コンテンツ論文

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

平田 遼太郎[*1]　石橋 朋果[*1]　チェ カネイ[*1]　森 尚平[*1, 2]
池田 聖[*1]　柴田 史久[*1]　木村 朝子[*1]　田村 秀行[*3]

DOMINO Toppling: An MR Attraction Focusing on R-V Continuum

Ryotaro Hirata[*1], Tomoka Ishibashi[*1], Jianing Qie[*1], Shohei Mori[*1, 2],
Sei Ikeda[*1], Fumihisa Shibata[*1], Asako Kimura[*1], and Hideyuki Tamura[*3]

Abstract -- In this paper, we present an MR-based attraction, "DOMINO (DO MIxed-reality NOn-stop) Toppling," as a case study of MR-based entertainment systems, focusing on the Real–Virtual (R–V) and Virtual–Real (V–R) continuum. In this attraction, the user experiences that real and virtual domino blocks seamlessly push each other through a video-seethrough head-mounted display. Therefore, the user may believe that attractive MR effects happen in the real space. To achieve the seamless R–V/V–R transitions, we designed and implemented simple switching devices. We carried out demonstrations of our system at an international symposium and found such seamless R–V/V–R transitions effectively entertained people.

Keywords: Mixed Reality, MR attraction, R–V/V–R continuum

1 はじめに

現実世界と仮想世界を実時間で融合させる複合現実感（Mixed Reality; MR）は，人工現実感（Virtual Reality; VR）の中でも，最も活発に研究されている分野の１つである[1, 2]．仮想空間だけを対象としたVR に対して，現実世界をも視認対象，操作対象とし得るMR 技術は，情報提示能力の高さ，表現力の豊かさを有することから，科学技術や設計・製造分野に応用されるだけでなく，アート&エンターテインメント（A&E）分野で注目を集めてきた．CG の祭典SIGGRAPH では，Emerging Technologies 部門で[3]，欧州のLaval Virtual ではVirtual Fantasy のデモ展示で[4]，毎年のようにMR 型のアトラクションが人気を博している．オーストリアの美術館Ars Electronica でも，しばしばMR 型アート作品[5]が特別展示されていることからも，既にMR 技術が現代アートや最新エンターテインメントに大きな影響を与えつつあることが分かる．

従来のA&E 作品やTV 型モニタを利用するビデオゲームと比較すると，MR アトラクションは遊戯者の眼前の現実世界を借景できることが大きな魅力である．実物を配置するインスタレーション型アートに比べると，実物とCG 映像を併用できる自由度の高さが大きな魅力である．ビデオシースルー型HMD を利用するMR アトラクションでは，体験者視点のMR 合成映像を他の観衆に大画面で表示する利用法も好評の一因となっている．

こうした視点から開発されたMR アトラクションでは，聴覚的MR 刺激や，触覚や嗅覚の併用等も工夫されてきたが，主たる演出対象は，現実と仮想の視覚的融合（即ち，いかに魅力的かつ効果的なCG 映像を目の前の現実世界に出現させるか）にあったと言っても過言ではない．技術的には，CG 物体を現実世界に位置ずれなく配置し（幾何学的整合性），現実世界の照明条件と違和感のないCG 映像を描画する（光学的整合性）ことの達成が必須条件であり，CG 中心の演出が主流であった．

原点に戻って考えてみれば，**図1**に示すようにMR 技術の要諦は，現実世界と仮想世界の対等な融合を目指すものであり，AR (Augmented Reality)と AV (Augmented Virtuality) の間も技術的には連続体(continuum) である[6]というのが，元来の定義である．我々はこの「R-V Continuum」の基本概念に忠実なMR アトラクションの開発を通して，MR 技術のさらなる発展を目指すことにした．

具体的な課題として，現実物体と仮想物体が同じものを表現し，それぞれが静的でなく，衝突や移動が可能であり，かつ可能な限り継ぎ目なくR-V/V-R

*1 立命館大学大学院 情報理工学研究科
*2 現在，慶應義塾大学 理工学部
*3 立命館大学 総合科学技術研究機構
*1 Graduate School of Information Science & Engineering, Ritsumeikan University
*2 Faculty of Science and Engineering, Keio University
*3 Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University

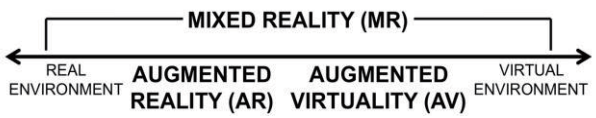


図 1　Milgram の唱えた R-V continuum [6]
Fig. 1 Milgram's reality-virtuality continuum [6]

間も遷移するような MR 空間の実現である．これを単に技術的に解決するだけでなく，体験して楽しい MR アトラクションとして具現化することを目標とした．

R-V 相互連続的遷移の技術的解決と MR コンテンツとしての充実度の両方を同時に達成する題材として，後述する理由により，所謂「ドミノ倒し」を選んだ．即ち，「実物ドミノ」と「仮想ドミノ」が連続的に遷移する MR アトラクションである．

以下，第 2 章では，我々が制作する MR アトラクションのコンテンツ事例について述べる．第 3 章では，目指す DOMINO Toppling の構成技術について述べる．第 4 章では，開発した DOMINO Toppling の展示運用および運用結果について述べる．第 5 章では，運用結果を分析し，考察する．

2 関連研究とコンテンツ対象の選択

2.1 既存の MR アトラクション

これまでの MR 型 A&E アトラクションの成功例は，実背景のリアリティに仮想物体の自由度を巧みに融合させた空間型体験の演出が多く[7, 8]，ゲーム型 MR コンテンツにジェスチャを用いた事例も少なくない[9, 10]．いずれの場合も，何を実物とし，何を仮想物とするかの判断は，アーティストのデザイン・センスに委ねられていた．MR 技術の表現力が向上するにつれ，それだけデザインの自由度も増し，高度な演出も可能となってきた．

筆者らの研究グループは，多数の MR アトラクション開発経験があり，「Watch the Birdie!」[11]「Rhythm of the Rain in 3D」[12]「Kaidan」[13]等々を展示発表し，MR アトラクションを進化させてきた．いずれも，ビデオシースルー型 Head-Mounted Display (HMD) を用いた視覚的 MR 合成だけでなく，聴覚的 MR を共存させた「2×2 方式視聴覚併用 MR システム」たることを特徴としていた．本論文で扱うのは，表現力向上の方向を変え，前述のように「R-V Continuum」を意識し，R-V/V-R 間の遷移を円滑に行なうコンテンツの制作である．

実物体から仮想物体に影響を及ぼす R→V 遷移，もしくはその逆の V→R 遷移をスムーズに行なった研究例として[14 - 16]が挙げられる．仮想物体の衝突で実物体が動いたり，逆に実物体の接触で仮想物体が変形したりする等の R-V 力学的相互作用が実現されている．我々の着想はそれらとは違い，現実と仮想で同種の物体が滑らかに遷移することを目指している．即ち，幾何学的，光学的，力学的，音響的にシームレスかつ相互に遷移し，この遷移のシームレスさ自体により，新しい驚きを得ようとするものである．

2.2 R-V/V-R 遷移の題材としてのドミノ倒し

上記の着想を具現化するのに適した対象として，「ドミノ倒し」を選択した．これは素材がシンプルで，仮想物体が精度高く描画しやすく，また同じ種類の物体が力学的影響を及ぼし合うという目的に格好の題材だからである．

ドミノ倒しでは，最初のドミノが倒されると，ドミノは物理的な衝突を繰り返しながら次々に倒れていく．我々は，実物ドミノの系列と CG で描いた仮想ドミノの系列を混在させたアトラクションを企画した．実物ドミノが仮想ドミノを倒す現象（R-V）とその逆の現象（V-R）が，滑らかに起こるように見せること（シームレスな遷移）を目指した．

既存研究においても，ドミノ倒しを題材とした MR アトラクションが提案されている．Leitner らの COMINO[17, 18]では，実物ドミノと仮想ドミノの切り替わりの箇所を体験者が自由に設定してゲーム形式で遊ぶことができる．ただし，このシステムでは，専用ボックスが用意され，その中で R-V/V-R の遷移が行われるので，遷移の瞬間は視認できない．また，仮想ドミノはテーブル上に投影された CG 像象であるので，リアリティは高くない．

我々の作品では，仮想ドミノの描写を実物ドミノの違いを簡単に識別できないレベルに高め，その相互間の遷移を覆い隠すことなく見せることを目標とした．これを実現するためには，高度な幾何学的整合と光学的整合の達成が要求される．

3 DOMINO Toppling のデザイン

3.1 体験の流れと期待される演出効果

我々の DOMINO (DO MIxed-reality NOn-stop) Toppling は，ビデオシースルーHMD 越しに実物ドミノと仮想ドミノのシームレスな遷移を体験できる MR アトラクションである．現実空間では，離れ小島に実物ドミノが配置されており，MR 空間では，それらが仮想ドミノによって接続されている（**図 2**）．

本アトラクションの体験は，体験者が自らの手で実物ドミノに触れて体験がスタートする．その後，実物ドミノから仮想ドミノ (Real to Virtual; R-V)，仮想ドミノから実物ドミノ (Virtual to Real; V-R) と遷移を繰り返し，最終的に実物ドミノが倒れて体験が終了する．即ち，HMD を通して見る MR 空間では，仮想ドミノが摩訶不思議な動きをすることで

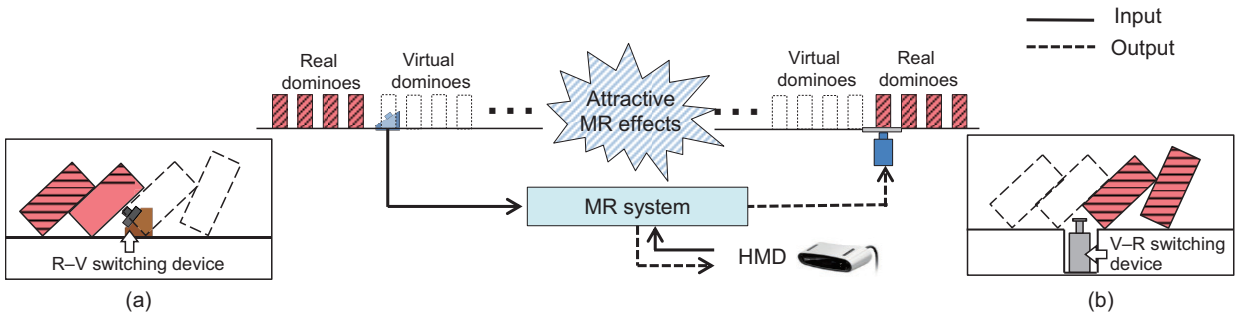


図 2 DOMINO Toppling のコンセプト図
Fig. 2 Concept image of "DOMINO Toppling"

体験者を驚かせ，HMD を取り外して見る現実世界では，不連続に配置された実物ドミノが倒れており，もう一度体験者を驚かせる．

3.2 実装方針

DOMINO Toppling を実装する上で，R-V/V-R 両方向のシームレスな遷移を実現するための課題を以下のように整理した．

(A) 現実空間と仮想空間の連続性において，
　(A-1) 幾何学的・光学的整合を達成すること
　(A-2) 同様の力学特性を有すること
　(A-3) 音響的に同じ属性を有すること
(B) 物理的な影響を伝播するデバイスの実装

(A) 実物ドミノと仮想ドミノの間をシームレスに遷移するためには，実物体と仮想物体の間で視覚的・聴覚的に違和感が生じないように工夫しなくてはならない．視覚的な違和感を低減するためには，実物体と比べた際の仮想物体の不自然な反射や，仮想物体の位置ずれを防ぎ，実物体の物理的な動きを仮想空間で再現する必要がある．聴覚的な違和感を低減するためには，実物体と仮想物体の衝突に際した衝突音の再現が必要である．

(B) 実物・仮想ドミノ間の衝突を実物と仮想の双方向に伝えるために，実物ドミノから仮想ドミノへ衝突の情報を伝えるだけでなく，実物体側に物理的な影響を伝播するデバイスが必要となる．

以下では，DOMINO Toppling を構成する技術的な要素や実装における留意点について述べる．

3.3 仮想ドミノの幾何位置合わせ

本節では，仮想ドミノを指定の位置姿勢で空間に配置するために必要となる幾何位置合わせの方法に関して述べる．これは 2.2 節 (A-1) の幾何学的整合の達成に相当する．

本アトラクションでは，体験者が自由視点でドミノの R-V/V-R 遷移を視認できるように，MR 空間を観測するデバイスとして HMD を用いる．HMD による観測の際に，実空間と仮想空間の映像上の同期ずれによって実物と仮想のドミノの間で位置ずれが生じ，両者を見分け易くなる恐れがある．そこで，撮影した実空間の映像上に仮想物体を合成することで，仮想空間と実空間の同期をとって提示することの出来るビデオシースルー型 HMD を選択した．また，体験者が HMD をすぐに取り外して MR 空間と実空間を見比べ易いように，ハンドヘルド型 HMD（キヤノン社製 MREAL HH-A1）を採用した．**表 1** にその仕様を示す．

表 1 HMD の仕様
Table. 1 Spec of HMD

画角	水平 60 度 / 垂直 47 度
撮像系解像度	640×480 画素
表示系解像度	1280×980 画素

【世界座標系の設定と HMD のトラッキング】

本アトラクションでは，演出の自由度を高めるため，MR 空間として空中を含めた 5.0m×5.0m×5.3m の空間を設定する．体験者は HMD 越しにドミノを追うために，この空間の床面上を動き回ることが予想される．この体験者の動きを実時間追跡する位置・姿勢センサが必要となるが，動きを制限・拘束するようなセンサは好ましくない．この観点から，広範囲のトラッキングが可能であり，トラッキング対象の HMD には軽量の再帰性反射材を取り付けるだけで済む光学式センサ Vicon 社製 Bonita3 及び Bonita10 を採用した．

このセンサを用いて世界座標系の設定及び HMD のトラッキングを行う．HMD に複数の再帰性反射材で構成した剛体を取り付け，センサからその剛体の位置姿勢を取得する．HMD に取り付けた剛体と HMD カメラとの 6 自由度のオフセットを計算するため，キヤノン社製 MREAL システムに実装されている較正機構を利用した．尚，HMD 内臓カメラの内部パラメータは既知であるものとする．

【R-V，V-R 切り替え箇所でのトラッキング】

R-V，V-R 切り替え箇所では，実物ドミノと仮想

ドミノが互いに近くに置かれているため，他の箇所よりもトラッキングに起因する位置ずれが目立ちやすい．そこで，R-V，V-R 切り替え箇所には基準マーカを置き，光学式センサから基準マーカによるトラッキングに切り替え，見た目に正しく位置合わせされるように工夫した．

3.4 仮想ドミノの配置と描画

本節では，HMD に表示される実物ドミノに仮想ドミノの描画結果を近づける方法に関して述べる．これは 3.2 節（A-1）の光学的整合の達成にあたる．

【実物ドミノの作成】

仮想ドミノの描画方法を工夫する前に，まず，モデル化しやすい実物ドミノを作成した．仮想物体の反射特性の計算を簡単化するため，鏡面反射が発生しにくい木製の実物ドミノを用いた．実物ドミノは，上記 MR 空間のどこに配置して観察したとしても，HMD 越しに確認できる大きさとして，高さ，幅，奥行きをそれぞれ 8cm，4cm，2cm とした．また，意図しない衝撃によって倒れないように，重さ 80g のドミノを利用している．加えて，ドミノの色は，色彩鮮やかなコースを提示できるように複数色用意した．

【仮想ドミノの配置】

上記の実物ドミノを模した仮想ドミノの描画ステップを**図 3** に示す．以降，4 つのステップ毎に実装上の留意点を述べる．

仮想部でのドミノコースの設計は，コンテンツの持つエンターテインメント性を高めるために大きな意味を持つ．本アトラクションでは，仮想ドミノを MR 空間のコース上に配置するために，既存の 3DCG モデリングソフトを利用した．具体的には，Autodesk 社製 Maya を利用してドミノのコースを設計し，各ドミノの「位置姿勢，カラーコード」を 1 行ごとにテキストファイルに出力し，それを MR 空間管理用システムで読み込むことで任意のコースを MR 空間に配置できるようにした．

Autodesk 社製 Maya を使って作成したコースの例を**図 4** に示す．図中の小さな直方体はドミノを，大きな直方体は，体験スペースに配置する実物体を表している．**図 5** にこのコースを MR 空間に描画した結果を示す．シームレスな遷移が達成できれば，体験者には縦横無尽に展開する仮想ドミノコースが現実に存在するように感じられるはずである．

【テクスチャマッピング】

実物ドミノの質感を仮想ドミノに反映するため，実物ドミノをスキャナで画像化して仮想ドミノにテクスチャマッピングを行った．

【シェーディング】

仮想ドミノのシェーディングには Phong の反射モデルを利用した．本アトラクションは室内での体験を想定しているため，光源は静的であり，その位置や強さといったパラメータは既知であるとした．また，処理の簡単化のため，光源数は 1 とした．

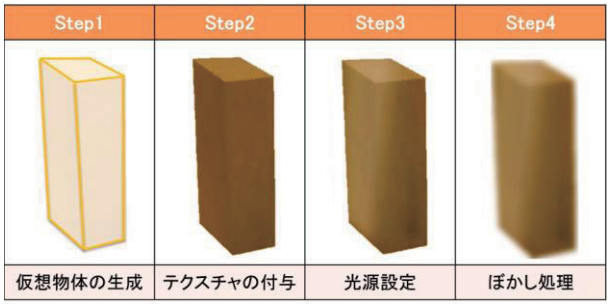


図 3 仮想ドミノの描画ステップ
Fig. 3 Steps for rendering a virtual domino

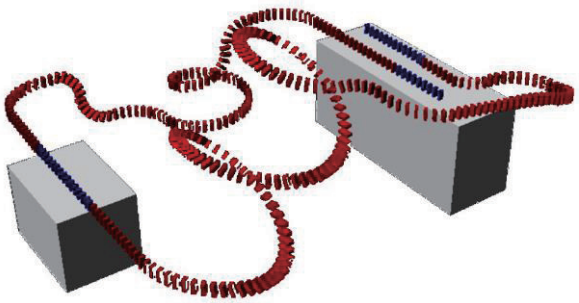


図 4 ドミノコースの全体像
Fig. 4 Overall image of the domino course

【ぼかし処理】

今回の体験に用いた HMD は，HMD 撮像系と表示系の解像度が異なるため，HMD に表示される実画像がぼけて見える．そこで，HMD のディスプレイに映し出される実物ドミノと仮想ドミノの見た目を合わせるために，仮想ドミノを撮像系の解像度である 640×480 画素で一旦レンダリングし，その後，バイリニア補間を用いて表示系の画像サイズである 1280×960 画素に拡大した．

これらの一連の描画は，OpenGL Shading Language（GLSL）によって記述した．この描画ステップに従い，実物ドミノの横に仮想ドミノを描画した結果を**図 6** に示す．

3.5 仮想ドミノのアニメーション

本節では，実物ドミノの倒れ方を再現した仮想ドミノのアニメーションに関して述べる．これは 3.2 節（A-2）の解決方法に相当する．

実物体の動きを再現する方法として，実空間の物理法則を参考にした物理エンジンを利用する方法が挙げられる．本アトラクションでは，こうした物理法則に従わない仮想ドミノを提示することを目的としているため，物理エンジンは利用しない．代わりに，実物ドミノの倒れ方に基づいてモデル化したア



図 5 体験者視点から見た仮想ドミノコース
Fig. 5 Virtual domino course from user's view

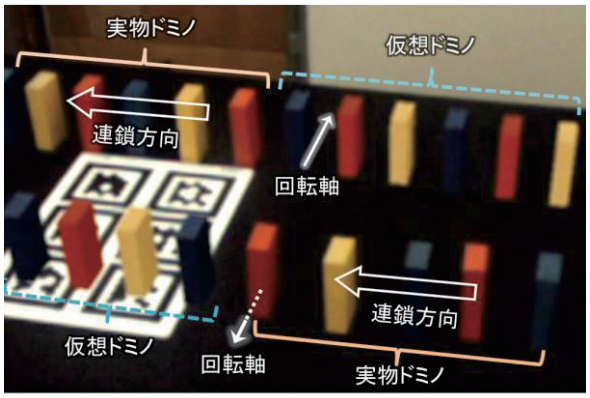


図 6 仮想ドミノの MR 合成結果
Fig. 6 MR composited virtual dominos

ニメーションで仮想ドミノを制御した．仮想ドミノの動きは（1）基本アニメーションと（2）高低差による速度変化の 2 つの要素で制御している．

（1）ドミノの転倒時の回転軸を図 6 中の矢印のようにドミノ底面の一辺に定める．速度を調整する係数 *Base* を用いて角度 30.0 度までは *Base*×6π rad/sec，角度 54.0 度までは *Base*×5π rad/sec，角度 64.0 度までは *Base*×2π rad/sec，角度 70.0 度までは *Base*×π rad/sec で回転させる．尚，角度 30.0 度まで倒れたところで，次のドミノのアニメーションが開始する．ドミノが 4cm 間隔，ドミノの幅が 2cm のとき *Base*=0.42 と定めると経験的に自然な動きになり，このときドミノの進行速度は 90cm/sec となる．これを基本速度とする．

（2）2 つの仮想ドミノの高低差を 1cm とした時，コースの傾斜が上りである場合は基本速度から 5% 減速し，傾斜が下りである場合は基本速度から 5% 加速するように設定した．同様に高低差が 0.5cm 以上の場合は，0.5cm 毎に仮想ドミノの傾く速度が 2.5%減速し，−0.5cm 以下の場合は加速する．極端に高低差が続くドミノコースを作成した場合，ドミノの速度は無限に加速，もしくは停止するまで減速してしまうため，ドミノの加速・減速は±150%までとした．

3.6 仮想ドミノの音

本節では，実物ドミノが倒れる音を仮想ドミノに対して付与する方法に関して述べる．これは 3.2 節 (A-3) の解決方法に相当する．

実物ドミノの音は，実物ドミノ同士や設置面との衝突により発生する．仮想ドミノが倒れる音を実物ドミノのそれに似せるため，実物ドミノが倒れる音を録音して利用した．再生される音が同じものであると単調に聞こえて違和感が生じるため，こうした音源を 20 パターン録音し，仮想ドミノが倒れる度に，ランダムに選択された 1 パターンが再生されるようにした．こうした音は体験スペースに配置したスピーカから再生される．

3.7 R-V/V-R 切り替えデバイス

本節では，実物ドミノから仮想ドミノへ (R-V)，また，仮想ドミノから実物ドミノへ (V-R) の物理的な影響を伝播するために作成したデバイスに関して述べる．この内容は 3.2 節で述べた (B) の解決方法に相当する．

【R-V 切り替えデバイス】

実物ドミノが倒れ，その影響を受けて仮想ドミノが倒れ始める必要がある．本アトラクションでこれを模すため，実物ドミノが倒れたことを検知するタクタイルスイッチを使用したデバイスを作成した（**図 7** 左）. R-V 切り替えデバイスはドミノコース上に，実物ドミノ，R-V 切り替えデバイス，仮想ドミノの順で配置する．この実物ドミノが倒れると，タクタイルスイッチを押し，その信号がデバイス制御機構（Arduino）を経由して MR 管理用 PC に送信されることで，続く仮想ドミノのアニメーションをスタートする（**図 8 (a)**）．このデバイスは，実物ドミノが接地面まで倒れきり，仮想ドミノと不自然な重なりにならないように，一定の角度に止める物理的なストッパとしての役割もある．

【V-R 切り替えデバイス】

仮想ドミノが倒れ，その影響を受けて実物ドミノが倒れ始める必要がある．本アトラクションではこれを模すために，80g の重さを持つ実物ドミノを体験の度に安定して倒さなければならない．そこで，簡易に電気制御可能であり，一定の力でストロークさせることが可能なソレノイドアクチュエータを利用し，切り替えデバイスを作成した（図 7 右）．V-R 切り替えデバイスは，実物ドミノの下に配置する．仮想ドミノが倒れるタイミングはプログラム上で制御するため，実物ドミノに衝突するタイミングは既知である．よって，仮想ドミノが倒れると，次いで，Arduino を経由して V-R 切り替えデバイスに信号を送り，ソレノイドアクチュエータが実物ドミノを下から突き上げることで倒す（図 8 (b)）．

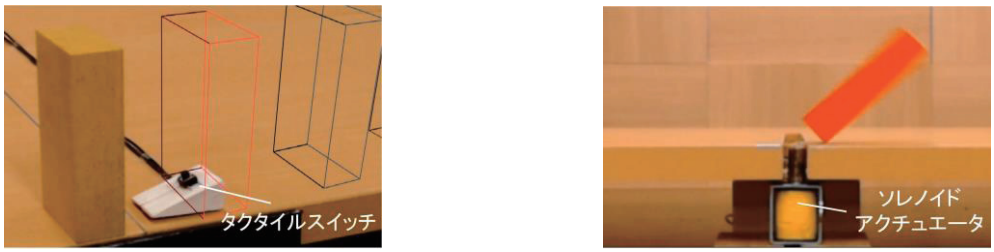
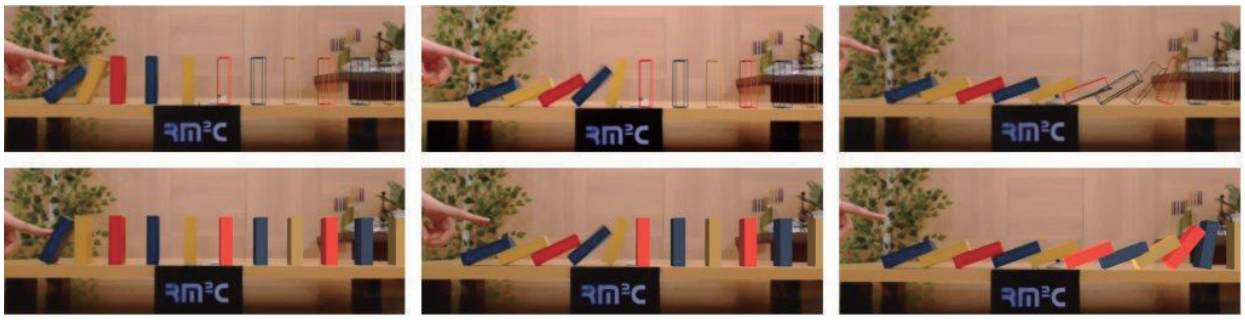
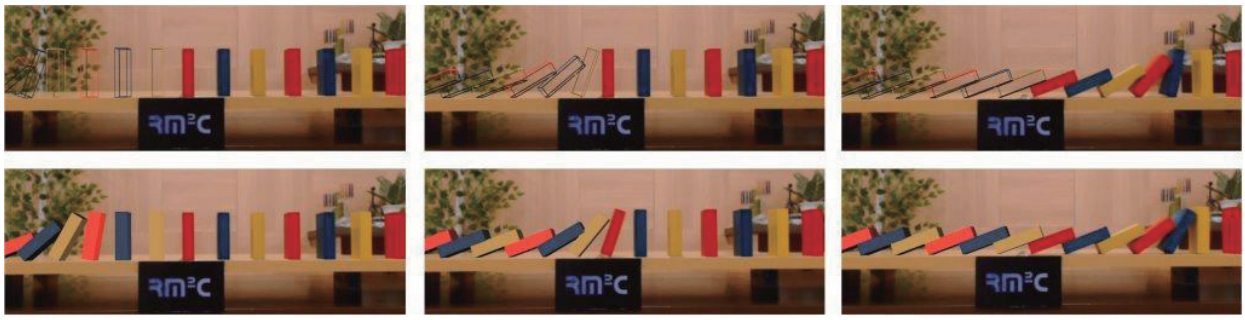


図 7 R-V 切り替えデバイス（左）と V-R 切り替えデバイス（右）
Fig. 7 R-V switching device (left) and V-R switching device (right)



(a) 実物ドミノから仮想ドミノへの遷移
(a) Real to virtual domino



(b) 仮想ドミノから実物ドミノへの遷移
(b) Virtual to real domino

図 8 実物ドミノと仮想ドミノの遷移
Fig. 8 Real and virtual domino transitions

4 国際会議 ISMAR2015 での技術展示

4.1 学内試作から国際会議技術展示へ

前章の概念設計，機能設計を行った上で，目指す DOMINO Toppling のアトラクション・プロトタイプを開発し，学内外の人々に体験してもらった．例えば，研究室未配属の学生たちや，学外から研究室見学に来られた来客等，開発の経緯や切り替えの仕掛けを知らない人々である．この段階で，R-V/V-R 間の遷移の円滑さやアトラクションとしての面白さを向上させる貴重な意見を聴取することができた．

DOMINO Toppling の展示発表の最終目標を，2015 年 9 月 29 日から 10 月 3 日にかけて開催された ISMAR 2015 (The 13th IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality)（於 福岡国際センター）と定めた．AR/MR 研究の専門家に体験してもらい，評価を仰ぐことを目指したためである．

学内試作から外部展示物への改善で考慮したのは，次の 2 点である．

(a) MR 分野最前線の世界の研究者にアピールできる技術水準である上に，一般市民への開放日の来場者にも楽しんでもらえるコンテンツであること
(b) R-V Continuum は，一旦可能な限り区別がつかないレベルを達成し，しかる後に，「楽しさ」を重視して，意図的に実物と仮想物の違いを強調する演出も加える．

4.2 DOMINO Toppling の機器構成

展示時の最終的な機器構成を図 9 に示す．MR 空間管理用 PC には，視覚情報提示用の VST-HMD（前述），音声情報の提示にスピーカ，R-V/V-R 切り替えデバイスの制御に Arduino を接続する．体験者の頭部の位置姿勢を取得するために，HMD には再帰性反射材のマーカを取り付ける．また，客観視点からの映像提示を行うための USB カメラを接続する．

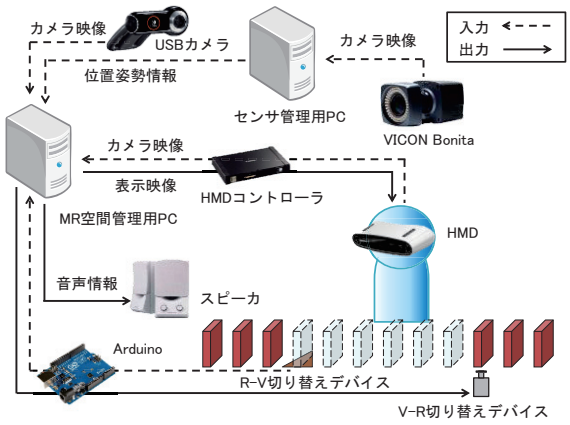


図 9 システム構成図
Fig. 9 System configuration

センサ制御用 PC では，光学式センサ VICON Bonita を制御する．HMD のトラッキングには，VICON 社製のソフトウェア「VICON TRACKER 3.0」を使用し，再帰性反射材を取り付けた HMD の座標系を定義し，位置姿勢を取得する．取得した位置姿勢は MR 空間管理用 PC に送信される．

4.3 体験スペース

展示発表において設営した体験スペースを図 10 に示す. VICON カメラは, 体験スペース内に 6 台, 互いの視野角範囲を補うように設置した.

MR アトラクションの体験の様子は，左右の机の外側に配置された客観視点カメラを介して，待機列に向けた大型モニタへ出力され，客観視点から体験者と描画された仮想ドミノを同時に確認できる．

4.4 体験内容と機能追加

展示発表時のドミノコースの進み方を図 11 に示す．コースの構成は「実物ドミノ」「仮想ドミノ」「実物ドミノ」「仮想ドミノ」「実物ドミノ」というパートで成り立っている．体験者は HMD を介して，実物ドミノと仮想ドミノが切り替わりを繰り返しながら，実世界の物理法則に従わない摩訶不思議なドミノコースを進んでいく様子を見ることができる．

【体験の流れ】

DOMINO Toppling の体験は，スタート地点の実物ドミノの最初の一つを，体験者が倒すことで始まる．実物ドミノは机の上を進んだ後に仮想ドミノへと切り替わり, 机上から空中へと移行し, 図 12 (a) に示すような仮想ならではの空中コースを進行する．空中コースを進んだ後，仮想ドミノは左の机上で実物ドミノへ切り替わり，その後，再び実物ドミノから仮想ドミノへ切り替わる（図 12 (b)）．最後に，体験者が実物ドミノを倒した机の上に戻り，体験者の目の前で仮想ドミノから実物ドミノへの切り替わりを行いゴール地点に到達する．この一連のドミノ倒しを，体験者は HMD 越しに追いかける．

また，体験時にただ漫然とドミノ倒しを眺めるだけでなく，よりインタラクティブな体験を促すため下記のアトラクション要素を導入した．

【スコアアタック機能の追加】

追加したアトラクション要素は以下の 2 点である．

(1) スコアリング機能
(2) ドミノ進行速度の自動調整機能

(1) のスコアリング機能は，アトラクションにゲーム性を追加することで，ドミノの動きを集中して眺めさせ，よりシームレスな遷移による驚きを感じられるようにした．体験者は視界の中心にドミノが倒れていく様子を上手く収めると，高いスコアを得ることができる．スコアの算出には，倒れ始めている仮想ドミノの重心点の 3 次元座標を用いる．この 3 次元座標をディスプレイ平面の 2 次元座標に変換し，HMD の視界の中心からの距離 d_i $(0 \leqq i \leqq N)$ を計算する．距離の計測は，コース中の仮想ドミノの個数と同じ N 回行われ，その合計値を仮想ドミノの個数で割った値の逆数がスコア $(= N / \Sigma d_i)$ となる．(2) 体験者の誰もが実物・仮想ドミノの遷移を確認できるように，ドミノ進行速度の自動調整機能を実装した．同時に，難易度の自動調整機能にも相当する．スコア算出の際に HMD の視界の中心から仮想ドミノの位置が遠い場合 $(d_i \geqq d_{\max})$，ドミノ倒しを HMD で上手く追いかけられるように仮想ドミノは減速する．一方で，HMD の視界の中心から仮想ドミノの位置が近い場合 $(d_i \leqq d_{\min})$, 難易度を挙げるため，仮想ドミノが加速する．

5 展示結果の分析と考察

展示発表では，DOMINO Toppling を約 200 人が体験した（図 13）．1 人当たりの体験時間は約 3 分であった．展示期間は 4 日間に渡り，初日から 3 日目までは，MR 技術を研究する国際会議参加者が体験し，最終日の 4 日目には，一般市民の来場者にも本アトラクションを体験する機会が設けられた．

5.1 R-V 間遷移に関する意見聴取

実物体と仮想物体の遷移に関して,「実物から仮想への遷移はシームレスであったか」「仮想から実物への遷移はシームレスであったか」という 2 つの設問と，体験を通しての意見を自由に回答させる調査を実施した．2 つの設問は「はい」「どちらかといえばはい」「どちらかといえばいいえ」「いいえ」の 4 段階で回答させた. 意見聴収では, いずれの設問にも, 回答者 150 名の 95%以上から,「はい」もしくは「どちらかといえばはい」との肯定的な意見が得られた．このことから，我々の意図した実物体と仮想物体間の遷移は，ほぼ目標通りに達成できたと言えよう．

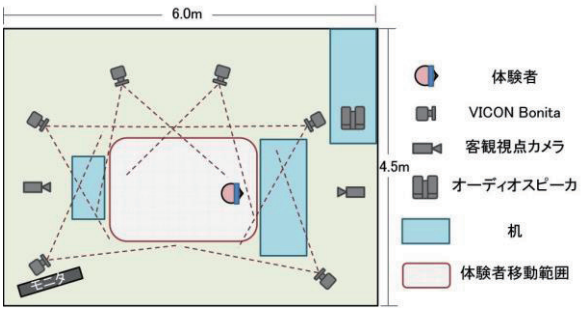


図 10 展示発表での機材配置
Fig. 10 Floor map at the exhibition

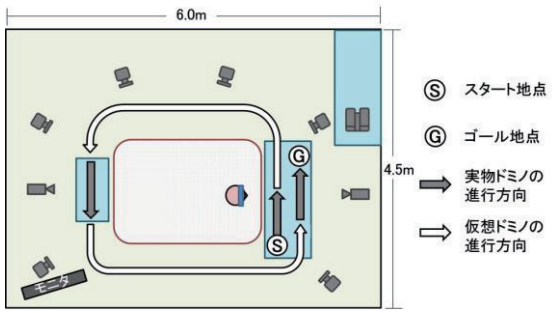


図 11 展示発表でのドミノコース
Fig. 11 Domino course at the exhibition



(a) 空中コース
(a) Air course



(b) 空中から実コースへ
(b) Air to real course

図 12 仮想ならではのドミノコース
Fig. 12 Virtual domino course



(a) 展示スペース
(a) Exhibition space



(b) 体験の様子
(b) User seeing dominoes

図 13 ISMAR2015 での展示の様子
Fig. 13 Exhibition at ISMAR 2015

5.2 体験中の反応からの示唆

展示発表では，ほとんどの体験者が HMD を何度も付けたり外したりしながら，実物ドミノと仮想ドミノの視覚的差分を確認していた．体験者の多くが一見すると「実物と仮想の見分けが付かない」とコメントし，驚いた様子であった．また，何人かの体験者は，目の前のドミノが実物なのか仮想なのか判断するために，ドミノに触れてみて実物かどうかを確認していた．今回簡易なレンダリング手法での実装であったが，R-V/V-R 間のシームレスな遷移を演出する上で，十分な性能を発揮していたものと思われる．

体験中，多くの体験者が空中へと進む仮想ドミノの動きに驚きの声を挙げ，顔を綻ばせる様子が見られた．このことから，仮想ドミノならでは動きの演出は奏功し，DOMINO Toppling は観客を楽しませる MR アトラクションとして機能していたと考えられる．

5.3 実物体と仮想物体の連続性に対する意見

実物ドミノと仮想ドミノの違いの指摘として，以下のようなコメントが得られた．

・注視すると，実物のドミノと仮想のドミノの色，影が若干異なることに気付く
・実物と仮想の音の違いは重要ではない
・実物と仮想の音は違う方が演出として面白い

これらの意見から，視覚的連続性（A-1）に関しては厳しい意見も聞かれたものの，本コンテンツにおいては，必ずしも音の連続性（A-3）を達成することが求められていないということが明らかになった．

本アトラクションでは，物理的な影響を伝播するデバイス（B）として，R-V/V-R 切り替えデバイスを作成した．R-V 切り替えデバイスは小型に作成し，V-R 切り替えデバイスは接地面の机より低い位置に置いた．そして，両デバイスを布で覆い隠すことで，体験者からこのデバイスが見えないようにした．

そのため，多くの体験者から「どのように実物ドミノを倒しているのか教えて欲しい」との要望があった．この要望は事前に予想できたので，物理デバイスの仕組みが見えるようにした展示物を，アクリルボックスを用いて作成しておいた（**図 14**）．これを使って，説明したところ，「単純だが，効果的である」との評価を得た．

5.4 総合評価と感想

ISMAR 2015 には，MASH'D (Media, Arts, Social Sciences, Humanities & Design) での芸術系展示も存在したが，本アトラクションは，主たる Science & Technology Program 中の Demonstrations 部門での技術展示に投稿し，採択された．同部門には 36 件の展示があったが，我々の「DOMINO Toppling」が BEST DEMO AWARD を受賞した．その評価は国際会議参加者の投票によるものである．審査基準は公表されていないが，我々の展示が，安定して動作し，技術的アピール度や体験者満足度が高かったことを，総合的に証明していると考えられる．

また，国際会議参加者だけでなく，土曜日には一般市民にも公開され，「アイデアがクール，面白い」



図 14 R-V/V-R 切り替えデバイスの仕組みを見せるアクリルボックス
Fig. 14 Acrylic box showing R-V/V-R switching device

「印象的なデモだった」「仮想と現実の入れ替わりを初めて体験した」等の感想が得られた．MR 技術には無縁の来場者にも，コンテンツとしての面白さ，楽しさをアピールできたことから，R-V Continuum が MR アトラクションの質を向上させ得るものであることを検証できたと考えられる．

6 まとめ

本論文では，複合現実感（MR）技術を用いたアート＆エンターテインメント作品を制作する上で，同種の実物体と仮想物体間のシームレスな遷移を可能にすることが，表現力，演出力を高め，MR アトラクションの質を向上させるという考えに基づき，上述の遷移を実現する「DOMINO (DO MIxed-reality NOn-stop) Toppling」の設計・開発を行った．

技術的には，実物体と仮想物体のシームレスな遷移は「(A) 実空間と仮想空間の連続性において，(A-1) 幾何学的および光学的整合性の達成，(A-2) 同じ力学特性を有すること，(A-3) 音響的に同じ属性を有すること」と「(B) 物理的な影響を伝播するデバイス」の実現により達成するものとした．そして，これらを達成できるように DOMINO Toppling を設計及び実装した．

DOMINO Toppling の展示発表では，アンケート回答者の 95%以上から肯定的な意見が得られた．このことから，本アトラクションが高いエンターテインメント性を有していること，本研究で掲げる実物体と仮想物体のシームレスな遷移が，MR 表現の魅力を高める働きをしたことを確認できた．

謝辞

DOMINO Toppling の実装の一部を担当した立命館大学情報理工学部学生 横田茉紀, 田口真理の両名に感謝の意を表する．本研究の一部は，科研費・基盤研究（S）「複合現実型情報空間の表現力基盤強化と体系化」と学振・特別研究員奨励費（課題番号 25・9193）「複合現実空間の表現力向上のための 2 つのアプローチ」による．

参考文献

[1] 特集号「複合現実感 1~6」, 日本 VR 学会論文誌 (1999 - 2014)
[2] 特集 拡張現実感 (AR), 情報処理, Vol. 51, No. 4, 2010.
[3] A. Israr, S. Zhao, K. McIntosh, J. Kang, Z. Schwemler, E. Brockmeyer, M. Baskinger, and M. Mahler: “Po2: Augmented haptics for interactive gameplay,” Proc. SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, Article 21, 2015.
[4] C. Tanaka and T. Ohshima: MR Coral Sea, Laval Virtual 2014, ReVolution Demo, 2014.
[5] C. Lindinger, R. Haring, H. Hörtner, D. Kuka, K. Kato: “Mixed reality installation ‘Gulliver’s World’: Interactive content creation in nonlinear exhibition design,” Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment, Vol. 4326, pp. 312 - 323, 2006.
[6] P. Milgram and F. Kishino: “A taxonomy of mixed reality visual display,” *IEICE Trans. Inf. & Sys.*, vol. E77-D, no. 12, pp. 1321 - 1329, 1994.
[7] 大島登志一, 黒木剛, 小林俊広, 山本裕之, 田村秀行: 2001 年 MR 空間の旅－複合現実感技術の映像製作分野への応用, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 219 - 226, 2002.
[8] T. Ohshima, S. Kawaguchi, and Y. Tanaka: “MR coral sea evolved: Mixed reality aquarium with physical MR displays,” Proc. SIGGRAPH Posters, No. 27, 2015.
[9] 大島登志一, 佐藤清秀, 山本裕之, 田村秀行: “RV-Border Guards : 複数人参加型複合現実感ゲーム”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 699 - 705, 1999.
[10] 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 VR 学会論文誌, Vol. 10, No. 1, pp. 119 - 127, 2005.
[11] 石黒祥生, 大槻麻衣, 比嘉恭太, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “Watch the Birdie!－三感融合型複合現実感アトラクション”, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 259 - 268, 2007.
[12] 村井嘉彦, 深川亜美, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “Rhythm of the Rain in 3D －視聴覚 3D-MR 空間の表現力を体験できる複合現実型アトラクション－”, 日本 VR 学会大会論文集, pp. 560 - 563, 2008.
[13] 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,” Proc. SIGGRAPH ASIA, Emerging Technologies, p. 75, 2009.
[14] 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 VR 学会論文誌, Vol. 11, No. 2, pp. 313 - 321, 2006.
[15] 杉本麻樹, 小島稔, 中村享大, 冨田正浩, 新居英明, 稲見昌彦: “複合現実感技術と小型ロボットを用いたゲーム環境”, 情処論, Vol. 48, No. 11, pp. 3490 - 3500, 2007.
[16] S. Follmer, D. Leithinger, A. Olwal, A. Hogge, and H. Ishii: “inFORM Dynamic physical affordances and constraints,” Proc. 26th Symp. on User Interface Software and Technology (UIST 13), pp. 417 - 426, 2013.

[17] J. Leitner, C. Köffel, and M. Haller: “Bridging the gap between real and virtual objects for tabletop games,” *Int. J. Virtual Reality*, Vol. 5, No. 3, pp. 1 - 5, 2006.
[18] J. Leitner, M. Haller, K. Yun, W. Woo, M. Sugimoto, and M. Inami: “IncreTable, A mixed reality tabletop game experience,” Proc. Int. Conf. on Advances in Computer Entertainment Technology (ACE2008), pp. 9 - 16, 2008.

（2016 年 3 月 7 日受付）

［著者紹介］

平田 遼太郎　（学生会員）



2016年3月立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒業．現在，同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中．複合現実感における実物体と仮想物体のシームレスな遷移の研究に従事．

石橋 朋果　（非会員）



2016 年 3 月立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒業．現在，同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中．複合現実感における光学的整合性の研究に従事．

チェ カネイ　（非会員）



2016 年 3 月立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒業．現在，同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中．隠消現実感を前提とするトラッキング手法の研究に従事．

森 尚平　（正会員）



2011 年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒. 2013 年同大学院情報理工学研究科博士前期課程修了. 2016 年同大学院博士後期課程修了．複合現実感及び隠消現実感の研究に従事．同年 4 月より，慶應義塾大学理工学部訪問研究員（学振・特別研究員 PD）．日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会, IEEE, ACM 各会員．博士（工学）．

池田 聖　（正会員）



2001 年広島大学理学部物理学科卒．2003 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了. 2006 年同研究科博士後期課程修了．同年同研究科特任助手，翌 2007 年助教．2011 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教を経て，2015 年より立命館大学情報理工学部講師．複合現実感，コンピュータビジョンに関する研究に従事．日本バーチャルリアリティ学会，情報処理学会，IEEE，ACM 他各会員．博士（工学）．

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，同情報理工学部情報コミュニケーション学科教授．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. 本学会複合現実感研究委員会委員．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．

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メディア情報学科准教授. 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．

田村 秀行　（正会員）



1970 年京都大学工学部電気工学科卒．工業技術院電子技術総合研究所，キヤノン（株）等を経て，2003 年 4 月より立命館大学理工学部教授．同情報理工学部教授を経て，現在，同総合科学技術研究機構教授．工学博士．1997 年より 2001 年まで，MR システム研究所にて「複合現実感研究プロジェクト」を率いた．本学会フェロー，元理事，現在，評議員，複合現実感研究委員会顧問．編著書「Mixed Reality」(Ohmsha & Springer)「コンピュータ画像処理」（オーム社）など．電子情報通信学会フェロー，IEEE，ACM，情報処理学会，映像情報メディア学会等会員．本学会，情報処理学会，ヒューマンインタフェース学会の論文賞，人工知能学会功労賞等を受賞．