが、詳細は後述する。

システム全体の構成図を図 1 に示す。システムは、MR 空間を描画する PC とそれに接続された HMD、RV-XoverKit for EM の中核であるハードウェアユニットから構成される。HMD には Varjo 社の XR-3 を採用した。PC の仕様は、OS が Windows 10、搭載 CPU が Intel(R) Core(TM) i9-10980XE、メモリは 128GB、ビデオカードが NVIDIA GeForce RTX 3090 である。

電流、電圧や磁力を扱うことを考えると、様々な計測装置や伝達装置を接続可能で、プログラミングの自由度についても高い必要がある。そこで、本研究では、ハードウェアユニットの制御用コンピュータとして、Arduino を採用し、これに計測装置や伝達装置を接続して制御することとした。V 空間におけるコンテンツ開発には Unity を使用することを想定し、コンテンツ開発者は Unity 上に用意する API を介して RV-XoverKit for EM を使用する。図 2 にプログラムの構成を示す。

プログラムを作成する段階で使用するコンフィグレーションファイルやソフトウェアモジュールを選択し、ソフトウェアモジュールを統括する統括プログラムとのメッセージのやり取りでモジュールを使

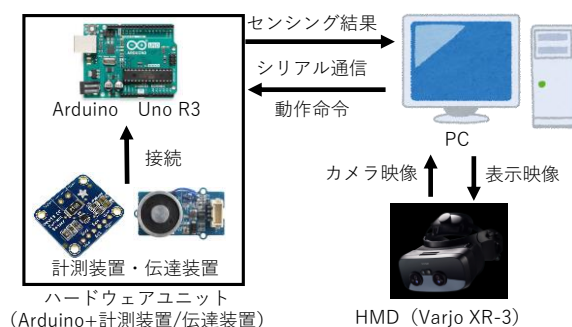


図 1 システム構成図

Fig.1 System configuration diagram

用する。ソフトウェアモジュールは、Arduino との通信を行い、その通信で計測装置や伝達装置を制御する。計測装置や伝達装置の違いはコンフィグレーションファイルを使用して性能差を吸収する。コンフィグレーションファイルには、対象の装置の仕様などが書き込まれており、これによって装置の誤操作、誤動作を防止する。

ハードウェアユニットは、計測装置や伝達装置とそれらを制御する制御用コンピュータの組み合わせである。ハードウェアユニットは、1つの計測装置や伝達装置と制御用コンピュータのセットで扱い、装置を変更する場合は、制御用コンピュータごとと交換する。このような方法をとることでソフトウェアモジュールの使用者がハードウェアユニットを容易に使用することができ、制御用コンピュータに書き込まれたプログラムと装置の不整合や誤配線といった問題を回避することができる。

RV-XoverKit for EM では、電気や磁気に関しては何でも伝達できるというわけではなく、計測装置や伝達装置、Arduino の仕様上、伝達できない場合が存在する。例えば、電流計の計測上限を超える電流や Arduino が制御できない電気回路などが該当する。このような状況を回避するため、RV-XoverKit for EM を使用して R 空間と V 空間の間で電流や電圧などの伝達を行う際には、コンテンツ開発者は、ハードウェアブロックのみ使用して電気回路を作成することとした。ハードウェアブロックとは、電気部品をはんだ付けしたユニバーサル基盤にマーカを取り付けたものである(図3)。ハードウェアブロックには LED や抵抗、スイッチ、三叉配線(並列回路を作成するためのもの)や直線配線といった様々な種類のハードウェアブロックが存在する。提供するハードウェアブロックの種類や個数をコントロールすることによってユーザーが作成可能な電気回路を制限している。ハードウェアブロック同士は、左右のピンソケットにジャンパワイヤを差し込み接続する。ハードウェアブロック製作上の制

約として、ユニバーサル基盤を使用して作成しているため、ユニバーサル基盤に搭載できる大きさの素子であることや Arduino と併用して使用することができる素子であるという条件がある。図4は図3のハードウェアブロックを回路図で表したものである。ハードウェアブロックに使用しているマーカには Varjo 社が提供しているマーカを使用している。

RV-XoverKit for EM における V 空間の回路は、Unity 上で作成する。最初に、配線用のスクリプトを使用する LED 等の部品のモデルにアタッチする。その後、Unity の設定画面(Inspector 画面)において仮想の部品が何に接続されているのかを設定することで V 空間の回路を構成することができる。また、V 空間における仮想の素子の配置に関しては、ユーザーが好きな位置に配置できるモードと部品ごとに指定したマーカ上に配置するモードがある。

#### 4.2 R-V 境界接続判定機能の実装

3.3 節で述べた R-V 境界接続判定機能は、伝達位置判定機能と電気回路判定機能に分けられる。伝達位置判定機能とは、V 空間の物体が伝達される位置に正しく配置されているのかを判定する機能である。伝達位置の判定には、マーカと仮想のバウンディングボックスを使用して判定する。マーカは、Varjo 社が提供しているのマーカを使用する。マーカを R-V 越境転移される位置に配置し、システムがその位置姿勢を取得した上で、その位置姿勢にあわせて仮想のバウンディングボックスを配置する。システムは、このバウンディングボックス内に仮想物体が存在すれば正しく伝達される位置に仮想物体が存在していると判定し、バウンディングボックス外に仮想物体が存在すれば正しく伝達される位置に仮想物

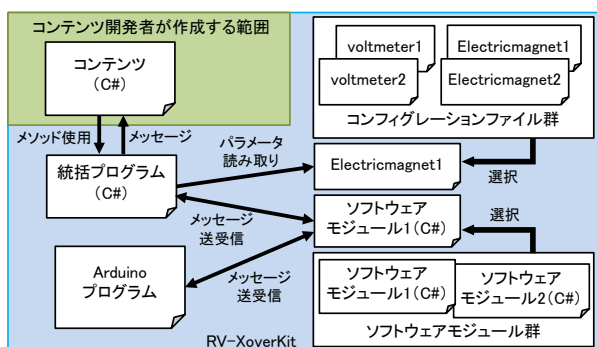


図2 プログラム構成図

Fig.2 Program configuration diagram

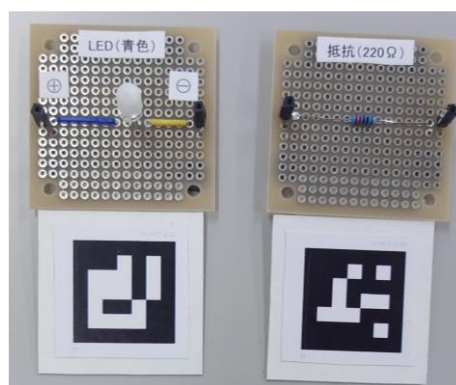


図3 ハードウェアブロック

Fig.3 Hardware blocks



図4 回路図

Fig.4 Circuit diagram



体が存在しないと判定する。

一方、電気回路判定機能とは、R空間の電気回路とV空間の電気回路を合わせて閉回路になっているかどうかを判定する機能である。この電気回路判定機能には、R空間側の回路の判定とV空間側の回路の判定のそれぞれの判定が必要となっている。V空間側の回路の判定方法としては、V空間側の仮想の電気部品がどのように接続されているのかはコンテンツ開発者が設定し、その情報をもとに判定する。R空間側の電気回路は、ハードウェアブロック同士を、マークをつけた銅線で接続して電気回路を構成する。マークはハードウェアブロックの時と同様に Varjo 社が提供しているマークを使用している。このマーク付きの銅線が接続されているかどうかで現実の回路が接続されているのかを判定する。

### 4.3 RV-XoverKit for EM の動作例

ここでは、実装した RV-XoverKit for EM の動作例について述べる。

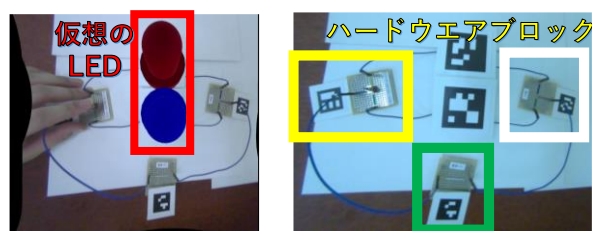
#### (1) RtoV 電圧 (図 5 参照)

- ・**現実物体**：三路スイッチのハードウェアブロック (図 5(b)黄色の枠内)、三叉配線のハードウェアブロック (図 5(b)白色枠内)、電源 (5V) のハードウェアブロック (図 5(b)緑色枠内)

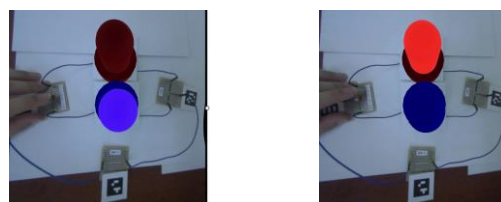
- ・**仮想物体**：青色の LED (図 5(a) 赤枠内下)、赤色の LED (図 5(a) 赤枠内上)

- ・**マーカ**：中サイズのマーカは、仮想のオブジェクトの配置に使用している。小サイズのマーカはハードウェアブロックの識別に使用している。

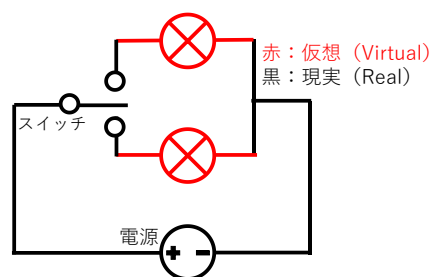
- ・**伝達する前後の現象**：現実の電気回路と仮想の電気回路が組み合わさった状態で R空間から V空間へ電圧を伝達する様子である。図 5(a)は MR 体験の様子で、図 5(b)は R空間のみを撮影したものである。現実のスイッチを下側に倒すと仮想の青色の LED が点灯し、仮想の赤色の LED が消灯する (図 5(c))。上側に倒すと仮想の赤色の LED が点灯し、仮想の青色の LED が消灯する (図 5(d))。現実のスイッチをニュートラルに戻すと仮想の青色 LED と仮想の赤色の LED の両方が消灯する。図 5(e)は、R空間と V空間を繋いで構成した電気回路の回路図である。同図において黒色で描いたものが現実の物体で、赤色で描いたものが仮想の物体である。図 5(f)は、R空間において実際に接続されている電気回路を回路図で表したものである。図 5(g)に示すハードウェアユニットを 2つ使用して、V空間における仮想 LED の代わりに R空間の電気回路の電圧を計測している。図 5(h)は、仮想 LED に該当する部分の回路図である。この例で使用しているハードウェアユニットは、図 5(g)の左上にあるジャ



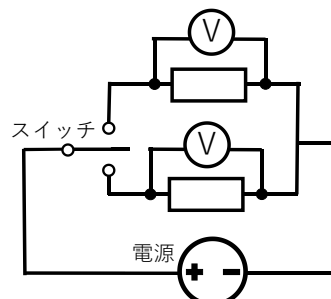
(a) MR 体験の様子 (b) R空間のみの様子



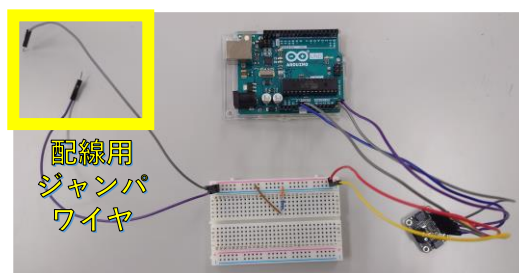
(c) 青色 LED が点灯 (d) 赤色 LED が点灯



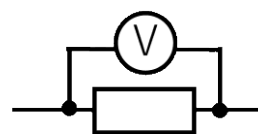
(e) R空間と V空間で構成された電気回路



(f) 実際の回路図



(g) ハードウェアユニット



(h) ハードウェアユニット

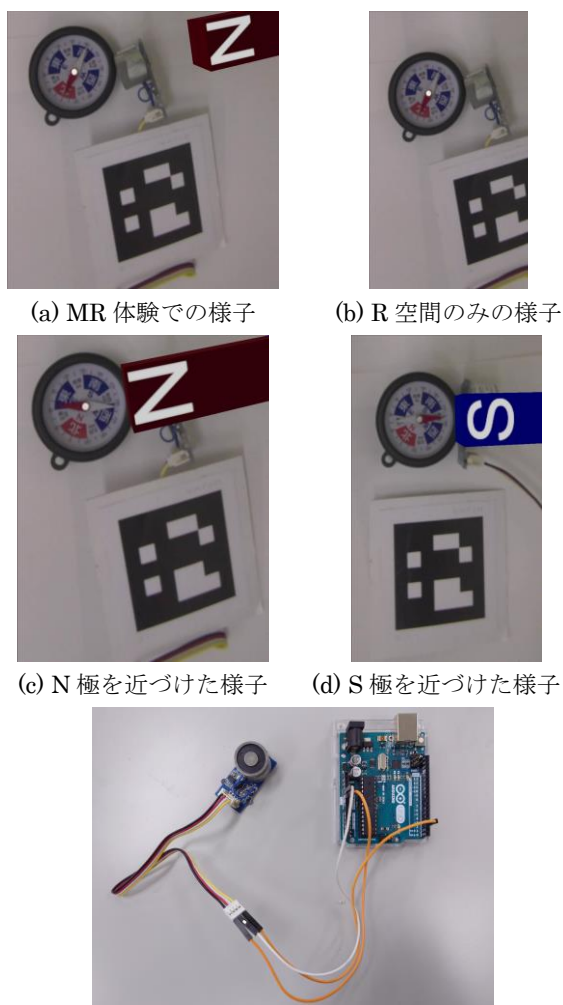
図 5 RtoV 電圧の使用例

Fig.5 An example of RtoV voltage

ンパワイヤの端子（黄色の枠内）をハードウェアブロックにあるピンソケットに差し込み接続する。2つのハードウェアユニットは、図 5 (b) において中央上よりの大きな 2 つのマーカの下に隠して配置しており、ハードウェアブロックに接続されたジャンパワイヤがマーカの下を通してハードウェアユニットに接続されている。本モジュールにおいて仮想側の回路は自由に構成することができるが、現実側の回路は、図 5(g)の回路図のように閉回路の状態になっている必要がある。

(2) VtoR 磁場 (図 6 参照)

- ・ 現実物体：コンパス (図 6(a)左上)
- ・ 仮想物体：磁石 (図 6(a)右上)
- ・ マーカ：中サイズのマーカは、仮想のオブジェクトの配置に使用している。(図 6(b)下)
- ・ 伝達する前後の現象：仮想の磁石を現実のコンパスに近づけると現実のコンパスの針が仮想の磁石に引き寄せられる。図 6(a)が MR 体験の様子で、(b)は R 空間のみを撮影したものである。仮想の磁石の N 極を現実のコンパスに近づけるとコンパスの



(e) ハードウェアユニット  
図 6 VtoR 磁場の使用例

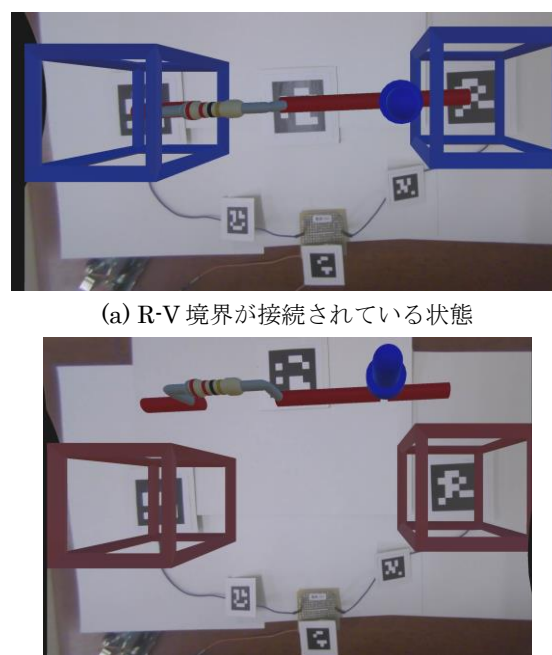
Fig.6 An example of VtoR magnetic field

S 極 (針の白い方) が仮想の磁石に引き寄せられ (図 6(c)), 仮想の磁石の S 極を現実のコンパスに近づけるとコンパスの N 極 (針の赤い方) が仮想の磁石に引き寄せられる (図 6(d)). この伝達には図 6(e) に示すハードウェアユニットを使用して R 空間に磁場を発生させている。磁場は、電磁石 (Grove-Electromagnet, 型番:101020073) を、Arudino を介して制御することで発生させている。

4.4 R-V 境界接続判定機能の動作例

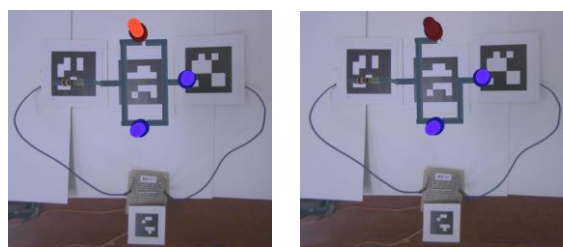
R-V 境界接続判定機能の伝達位置判定機能に関する動作確認を行った結果を図 7 に示す。バウンディングボックス内に仮想物体が存在している場合は、R-V 境界が正しく接続されている状態で、この時はバウンディングボックスが青く表示される (図 7(a)). バウンディングボックス外に仮想物体が存在しているのであれば R-V 境界が接続されておらず、この時はバウンディングボックスが赤く表示される (図 7(b)). このバウンディングボックスは動作確認のため表示しているが、MR 体験時には、非表示となる。

次に、R-V 境界接続判定機能の電気回路判定機能に関して動作確認を行った結果を図 8 と図 9 に示す。図 8 は V 空間での判定結果を示しており、(a) では、仮想の電気回路の電気部品がすべてに電気が流れているのがわかる。一方、(b)では仮想回路における上側の経路に断線があるため、上側の赤色 LED は消灯しており、他の青色 LED は点灯しているのが確認できる。図 9 は R 空間での判定結果



(a) R-V 境界が接続されている状態  
(b) R-V 境界が接続されていない状態  
図 7 R-V 境界の状態

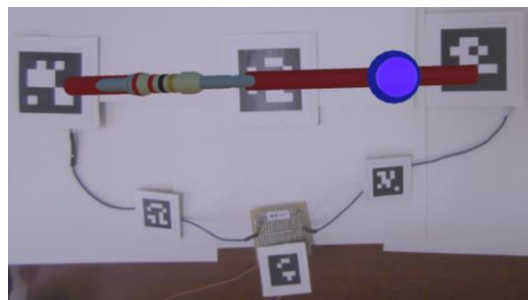
Fig.7 Condition of R-V boundary



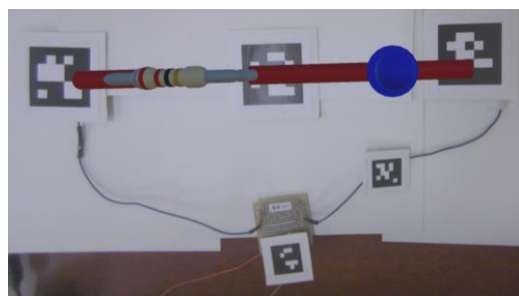
(a) 断線なし (b) 赤色 LED 側が断線

図 8 V 空間での判定結果

Fig.8 Judgement result in virtual space



(a) 断線なし



(b) 左側の動線に断線あり

図 9 R 空間での判定結果

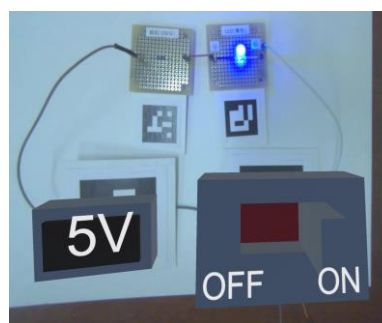
Fig.9 Judgement result in real space

を示している。図 9(a)は R 空間の回路が成立している様子でハードウェアブロックがマーカの貼付された銅線で接続されている。図 9(b)は現実の回路が断線して、仮想の青色の LED が消灯している様子である。ハードウェアブロックは銅線で接続されているが左側の銅線にはマーカがついておらず、接続されていないという判定になっている。

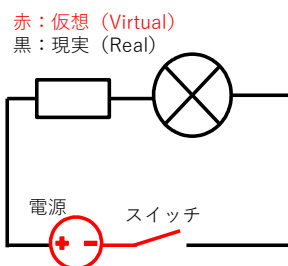
#### 4.5 RV-XoverKit for EM の性能

RV-XoverKit for EM は、PC と Arduino を介して制御するという仕組み上、R-V 越境転移に際して、遅延が生じる。この遅延が増大するにつれて MR における臨場感や体験の質が低下する。そこで、RV-XoverKit の性能を測るために、遅延時間と同時接続数の関係について調べた。

V 空間から R 空間へ電圧を伝達する状況での遅延時間について調査した。調査を行った環境を図 10 に示す。RV-XoverKit の VtoR 電圧を使った回路を作成し、遅延時間を計測することとした。ここでは V 空間のスイッチを操作してから時間計測を



(a) MR 体験での様子



(b) 回路図

図 10 VtoR 電圧を用いた遅延確認用の回路

Fig.10 Circuit for checking delay using VtoR voltage

開始し、R 空間の回路に通電して LED が点灯するまでの時間を遅延時間としている。合計 30 回計測し、結果は、平均が 0.0119 秒、最大が 0.02 秒、最小が 0.0097 秒となった。

同時接続数については、接続数を 6 個同時にした場合と 12 個同時にした場合についての遅延を調査した。福田らによる MR 作品[7]では、同時に 6 個の RV-XoverKit を利用していることから、前述の 6 個およびその倍の 12 個という数を選定した。遅延時間の計測方法は上記と同様である。合計 30 回計測した結果、同時接続数を 6 個にした場合の遅延時間は、平均が 0.0139 秒、最大が 0.025 秒、最小が 0.01 秒となった。また、同時接続数を 12 個にした場合の遅延時間は、合計 30 回計測した結果、平均が 0.0194 秒、最大が 0.0271 秒、最小が 0.0162 秒となった。

#### 4.6 考察

人間が認識可能な画面描画のフレームレートは、おおよそ 60fps といわれていて、その際のフレーム更新時間は、約 0.016 秒である。前節で示した遅延時間の計測結果から、同時接続数が 6 個の場合は、平均が 0.016 秒以下に収まっているため、遅延の影響によって MR 体験の品質が低下することはあまり起こらないと考えられる。一方、同時接続数が 12 個の場合では、平均が 0.016 秒を上回っているため改善の必要があると考えられる。分析の結果、遅延時間の約 9 割が Arduino と PC 間の通信に起因することが分かったため、この通信時間を削減す



ることができれば、遅延時間を少なくすることができると思う。

### 5 電気回路学習への応用

本研究の応用事例として、R 空間と V 空間を融合した電気回路学習キットを作成した。電気回路学習キットとは小学校や一般家庭で電気を学習するためのツールキットで、様々なものが販売されている。ここで電気回路学習キットとは、MR 空間において現実の電気部品と仮想の電気部品を使用して電気回路を作成し、遊びながら電気回路に関して学習するキットである。一般のキットと異なり、このキットでは、V 空間においてユーザが自由な発想でオリジナルの電気部品を作成して回路を組むこともできる。

この電気回路学習キットで回路を作成する際は、現実と仮想のハードウェアブロックを組み合わせる回路を作成する。現実のハードウェアブロックは本研究で作成したハードウェアブロックを使用する。また、仮想のハードウェアブロックは、図 11 のようなものを使用する。図 11(a)や図 11(b)で示した仮想のハードウェアブロックだけではなく、仮想の LED のハードウェアブロックや仮想のスイッチのハードウェアブロック、仮想の電源のハードウェアブロックといった様々な仮想のハードウェアブロックが存在する。

ここからは、電気回路学習キットを実際に使用して電気回路を作成した動作事例に関して述べる。図 12 は現実と仮想のハードウェアブロックを組み合わせる作成した電気回路の例である。図 12(a)は MR で体験している様子で、現実のハードウェアブロックと仮想のハードウェアブロックを組み合わせる 1 つの回路を構成している。図 12(b)は、R 空間のみの様子である。この例では、V 空間から R 空間へ電圧を伝達し、また仮想のコイルから現実のコンパスへ電磁場を伝達している。電源とコイル、抵抗、青色の LED が仮想の物体で、青色の LED のハードウェアブロックと抵抗 (220Ω) のハードウェアブロック、コンパスが現実の物体である。小サイズのマークは、現実のハードウェアブロックと電気回路判定機能に使用し、中サイズのマークは、仮想オブジェクトの配置と R-V 境界接続判定機能に使用している。

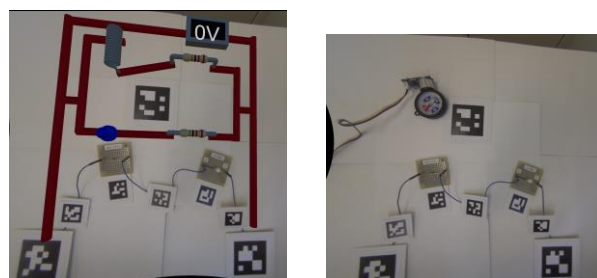
この動作事例では、仮想の電源が ON になると現実の青色の LED が点灯する。また、仮想のコイルに電圧がかかると磁場が発生し、その影響で現実のコンパスの針が仮想のコイルの方向に振れる。図 12(c)と(d)は伝達した様子である。(c)は、仮想の電源が 1.5V の電源を出力した場合で、(d)は、仮想の電源が 5V の電圧を出力した場合である。仮想の電

源が 1.5V を出力したときは、現実と仮想の青色 LED が両方とも少し明るくなり、仮想の電源が 5V を出力したときは、現実と仮想の青色 LED が両方

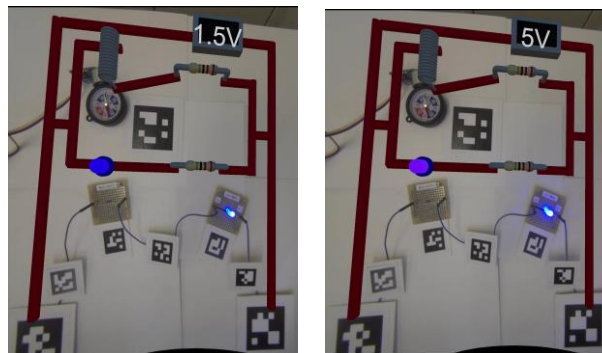


図 11 仮想のハードウェアブロック

Fig.11 Virtual hardware blocks

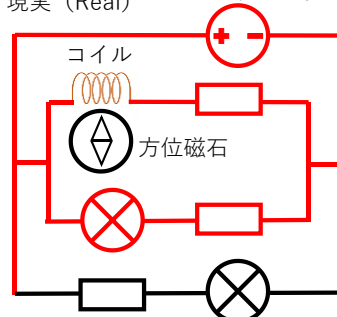


(a) MR 体験での様子 (b) R 空間のみの様子

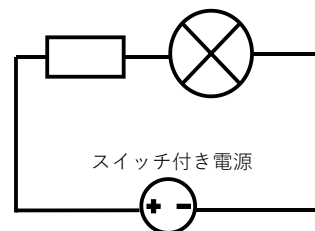


(c) 仮想電源が 1.5V の場合 (d) 仮想電源が 5.0V の場合

赤：仮想 (Virtual) スイッチ付き電源  
黒：現実 (Real)



(e) R 空間と V 空間で構成された電気回路



(f) 実際の回路図

図 12 電気回路の例

Fig.12 Example of a circuit

ともさらに明るくなっている。本動作事例で作成した電気回路を回路図で表したものが、図 12(e)である。図 12(f)は、R 空間側の回路が実際に接続されている回路を図示したものである。V 空間から R 空間への電圧の伝達は Arduino を使用して現実側の回路に直接 1.5V や 5V の電圧をかけている。また、V 空間から R 空間へ電磁誘導の伝達は、図 6(e)のハードウェアユニットを使用して、コイルに電流が流れた際に発生する磁場を計算し、電磁石を使用して磁場を発生させて、電磁誘導の伝達を行っている。

## 6 むすび

本研究では、これまでに研究を進めてきた現実と仮想が相互に連携する R-V 越境転移という考え方を電気や磁気による物理現象へと展開し、電圧や電流、磁力などの物理現象を R 空間と V 空間の間で相互に伝達する仕組みの設計および実装した。電気や磁気を扱う場合に、両空間の間で伝達する情報を整理し、それにそって RV-XoverKit for EM を設計・実装した。さらに、RV-XoverKit for EM を利用する上で必要となる R-V 境界接続判定機能について検討した。また、提案した RV-XoverKit for EM の利用例として、現実と仮想を融合した電気回路学習キットを作成した。

本論文で述べた RV-XoverKit for EM は、電気については中学校程度で扱う直流の電気回路を対象とし、磁力についてもそれに見合った現象を扱うこととしており、この範囲で扱うことのできる現象は多くはない。世の中にある電気や磁気を使用するシステムへと応用するには、大電流、高電圧をどのように扱うか、交流回路へどのように展開するか、など多くの検討事項が残っている。それらが達成された際の本研究の応用可能性としては、教育という観点では、自動車の電装品や家電製品など、電気や磁気などを使用する機器の整備・修理などについて技術者が学ぶ際に、本研究の成果を応用することが考えられる。例えば、電気自動車の整備・修理について考えてみると、高電圧のバッテリーや精密機器を多く使用しているため、不慣れた技術者が高圧のバッテリーを触り、感電することや精密機器を壊したりすることが予想される。このような場合に、触ると危険や部分を仮想の物体としてシミュレートし、危険のない部分を現実の物体として作成した上で、本研究の成果を用いて両者を繋いで整備・修理手順を学習する、という使い方が考えられる。本研究を使用したシミュレーションでは、危険な部分を仮想とし、感覚を伴う部分を現実の部品を使用することで、学習者の安全を確保することができ、教育の質を向

上させることができる。

## 謝辞

本研究の一部は、科研費 17H01747, 19K22882, 21H03487 の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] 柴田史久: 複合現実感技術の歴史と今後の展望, システム/制御/情報; Vol. 64, No. 9, pp.343 - 348 (2020)
- [2] J. Leitner, C. Köeffel, and M. Haller: Bridging the Gap between Real and Virtual Objects for Tabletop Games; Int'l Journal of Virtual Reality, Vol. 5, No. 3, pp. 1 - 5 (2006)
- [3] 青木孝文, 三武裕玄, 浅野一行, 栗山貴嗣, 遠山喬, 長谷川晶一, 佐藤誠: 実世界で存在感を持つバーチャルクリーチャーの実現: Kobito -Virtual Brownies-; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 2, pp. 313 - 321 (2006)
- [4] 平田遼太郎, 石橋朋果, チェカネイ, 森尚平, 池田聖, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: DOMINO Toppling: 実物体と仮想物体のシームレスな遷移を可能にした MR アトラクション; 同上, Vol. 21, No. 3, pp. 463 - 472 (2016)
- [5] 石田隼也, 若林優, 萩尾恭兵, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: R-V 空間相互間で運動状態を伝達する複合現実遷移モジュールの開発; 日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究会, MR2020-13, Vol.23, No. 1, pp. 1 - 6 (2020)
- [6] 敷島歩, 石田隼也, 福田裕美, 木村朝子, 田村秀行, 柴田史久: RV-XoverKit: エデュテインメント分野での MR コンテンツ制作に適したツールキット; 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2D1-1 (2021)
- [7] 福田裕美, 敷島歩, 石田隼也, 木村朝子, 田村秀行, 柴田史久: 三代目 MR ピタゴラ兄妹 with RV-XoverKit ~エデュテインメント作品制作に適したツールの利用例~; 同上, 2D1-2 (2021)
- [8] 福田裕美, 石田隼也, 木村朝子, 柴田史久: RV-XoverKit: エデュテインメント分野での MR コンテンツ制作に適したツールキット(2)~ハンドジェスチャを利用した仮想物体配置支援システム~; 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1D2-3 (2022)
- [9] Y. Fukuda, A. Shikishima, A. Kimura, H. Tamura, and F. Shibata: RV-XoverKit: Mixed Reality Content Creation Toolkit to Connect Real and Virtual Spaces; Proc. Asia-Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality (APMAR 2022), CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3297 (2022)
- [10] 福田裕美, 敷島歩, 木村朝子, 柴田史久: R-V 空間相互間で物理現象を伝達する複合現実遷移モジュールの開発—運動状態を伝達するモジュール群とコンテンツ開発支援ツール—; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 28, No. 3 (投稿中)
- [11] 小林剛史, 重宗宏毅, 澤田秀之: 磁場の視覚・触覚化による磁場体験システム; 情報処理学会インタラクシオン 2020, 1B-31, pp. 302 - 307 (2020)

- [12] 田中大志郎, 真鍋伸也, 渡部佳孝, 福井康人, 九代紀之: AR グラスを用いた放射ノイズの可視化と要因特定支援ツール; 情報処理学会第 80 回全国大会, 3H-09, pp. 1-79 - 1-80 (2018)
- [13] 程秋涛, 長谷川忍: 電気現象を可視化する MR 電気回路実験システムの提案; 第 81 回先進的学習科学と工学研究会, pp. 30 - 33 (2017)
- [14] R. Suzuki, R. H. Kazi, L. Y. Wei, S. DiVerdi, W. Li, and D. Leithinger: RealitySketch: Embedding responsive graphics and visualizations in AR through dynamic sketching, Adjunct Proc. 33rd Annual ACM SYmpo. On User Interface Software and Technology (UIST '20), pp. 135 - 138 (2020)
- [15] H. Javaheri, F. Lauer, L. Lauer, K. Altmeyer, R. Brünken, M. Peschel, N. When, and P. Lukowicz: Smart teaching materials with real-time augmented reality support for introductory physics education, Adjunct Proc. 2022 ACM Int'l Joint Conf. on Pervasive and Ubiquitous Computing and 2022 AMC Int'l Sympo. on Wearable Computers (UbiComp/ISWC '22), pp. 53 - 54 (2022)
- [16] T. Y. Wu, H. P. Shen, Y. C. Wu, Y. A. Chen, P. S. Ku, M. W. Hsu, J. Y. Liu, Y. C. Lin, and M. Y. Chen: CurrentViz: Sensing and visualizing electric current flows of breadboarded circuits, Proc. 30th ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '17), pp. 343 - 349 (2017)
- [17] T. Y. Wu, J. Gong, T. Seyed, and X. Yang: Proxino: Enabling prototyping of virtual circuits with physical proxies, Proc. 32nd Annual ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '19), pp. 121 - 132 (2019)

(2023 年 3 月 6 日受付)

[著者紹介]

敷島 歩 (学生会員)



2021 年 3 月立命館大学情報理工学部情報理工学科卒業。2023 年 3 月同大学院情報理工学研究科博士前期課程卒業。

福田 裕美 (学生員)



2022 年 3 月立命館大学情報理工学部情報理工学科卒業。現在、同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中

木村 朝子 (正会員)



1996 年大阪大学基礎工学部卒。1998 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同大学助手、立命館大学理工学部助教授、科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て、2009 年 4 月より立命館大学情報理工学部

准教授。現在、同教授。博士 (工学)。実世界指向インタフェース、複合現実感、ハプティックインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会、ACM、IEEE 各会員。本学会学術奨励賞・論文賞、情報処理学会山下記念研究賞等受賞。



柴田 史久 (正会員)

1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1999 年同研究科博士後期課程修了。大阪大学産業科学研究科助手を経て、2003 年 4 月より立命館大学理工学部助教授。現在、同情報理工学部教授。博士 (工学)。モバイルコンピューティング、複合現実感等の研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、日本ロボット学会、情報処理学会等の会員。本学会学術奨励賞・論文賞を受賞。