

# 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—

福田 裕美<sup>\*1</sup>, 敷島 歩<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**

**- A Set of Modules Transmitting State of Motions and Content Development Support Tool -**

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

**Abstract --- We aim to realize mixed reality transition modules that enable to transmit physical phenomena between real (R) and virtual (V) spaces as an advanced use form of mixed reality technology. Transmission of object motion in real space to virtual space, or vice versa, is referred to as “R-V Crossover Rendition,” and this paper describes the design and implementation of modules to realize this concept. In addition, when using the implemented modules, we propose a content development support tool for arranging real and virtual objects so that they appear to be connected.**

**Keywords: Mixed reality transition, RV-XoverKit, RV-MessengerKit, Content development support tool**

## 1 はじめに

複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術への関心は近年急速に高まってきており、今後様々な分野に応用され活用されていくことが予想される[1]。MRが注目され始めたのは、すべてをCGによる仮想空間で再現するVirtual Reality(VR)と違い、現実空間と融合する形でシミュレーション結果などをCGによって表現することに長けているためである。現実・仮想両空間の位置合わせ精度の向上、CG描画力の進化により、魅力的かつ実用性が高い利用事例も散見されるようになってきた。現実世界に重畳表示される映像の画質が向上しただけでなく、仮想世界との実時間対話も有効活用されている。

このような背景から、MRコンテンツの一層の表現力向上が期待されている。しかるに、現実(R)空間と仮想(V)空間にまたがり、両者の間で物体の動的な現象を伝達し、相互に影響を及ぼすような仕組みについての検討はあまり為されていない。ここでいう物体の動的現象の伝達とは、R空間で物体が動的に変化した際にその変化を現実と仮想の境界

(R-V境界)を越えてV空間の物体へ影響させること、もしくはその逆である。

R空間とV空間を組み合わせるという観点でみた場合、例えば、静止した現実の物体に動く仮想物体を重畳描画させる試みは、HMDを用いて柄部分のみのデバイスを取り仮想の刀を重畳描画する刀型デバイスを使用した展示[2]や、ユーザの手の動きを入力として認識するMRアトラクションの事例[3]などで紹介されている。しかしながら、これらの事例では、刀型デバイスや手の動きによって仮想の物体の挙動に影響を与えるということはできるが、それらの情報の伝達は間接的なものであり、現実の物体が直接、仮想の物体に接触することや、その逆に、仮想から現実の物体へ接触したことを伝達するような仕組みは実装されていない。また、形状が変化するディスプレイを用いて3種類のインタラクションを媒介するシステム[4]や、小型戦車ロボットにCGを重ね合わせ、仮想空間に戦場を再現するシステムなどの事例[5]では、現実・仮想両空間を同期させ、実物体とCGによる仮想物体の相互作用を実現している。しかし、文献[4]では人の手によって直接操作されていない、物理法則に従って運動する現実の物体を、ディスプレイに表示される仮想物体の情報

<sup>\*1</sup> 立命館大学大学院情報理工学研究科

<sup>\*1</sup> Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

として伝達することや、その逆方向の伝達はできていない。また、文献[5]ではロボットの移動量などの情報を伝達することは実現されていない。他には、HirakiらによるロボットとCGを連携させる試みもある[6]。この研究では、小型のロボットの動きとプロジェクタによる投影映像の連携が実現されているが、この研究の主眼は可視光によるロボット制御と人間向けの画像投影を同時に実現する仕組みにある。Suzukiらは、形状の変化する小型群ロボットを提案しており[7]、プロジェクタによる投影画像とロボットの形状変化によってデータを可視化する応用例を示しているが、この研究で目指しているのは、ユーザを介したロボット、すなわち現実と、データ、すなわち仮想の連携となっている。他にも卓上に描写されたデジタルモデルと現実が存在している物理モデルが相互に影響し形状を変化させることができる物理インタフェースの例が存在している[8]。この例において物理インタフェースが伝達できる情報は平行移動、回転、高さに限られており、それ以外の情報を伝達することができない。また現実と仮想を連携させるものとしては、仮想の小人が現実で置かれた現実の物体を押ししたり現実の物体に押されたりする事例[9]や、現実と仮想のドミノをポータルと呼ばれる特殊なトンネルで繋ぎ相互作用させる事例[10]もある。前者における相互作用には現実の物体の位置を仮想の小人の動きに合わせて動かす、電磁石を使用したコンテンツに対して作りこまれた装置が必要である。後者では現実と仮想が入れ替わる部分、すなわちR-V境界の接続部分が隠されているため、本当の意味での現実と仮想の接続はシームレスとは言い難い。

我々はこのようなR-V境界での相互作用を「R-V越境転移」と呼び、この概念の技術体系化を目指してきた[11]。この研究の原点は、ドミノ倒しをテーマとして作成したMRアトラクション「DOMINO Toppling」にある[12]。この作品はドミノ倒しという現象のみを対象としていたため、R空間とV空間を行き来する対象物をドミノのみに限定していた。しかし、R-V越境転移を活用できる対象は、エンターテインメントや展示分野だけでなく、都市計画や製品の設計・製造にも展開できると考えている。そこで我々は、R-V越境転移の一般化に着手し、関連する概念・用語の整理を進め、これを実現するツールキットをRV-XoverKitと称しその開発を進めてきた[13-16]。本研究が目指すのは、MRコンテンツの開発者がR-V越境転移を容易に利用できる複合現実遷移モジュールの実現である。

本論文では、R-V空間相互間において伝達する現象について整理した上で、これを実現するモジュール

群の設計および実装について述べる。さらに、実装したモジュール群を用いてMRコンテンツを制作することを想定し、現実と仮想をシームレスに接続するための配置支援ツールについて述べる。

## 2 R-V越境転移

### 2.1 概念整理

「DOMINO Toppling[12]」では、現実のドミノが倒されたかどうかをタクトイルスイッチで取得し仮想のドミノへ伝え、仮想のドミノから現実のドミノへの伝達にはソレノイドアクチュエータで力を加えることでドミノ倒しが続いているように見せている。すなわちドミノが「倒れた」かどうかを測定し伝達しているわけであるが、現実の物体が仮想の物体に影響を与える（もしくはその逆の）現象は「倒れた」以外にも考えられる。

R-V越境転移を一般化するためには、R空間とV空間の間でどのような情報を伝達すべきかを考える必要がある。両空間の間で状態をできるだけそのまま引き継がれるように情報を伝達するという場合もあれば、物体の動的現象を簡略化し記号的な情報に変換して伝達したい場合もある。ここで変換とは非線形変換、幾何学的変形、記号化、数値化などが考えられる。前者は相似形の遷移、後者は非相似形の情報伝達と考えることができる。

このような考えのもとに我々は、R-V越境転移を、R-V境界において運動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」(R-V Transition)と、その補集合でR-V境界での情報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」(R-V Message Transmission)に分類することとした。R-V遷移は、物体の動的現象をR空間とV空間の間でできるだけ正確に伝えることを主眼としている一方、R-V情報伝達は両空間の間で簡単に情報を伝達することに重きをおいている。

### 2.2 RV-XoverKit

前節で述べた各概念は、現実の物理現象を計測する何らかのセンサや現実の物体に対して作用するアクチュエータとそれを制御するプログラムによって実現される。本研究では、両者をまとめてツールキットと呼び、各概念に対応するツールキットの名称を定めた。R-V越境転移、R-V遷移、R-V情報伝達それぞれに対応するツールキットの名称は順にRV-XoverKit、RV-TransitionKit、RV-MessengerKitである。RV-XoverKitは、R-V越境転移とR-V遷移およびR-V情報伝達の関係と同じく、他の2つのツールキットの集合体である。図1は、これらの概念と用語の関係を示している。RV-

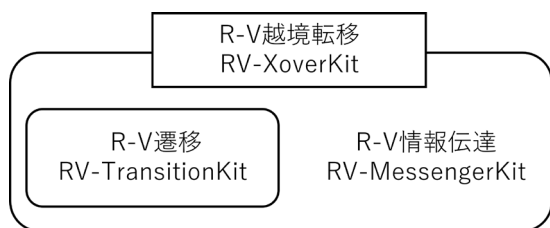


図1 概念と用語の関係

Fig.1 Relationship of the concepts and terminology

TransitionKit は V 空間でより現実に近い環境を構築し、現実では実装できない箇所を仮想の物体で置き換えたい場合や、現実の一部分だけをシミュレーションしたい場合などで使用する。一方、RV-MessengerKit はエデュテインメント分野などでより容易に使用することを想定している。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。

### 3 RV-MessengerKit の設計

前章で述べたように、R-V 越境転移は R-V 遷移と R-V 情報伝達に分けて考えることができる。R-V 遷移の概念を設計・実装した RV-TransitionKit については、文献[11]にて発表済みであるため、本論文では、対象をエデュテインメント分野に絞り、R-V 境界での相互の情報伝達が簡便に利用できる RV-MessengerKit について、具体的な機能設計と実用的な実装方法を検討した結果について報告する。

エデュテインメント分野に限定するといってもその範囲は広い。そのため、本研究では具体的な使用例を先に考えた上で、そこで必要な機能を具体化するという手法をとった。その使用例としては、2002 年から NHK で放映されている日本の教育テレビ番組「ピタゴラスイッチ」で実演されている『ピタゴラ装置』を考える。ループ・ゴールドバーグ・マシン[17]と呼ばれる一連の仕掛けもこの範疇に入る。ピタゴラ装置は、様々な物体が、倒れる、転がる、押すなどの物理現象を起こすことで、次の物理現象へと連鎖反動的につながる仕掛けである。以降では、このような連鎖反動現象を R 空間と V 空間を交えて実現する、すなわち MR ピタゴラスイッチを製作することを想定し、そこで利用する RV-MessengerKit を設計することが目標となる。

MR ピタゴラスイッチは R 空間と V 空間を行き来しながら連鎖反応が起こり続けるものであり、その R-V 境界では R 空間から V 空間、もしくはその逆方向に物理現象を繋げるうえで必要な情報を伝達する必要がある。伝達する情報としては、R 空間から V 空間向きには、現実の物体で仮想の物体を傾けたり押ししたりする、現実の物体と仮想の物体との衝突

判定を行う、現実の物体が移動した量・回転角度を仮想の物体に反映する、R 空間の周囲の光量や物体色を V 空間に反映させるなどが考えられる。逆に V 空間から R 空間向きであれば、仮想の物体が現実の物体を傾けたり押ししたりする、仮想の物体の移動量を反映して現実の物体を動かす、仮想の物体の回転角度を現実の物体へ反映させるなどが考えられる。このような検討に基づいて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空間からV空間へ伝達する情報をまとめたもので、以降ではR空間からV空間へ情報を渡すことを「RtoV」と呼び、この情報を「RtoV 伝達項目」と呼ぶ。RtoVでは、R空間の情報をV空間に伝えるため、基本的には何らかのセンサでR空間をセンシングしてその情報を伝えることになる。RtoV 伝達項目は、傾倒、押圧、存在位置、移動距離、回転、環境光、色相の7種類に分類した。傾倒は現実の物体が仮想の物体を傾けたかどうか、押圧は現実の物体が仮想の物体を押ししたかどうか、存在位置は現実の物体がセンサの範囲に存在しているかどうか、移動距離は現実の物体がどれだけ移動したか、回転は現実の物体がどれだけ回転したか、環境光は周囲がどれだけ明るいか、色相はセンサの前に何色の物体があるかをV空間に伝達する場合に使用する。

傾倒と押圧は「傾いたか」「押されたか」という情報を伝達することができれば良いため、様々なセンサの利用が考えられるが、現実の物体が倒れたり、押されて場所が移動したタイミングを検出できる仕組みが必要である。存在位置、移動距離は現実の物体の位置を取得する必要があるため、センサからの距離を計測できる超音波センサなどを使用しての実

表1 RtoV 伝達項目  
Table 1 RtoV Transmission Items

	伝達項目名
実物体の状態変化	傾倒
	押圧
	存在位置
	移動距離
	回転
明るさや色情報の検出	環境光
	色相

表2 VtoR 伝達項目  
Table 2 VtoR Transmission Items

	伝達項目
仮想物体の状態変化	傾倒
	押圧
	移動距離
	回転

装が考えられる。回転は物体の初期状態からの回転角度を計測する必要があり、現実の物体に取り付けられる角度センサなどを使用しての実装が望ましい。環境光は周囲の明るさを検知できる環境光センサ、色相は色を識別できるカラーセンサなどを使用しての実装が考えられる。

表 2 は V 空間から R 空間へ伝達する情報をまとめたもので、以降では V 空間から R 空間へ情報を渡すことを「VtoR」と呼び、この情報を「VtoR 伝達項目」と呼ぶ。VtoR では、V 空間の情報を R 空間に伝えるため、基本的にはアクチュエータで R 空間に何らかの動きを作り出すことになる。RtoV 伝達項目と VtoR 伝達項目は、基本的には対称な形となる。しかし、V 空間は計算機ですべてを制御できる空間のため、オブジェクトの有無や色などを自由に変更できる一方、R 空間には物理的な制限が加わる。このような前提のもとで伝達項目を整理した結果、VtoR 伝達項目は、傾倒、押圧、移動距離、回転の 4 種類に分類した。傾倒は仮想の物体が現実の物体を傾けたかどうか、押圧は仮想の物体が現実の物体を押したかどうか、移動距離は仮想物体の移動量がどれほどか、回転は仮想物体がどれだけ回転したかをそれぞれ R 空間へ伝達する場合に使用する。RtoV 伝達項目と異なり存在位置、環境光、色相の 3 種類に関しては、VtoR の伝達項目に加えていない。VtoR 伝達項目としての存在位置の定義は、「仮想空間の物体が特定の位置に存在するタイミングで現実の物体に対応する位置に出現させる」というものとなり、物理的な制限から実現が困難なためである。VtoR 伝達項目としての環境光は、「仮想物体に合わせて現実の物体が光を出す」ということになり、VtoR 伝達項目としての色相は、「仮想物体の色に合わせて現実の物体の色を変化させる」ということになり、これらも汎用的に実現するのが難しいためである。残りの VtoR 伝達項目は、4 種類とも仮想の物体の動きを現実の物体へ伝えるため、アクチュエータとしてはモータやソレノイドなどを使用しての実装が考えられる。

## 4 RV-MessengerKit の実装

### 4.1 システム構成

前章で述べた設計にそって RV-MessengerKit を実装するには、そこで利用するセンサやアクチュエータ、およびそれを制御するコンピュータと制御プログラムについて検討する必要がある。選択肢の自由度は高く、RV-TransitionKit の実装[11]ではコンピュータとして Arduino を選び、Arduino で制御可能なセンサやアクチュエータを採用した。今回は、エデュテインメント分野での RV-

MessengerKit の使用を目標としているため、教育分野で広く利用されている LEGO® Mindstorm® EV3 を採用した。

Mindstorm® EV3 の基本セットには、タッチセンサ、超音波センサ、カラーセンサなどのセンサやアクチュエータとしてモータが含まれており、これらを組み合わせたり LEGO®ブロックを活用することでロボットや対話型システムなどを作成できる。以降では、Mindstorm®の各センサ・アクチュエータとインテリジェントブロック EV3 (コンピュータに該当し以降、EV3 と呼ぶ) を組み合わせたものを「ハードウェアユニット」、センサ・アクチュエータを制御するためのソフトウェアを「ソフトウェアモジュール」と呼称する。EV3 のプログラミング環境として、Java でプログラミングが可能な leJOS EV3 を使用し、1つのソフトウェアモジュールで 1 台の EV3 に対しセンサ・アクチュエータを取り換えれば複数の伝達項目を使用できるように実装する。V 空間におけるコンテンツ開発は Unity を使用して開発することを想定しており、図 2 は作成したプログラムの構成を示している。コンテンツ開発者は EV3 を直接利用するのではなく、EV3 と通信している Unity 上のプログラムに用意された API を利用してコンテンツ開発を行う。図 2 のコンテンツの項目では、Blender などのモデリングソフトを使用し、仮想物体の形状や挙動が決定しているという前提で、現実からどのような情報を取得し、どのような情報を取得すれば仮想物体を動かすのか、また仮想物体がどのような状態になれば現実側へどのような情報を渡すのかを決定し、それに伴ってどのようなハードウェアユニットを使用するのかをプログラミングによって指定することを想定している。EV3 から送られたセンサ情報は Unity 上で処理され、コンテンツで指定された情報を元に Unity を経由して EV3 に接続されたアクチュエータを制御する。

### 4.2 ハードウェアユニット

ここからはハードウェアユニットごとに実装した伝達項目について説明する。

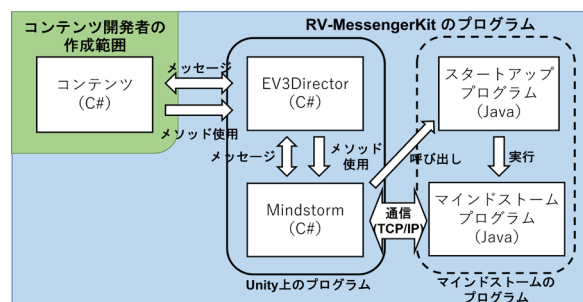


図 2 ソフトウェアモジュールの構成  
Fig.2 Structure of software modules

## タッチセンサ

タッチセンサは RtoV 伝達項目の内、傾倒と押圧に使用する。Mindstorm®に付属するタッチセンサは ON と OFF の 2 値しか検出できないため、RtoV の傾倒は現実の物体が「傾いている」か「傾いていない」かのみを伝達する。同様に RtoV の押圧も、現実の物体が仮想の物体を「押している」か「押していない」かのみを伝達する。

## 超音波センサ

超音波センサは RtoV 伝達項目の内、存在位置と移動距離に使用する。存在位置では超音波センサで認識できる距離を任意の分割数で離散化し、分割数に応じて検出した現実の物体の距離を値として返す。このとき物体が検出されない場合は 0 を値として返す。移動距離では超音波センサで認識できる距離を任意の分割数で離散化し、分割された範囲を物体がいくつ超えたかを移動量として返す。値の比較はツールキット使用開始時に取得した初期位置と、現在の物体の位置を用いて算出する。超音波センサの検出値が物体の初期位置よりも大きい場合は正の値を、小さい場合は負の値を返す。

## モータ (センサ用)

モータは本来アクチュエータとして使用するものだが、Mindstorm®のモータは回転角度を測定する機能を有する。そこで RtoV の回転では、センサとしてモータを使用し、回転角度を絶対値と相対値の 2 種類の値として返す。予め 360 度全周を任意の数で分割し、絶対値を返す場合は、時計回り方向に増加する値を返す。一方、相対値を返す場合は、時計回り方向への変化を正、反時計回り方向への変化を負として回転前と回転後の差分を返す。

## カラーセンサ

RtoV の環境光と色相はこのカラーセンサを用いて実装した。RtoV の環境光は初期値と現在値の差を返すものと、直近の値と現在値の差を返す 2 種類を実装した。前者は「初期差分」と呼称し、起動時に取得した初期値と現在値の差を返す。後者は「直近差分」と呼称し、EV3 がカラーセンサから周囲の明るさを取得し続けている仕組みを利用し、現在の値と直前の値との差を返す。RtoV の色相はカラーセンサの前にかざされた物体の色を認識できればその色名を返し、色が認識できなければ無色を値として返す。色相で認識できる色は LEGO® ブロックの公式購入ページ[18]に掲載されている色から認識可能な 32 色を実装した。

## モータ (アクチュエータ用)

VtoR の傾倒、押圧、移動距離、回転はいずれもモータを用いて実装している。傾倒・押圧・移動距離の場合は回転運動をクランクなどの機構を用いて

直線運動に変換し、現実の物体の運動へと繋げる。傾倒・押圧・移動距離ではモータの回転速度と回転方向を指定して使用する。一方、回転では、事前に 360 度全周を任意の数を決めて分割して番号を付与し、回転速度と番号を指定することで、その分割範囲の中央までモータを回転させる。

## 4.3 動作例

この節では実装した RV-MessengerKit の動作例を 2 種類紹介する。MR 体験を行う HMD はビデオシースルーである HTC VIVE Pro に、ステレオカメラである Stereo Labs ZED mini を取り付けたものを使用する。HMD をつなぐ PC の仕様は、OS が Windows 10、搭載 CPU が Intel(R) Core(TM) i7-8700K、メモリは 32GB、ビデオカードが NVIDIA GeForce GTX 1080 である。ZED mini では、両眼で解像度 2560×720、フレームレート 60fps の映像を入力として取得し、VIVE Pro のディスプレイで両眼の解像度 2880×1600、フレームレート 90fps の映像を出力している。画像提示の際の遅延時間に関しては、実行中の遅延の発生は確認されなかったため、描画は 1 フレーム以内に完了していることとなる。

### (A) RtoV 回転の例 (図 3)

- ・ 現実の物体：モータに取り付けたまっすぐなレゴブロック (図 3(a)の水色で囲った箇所)
- ・ 仮想の物体：円盤と円盤上に表示された数字 (図 3(b)のオレンジ色で囲った箇所)
- ・ 分割数：4 分割
- ・ 伝達前後の現象：現実のモータを手動で回転させると仮想へ情報が伝達され、取り付けられたレゴブロックの角度に対応する分割範囲の値が出力される。図 3 では出力された数値が、対応する分割範囲の仮想の円盤上に表示されている。

### (B) VtoR 押圧の例 (図 4)

- ・ 現実の物体：図 4(a)の中央に置かれた青いビー玉 (水色で囲った箇所)
- ・ 仮想の物体：図 4(b)の左側にある茶色の球体およびそれが転がるレール (オレンジで囲った箇所)
- ・ 伝達前後の現象：レール上を転がる仮想の球体が本物のビー玉に触れる位置まで移動すると、仮想空間から現実空間へ情報が伝達され、モータが回転し本物のビー玉を押す。その結果、仮想の球体が現実のビー玉を押しているように見える。

これら 2 つの例の仮想物体と現実の物体の双方の動きのタイミングのズレ量に関しては、RtoV 回転では現実の物体がセンサに触れたタイミングと仮想

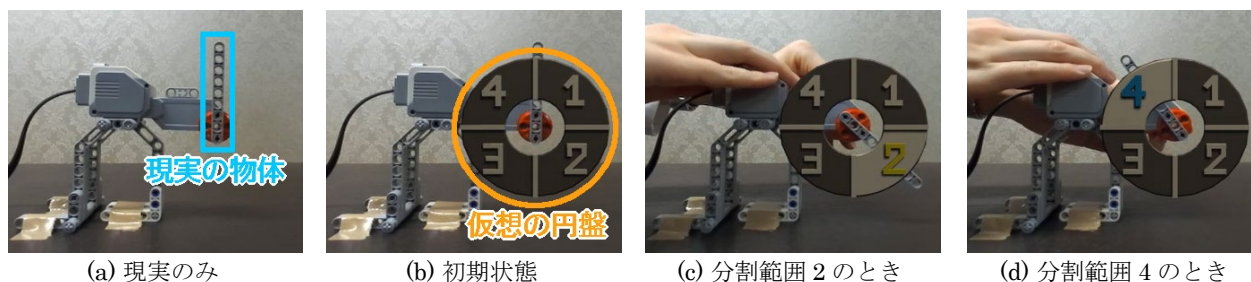


図 3 RtoV 回転 (絶対値) の例  
Fig.3 Example of RtoV Rotation (Absolute)

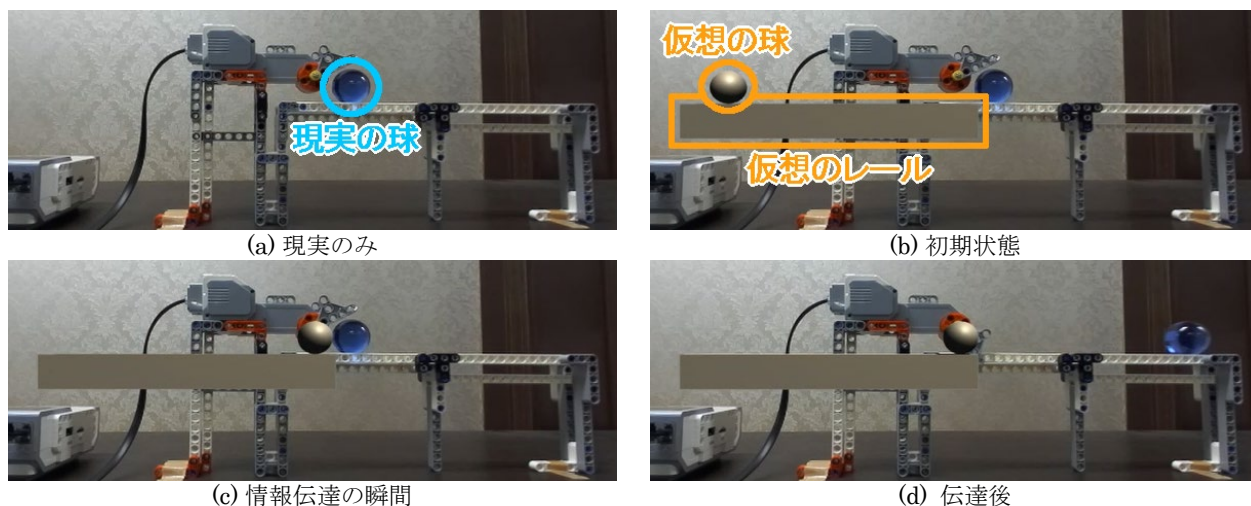


図 4 VtoR 押圧の例  
Fig.4 Example of VtoR Pressed

物体が動き出すタイミングを正確に計測し比較することが難しいため計測していないが、VtoR 押圧で計測したところ 0.183 秒の遅延が確認された。

#### 4.4 MR 作品での使用例

4.3 節で示した例に加え、実際に RV-XoverKit を使用した MR ピタゴラスイッチ[14]のデモを第 26 回 VR 学会大会にて実施した。図 5 は MR ピタゴラスイッチの全体像を現実空間から見たもの、図 6 は HMD を被り MR ピタゴラスイッチを体験しているユーザに提示された画像の例である。このデモでは現実と仮想を交互に行き来しながら連鎖反応が進むピタゴラ装置を体験することができた。

MR ピタゴラスイッチは、現実と仮想の切り替えが何度も発生するような作品であるが、VR 空間の仮想物体の動きをきっかけに実物体が動くギミックは様々なコンテンツで考えられる。例えば、仮想空間内に動物のモデルを描写し、その動物が体験者から見て現実空間に実在する物体の背後に隠れようとしていたり、現実の物体に衝突するかのよう仮想物体を移動させる際に RV-MessengerKit を使用することで、本当に仮想の動物が現実の物体に干渉しているかのような臨場感を与えるといった使用方法が考えられる。その他の使用例の 1 つとして、仮想のお化けが出現する体験型のアトラクションにおいて、

お化けが現実の本を倒すというギミックを製作した。図 7 は実際にツールを使用して作成された仮想のお化けが現実の本を倒している例である。図 8 は、図 7 の現実側の実際の状態を示したもので、青で囲ん



図 5 MR ピタゴラスイッチの全体図  
Fig.5 Overall view of MR Pythagora Switch

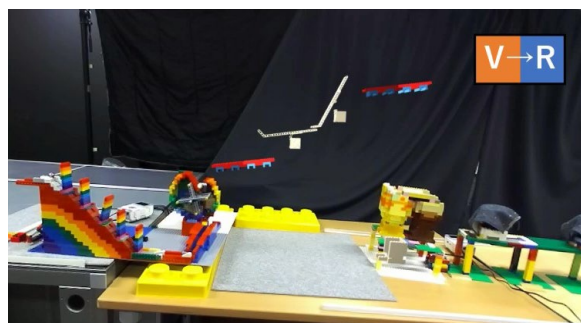


図 6 ユーザに提示された画像の例  
Fig.6 Example of image presented to user

た箇所には図9のようなRtoV傾倒として使用するアクチュエータが配置されており、アクチュエータを仮想のお化けがぶつかるタイミングで動かすことで、現実の本がお化けに倒されたように見せかけている。

研究室での他の作品制作にRV-MessengerKitを実際に使用してもらい使用感を調査した。対象は本研究室に配属されたばかりのMR初学者の学生で、ツールの使用方法と過去の使用例を文献[14]の動画等を用いて説明・教示した上で、約3カ月の期間をかけ、8名によるグループワークで作品を制作した。作品完成後に使用感を聞き取り調査したところ、Mindstorm®を使用して実装したためLEGO®との相性がよく、使用したい伝達項目に合わせてセンサやアクチュエータを取り付け、各種項目を設定すれば簡単に使用できたという意見が得られた。また分割数という考え方を導入したため、判定に使用する範囲を直観的に分割して使うことができ、実数値が返ってくるよりも使いやすいという意見も得られた。R-V境界での接続に関しては、遅延が発生することはあってもツールキットを使うことで滑らかに連鎖反応が繋がって見えるものを作ることができるという回答が得られた。

## 5 コンテンツ開発支援ツール

### 5.1 概要

RV-XoverKitは、R空間からV空間へセンサを用いて、V空間からR空間へアクチュエータを用いて情報を伝達することのみに焦点をあててきた。そのため、R空間の物体に対して滑らかに繋がって見える位置にV空間の仮想物体を配置する方法については、コンテンツ開発者に委ねていた。しかし、RV-XoverKitを実際に使う上では、V空間に存在する仮想物体をR-V越境転移される位置に正しく配置す



図7 VtoR傾倒の利用例  
Fig.7 Usage example of VtoR



図8 現実側の仕組み  
Fig.8 Mechanism of the real side

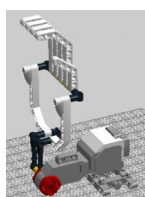


図9 アクチュエータ  
Fig.9 Actuator

る必要がある。

このようなR-V境界における接続性を担保するには、R空間からV空間への入口部分とV空間からR空間への出口部分に配置するハードウェアユニットのR空間における位置姿勢を計測し、その位置姿勢に対応するように仮想物体を配置できれば良い。そこで本研究では、RV-MessengerKitを使用する際に、仮想物体を視覚的・直観的に配置するためのコンテンツ開発支援ツールを設計・実装した。ツールの利用は大きく2段階に分かれている。1段階目では、R空間におけるハードウェアユニットの位置姿勢をツールが取得し、その情報を用いてコンテンツ開発者が仮想物体を視覚的に確認しながら配置する。配置した仮想物体の位置姿勢は2段階目へと渡され、MR体験時の仮想物体の描画位置へと反映される。

### 5.2 機能設計

コンテンツ開発支援ツールは、MRコンテンツ開発過程の中で、R空間における実物体の配置やV空間における仮想物体の形状、どのような振る舞いをするか、R空間とどのように接続するかなどを決定する作業が終了し、仮想物体の位置が確定していない際に利用する。視覚的・直観的に仮想物体を操作でき、実際にR空間の実物体と繋がって見える位置に配置できているかを確認しながら座標登録を行うことができるツールである。

我々は、R空間に仮想物体を配置する際には、1) コントローラを使用せず、仮想物体を実際に挿んで動かせるハンドトラッキング機能を有する、2) R空間を広範囲に視認できる、3) ハードウェアユニットの位置姿勢を推定する機能を有する、という3つの要件を満たすHMDの使用が望ましいと考えた。一方、MR体験時には、RV-XoverKitを低遅延で制御するために、Mindstorm®と有線ネットワークで接続する必要がある。これらを満足するために、我々はコンテンツ開発支援ツールを、仮想物体を配置するシステムと実際にMRを体験するシステムに分けて設計することとした。システムを2つに分けるため、両システム間で座標系を統一する機能や、保存した仮想物体の位置姿勢を共有する機能も必要となる。

### 5.3 システムの実装

先に述べた要件を満たすデバイスとして本研究では、仮想物体を配置する際のHMDとしてMicrosoft HoloLens2を採用し、体験用のHMDはHTC VIVE ProにStereolabs ZED miniを取り付けたものを採用した。仮想物体の配置に際してハードウェアユニットの位置姿勢推定には、ARライブラリであるVuforiaを利用する。事前にVuforia

Object Scanner というアプリで、ハードウェアユニットを 3D オブジェクトとして登録し、これによって HoloLens2 とハードウェアユニット間の位置姿勢を推定することで、R 空間と V 空間の整合性を確保する。コンテンツ開発支援ツールを使ったコンテンツ制作と MR 体験の流れは以下のようになる。

- (1) 画像マーカを用いて HoloLens2 と VIVE Pro の原点と座標軸を合わせる
- (2) 事前に登録したハードウェアユニットを Vuforia の マーカ 認識 機能 によって HoloLens2 上で認識させる
- (3) コンテンツ開発者が HoloLens2 のハンドトラッキング機能を用いて仮想物体を R 空間中に配置し、その位置姿勢を保存
- (4) 保存した仮想物体の位置姿勢を VIVE Pro に転送し、それに基づいて V 空間をレンダリングして MR 体験を行う

コンテンツ配置支援ツールは RV-MessengerKit との併用が前提のため、Unity 上での利用を想定している。作成したシステムの構成を図 10 に示す。このシステムを実装するに当たって必要な機能は座標系調整機能、R-V 情報伝達位置の判定機能、仮想物体の位置調整機能、調整結果共有機能の 4 種類となる。

座標系調整機能は、HoloLens2 と VIVE Pro の 2 種類の HMD の座標系を統一するための機能である。システム実行時に VIVE Pro 側のプロジェクトの原点座標に画像マーカを配置し、それを HoloLens2 側で認識することで座標系を合わせる。R-V 情報伝達位置の判定機能は、仮想物体が、ハードウェアユニット (図 11) が動作する位置に配置されているかを判定する。図 11 内の白い仮想の板が判定検知範囲で、仮想物体が判定検知範囲と重なると枠の色が赤から緑へ変化する。この状態が R-V 情報伝達において、現実と仮想が繋がって見える配置となる。仮想物体の位置調整機能では、HoloLens2 のハンドトラッキング機能を利用して掴むなどのハンドジェスチャによって仮想物体の位置を調整できる。図 12 のようなハンドメニューも実装しており、操作途中で仮想物体の位置をリセットしたり誤操作を取り消す指示ができる。調整結果共有機能は、仮想物体の位置姿勢調整結果を VIVE Pro で利用するため出力する機能である。図 12 の一番下にある Finish ボタンを押すことで仮想物体の座標が出力される。仮想物体の 3D モデルは 2 つのプロジェクト間で共有されているため、同じ仮想物体の座標がプロジェクトを実行すると保存された座標に書き換えられるようになっている。各機能の更に詳細な実装に関しては文献[13]を参照されたい。

## 5.4 コンテンツ開発支援ツールの使用例

この節では実際の使用例について説明する。ハードウェアユニットとしては、RtoV 傾倒の情報伝達に使用する図 13 のセンサと、VtoR 傾倒の情報伝達に使用する図 14 のアクチュエータをそれぞれ登録し、仮想物体としては、図 15 に示すサイズが  $0.28W \times 0.025D \times 0.05H(m)$  の 12 枚からなる仮想ドミノ列を使用する。使用例の全体を図 16 に示す。図左側のオレンジで囲まれた箇所に図 15 の仮想物体があり、図右側の水色で囲われた箇所には RtoV 傾倒のセンサと VtoR 傾倒のアクチュエータが置かれている。センサ・アクチュエータの左右には現実のドミノが置かれており、現実のドミノが倒れ RtoV 傾倒に触れることで V 空間へ入り、仮想のドミノからの運動が VtoR 傾倒を通して R 空間のドミノへ続くという状況を想定する。ここでは、図 15 の仮想物体を、ツールを使用して見かけ上繋がって見える位置に配置することを考える。

HoloLens2 でプロジェクトを起動すると、図 17(a)のように原点座標を決定するウィンドウが表示される。これは 5.3 節の手順(1)に当たり、原点登録用のマーカは VIVE Pro の原点にあわせて予め配置しておく。原点登録用のマーカの上に仮想の矢印がマーカに対して垂直に表示されている状態でウィンドウの YES ボタンを押すと原点座標が固定される。その後仮想物体が表示され、この状態で左右どちらかの手のひらを認識させるとハンドメニューが表示される。手順(2)のハードウェアユニットの認識を行うのはこの時で、ハードウェアユニットの認識が完了したら手順(3)にあるようにハンドトラッキング機能で仮想物体を掴み、ハードウェアユニット

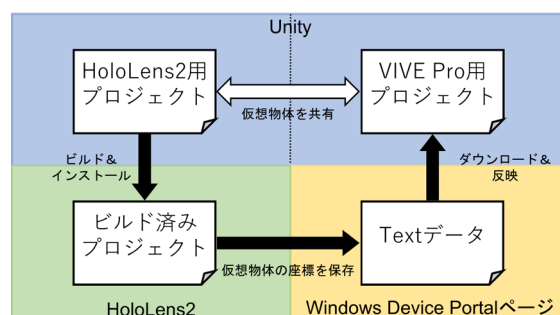


図 10 システムの構成

Fig.10 System structure

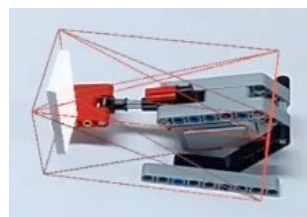


図 11 ハードウェアユニット  
Fig.11 Hardware unit

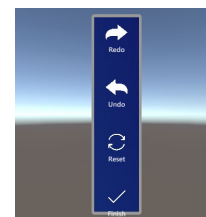


図 12 ハンドメニュー  
Fig.12 Hand menu



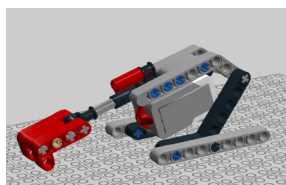


図 13 センサ  
Fig.13 Sensor

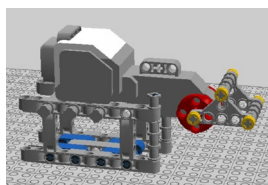


図 14 アクチュエータ  
Fig.14 Actuator

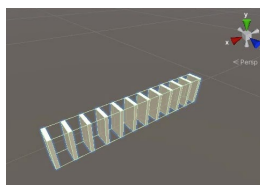
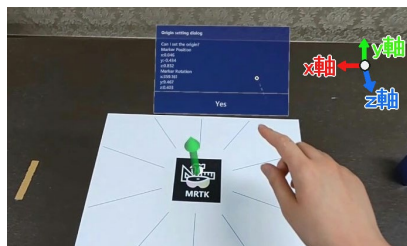


図 15 仮想物体  
Fig.15 Virtual objects



図 16 全体像  
Fig.16 Overall image



(a) 原点座標認識



(b) 仮想物体の配置



(c) MR 空間表示

図 17 コンテンツ制作の流れと MR 体験の様子

Fig.17 The flow of content production and its MR experience

トに重畳描画されている赤枠が緑色になるように仮想物体を配置する (図 17(b)). 仮想物体が正しい位置に配置されたら, ハンドメニューから **Finish** ボタンを押す, 確認ウィンドウから **OK** ボタンを押す事で仮想物体の位置姿勢がファイルに出力される.

図 17(c)は VIVE Pro 側の Unity プロジェクトに仮想物体の配置結果を反映させ実行した様子である (5.3 節の手順(4)). 図から HoloLens2 で保存した位置姿勢と同じ位置に仮想物体が表示されていることがわかる. 仮想物体を配置する際の所要時間は仮想物体の大きさやどれぐらい仮想物体を掴んで移動させなければならないかに依存するが, この例での仮想物体の配置には約 16 秒かかっている. 仮想物体が現実の物体に対してどの程度正確に配置することができたかに関して, この例と同じ環境で 30 回仮想物体の配置を行い, その平均を算出した. 図 15 の仮想物体を現実の物体として作成したと仮定した際の中心座標は原点マーカの座標から (0.458, 0.048, -0.004) の位置となるのに対して, 仮想物体を配置した座標の平均は (0.469, 0.048, -0.014) となり, z 軸方向でのズレが他と比べて若干目立つ結果となっている.

### 5.5 コンテンツ開発支援ツールの問題点

現状のツールには 2 つ問題点がある. 1 つ目は, HoloLens2 のハンドトラッキング機能に起因するもので, 操作に慣れるまでは仮想物体の配置に時間がかかる場合や, 配置完了後に意図せずに仮想物体を把持・移動してしまう場合があることである. 2 つ目は R-V 情報伝達位置の判定に関するもので, 操作のしやすさを考慮して, 仮想物体に移動・回転に制限を加えると接触位置の判定がうまくいかない場合がある. ハンドトラッキング機能に関する問題は,

仮想物体を把持する際の判定を修正することで改善が期待できる. R-V 情報伝達位置の判定については, 判定範囲の形状や大きさを工夫することで改善できると考えている.

## 6 むすび

本研究では, MR コンテンツの表現力向上を念頭に, 現実と仮想が相互に連携する R-V 越境転移という概念とそれを実現する RV-XoverKit というツールキットについて提案している. 本論文では, 特に対象をエデュテインメント分野に絞り, R-V 境界における相互の情報伝達が簡便に実現できる RV-MessengerKit の設計と実装について述べた. また, RV-MessengerKit を利用する際に, R 空間の実物体と V 空間の仮想物体が滑らかに繋がるように仮想物体を配置するためにコンテンツ開発支援ツールについて提案した. RV-MessengerKit やそれに付随するコンテンツ開発支援ツールを活用することで, 現実と仮想が組み合わせり滑らかに相互作用する高度な MR コンテンツの開発が可能となる.

## 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] K. Inoue, T. Wada, K. Kitamura, S. Nishino, R. Ichikari, R. Tenmoku, T. Ohshima, and H. Tamura. Kaidan: Japanese Horror Experience in Interactive Mixed Reality Space; SIGGRAPH ASIA 2009, Emerging Technologies, p. 75 (2009)
- [3] 竹村雅幸, 原口俊吾, 大田友一: 複合現実空間における

インタラクティブ・アトラクション：BLADESHIPS; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 1, pp. 119 - 127 (2005)

- [4] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, A. Hogge, and H. Ishii: inFORM Dynamic Physical Affordances and Constraints; Proc. 26th Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 13), pp. 417 - 426 (2013)
- [5] M. Kojima, M. Sugimoto, A. Nakamura, M. Tomita, H. Nii and M. Inami: Augmented Coliseum: An Augmented Game Environment with Small Vehicles; Proc. 1st IEEE Int'l Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems (TABLETOP '06), pp. 3 - 8 (2006)
- [6] T. Hiraki, S. Fukushima, Y. Kawahara, and T. Naemura: Phygital Field: An Integrated Field with Physical Robots and Digital Images Using Projection-Based Localization and Control Method; SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 11, No. 4, pp. 302 - 311 (2018)
- [7] R. Suzuki, C. Zheng, Y. Kakehi, T. Yeh, E. Y. Do, M. D. Gross, and D. Leithinger: ShapeBots: Shape-changing Swarm Robots; Proc. 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 493 - 505 (2019)
- [8] H. Mi, and M. Sugimoto: Hats: Interact Using Height-adjustable Tangibles in Tabletop Interfaces; Proc. Int'l Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, pp. 71 - 74 (2011)
- [9] 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リーチの実現 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)
- [10] J. Leitner, C. Köffel, 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)
- [11] 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)
- [12] 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; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 463 - 472 (2016)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 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).

- [16] Y. Fukuda, A. Shikishima, A. Kimura, H. Tamura, and Fumihisa Shibata: RV-XoverKit: Mixed Reality Content Creation Toolkit to Connect Real and Virtual Spaces, Proc. 14th Asia-Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality (APMAR 2022), CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3297 (2022)
- [17] The Rube Goldberg: <https://www.rubegoldberg.org/> (参照日 2023 年 2 月 25 日)
- [18] LEGO® Pick a Brick Official LEGO® Shop US: <https://www.lego.com/en-us/page/static/pick-a-brick?query=&page=1> (参照日 2022 年 1 月 10 日)

(2023 年 3 月 6 日受付)

### [著者紹介]

福田 裕美 (学生会員)

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。複合現実感技術に関する研究に従事。学士 (工学)。



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修了。修士 (工学)。複合現実感に関する研究に従事。



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所助手を経て, 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,



福田・敷島・木村・柴田: 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

電子情報通信学会, 日本ロボット学会, 情報処理学会等の  
の会員. 本学会学術奨励賞・論文賞を受賞.