

# HaptoBOX: フィジカルなミクストリアリティ体験のための 多感覚型インターフェースデバイスの研究 (2) インタラクション機能の拡張

木川貴一郎<sup>†1</sup> 大島登志一<sup>†2</sup>

**概要:** 本研究では、ビデオシースルー型複合現実感を基盤として、多感覚的にリアリティを増強するインタフェースを研究している。HMD を装着し箱状の本デバイスを手に持つと箱内にオブジェクトが表示され、オブジェクトの動きに応じて振動や反動が映像と同期して提示されることで多感覚的にリアリティを増強することができる。第1報では、アクチュエータを組み込み試作したデバイスを提案した。第2報では、国際会議での展示実験の考察とそれを踏まえた改良について論じる。

## 1. はじめに

本研究では、複合現実感 (Mixed Reality; MR) の教育・学習現場での活用を目的として、現実物体とバーチャルな対象との融合と、視覚を中心に主に触知を重視した、インタラクティブな体験型実験教材の実現を目指している。プロジェクト全体としては、HMD型 (Head-Mounted Display; 頭部装着型表示装置) や投影型など多様な形式のMRディスプレイを対象としている。特に、現実環境の一部としてインタラクティブなディスプレイデバイスを組み込み、現実環境の中でMR空間を共有しようとするインタフェースをフィジカルMRディスプレイ[1]と称しており、本プロジェクトの特長を代表するアプローチとして、フィジカルMRプロジェクトと総称している。

HaptoBOXは、リアルとバーチャルとをシームレスに融合し主観視点で体験することに重きをおき、ビデオシースルー型HMDを主要な視覚デバイスとして、箱型の空間にMR世界を取り込み、両手で把持することによるフィジカルな触知覚と視覚・聴覚を中心に多感覚的に体験できるMRインタフェースの実現を目指す。HaptoBOXシステムでは、現実環境やバーチャル環境からデバイス空間内に対象物を取り込んだり、空間を切り取ったりし、それらに対してインタラクションする機能を提供する。また、複数ユーザや遠隔地間での共有機能も構想する。

第一報では、当該コンセプトの検証用プロトタイプについて報告した。図1にHaptoBOXでの体験の様子を示す。ユーザは、ビデオシースルー型MRHMDを装着し、HaptoBOXを両手で把持する。HaptoBOX内部には、仮想物が提示され、HaptoBOXを自由な方向から観察することで、位置的に整合性のとれた視覚体験をおこなうことができる。また、表示される仮想物の動きの特性に応じて、映像と同期した振動や反動などが手に伝わり、箱型デバイスを手に

持つ触知覚を併せてリアリティの高いMR体験が可能である。また、手の部分は、ステレオ法とクロマキー方式により、仮想物体との前後関係が正しく再現されており、手に持ったケースの中に仮想物が入っている感覚を視覚的に矛盾なく表現できるようになっている。

また、HaptoBOXに対して外部からインタラクションするための仕組みとしてHaptoWANDと呼ぶWANDデバイスを備えている。

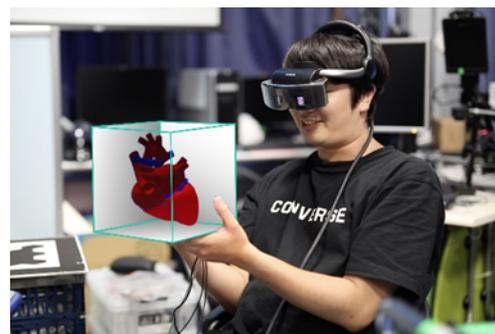


図1 HaptoBOXの体験の様子

本稿では、第一報でのプロトタイプシステムをベースに、国内外での展示実験でのフィードバックも踏まえて、HaptoBOXシステムの機能要件について考察し、改良の状況について報告する。

## 2. MRの多感覚展開とHaptoBOX

### 2.1 MRにおけるリアルとバーチャルとの視覚的融合

MRや拡張現実感 (Augmented Reality; AR) は、仮想空間の情報を現実空間に重畳して提示し、現実物と仮想物の融合体験をよりリアリティ高く体験できる技術として注目を集め、近年実用性も高まってきている。これらの技術 (ARとMRを併せてMRと表記) は、当初より現実物と仮想物を融合するという観点から、現実物の形態を生かした利用

<sup>†1</sup> 立命館大学 映像研究科  
Graduate School of Image Arts, Ritsumeikan University  
<sup>†2</sup> 立命館大学 映像学部  
College of Image Arts and Sciences, Ritsumeikan University

方法が提唱されてきた。たとえば、2次元平面上に描かれたマーカを用いた位置合わせ手法の初期の研究事例として、暦本の2次元マトリクスコード CyberCode[2]においては、飛び出す絵本や恐竜の骨格模型など、教育用を想定したコンテンツが提案されていた。また、Billinghurst らの MagicBook[3]ではMRの利点を活用した研究として、本を媒介してリアルとバーチャルとを行き来するインタラクティブ・コンテンツの枠組みを提案した。現在では、スマートフォンやカメラを備えたパソコンで、紙媒体の上にCGモデルや動画を観察することのできるMR図鑑も販売されている[4][5]。また、書籍やカードではなく、子供が片手で持てる程度の立体的なキューブをマーカとしてスマートフォンやタブレットでCGモデルを重畳して観察できる製品 Merge Cube も市販されている[6]。さらに、より広い現実環境中にバーチャルな対象物を重畳する実用的な活用も進んでいる[7]。

視覚ディスプレイ上でMR体験を行うこれらのオーソドックスなMRのアプローチの一方で、フィジカルなディスプレイデバイス自体がバーチャルな対象物を表現するキューブ型のディスプレイがいくつか提案されている。pCube[8]は、5面の箱型ディスプレイ装置と3軸ジャイロセンサで傾きやユーザの視点に応じた映像を箱型ディスプレイ装置の内部に表示するものである。また、同様にリアルタイム・インテグラルフォトグラフィ・ディスプレイを6面に備えた箱型ディスプレイ内部に仮想物を提示するgCubik[9]などがある。これらの箱型ディスプレイは、多様な形状の仮想物を直接手で取り扱うことによるリアリティの向上の効果を示したものである。

本研究のHaptoBOXでは、このようなフィジカルなインタフェースをビデオシーズル型のMRシステムにおいて箱型マーカによりバーチャルなフィジカルディスプレイとして実装している。

## 2.2 視覚と触覚との融合

視覚体験と多感覚なフィードバックによる多様な感覚モダリティの実現は、元来バーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) の核となる特質である。そうしたVRの系譜であるMRにおいては、それは現実体験とバーチャルな感覚体験との整合性をより精緻に実現する方向で研究がなされている。現実物に対して、それと同じ形状の仮想物を提示することで触覚を提示しMR体験の効果を高める研究が実用化も含めて多くなされている[7][10]。

力触覚提示については、TECHTILE ToolKit[11]など数多くの研究がなされており、実物体の形状だけではなく力触覚提示と視覚との積極的な併用をMR体験に組み込むことも多くなされている[12]。著者らはフィジカルMRディスプレイ[1][13]というアプローチで当該課題に取り組んでおり本研究もその一環である。

## 3. HaptoBOXのアプローチ

### 3.1 基本機能

本研究でのフィジカルMRディスプレイHaptoBOXの特徴は、キューブ形のマーカ内部に仮想物があるかのように表示することと、仮想物の映像の動きと同期して、音響と触覚とを同時に提示することによって、観察体験のリアリティを向上するという点である。すなわち、多種多様な形状の仮想物をその形状に合わせてインタフェースを実現するのではなく、多様な形状を自然に受け入れる形態としてバーチャルなガラスケースを手を持ち、その内部にある仮想物の動態をリアリティ高く体験できることとしたのである。HaptoBOXでの触覚体験は、箱そのものがフィジカルであることによるリアルな触覚体験と併せて、アクチュエータなどによって提示するシミュレートされた力触覚体験との複合として提示される。

### 3.2 デモ展示でのフィードバック

Laval Virtual 2019 の ReVolution #Research セッションにて、多くの一般ユーザを対象に本プロトタイプの展示発表を行った。小さな子供から高齢者までの幅広い年齢層を含む家族層を中心に250名程度の体験者があった(図2)。HMDを装着すると手にした箱の中にCGモデルが入っており、箱を回して自由な視点から観察できるという体験は、多くの観客の興味を惹いていた。オブジェクトの動きに応じて振動を感じると、子供が歓声をあげるなど、特に体験を楽しんでいる様子が見られた。



図2 デモ展示発表の様子

HMDの装着や説明などを含めたデモシナリオ全体に要する時間を鑑みて、今回の展示内容ではユーザが任意に行えるインタラクション操作は特に設けなかったが、本システムに期待されるいくつかの興味深い意見も得られた。現実物体をこの箱に入れるとバーチャルになるのか、現実世界に取り出すことができるのかなど、特にリアルとバーチャルとの往還に関するコメントであった。

すでに計画し取り組んでいる事項も含め、これらの展示でのフィードバックも踏まえて、HaptoBOXシステムの機能要件について下記のように整理して示す。

### 3.3 機能要件の整理

HaptoBOX を用いた応用システムとしての機能要件を3の着眼点からカテゴリ化して、具体的な項目を列挙する。3つの着眼点とは (1)コンテンツの組み込み (2)多感覚提示の拡張と同期 (3)オブジェクトへのインタラクティブ操作の3つである。またこれらの他、実利用の観点からは、軽量化も求められる。

#### (1) コンテンツオーサリング

実用性の観点から、コンテンツのオーサリングを円滑に行えるワークフローを整理する。コンテンツには、人手によるモデリングから実環境のデジタル化までが含まれ、また静的な幾何形状モデルデータだけでなく、その動態を表す時間的な変化の情報も必要である。取り扱えるモデルデータとしても、HaptoBOX の特長を活かすためにボリュームデータも取り扱えることが必要そうである。さらに、現実環境からの情報の取り込みと、視覚に関わる幾何情報だけでなく、音響と力触覚提示のための情報も必要である。後述のインタラクション機能とも関連して、アノテーションの付加、シミュレーションロジックの実装、インタラクションによるイベントのハンドリングなどアプリケーションとして標準的な機能が必要である。また、このようなオーサリング作業が本システムを体験しながら実施できる完結した機能であることが望ましい。コンテンツの制作に関わる主な機能を下記に示す。

- ・オブジェクトデータの組み込み
- ・現実環境からのデータ取り込み
- ・多感覚データの組み込み
- ・アノテーション等付加情報の付与
- ・インタラクションに対するイベントの設定
- ・シミュレーションロジック

#### (2) 多感覚提示

各感覚提示のための機構については、提示する感覚の種類の実装も含めて、それぞれ解決すべき技術課題がある。さらに、それらを同期させる仕組みが必要である。例えばアニメーションのあるCGモデルを組み込んだ時にある程度自動的に他の感覚情報を提示する機能が必要である。主なユーザであるHMD装着者以外の周囲にもある程度の情報を共有する

多感覚提示に関わる主な機能を下記に示す。

- ・力触覚提示
- ・音響提示機能
- ・視覚情報提示機能
- ・その他、温度感覚や嗅覚などの感覚情報提示機能
- ・多感覚同期提示機能

#### (3) インタラクション操作

HaptoBOX におけるインタラクションの基本は、手でデバイスを把持して直接的に移動や回転を行うことであるが、その他にも多様な機能が考えうる。大きくは ①対象を様々

な状態で表示し観察するための機能 ②対象に対して変更をとまう編集機能 ③対象に対して情報を付加する機能 ④インタラクション機構の3つに分けられる。

#### ①観察機能

観察機能として、特に複雑な対象については、その内部構造を分かりやすく示すことが必要となる。例えば、各種医療診断画像からボリュームデータによる3Dモデルを構築し診断に用いることが医療現場では一般的であり、そうした3Dモデルを観察するときには、ボリューム内部を分かりやすく見るための工夫が必要である。

- ・基本閲覧操作（移動、回転、拡大・縮小）
- ・内部構造の観察（透過表現、部分表示、断面表示など）
- ・ポインティング
- ・表示形式の切り替え
- ・コンテンツ切り替え
- ・情報レイヤの切り替えやオーバーレイ

#### ②変更・編集機能

- ・形状編集（変形、切断、分解など）
- ・動態編集（アニメーション）

#### ③付加情報提示機能

コンテンツの一部として事前にアノテーションや付加情報を組み込むケースのほか、体験中に記録や注釈を残すことが考えられる。

- ・アノテーションの付加・提示
- ・スナップショット

#### ④インタラクション機構

HaptoBOX 本体のトラッキング機構は、現在マーカを使用しているが状況に応じて他の代替機構を使うこともあり得る。どのように使うのかは、具体的な操作のデザインに委ねるとして、HaptoBOX に様々なメカニズムを組み込んでおくことが考えられる。また、先に挙げたインタラクション機能のうち3次元的操作を要する基本的な道具立てとして、HaptoBOX ではWANDを備える。HaptoBOX 自体がインサイドアウト形式で手を認識する方法も考えられる。また、マルチユーザでの体験共有機能もここに挙げておく。

- ・位置姿勢トラッキング機構
- ・慣性センサ（加速度センサやジャイロセンサ）
- ・圧力センサ
- ・心拍など生体データセンサ
- ・WAND機能
- ・ハンドトラッキング機能
- ・マルチユーザ共有機能

## 4. システム構成

図1にシステム構成を示す。ユーザインタフェースとしては、頭部に装着するビデオシーズルー型MRHMD（キヤノン MREAL HM-A1）と、手に持つHaptoBOX およびHaptoWAND、空間的な音像定位のための3Dヘッドフォン

から構成される。HaptoBOX および HaptoWAND には触覚提示用のアクチュエータが含まれている。

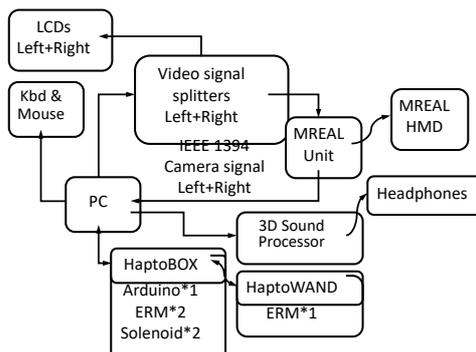


図2 システム構成図

#### 4.1 HaptoBOX

HaptoBOX の外装には、位置合わせのためのマークが配置されている。HaptoBOX を把持する際にマークの視認性を確保するため、各面中央に大きめのマークと周囲に小型のマークをレイアウトしている (図3)。HaptoBOX 内部には、触覚を提示するためのアクチュエータ類とそれらを制御するための Arduino を内蔵している。

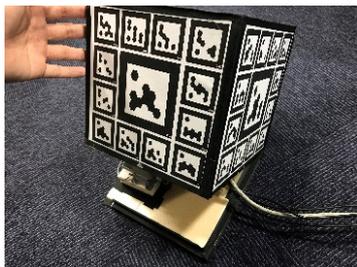


図3 HaptoBox 外装のマーク配置

本プロトタイプでは、反動の再現のための対向型ソレノイドモジュールと、周期の異なる2種類の偏心バイブレーションモータを装備している。

#### 4.2 リニア型反動モジュール

軸に沿った反動を提示するため、図4に示すように二つのソレノイドを対向させて連結し、両方向に可動できるように実装した。内部のプランジャー（可動鉄芯）を基台に固定することで、より慣性の大きい本体部分を可動させることで、より強い反動が得られるようにした。現在は一軸だけであるが、今後の計画として、提示感覚の自由度を高くするため、例えば3組のリニアアクチュエータを3軸で直交させるなどの改良を検討する。

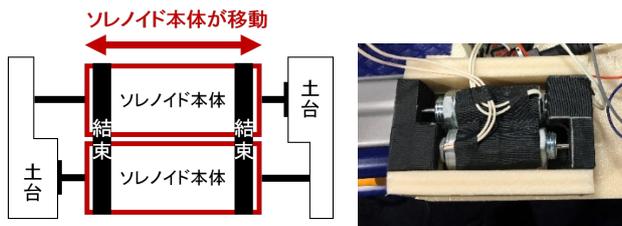


図4 ソレノイドモジュールの配置と実装

#### 4.3 回転型振動モジュール

偏心モータによって振動を発生する触覚デバイスは、携帯電話の通知機能やゲームコントローラのフィードバック機能として一般化している。その中でも、二つの振動周期の異なる偏心モータを用いることで、多様な触覚を再現しようとするデバイスもあり、1997年発売のソニー製家庭用ゲーム機用のコントローラ DualShock はその代表的事例である。HaptoBOX においても、振動周期の異なる2つの偏心モータを組み合わせたモジュールを内蔵している。同じモータとウェイトを用いているが、ウェイトを軸から異なる距離に設置して振動周期を変え、さらに90度方向を変えて設置することで、振動方向も異なるよう配慮している (図5)。今後の改良の方向性として、直交する3軸のそれぞれについて振動周期の異なる複数のモータを設置することでより複雑な振動感覚を提示できる可能性がある。



図5 偏心バイブレーションモータの配置

#### 4.4 聴覚体験の向上

現状での聴覚体験に関して、3次元的な音像定位が可能な立体音響ヘッドフォン (SONY VIP-1000) を採用し、HaptoBOX 内部から音響が聞こえてくるよう構成している。ヘッドフォンにジャイロが内蔵されており、3D音場プロセッサにより、HaptoBOX との方向差に基づいて音像が定位する。使用した装置は、所有していた古い製品を試用したが所期の効果を得ることができている。今後は、音源の空間定位をプログラムで行うことと併せて、聴覚体験の3次元空間性を増強することを検討する。

#### 4.5 HaptoWAND によるインタラクション

先のプロトタイプでは、HaptoWAND によってポインティングを行うことができた。それはHMDユーザが観察している状況を第三者がモニタ上で共有しながら、コミュニケーションするための最低限の機能である。今回、その機能の拡張として (1)触覚フィードバック機能 (2)アノテーション表示機能 (3)断面機能を付加した。

(1) 触覚フィードバックでは、HaptoWAND にバイブレーションモータを内蔵し、バーチャルポインタ先端と表示対象との接触で提示する機能と、表示対象の動きと同期して振動を提示する機能の試行をおこなった。後者の機能は、HaptoBOX 本体では表示対象全体の大域的な動きを提示することを補完し、各部の局所的な動きを提示しようとするものである。

(2) アノテーション機能では、ポインティングを行った箇所に対応する付帯情報を表示する。

(3) 断面表示機能では、HaptoWAND によるバーチャルスラ

イス面とモデルの交差点でモデルが切断して示され、モデル内部が観察できるようになる。

#### 4.6 コンテンツと応用

本研究では、学習用のシステム構築を主な目的としており、具体的な科目や単元などをまだ定めてはいないが、教材として想定されるいくつかの着眼点から、サンプルコンテンツとして「心臓」、「ヘリコプター」、「ジェット機」の3種類を実装している。「心臓」は、生物・生命についての学習に関わる標本として、「ヘリコプター」は、人工的な機械構造の学習に関わる標本として取り上げた。第一報からのコンテンツ追加はないが、Mayaなどのモデリングソフトウェアからのアニメーションを含むモデルのインポートなどのワークフローの整備を進めており、データの更新を行った。以下、改めて各コンテンツの触覚・視覚・聴覚提示の内容を説明する。

##### (1) 「心臓」

医療や生物教育での応用事例を想定し、心臓を表現した。心臓は人体の中でも複雑な動きや構造が特徴的であり、本研究でのサンプルとして適していると考えられる(図6)。前述した様々な機能の拡張を行う対象としても、本コンテンツをベースとする。アニメーション付きのモデルデータからその動きを分析し、音響と触覚に同期させることについて検討を進めている。

- ・視覚：一定の周期で心臓の縮小・拡張を繰り返す。
- ・触覚：ソレノイドモジュールを使用し一定サイクルで拍動の振動感を提示する。
- ・聴覚：一定の周期で心臓の鼓動音が提示される。

##### (2) 「ヘリコプター」

2つの回転翼があり複雑な振動と動きを体験する事例としてヘリコプターを採用した(図7)。ローターが回転するという視覚的にも分かりやすい機構を対象として、触覚と音響とを同期して提示するサンプルとして実装した。想定学習内容の改良案として、操作状態に応じて感覚提示の状態を変化させることを検討する。

- ・視覚：メインローターとテイルローターのブレードが回転する。
- ・触覚：偏心モータで、テイルローターの周期の短い振動とメインローターの周期の長い大きな振動とを提示する。
- ・聴覚：二種類の回転音を聴覚提示する。

##### (3) 「ジェット機」

ジェット機からイメージされるエンジンの振動を偏心モータで再現している(図8)。本コンテンツの特徴としては、見た目の動きには、直接的に振動を感じさせる要素はないのだが、それゆえに、触覚提示によって視覚情報を補足するという体験を示す事例である。また、今後の改良案として、排気をファンによる風と温覚提示で示す多感覚提示の事例として変更を検討する。

- ・触覚：高周期の偏心モータで細かく早い振動を提示する。

- ・視覚：エンジン後方から排気を表示する。
- ・聴覚：ジェットエンジン音を聴覚提示する。

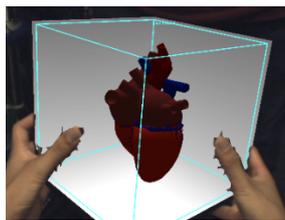


図6 心臓

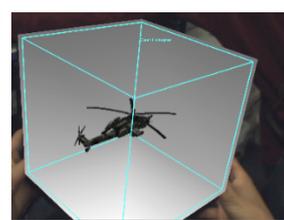


図7 ヘリコプター

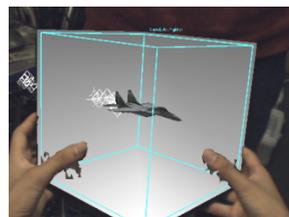


図8 ジェット機

また上記に加えて、ボリュームデータのサンプルコンテンツを実装中である。これらのサンプルコンテンツをベースに装置機構や感覚提示方法などについて引き続き改良を進めていく。またその知見に基づきながら、具体的な対象ユーザ、科目や単元を想定し、教材としての一定の体裁を整える予定である。

## 5. むすび

本研究では、複合現実感の教育・学習現場での活用を目的として、現実物体とバーチャルな対象との融合と、視覚を中心に主に触知を重視した、インタラクティブな体験型実験教材の実現を目指している。本報告においてはコンセプトの整理と、SIGGRAPH Asia 2018やLaval Virtual 2019など国内外でのデモ展示でのフィードバックも元に機能要件の検討を行った。今後は今回の整理に基づいて、主に以下のような事項から着手する。

(1) コンテンツ実装に関わる機能改善については、コンテンツの組み込みが容易になるよう整備をおこなう。また、ボリュームデータのサンプルコンテンツを実装する。

(2) 多感覚提示の機能拡張については、デバイス面での改良を行うとともに、アクチュエータ類の駆動制御、アニメーションモデルと触覚・聴覚の同期について検討する。

(3) インタラクション操作の拡張については、HaptoWANDの機能を基本に断面表示などの内部構造観察機能、モデルに対する編集機能などを実装していく。

(4) サンプルコンテンツ改良として、上記の進捗と併せて、その機能を検証できるようコンテンツの改良を行う。

(5) 実利用を想定したコンテンツの実装として、HaptoBOXの形態の特長を活かすこととして、体積表現が適するような地学での地層や生物学での動物の内部などを教材として実装に取り組む。

また、デバイスの基本的な実装上の改善として、デバイ

スの軽量化やワイヤレス化の検討を進める。こうした総合的な改善に取り組みながら、HaptoBOXの可能性を活用できる応用を開拓していき、適宜評価と検証を行っていく。

**謝辞** 本研究の一部は JSPS 科研費 16K00288 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) Toshikazu Ohshima, Chiharu Tanaka : MR coral sea: mixed reality aquarium with physical MR displays, Proc. of SIGGRAPH ASIA 2014 Emerging Technologies (2014)  
DOI:10.1145/2669047.2669051
- 2) 暦本純一: 2次元マトリックスコードを利用した拡張現実感の構成手法, WISS'96 予稿集, 1996年12月
- 3) Mark Billinghurst, Hirokazu Kato, Ivan Poupyrev: The MagicBook: a transitional AR interface, Computers & Graphics, Vol. 25, Issue 5, pp. 745 - 753, Elsevier Science Ltd., Oct. 2001.
- 4) リチャード・ウォーカー編, 伊藤伸子訳: 人体図鑑-3Dアニメーションで見て学ぼう, 化学同人 (2012)
- 5) 阿部和厚編, 学研の図鑑 LIVE 9 人体, 学研教育出版 (2015)
- 6) Merge Cube, Merge Labs, Inc.  
<https://mergevr.com/> (参照 2019年7月24日)
- 7) MREAL 導入事例, キヤノン IT ソリューションズ株式会社  
<https://www.canon-its.co.jp/solution/mr/case/> (参照 2019-12-25)
- 8) Ian Stavness, Billy Lam: pCubee: A Perspective-Corrected Handheld Cubic Display, Proc. of CHI 2010: Pointing and Selecting, pp. 1381 - 1390 (2010)  
DOI: 10.1145/1753326.1753535.
- 9) Roberto Lopez-Gulliver: gCubik+i Virtual 3D Aquarium: Interfacing a Graspable 3D Display with a Tabletop Display, 情報通信研究機構季報, Vol.56, Nos.1/2, 2010.
- 10) 大島登志一, 山本裕之, 田村秀行: 実体触知覚機能を重視した複合現実感システム—自動車インテリア・デザイン検証への応用—, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 9, No. 1, pp. 79 - 88 (2004)
- 11) 仲谷正史, 笈康明, 南澤孝太, 三原聡一郎, 舘暉: 触感表現の一般普及に向けた方法論とテクニカルワークショップを通じたその実践, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 593 - 603 (2014)
- 12) 安藤広志, Juan Liu, Dong Wook Kim: 多感覚インタラクション技術とシステム応用, 情報通信研究機構季報, Vol. 56 pp. 147 - 155 (2010)
- 13) Toshikazu Ohshima, Tsukasa Sumizono: Tactile microcosm of ALife: interaction with artificial life by aerial mixed reality display, Proc of SIGGRAPH Asia 2018 Posters, Article No. 53 (2018)  
DOI: 10.1145/3283289.3283357