

## 特集 ■ 新しい飛躍の時代を迎えた複合現実感

## Projection-Based Mixed Reality



苗村 健

東京大学

NAEMURA TAKESHI

## 1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality) もしくは拡張現実感 (Augmented Reality) という研究分野の存在は、すでにお茶の間にまで知れ渡りつつある。多くの人々がそのビジョンを共有し、「単に可能である」という段階から、「日常的に当たり前のように使える」という段階へと飛躍すべき時代を迎えたと言える。

複合現実感研究の中でも、特に、日常的生活空間 (現実世界) を情報的に拡張するという立場の研究は、Mark Weiser が提唱した Ubiquitous Computing の概念にも通じている。コンピュータが我々の生活空間に遍在し、区別がつかないほどひっそりと日常生活に織り込まれていくという未来像である。このためのインフラとして、いつでもどこでもネットワークにアクセスできる環境の整備に重点が置かれてきた。すぐそこまで、バーチャル世界の情報が届いているのである。この情報を人々に効果的に提示するために、各種の「整合性」を高いレベルで実現することが、複合現実感技術が担う重要な役割である。

特に、時間的整合性、幾何学的整合性、光学的整合性を同時に高めるためには、カメラで現実世界を撮影し、その撮影位置における整合性に処理を集中させることが得策となる。このため、カメラ付き情報端末の表示画面上での情報重畳や、HMD (Head Mounted Display) を用いたシステムが、この分野を代表する試みとして、数々の成功を収めてきたのだと言える。

本稿では、さらに次のステップとして、電子的なディスプレイという「枠」から脱却することを目指し、ディスプレイ画面の中ではなく、現実世界の中にバーチャル世界の情報が立ち現れるような仕組みについて、いくつかの研究例を紹介する。

## 2. Projection-Based Mixed Reality

バーチャルリアリティ分野において、没入型の映像提

示のために、プロジェクタ技術が早くから重要な役割を演じてきた。CAVE など、大画面の全周立体映像の中に、ステレオメガネをかけて入り込むシステムである。このように、ステレオ映像を用いて立体感を提示するためには、特殊なメガネを使用することが一般的である。スクリーンに囲まれた部屋から飛び出して、日常の生活空間でも同様の体験をもたらすために、HMD などの技術が発展してきた。

本稿では、これらとは異なる方向性として、プロジェクタ映像の投影方法を工夫することで、メガネなどの装着を極力避けることを目指した試みに焦点をあてる。

3D 元年と呼ばれる昨今では、裸眼で鑑賞できる立体表示ディスプレイの研究開発も盛んに進められている。しかし、このようなアプローチは、あくまで電子的ディスプレイの画面が立体的に見えるに過ぎない。物理的なディスプレイの枠から脱却するためには、現実世界への投影 (projection) が本質的な役割を担うことになる。

このような projection 方式の長所は、機器装着に伴うユーザ負担やコストの軽減が挙げられる。また、多人数による同時鑑賞に適しているため、協調作業・ミュージアムにおける展示・デジタルサイネージなどへの応用の親和性が高い。さらに、映像投影面となるスクリーン物体を実際に掴んで操作することも可能であり、視覚に限定されないマルチモーダルな複合現実感を提示することができる。一方で、眼前で光を制御する HMD などに比べれば、必ずしも万能なディスプレイではない。用途に応じて適切な方法を選択していく必要がある。

なお、当該分野の呼称として、“Projection-Based Mixed Reality” と “Projector-Based Mixed Reality” の両者をしばしば見かける。本稿では、既存のプロジェクタを単に使うだけでなく、投影手段全般が研究課題に含まれるという意識から、“Projection-Based Mixed Reality” という表記を用いることにする。

### 3. プロジェクタからの映像の投影手法に関する研究

Projection-Based Mixed Reality における研究では、高速性（時間的整合性）を保ちつつ、如何にして、投影位置（幾何学的整合性）と自然な見え方（光学的整合性）を両立していくかが重要な課題になってくる。

#### 3.1 要素技術

光学迷彩 [1] や HMP (Head Mounted Projector) [2] は、再帰性反射材を用いて視点位置を限定することで、ユーザ負担の問題は残るが、これらの整合性を担保しつつ、ディスプレイの枠にとらわれない投影型の複合現実感の可能性を提示した試みとして位置付けられる。

Table-Top Spatially Augmented Reality[3] や、Dynamic Shader Lamps [4] では、スクリーンとなる実物体の位置や向きに応じて、適応的に映像の投影方法を制御している。このように投影映像の幾何学的な整合性を維持するためには、実物体の位置計測が必要になる。位置計測センサやレンジファインダ、各種マーカを用いる方法以外にも、投影型の複合現実感ならではの手法も提案されている。例えば、プロジェクタ映像へのパターン埋め込みによってこれを実現することができる [5]。また、プロジェクタ映像を人が遮ってしまうと、例え原理的に位置があっても、正しい光を目に届けることができなくなる。この問題に対して、複数のプロジェクタを用いて協調的に投影することで影を除去する試み [6][7] や指向性フィルムを用いてシステム内部から投影する試み [8] が報告されている。

光学的整合性の課題としては、スクリーンとなる物体が必ずしも白色とは限らないことに対する色補正やダイナミックレンジの問題と、プロジェクタとスクリーンの距離が一樣でないことに起因する焦点ボケの問題などがある。色補正やダイナミックレンジの問題は、プロジェクタとカメラの連携によって、解決が試みられている [9][10]。また、焦点ボケへの対応としては、PSF (Point Spread Function) の逆フィルタを適用する試み [11] や、プロジェクタ開口を工夫して被写界深度を拡大する試み [12]、複数のプロジェクタで対処する方法 [13][14] などが提案されている。

以上の先行研究においては、スクリーン物体の形状や表面の光学特性が既知の場合と未知の場合、空間的な配置を計測する様々な方法、プロジェクタの台数などコスト面をどこまで許容できるのかなど、様々な前提条件の異なる立場からの研究が精力的に進められている。

#### 3.2 アプリケーション

HMD を用いるべきか、Projection-Based のアプローチをとるべきかは、アプリケーションのデザインによって

決まってくる。ここでは、具体的な応用例を紹介する。

Free Form Projection Display [15] では、立体視のためのメガネの着用が必要になるが、人体模型の中に内臓などの映像を透かして見ることが可能になっている。これも、ディスプレイの枠を超えた複合現実感提示の実用的な試みとして位置づけられる。

Limpid Desk [16] では、机上の書類を対象を絞り、下層の書類を色補正しながら透かして提示することが可能になっている。Universal Media Book [17] では、物理的な書籍に対する映像投影による拡張が施されている。このような平面で構成される対象を扱う場合には、Projection-Based のアプローチの有意性が顕著になる。

### 4. 映像投影から情報投影へ

ここで、Ubiquitous Computing のもう一つの側面に着目する。Mark Wiser は、invisible という言葉を強調していた。あからさまに目立つ存在であっては、真に日常生活に溶け込んだことにはならないのである。それでいて、あらゆる場面にコンピュータが遍在している姿は、古来の日本で「万物に神が宿る」と信じられてきたという話を連想させる。

#### 4.1 情報を宿すアプローチ

これまでの複合現実感技術は、物体やユーザの位置計測に重きを置き、その計測結果に応じて情報を加工したり、サーバから別のチャンネルで情報を伝送したりする手法が一般的であった。これは「位置計測に基づくコンピューティング」であって、物体そのものに情報を宿すという立場とは異なるものである（図1）。筆者らは、個々の物体に宿された情報を直接受信するだけで、明示的な位置計測を行わずとも、空間的な整合性を保った情報提示が可能になる仕組みの実現を目指している。

「位置計測に基づくコンピューティング」と「情報を宿すアプローチ」では、例えば、以下のような違いが期待される。前者では、位置計測の精度・計算コスト・遅

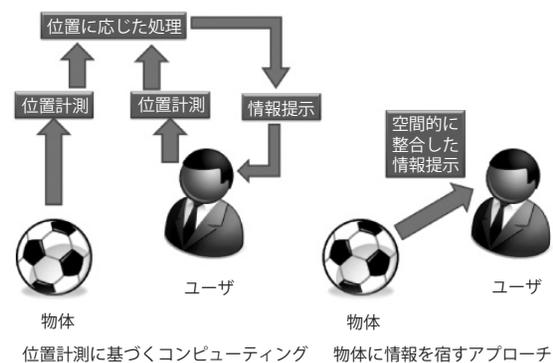


図1 位置計測に基づくコンピューティングと物体に情報を宿すアプローチ

延などが問題になるが、伝送する情報の量は別のチャンネルを使用することで自由に設計できる。特に、不特定多数で同時に使用するためには、人数に応じた規模のシステムをあらかじめ設計しておくが必要になる。一方、後者では、物体に宿された情報を同時に多人数で受信することを可能にすることで、人数に対する自由度は高くなるが、情報量は通信の方式によって制限されることになる。ただし、後者の方式で位置情報を宿すことによって、前者の枠組みを取り入れていくことも可能となる。

以下では、「情報を宿す」ための具体的な例として、聴覚と視覚のそれぞれにおいて、聞きたい人にだけ聞かせ、見たい人にだけ見せる仕組みを紹介する。

#### 4.2 超音波による現実世界の拡張 [18]

まず、超音波によって現実世界を情報で満たす方法について述べる。これはプロジェクタを用いる研究ではなく、本稿の主旨からは外れるが、情報を宿すアプローチの例として簡単に紹介する。

博物館における音声ガイドのように、聞きたい人にだけスポット的に音を伝える技術がある。一般に、多くのシステムでは、音が耳の中（もしくは頭の中）から聞こえてくるように知覚される。頭の中でなく、3次元空間中に音を定位させる方法としては、HRTF (Head Related Transfer Function) を用いた手法が開発されている。人と音源の位置関係を計測し、それに応じて音波の各周波数成分がどのように空気中を伝搬するのかを計算し尽くして、両耳に提示する手法である。これは典型的な「位置計測に基づくコンピューティング」であり、多人数で同時に利用するためには、ユーザ全員の位置計測と位置に応じた計算処理が必要になる。

以上の状況を踏まえ、下記の三つの条件を満たす新たな手法として、u-soul (Ubiquitous/Ultrasonic SOund Localization) を提案した [18]。

- ・ヘッドホンをした人だけに
- ・人数に依らずに
- ・3次元空間中に定位した音を聞かせる

図2を用いて説明する。各人形が発するメッセージ(可聴音)を超音波領域に変調し、人形内部の超音波スピー



図2 人形から聞こえてくる音像

カーで出力する。そして、左右に超音波マイクを有するヘッドホンを装着したユーザに対して、集音された超音波を可聴音に復調して提示する。超音波の空気中での伝播を経て、左右の耳に適切な時間差と音圧差が現れる。この時間差と音圧差を保ったまま可聴音に変調することで、人はどの方向から音が聞こえてきたのかを知覚することができる。超音波スピーカーの位置(図2では二つの人形)に宿っている情報は、超音波マイクを装着したユーザだけがアクセス可能であり、コンピュータによる位置計測などを行わずとも、ユーザの耳に届く段階でその位置をユーザ自身が知覚することができる。超音波という形態で現実世界を情報で満たしておくアプローチであるため、不特定多数のユーザが同時に利用することが可能になっている。本システムは、超音波スピーカーを仕込んだ実物体からしか音が聞こえてこないという制約が許容される応用において、多人数向けの複合現実環境を容易に実現する方式として位置づけられる。

#### 4.3 可視光通信プロジェクタ [19]

続いて、本稿の主旨であるプロジェクタを用いて情報を宿す試みについて紹介する。

ディスプレイを人間のための映像提示だけでなく、機械に対する情報提示に応用する Display-Based Computing の概念が提案されている [20]。Augmented Coliseum [21] では、小型ロボットをプロジェクタ映像で制御することで、映像とロボットが融合した複合現実環境を実現している。このようなアプローチのメリットは、プロジェクタで照らし出した生活空間が、そのまま情報的に拡張される点にある。

Display-Based Computing は、複合現実感研究の基盤技術として広く利用されている「マーカー」を動的に映像として提示するものである。このマーカーを不可視にする試みとしては、赤外光プロジェクタを利用する手法が提案されている [22]。ただし、見えない赤外光情報を生活空間の中で幾何学的に整合させる必要がある。

以上のような背景を踏まえ、筆者らは、不可視かつ動的な情報を、プロジェクタ映像そのものの中に宿す手法を提案してきた [19]。これは、マーカーという形式に限定せずに、より一般的な通信をプロジェクタ映像の画素単位で行う試みである。別の言い方をすれば、例えば XGA 解像度のプロジェクタを用いる場合、1024×768 個の画素がそれぞれ独立した通信チャンネルになることを意味している。プロジェクタで投影された可視の映像と空間的に整合した情報発信を行うことができる。

このような、人に見える光の中に、見えない形で情報を宿す技術は、可視光通信の研究分野での蓄積がある [23]。LED 照明や信号機を高速点滅させることで、時

間軸方向に情報を宿す技術である。しかし、LEDで照らされたエリアに様に情報を提供する場合はほとんど、空間中の位置に応じて細かく情報を分けて伝えることはあまり検討されていない。筆者らの試みは、プロジェクタ映像の画素毎に可視光通信を行う手法であり、PVLCプロジェクタ (Pixel-level Visual Light Communication Projector) と名付けた。

具体的には、DMD (Digital Micro-mirror Device) を用いた映像プロジェクタを改造して実装した。DMDは、微細な鏡を高度に集積したチップであり、鏡を高速制御することによって、プロジェクタ映像の諧調的な表現を画素単位で実現している。プロジェクタ映像の各画素は、それぞれ人に提示すべき輝度値を有しており、それは一定時間内において鏡がONの状態とOFFの状態の時間的な比率によって制御される。人に見える映像は、この時間的な比率だけで決まる。すなわち、この比率を保ったまま、点滅する順番を入れ替えても、人には知覚されないように制御することができる。図3にシステム構成図を示す。プロジェクションされた映像の上に何らかの受光端末をかざしたり、映像を高速カメラで撮影したりすることで、映像の中に宿っている情報(高速点滅パターン)にアクセスすることができる。

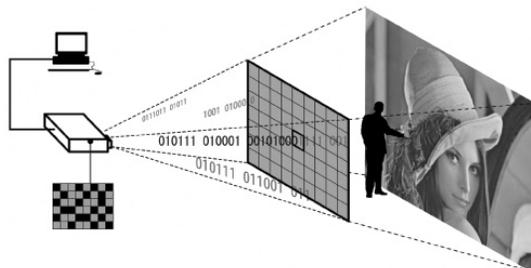


図3 可視光通信プロジェクタの基本原則

図4に実装例を示す。日本地図の映像の上に端末をかざすと、そこに点滅パターンとして宿っている天気情報(ピクトグラム)が表示される。この例に留まらず、

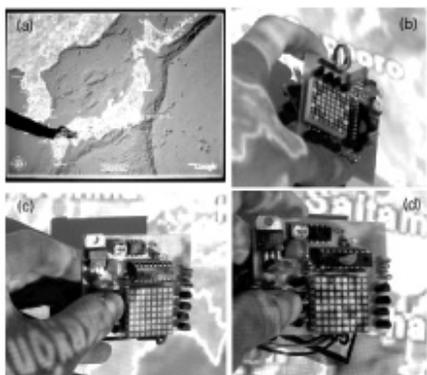


図4 地図に天気情報を宿す

原理的に、映像の内容と直接リンクした情報を提示することができる。

図5は、PVLCプロジェクタを水平スクリーンの下に設置し、背面投影によるテーブル型ディスプレイを構築した例である。テーブル面の各位置から個別の情報を放出 (emit) しているという意味から、EmiTableと名付けた[24]。EmiTableでは、水平なテーブル面に複数の受光端末を配置することができる。全画面に対して常に情報が届いており、受光端末の位置や数に応じて処理を変更する必要はない。この技術は、テーブル上に100個近い数のブロックを配置してその発色を制御する体積型立体ディスプレイ Bloxels (図6) に応用された[25]。



図5 EmiTable

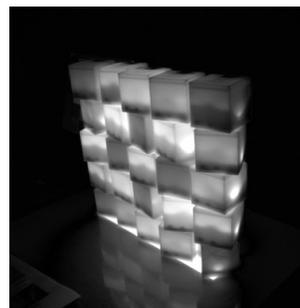


図6 Bloxels

プロジェクタを用いる利点として、スクリーンに到達する前の光路においても、高速点滅パターンとしての情報にアクセスできることが挙げられる。図7は、空間中で受光端末を振ることで残像として空中に映像が浮かび上がる SteganoScan [26] への応用例である。図8は、こ



図7 SteganoScan



図 8 SteganoScan Orbs

れを無数の球体が転がるお盆の中で、位置に応じた発色を制御した SteganoScan Orbs [27] への応用例である。

## 5. おわりに

ディスプレイの枠から脱却し、現実世界にバーチャル世界の情報が立ち現れるような複合現実感の実現を目指した Projection-Based Mixed Reality に関する研究をいくつか紹介した。現実世界とバーチャル世界の混ぜ合わせ方の一つの選択肢として、HMD などとは異なる新たな複合現実感を今後も提示していくものと期待される。

## 参考文献

- [1] 川上, 稲見, 柳田, 前田, 館: 現実感融合の研究 (第 2 報) - Reality Fusion における光学迷彩技術の提案と実装 -, VRSJ 大会論文集, pp. 285-286 (1998)
- [2] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda and S. Tachi: Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector, Proc. IEEE Virtual Reality 2000, pp. 233-240 (2000)
- [3] R. Raskar, G. Welch, W. C. Chen: Table-Top Spatially-Augmented Reality: Bringing Physical Models to Life with Projected Imagery, IWAR'99, pp. 64-71 (1999)
- [4] D. Bandyopadhyay, R. Raskar and H. Fuchs: Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects, ISAR'01, pp. 207-216 (2001)
- [5] 永井, 向川, 大田: プロジェクタ型複合現実感のためのスクリーン物体の追跡, 信学技報, Vol. 104, No. 391, MVE2004-37, pp.1-6 (2004)
- [6] R. Sukthankar, T. Cham, G. Sunthakar.: Dynamic shadow elimination for multiprojector displays, CVPR'01, vol.II, pp.151-157 (2001)
- [7] C. Jaynes, S. Webb, R. M. Steele: Camera-Based Detection and Removal of Shadows from Interactive Multiprojector Displays, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol.10, No.3, pp.290-301 (2004)
- [8] 寛, 飯田, 苗村, 松下: Tablescape Plus: インタラクティブな卓上映像シアター, VR 学論, Vol. 11, No. 3, pp. 377-386 (2006)
- [9] S. Nayar, H. Peri, M. Grossberg, and P. Belhumeur: A projection system with radiometric compensation for screen imperfections, PROCAMS'03 (2003)
- [10] D. Wang, I. Sato, T. Okabe and Y. Sato: Radiometric Compensation in a Projector-Camera System Based on the Properties of Human Vision System, PROCAMS'05 (2005)
- [11] 小山田, 斎藤: プロジェクタスクリーン上に生じる焦点ボケ解消のための投影画像の事前補正法, VR 学論, Vol. 12, No. 4 pp. 479-486 (2007)
- [12] M. Grosse and O. Bimber: Coded Aperture Projection, EDT-IPT, pp. 13:1-13:4 (2008)
- [13] O. Bimber and A. Emmerling: Multifocal Projection: A Multiprojector Technique for Increasing Focal Depth, IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol. 12, No. 4, pp. 658-667 (2006)
- [14] 長瀬, 岩井, 佐藤: 複数投影における鮮明な投影像表示のためのモデルベース多重焦点制御, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp. 1294-1306 (2007)
- [15] D. Kondo and R. Kijima: Proposal of a Free Form Projection Display Using the Principle of Duality Rendering, VSMM'02, pp. 346-352 (2002)
- [16] 岩井, 佐藤: Limpid Desk: 投影型複合現実感による机上書類の透過化, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3, pp. 1294-1306 (2007)
- [17] S. Gupta and C. Jaynes: The Universal media book: tracking and augmenting moving surface with projected information, ISMAR'06, pp. 177-180 (2006)
- [18] 吉野, 苗村: u-soul: 超音波を用いた空間的な音像提示システム, VR 学論, Vol. 13, No. 2, pp. 239-246 (2008)
- [19] 北村, 苗村: DMD を用いた空間分割可視光通信: メタメディア情報を埋め込んだ映像投影, VR 学論, Vol. 12, No. 3, pp. 381-388 (2007)
- [20] 稲見, 杉本, 新居: Display-Based Computing の研究第一報: 画像提示装置を主体とした実世界指向情報システム, VRSJ 大会論文集, pp. 441-442 (2005)
- [21] M. Kojima, M. Sugimoto, A. Nakamura, M. Tomita, H. Nii, M. Inami: Augmented coliseum: an augmented game environment with small vehicles, TableTop 2006, pp. 3-8 (2006)
- [22] 白井, 松下, 大黒: 秘映プロジェクト: 不可視情報による実環境の拡張, WISS2003, pp. 115-122 (2003)
- [23] Y. Tanaka, S. Haruyama and M. Nakagawa: Wireless optical transmission with the white-colored LED for the wireless home links, PIMRC 2000, pp. 1325-1329 (2000)
- [24] S. Kimura, M. Kitamura and T. Naemura: EmiTable: A Tabletop Surface Pervaded with Imperceptible Metadata, Tabletop 2007, pp. 189-192 (2007)
- [25] J. Lee, Y. Kakehi, and T. Naemura: Bloxels: Glowing Blocks as Volumetric Pixels, ACM SIGGRAPH 2009 Emerging Technologies, ET 331 (2009)
- [26] 岸, 寛, 苗村: 光で制御する残像ディスプレイ SteganoScan の提案, エンタテインメントコンピューティング 2009, pp. 43-46 (2009)
- [27] 岸, 李, 寛, 苗村: PVLC プロジェクタ - Bloxels & SteganoScan Orbs-, 第 13 回文化庁メディア芸術祭協賛展 先端技術ショーケース '10 (2010.2.3 - 2.14)

## 【略歴】

苗村 健 (NAEMURA Takeshi)  
 東京大学大学院 情報理工学系研究科 准教授  
 1992 年東京大学工学部卒業, 1997 年同博士課程修了。博士 (工学)。同大助手, 講師を経て, 2000 年米国スタンフォード大学客員助教授 (日本学術振興会海外特別研究員)。2002 年東京大学大学院情報学環助教授。2007 年より現職。メディア+コンテンツ, 複合現実感, 空間共有通信の研究に従事。文部科学大臣表彰若手科学者賞 (2008), 日本バーチャルリアリティ学会論文賞 (2008, 2007, 2006) など受賞。日本バーチャルリアリティ学会理事, アート&エンタテインメント研究委員会委員長 (2006 年~), 複合現実感研究委員会幹事 (2004 年~2007 年)。