

8 応用5： プロジェクション型AR

岩井大輔

大阪大学

プロジェクション型 AR

プロジェクション型 AR は、コンピュータ上で生成・加工した仮想像をビデオプロジェクタより投影し、実空間中の物体と光学的に重畳させる AR の一手法である。図-1 にその概念図を示す。ここでは、実物体の濃淡情報を計算して仮想像を生成し投影重畳している。投影するパターンを変更すれば、テキスト・標識などのアノテーション情報を提示することや、投影対象となる実物体の色の見えや質感等の表面属性をさまざまに変化させることが可能である。実空間中の対象表面上に直接情報を提示するので、実物体の存在感を損なうことなしに AR 環境を構築できる。

ほんの数年前までは、プロジェクタは大型の環境設置が前提とされてきたが、最近では小型化が進み、ハンドヘルドおよびウェアラブルのプロジェクション型 AR に関する研究が広く行われるようになってきている。ビデオシースルー型・光学シースルー型などの他方式と比較して、この方式では複数人が同時に同じ AR 感覚を享受できる、ユーザが HMD のような特別な装置を身体につける必要がない、といった利点がある。

プロジェクション型 AR においても、他のシースルー型と同様、幾何学的整合性・光学的整合性・時間的整合性を保つことが必須である。しかしながら、シースルー型が対象からの「反射光」を変調させているのに対して、プロジェクション型は対象への「入射光」を変調させるという違いにより、プロジェクション型 AR には固有の技術的問題が多数存在する。たとえば、対象面が平面でない場合は投影像が幾何学的に歪む。また、対象面の模様によって、投影像の見えが変化してしまうなど、シースルー型では考慮する必要のなかった種々の問題に対処する必要がある。

以降ではまず、これらの問題に対する基盤技術について簡単に述べ、その後、プロジェクション型 AR の応用例を紹介する。興味を持たれた読者には、当該研究分野を俯瞰するのに適した参考図書として、Bimber と Raskar が著した書籍「Spatial Augmented Reality」を推薦

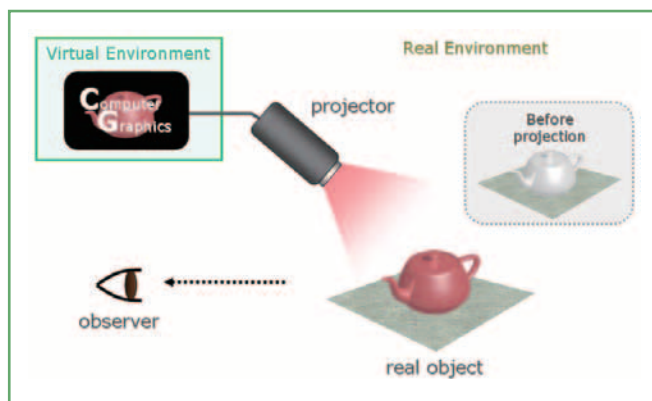


図-1 プロジェクション型 AR 概念図

する (Web よりフリーでダウンロード可能である)^{☆1, 1)}。

基盤技術

ここでは、プロジェクタからの投影画像を幾何学的・光学的整合性を保ちつつ表示するための基盤技術について簡単に解説する。

--- 幾何学的補正 ---

投影画像の幾何学的な歪みの大きさは、投影面の非平面性と投影角に大きく依存する。投影面が平面の場合は単純なホモグラフィ変換が適用されるが、非平面な投影面に対しては、以下に示す 2 種の幾何学的補正手法が、目的に応じて適用されるケースが多い。

●プロジェクタ・カメラ間画素対応マップ

ユーザの視点にカメラを設置し、カメラの撮影画像がユーザの観察しているシーンであるとして、プロジェクタとカメラの実対象上での画素対応を求める。画素対応が求めれば、カメラ画像のある 1 点に対応する実対象表面に白色を投影表示したい場合に、プロジェクタのどの画素から白色を投影すればよいかが分かる。この結果、

☆1 Spatial Augmented Reality, <http://www.uni-weimar.de/medien/ar/SpatialAR/>

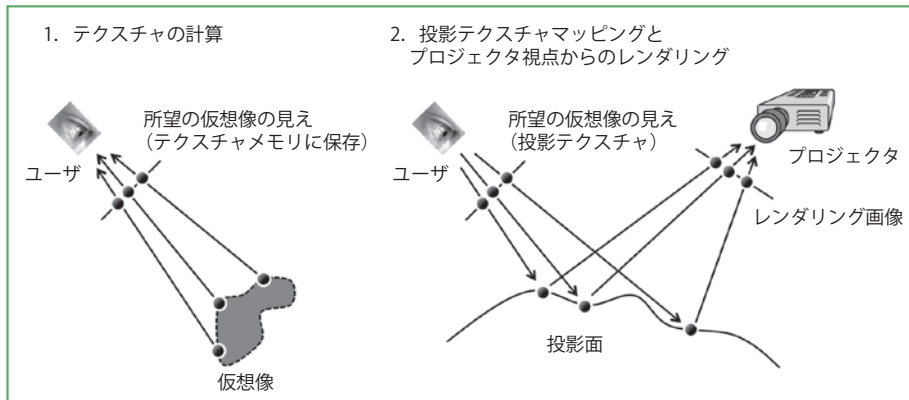


図-2 2-パスレンダリング法

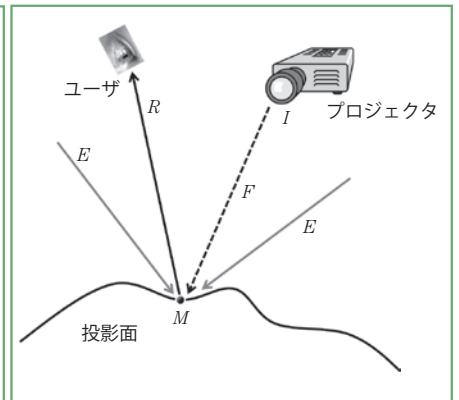


図-3 光学的補正技術で想定する環境

カメラ画像上で設定した任意の仮想像を歪みなく投影表示することができる。画素対応を求めるためには、グレイコード等のパターン光投影法を利用する。この手法では、ユーザや対象が移動するたびにパターン光を投影して画素対応を取得しなければならない（再校正が必要）ため、動的な環境に適用することは難しい。

● 2-パスレンダリング法

対象の形状およびプロジェクタとユーザの位置姿勢関係が既知であれば、画素対応を獲得する必要なしに、幾何学的な歪みのない所望の仮想像を投影表示できる。この手法は以下に示す2段階の事前処理によって投影像を生成する（図-2）。

この手法では、あらかじめプロジェクタ・視点・対象物体を仮想空間上に配置する。そして、1-パス目で、視点から観測したい仮想像を計算しテクスチャメモリに保存する。2-パス目では、仮想空間にて、このテクスチャを先ほどの視点位置から投影スクリーンとなる実対象の3次元形状モデル上に投影テクスチャマッピングし、これを実世界のプロジェクタ位置にあたる場所から観察した光学情報（レンダリング画像）を取得する。この事前処理後、実世界では、この光学情報を重畳画像としてプロジェクタより実物体表面上に投影する。これにより、ユーザは所望の歪みのない仮想像を観察することができる。この手法では、対象やユーザ視点の位置姿勢がトラッキングされていれば、再校正の必要なしに投影像を更新することが可能である。

--- 光学的補正 ---

対象表面が白色でない場合は、入射した投影光の色が変調され、所望の色の見えを表示することが困難となる。そこで、プロジェクタとカメラのフィードバック系を用いた光学的補正技術が複数提案されている。ここでは、その中でも最も単純なモデルを採用している Bimber らの提案手法を紹介する²⁾。

対象上のある1点について、環境光、プロジェクタからの入射光、対象の反射率をそれぞれ E, I, M とすると、反射光 R は、以下のように表される（図-3）。

$$R = (IF + E)M \quad (1)$$

ここで F は、プロジェクタから対象面までの距離と入射角によって決まる入射光の減衰を表すフォームファクタである。所望の色の見えを R に代入すると、それを再現するために投影色 I は以下の式により計算できる。

$$I = (R - EM) / FM \quad (2)$$

未知パラメータである EM は、プロジェクタより黒を投影（つまり、 $I=0$ ）した際の反射光として観測し、 FM はプロジェクタより白色を投影（つまり、 $I=1$ ）した際の反射光から算出する。

このほかにも、投影光の相互反射、焦点ボケ、影、鏡面反射といった諸問題により、任意の色の見えを再現することが困難となる。これらを補償する技術については誌面の都合上割愛する。興味を持たれた読者には、筆者が Bimber らと執筆したサーベイ論文²⁾を参照することをお薦めする。

応用

プロジェクション型 AR では、大きく分けて、投影対象の質感・色・形・透明度をそれぞれ操作することができる。そこで、ここではこれらの特徴を活かした応用例について紹介する。また、視覚を増強するような応用、ハンドヘルドおよびウェアラブルプロジェクションに関する応用についても、代表的な例を挙げて紹介する。

--- 質感を操作する ---

白色の実物体（模型）にテクスチャを投影重畳し、動的にその質感や模様を変更することで、3次元CGの忠実な再現が可能となる。Shader Lamps では、図-4(a)に

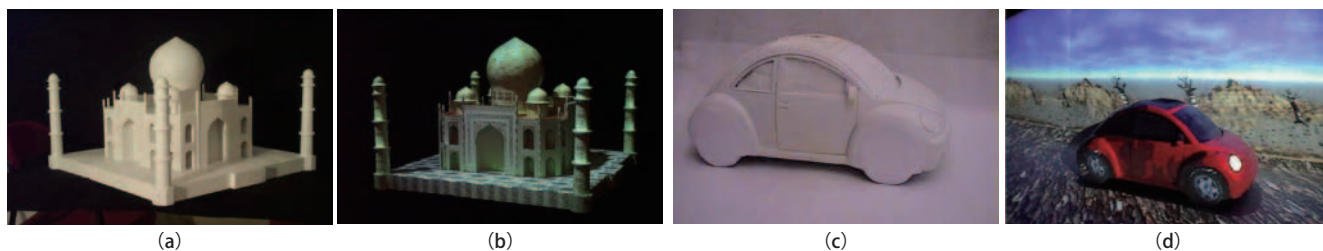


図-4 Shader Lamps : (a) 白色建築模型, (b) ある光源下での見えをテクスチャ投影, (c) 白色自動車模型, (d) 走行中の見えをテクスチャ投影 (Image courtesy of Ramesh Raskar, MIT)



図-5 Dynamic Shader Lamps (Image courtesy of Ramesh Raskar, MIT)

示すような白色の建築模型にある光源下での見えをシミュレーションし、その結果を投影重畳表示している¹⁾。太陽の移動により変化する建築物の見えが模型上で再現されるなど、リアリティの高い表現が可能となっている(図-4(b))。さらに、図-4(c)に示すように、自動車の走行中の見えを立体的に再現することも可能となる¹⁾。この例では、車に落ちる木漏れ日や、背景に投影されている風景の画像が車前方から後方へ流れる様子や、タイヤホイールが回転する様子が投影重畳されることで、あたかも車の模型が走っているかのような感覚を与えることが可能となっている(図-4(d))。

実物体表面に仮想的なドローイングをする応用も提案されている。図-5に示す Dynamic Shader Lamps では、実空間中の3次元位置がトラッキングされているペン型デバイスを利用して、同様に3次元位置姿勢がトラッキングされている白色模型に仮想的にドローイングを行うことができる¹⁾。具体的には、模型上のペン型デバイスが触れた位置に指定した色の線が投影描画される。

ここで述べた、白色模型にテクスチャを投影重畳し、対象の質感を変更する応用技術は、見ている人の目を強く惹きつける。実装が比較的容易でコストも低く抑えることができるため、すでに企業展示やメディアアートでの採用例も多く、今後も広く普及が見込まれる。

--- 色を操作する ---

実対象の表面が白色ではなく、テクスチャや模様を有



図-6 カーテンの模様および凹凸のキャンセリング: (左) 投影対象カーテン, (右上) オリジナル映像を直接投影した結果, (右下) 補正処理による投影結果 (Image courtesy of Oliver Bimber, Johannes Kepler University Linz)

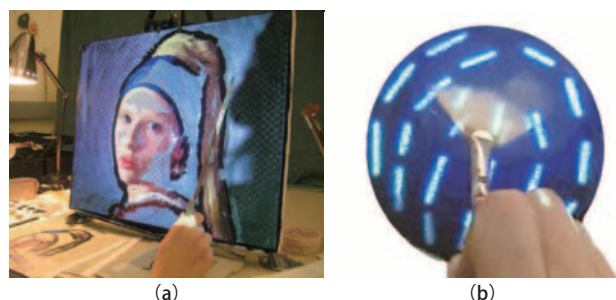


図-7 投影光による描画支援: (a) 描画すべきでない領域にチェッカーパターン投影, (b) 投影光による筆運びのガイド (Image courtesy of James M. Rehg, Georgia Institute of Technology)

している場合、光学的補正技術を利用してそれらをキャンセルすることができる。Bimberらは、家庭でのホームシアターの構築を簡易にするために、投影用スクリーンを設置せずとも、模様のついた壁紙やカーテンの上で、平面白色スクリーンに投影したかのような映像の表示を可能とする技術を提案している(図-6)¹⁾。また、FlaggとRehgは、実際に絵具と絵筆を利用して絵画を制作する際に、絵具を塗る領域や筆運びを投影光により指示する描画支援システムを提案している(図-7)³⁾。このシステムでは、描画すべきでない領域をチェッカーパターンに変更することで、逆に絵具を塗るべき領域をユーザに認識させている。

博物館や美術館の文化財等の展示品の表面上に、関連した仮想像を投影重畳することで、観覧者の文化財に対する理解を深めることを目指した応用も検討されてきている。筆者の所属する研究室では、このような応用を



図-8 光学的補正技術による劣化絵画の仮想修復：(a)色の劣化した絵画，(b)目標となる劣化前の見え，(c)投影画像，(d)投影結果(画像提供：大阪大学 佐藤宏介研究室)

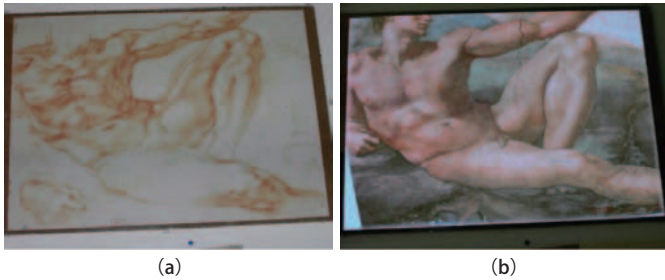


図-9 光学的補正技術によるスケッチ画への情報提示：(a)オリジナルのスケッチ画，(b)投影光による彩色結果 (Image courtesy of Oliver Bimber, Johannes Kepler University Linz)

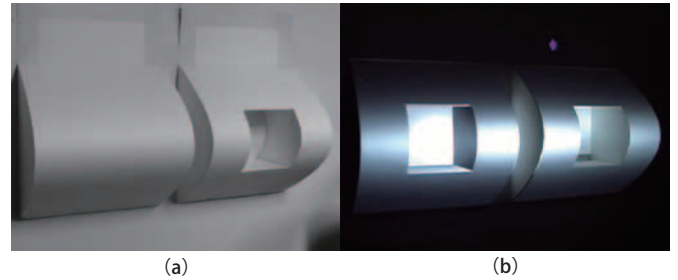


図-10 陰影情報投影による視覚的形状変形：(a)投影対象，(b)投影結果(画像提供：大阪大学 佐藤宏介研究室)

「複合現実博物館」と呼び、2002 年より、経年劣化により色あせた絵画をプロジェクション投影テクスチャにより実空間内で仮想的に色修復する研究を行っている(図-8)。近年ではこのコンセプトを立体の文化財に拡張し、マルチプロジェクションシステムによってその仮想的色修復を実現する研究も行われている⁴⁾。また、Bimber らは絵画の上に関連した情報を重畳表示し、観覧者にその絵画に対する理解を深めさせるような研究を行っている(図-9)¹⁾。具体的な一例としては、スケッチ画の上に、絵具が塗られた状態を重畳表示することが実現されている。

--- 形を操作する ---

上述の2-パスレンダリング法を用いることで、運動視差を利用して実対象の形状を視覚的に変更することが可能となる。筆者の所属する研究室では、プロダクトデザインの過程で作成されるクレイモデルを用いて行われるデザイン評価を支援するシステムを提案している。このシステムでは、クレイモデル上に陰影情報を投影して形状の視覚的変更を行い、デザイナーの形状変形の要求を即座に反映させることが可能となっている(図-10)。この応用では、運動視差を利用して形状の視覚的変形効果を得ているが、両眼視差は考慮されていない。このため、両目で観察する場合は、時分割方式の立体プロジェクタを用い、ユーザが液晶シャッターグラスを装着する必要がある。



図-11 光学迷彩技術：ユーザが把持している再帰性反射素材の貼付された直方体が透明化 (画像提供：慶應義塾大学 舘研究室・稲見研究室)



図-12 自由曲面投影ディスプレイを用いたバーチャル解剖模型 (画像提供：岐阜大学 木島研究室)

--- 透明度を操作する ---

プロジェクション型 AR の利点の1つとして、対象の存在感を損なわないという点を先に挙げた。しかしながら、光学系を工夫したり、幾何学的・光学的補正技術を利用することで、逆に対象の透明度を操作して存在感を消してしまうシステムも提案されてきている。

その先駆的研究である光学迷彩技術は、再帰性反射素材を利用することで、良好な透過効果を複雑な計算処理なしに実現した(図-11)⁵⁾。2-パスレンダリング法を用いることで、白色の人体のマネキン上で、その骨格等の内部構造を透けてみせる医療応用に関する研究も行われている(図-12)⁶⁾。筆者の所属する研究室では、投影光の光学的補正技術を適用して、再帰性反射素材や白色の対象以外でも実物体を透明化させることを実現した。応用例として、机の上に置かれた物理書類を透明化するこ



図-13 光学的補正技術を用いた物理書類透明化：(a) 書類の上に触れると、(b) 掌が触れた領域が透明化する(画像提供：大阪大学 佐藤宏介研究室)

とで、書類探索効率を向上させるシステムを構築した(図-13)。

--- 視覚増強 ---

実対象表面で生じている、人間の視覚では知覚できない物理現象を外部センサにより取得し、それを直接対象面上に投影重畳することで可視化する、「視覚増強」システムの構築も可能となる。VeinViewer^{☆2}は、プロジェクション型ARの応用例の中でも商業的に成功している好例である(図-14)。VeinViewerは、病院で患者の血管を投影光により皮膚上に視覚的に浮かび上がらせることで、医者や看護師が注射針を刺す位置を容易に見つけられるよう支援するシステムである。具体的には、血管の様子が鮮明に確認できる近赤外線カメラで撮影された画像を、プロジェクタよりそのまま同じ位置に投影する。このように、プロジェクション型ARは対象表面で生じている不可視な物理現象を可視化するのに有効であり、今後も人の視覚を増強させるような応用が広まっていくと考えられる。

--- ハンドヘルド・ウェアラブルプロジェクション ---

携帯電話サイズの小型なプロジェクタが市販されるようになり、SixthSense(「展望3：ARのインタフェース」を参照)などの応用システムが近年多数提案されてきている。プロジェクション型ARの研究分野では2000年代前半からこのような時代の到来を想定し、モバイルプロジェクタの応用に関する研究が行われてきた。その代表的研究例として、図-15に示すiLampsを紹介する¹⁾。このシステムでは、ユーザが把持しているプロジェクタを実空間中の対象に向けて、その対象に関する詳細情報が対象上に投影表示される。対象に貼り付けられた2次元タグをプロジェクタに取り付けられたカメラで撮影し、対象を認識している。最近では、ハンドヘルドプロジェクタを把持した複数人の協調作業も提案されている⁷⁾。この論文では、2台のハンドヘルドプロジェクタ



図-14 VeinViewer：血管を視覚的に浮かび上がらせる(Image courtesy of Luminetx Technologies Corporation)



図-15 ハンドヘルドプロジェクションシステム iLamps (Image courtesy of Ramesh Raskar, MIT)

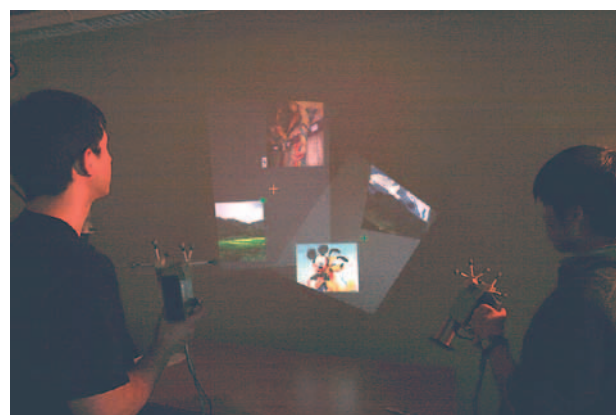


図-16 近接ユーザ同士のハンドヘルドプロジェクタを用いた協調インタラクション (Image courtesy of Xiang Cao, Microsoft Research)

を用いた協調インタラクション技法について網羅的に調査・実装されている(図-16)。たとえば、2台のハンドヘルドプロジェクタより投影された画面同士の重畳領域においてデータの授受を行う技法などが提案されている。このように、今後は、複数人のユーザそれぞれがハンドヘルドプロジェクタを持っているような環境を想定した研究が広く行われていくと考えられる。

ウェアラブルプロジェクションに関する研究も行われてきている。筆者の所属する研究室においては、2001年頃より、プロジェクタを装着した状態で、どのようなインタラクションが可能となるのかについてさまざまな研究を行ってきている(図-17)。提案したシステムでは、物理書類と電子情報との融合を目指し、読んでいる雑誌上にその内容に関するWebページを表示する(図-17(a)(b))、印刷されたエンジンの点検マニュアル上に点検すべき箇所を動的にハイライトする(図-17(c))、気になる記事に指先で接触してアノテーションを付与する(図-17(d))といったインタラクションを可能にした。さらに、実世界の掲示板にパーソナライズされた伝言を表示したり(図-17(e))、任意の平面に電卓を投影表示して計算する(図-17(f))といったインタラクションも実装した。他のウェアラブルプロジェクション型ARに関しては、「展望3：ARのインタフェース」をご覧ください。

☆2 Luminetx Technologies Corporation, <http://www.luminetx.com/>

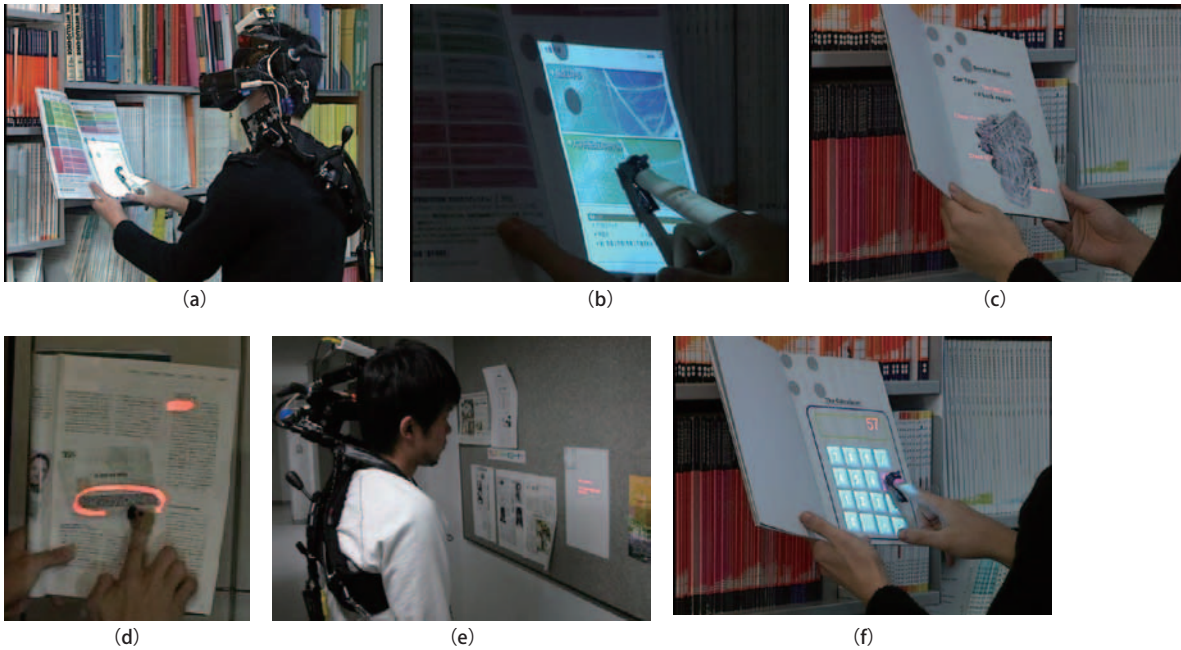


図-17 ウェアラブルプロジェクション応用：(a) (b) 開いたページに関する情報を Web で閲覧，(c) 印刷されたエンジン点検マニュアルへの点検位置指示，(d) 雑誌へのアノテーション，(e) 実掲示板へのパーソナライズされた伝言表示，(f) 投影された電卓での計算（画像提供：大阪大学 佐藤宏介研究室）

今後の展望

本稿では、プロジェクション型 AR について、その基盤技術と応用例を紹介した。今後は、プロジェクタが超小型化し、さまざまなモバイルデバイスに標準の表示装置として組み込まれることが予想される。そして、環境中に分散設置されたプロジェクタがこれらの小型プロジェクタと協調し、実空間中のあらゆる対象表面上で任意の仮想像を投影表示できるようになるであろう。筆者の所属する研究室では、モバイル型および環境設置型のプロジェクタに囲まれて人間が生活する「プロジェクタ共生環境」という概念を提唱し、分散協調投影技術に関する研究を推し進めている。実空間中の物体上に、まさに画素が万遍なく埃のように積もっていく「ピクセルダスト」とでも呼ぶべき映像メディア環境の実現を目指している。

プロジェクタの小型化および低価格化によって、最近では多くの研究者がプロジェクション型 AR の研究を行うようになってきている。しかしながらビジネスとして成功している例は少なく、AR 元年と言われる昨今ですら、シースルー型 AR のような盛り上がりは感じられない。誰でも簡単にプロジェクション型 AR 環境を構築できるよう、ARToolKit^{☆3}のような、プロジェクション型 AR のためのオープンソースプラットフォームの開発が

急務であると考えている。

参考文献

- 1) Bimber, O. and Raskar, R. : Spatial Augmented Reality : Merging Real and Virtual Worlds, A. K. Peters Ltd. (2005).
- 2) Bimber, O., Iwai, D., Wetzstein, G. and Grundhoefer, A. : The Visual Computing of Projector-Camera Systems, Computer Graphics Forum, Vol.27, No.8, pp.2219-2254 (2008).
- 3) Flagg, M. and Reh, J. M. : Projector-Guided Painting, In Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology '06, pp.235-244 (2006).
- 4) Aliaga, D. G., Law, A. J. and Yeung, Y. H. : A Virtual Restoration Stage for Real-world Objects, ACM Transactions on Graphics, Vol.27, No.5, pp.149:1-149:10 (2008).
- 5) Inami, M., Kawakami, N., Sekiguchi, D., Yanagida, Y., Maeda, T. and Tachi, S. : Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector, In Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000, pp.233-240 (2000).
- 6) 近藤大祐，後藤敏之，河野 誠，木島竜吾，高橋優三：自由曲面への投影を用いたバーチャル解剖模型，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.10, No.2, pp.201-208 (2005).
- 7) Cao, X., Forlines, C. and Balakrishnan, R. : Multi-user Interaction using Handheld Projectors, In Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology '07, pp.43-52 (2007).

(平成 22 年 2 月 10 日受付)

岩井大輔

daisuke.iwai@sys.es.osaka-u.ac.jp

2003 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2005 年同大学院博士前期課程修了。2006～08 年日本学術振興会特別研究員。2007 年同大学院博士後期課程修了。2007～08 年独バウハウス大学ワイマール校メディア学科客員研究員。2008 年大阪大学大学院基礎工学研究科助教。投影型複合現実感、ヒューマンコンピュータインタラクションに関する研究に従事。IEEE, ACM 他各会員。博士(工学)。

^{☆3} ARToolKit, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>