

特集 ■ プロジェクションマッピング

プロジェクタ応用工学の発展



佐藤宏介
Sato Kosuke

大阪大学

1. はじめに

スクリーンにプロジェクタからの映像を投影する映画館のような構成ではなく、矩形の白色平面スクリーンではない身の回りの様々な物体にビジュアルな情報を重畳する形態で提示する技術は、当学会においては仮想現実感の一技術である投影型複合現実感として研究が進められており、また近年では、一般の方々にもプロジェクションマッピングの名称で広く認知されてきている。本稿ではこのような研究分野をプロジェクタ応用工学と名付け、これまでの発展について俯瞰する。

著者の独断ではあるが、国際ワークショップ ProCams の開始と、Microsoft 社の廉価なモーションセンサ Kinect の販売の 2 つが、当該研究分野においてエポックメイキングな出来事であると考えており、本稿では、図 1、表 1 に示すように、これらを起点として時間軸を大きく 3 つに分けて研究例を紹介していきたい。なお、1980 年代より行われている、プロジェクタと画像センサを組み合わせる画像計測の観点については本稿では取り扱わない。

当然のことながら、紙幅の制約のために紹介できない重要な研究は多く存在する。また、研究は連綿としておりある年代で区切ることも、それが本質的ではないことは、多くの読者の考えられるとおりであるが、半ば無理やりな区切りであっても、それがなければ取り留めもなく研究紹介となってしまうため、ご容赦願いたい。

2. 黎明期（～2002年）

プロジェクタを用いて、コンピュータモニタの枠の外の現実空間にコンピュータ合成された映像を重畳する初期のシステムとして、1991年に提案された DigitalDesk が挙げられる [1]。この研究では、電卓等のウィジェッ

トが投影された机上で直接コンピュータを操作できるシステムが提案されている。

2000 年前後になると、コンピュータからの映像出力を直接投影することのできるデータプロジェクタの普及が進み、プロジェクタを用いた様々な研究がなされるようになってきた。The Office of the Future と呼ばれる研究プロジェクトでは、遠隔のオフィスの風景を、壁や机に映像を投影することで、あたかも空間を共有して共同作業できるようなシステムの提案がなされた [2]。同研究グループからは、その後も立て続けに重要な発表が行われており、任意形状の投影面上での立体表示を実現する手法 [3]、白色模型を自在に投影彩色する Shader Lamps [4] や、ペン型デバイスを用いてインタラクティブに模型に投影彩色する Dynamic Shader Lamps [5] など、現在のプ

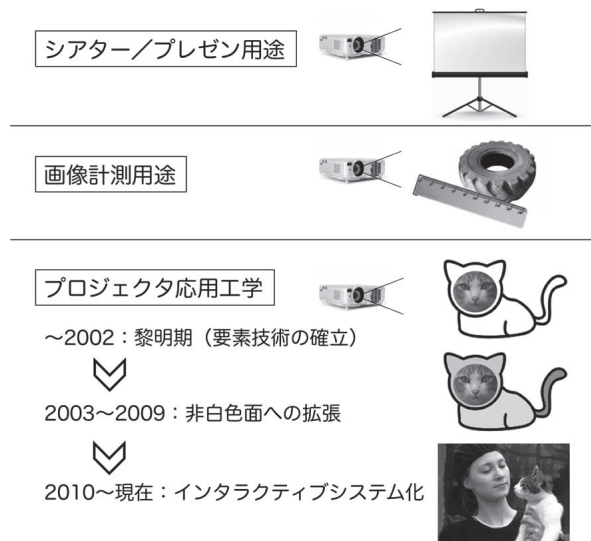


図 1 プロジェクタ応用工学の発展

ロジェクションマッピングで用いられる基盤技術のほとんどがこの頃に提案されている。プロジェクタの小型化を見越し、ハンドヘルドプロジェクタに関する研究も行われている [6].

一方、国内においても 2000 年前後にプロジェクタを用いて身の回りの実物体に映像を投影重畳する研究が進められている。その代表例として、再帰性反射材にプロジェクタから映像を投影することで、投影対象を透明化する光学迷彩 [7] が挙げられるが、その他にも、上述の Shader Lamps と同様の概念に関する研究も行われている [8][9]。さらに、プロジェクタを遠隔地間の情報伝達に利用するシステムも提案されている [10]。また、人体模型に映像を投影し、あたかもその内部が透けて見えるかのような映像表現が早くも実現されている [11].

表 1 プロジェクタ応用光学のエポック

黎明期 2002	机上ウィジェットの投影実現
	遠隔地映像の投影空間共有
	白色模型への投影色づけ
	ハンドヘルド可能なプロジェクタの出現
ProCams 創設 2003 2009	有色投影面に対する色補正、凹面への相互反射補償、焦点ボケ補正、ダイナミックレンジ拡張、複数プロジェクタ統合、解像度補正などの各種要素技術の確立
	上記要素技術に基づいた現実室内空間、身体への投影
	DMD を利用した可視光通信機能の内包
2010 現在	廉価なモーションセンサ Kinect の出現
	ユーザインタラクション機能の内包
	動的に移動/変形する対象への投影
	影キャンセリングの実現

3. 投影対象の非白色面への拡張 (2003 ~ 09 年)

2002 年頃までは、投影対象は非平面であっても白色であることが暗黙的・明示的に限定されていた。これに対して、2003 年になると、非白色（だけでなく、テクスチャを持つ）対象上でも、あたかも白色の対象に映像を投影したかのように色を補正する基盤技術に関する研究が進み、投影対象の幅が飛躍的に増加することとなる。これは、プロジェクタとカメラを組み合わせた Projector-Camera System に関する国際ワークショップ ProCams が 2003 年に創設されたことが大きな契機となっている。研究開発された色補正技術には、非白色かつテクスチャのあるような対象上で所望の色の見えを実現する手法 [12] だけでなく、複雑な形状をした対象

での相互反射補償 [13] や、焦点ボケも含めて投影色を補正する技術 [14] 等の要素技術の各種提案は、ProCams での発表でほぼ完了したと言える。

プロジェクタのハードウェアのダイナミックレンジおよび解像度に関する制約を乗り越えるような研究も行われている。プロジェクタのダイナミックレンジの制約を乗り越える研究では、印刷紙等の反射メディアに投影重畳することで、プロジェクタと反射メディアそれぞれの積のダイナミックレンジを持つプロジェクションシステムを実現する技法が提案されている [15]。解像度に関しては、複数台のプロジェクタからの投影像を重畳させることによって、超解像度化が実現されている [16].

人間にとって意味のある映像を投影するだけでなく、フォトセンサのような受光デバイスに対して時空間変調された情報を伝達する可視光通信デバイスとしてプロジェクタを使用する研究も行われている。例えば、近赤外線を投影するプロジェクタを用いて指先に取り付けたフォトセンサ付き触覚提示デバイスに信号を送り、任意の位置で触覚を提示するシステムが提案されている [17]。また、フォトセンサ付きのロボットの制御にプロジェクタからの投影光を利用するシステムが提案されている [18]。さらに、DMD 素子のミラーを画素毎に 1 万 Hz 以上で高速変調することで、人間にとってちらつきのない画像を提示しながらも、時間応答性の高い光検出器で投影光に埋め込まれたコードを読み取ることでできるようなシステムが提案されている [19].

アプリケーションの提案でも、机上や壁のような、比較的通常の投影スクリーンに近い対象や、投影用に作成された模型だけでなく、現実空間に存在する多種多様な実物体への重畳投影を応用したものが提案されている。例えば、キャンバスに絵画を描く際の筆使いを投影教示して絵画作成を支援するシステム [20] や、冷蔵庫の扉に映像を投影して扉を開けずにその中身を確認できるようにしたシステム [21] などが提案された。また、パンチルト台にプロジェクタを載せて、投影範囲の制限無しに部屋中の実物体上に情報を提示するシステムも提案されている [22]。上記の色補正技術を応用した応用研究としては、机上の書類の山を投影によって透明化していき書類探索を効率化するシステムが提案されている [23]。また、プロジェクタの小型化が進んだことから、ウェアラブルプロジェクタが提案され [24][25]、そのシステムを用いて、ユーザの掌に操作画面を投影重畳して、あたかも掌がスマートフォンやリモコンになったかのようなインタフェースの提案がなされている [26].

4. インタラクティブシステムの発展 (2010 年～現在)

プロジェクタから身の回りの実環境に投影された投影像を、ユーザの指先接触やジェスチャにより操作する研究はこれまでもなされてきていたが、入力操作の認識に、高価なモーションキャプチャシステムや照明条件等の環境変動に頑健でない画像処理技術が制約となっていた。この問題が、2010 年にリリースされた廉価なモーションセンサ Kinect によって克服され、実環境中でユーザインタラクションを伴うシステムが、この年以降、カンブリア爆発的に数多く提案されるようになってきている。例えば、[26] で提案された掌上でのコンピューティングを Kinect を用いたユーザインタフェースに置き換えた研究 [27] や、実環境およびユーザ手先の 3 次元形状をリアルタイムで計測することで実環境中に触れた箇所に絵を描く等のインタラクションを実現した研究 [28] が行われている。ユーザとのインタラクションだけでなく、天井に取り付けたパンチルト台にプロジェクタと Kinect を載せ、実環境中の物体の配置が変更しても適応的に投影像を補正して投影する研究 [29] や、テレビの置かれたリビングの形状を計測して、テレビ画面の周囲に映像を投影して没入感の高い表現を実現した研究 [30] などが挙げられる。

Kinect を使わない研究も継続して行われている。例えば、粘土を用いて望みの形状の模型を作成する作業を、プロジェクタとカメラを用いて粘土の形状を連続的に計測して、計測された形状と目標形状との差分を投影光によって可視化することで作業を支援するシステムが提案されている [31]。また、可視画像と同時に近赤外線画像を投影するハンドヘルドプロジェクタを試作し、近赤外線画像中に埋め込んだマーカパターンを近赤外線カメラで計測することで、複数のユーザが把持したハンドヘルドプロジェクタの投影像間でのインタラクションを実現する研究が行われている [32]。

これら諸研究が分野を大きく広げているなか、基盤技術の研究も着実に発展してきている。特に、複数台のプロジェクタを用いて、立体物に映像を投影する際や、ユーザとのインタラクションで生じる影をキャンセルする技法が幾つか提案され、例えば、対象上の各小領域で、最も解像度の高い映像を影無く投影できるプロジェクタを選択する手法 [33] や、投影結果の画質を最大化するようなプロジェクタの最適配置法が考案されている [34]。

5. おわりに

本稿では、白色平面スクリーンを想定しない、実環境中の様々な物体に映像投影するプロジェクタの新たな適

用を目指す、プロジェクタ応用工学の揺籃と発展を時間軸を追って紹介した。読者各位がこの時間軸をさらに延長することを期待したい。

参考文献

- [1] P. Wellner, "The DigitalDesk Calculator: Tangible Manipulation on a Desk Top Display," Proc. ACM UIST, pp. 27-33 (1991)
- [2] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin and H. Fuchs, "The Office of the Future: A Unified Approach to Image-based Modeling and Spatially Immersive Displays," Proc. ACM SIGGRAPH, pp. 179-188 (1998)
- [3] G. Welch, H. Fuchs, R. Raskar, H. Towles and M. S. Brown, "Projected Imagery in Your "Office of the Future"," IEEE Comput. Graph. Appl., Vol. 20, No. 4, pp. 62-67 (2000)
- [4] R. Raskar, G. Welch, K. L. Low and D. Bandyopadhyay, "Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination," Proc. EGWR, pp. 89-102 (2001)
- [5] D. Bandyopadhyay, R. Raskar and H. Fuchs, "Dynamic Shader Lamps: Painting on Movable Objects," Proc. IEEE/ACM ISAR, pp. 207-216 (2001)
- [6] R. Raskar, V. B. Jeroen, P. Beardsley, T. Willwacher, S. Rao and C. Forlines, "iLamps: Geometrically Aware and Self-configuring Projectors," ACM Trans. Graph., Vol. 22, No. 3, pp. 809-818 (2003)
- [7] 川上直樹, 稲見昌彦, 柳田康幸, 前田太郎, 館暲: 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 -, 日本 VR 学会第 3 回大会論文集, pp. 285-286 (1998)
- [8] 楠本拓矢, 佐藤宏介, 井口征士: 実物体へのテクスチャ像投影による混合現実感システム, 電子情報通信学会総合大会予稿集, A-16-14 (2000)
- [9] 向川康博, 西山正志, 尺長健: スクリーン物体への工学パターン投影による仮想工学環境の実現, 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. 84, No. 7, pp. 1448-1455 (2001)
- [10] 東城賢司, 日浦慎作, 井口征士, プロジェクタを用いた 3 次元遠隔指示インタフェースの構築, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 7, No. 2, pp. 169-176 (2002)
- [11] D. Kondo and R. Kijima, "Proposal of a Free From Projection Display Using the Principal Duality Rendering," In Proc. VSMM, pp. 346-352 (2002)
- [12] T. Yoshida, C. Horii and K. Sato, "A virtual color reconstruction system for real heritage with light projection," In Proc. VSMM, pp. 161-168 (2003)

- [13] O. Bimber, A. Grundhoefer, T. Zeidler, D. Danch, and P. Kapakos, "Compensating Indirect Scattering for Immersive and Semi-Immersive Projection Displays," *Proc. IEEE Virtual Reality*, pp. 151-158 (2006)
- [14] L. Zhang and S. Nayar, "Projection Defocus Analysis for Scene Capture and Image Display," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 907-915 (2006)
- [15] O. Bimber and D. Iwai, "Superimposing Dynamic Range," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 27, No. 5, pp. 150:1-150:8 (2008)
- [16] N. Damera-Venkata and N. L. Chang, "Realizing Super-Resolution with Superimposed Projection," *Proc. IEEE Procams* (2007)
- [17] 岩中由紀, 佐藤宏介: 赤外パターン光投影による触覚情報提示装置, 電子情報通信学会総合大会予稿集, A-16-25 (2005)
- [18] 杉本麻樹, 小島稔, 中村亨大, 新居英明, 稲見昌彦: 画像提示装置で表示した指標画像を用いた位置・姿勢計測, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 485-494 (2005)
- [19] 北村匡彦, 苗村健: 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, 日本 VR 学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 381-388 (2007)
- [20] M. Flagg and J. M. Rehg, "Projector-guided Painting," *Proc. of ACM UIST*, pp. 235-244 (2006)
- [21] L. Bonanni and C. H. Lee, "The Kitchen As a Graphical User Interface," *Proc. ACM SIGGRAPH Art Gallery*, pp. 109-111 (2004)
- [22] A. Butz and C. Schmitz, "Annotating Real World objects using a Steerable Projector-Camera Unit," *Proc. IEEE Procams* (2005)
- [23] D. Iwai and K. Sato, "Limpid Desk: See-Through Access to Disorderly Desktop in Projection-Based Mixed Reality," *Proc. ACM VRST*, pp. 112-115 (2006)
- [24] T. Karitsuka and K. Sato, "A Wearable Mixed Reality with an On-Board Projector," *Proc. IEEE/ACM ISMAR*, p. 321 (2003)
- [25] P. Mistry, P. Maes and L. Chang, "WUW - Wear Ur World: A Wearable Gestural Interface," *Proc. ACM CHI EA*, pp. 4111-4116 (2009)
- [26] G. Yamamoto and K. Sato, "PALMbit : A PALM Interface with Projector-Camera System," *Proc. UbiComp*, pp. 276-279 (2007)
- [27] C. Harrison, H. Benko and A. D. Wilson, "OmniTouch: wearable multitouch interaction everywhere," *Proc. ACM UIST*, pp. 441-450 (2011)
- [28] D. Molyneaux, S. Izadi, D. Kim, O. Hilliges, S. Hodges, X. Cao, A. Butler, H. Gellersen. "Interactive environment-aware handheld projectors for pervasive computing spaces," *Proc. Pervasive*, pp. 197-215 (2012)
- [29] A. D. Wilson, H. Benko, S. Izadi and O. Hilliges. "Steerable augmented reality with the beamatron," *Proc. ACM UIST*, pp. 413-422 (2012)
- [30] B. R. Jones, H. Benko, E. Ofek and A. D. Wilson, "IllumiRoom: Peripheral Projected Illusions for Interactive Experiences," *Proc. ACM CHI*, pp. 869-878 (2013)
- [31] A. Rivers, A. Adams and F. Durand, "Sculpting by Numbers," *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6, pp. 157:1-157:7 (2012)
- [32] K. D. D. Willis, I. Poupyrev, S. E. Hudson, M. Mahler, "SideBySide: Ad-hoc Multi-user Interaction with Handheld Projectors," *Proc. ACM UIST*, pp. 431-440 (2011)
- [33] A. J. Law, D. G. Aliaga and A. Majumder, "Projector Placement Planning for High Quality Visualizations on Real-World Colored Objects," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics*, Vol. 16, No. 6, pp. 1633-1641 (2010)
- [34] M. Nagase, D. Iwai and K. Sato, "Dynamic Defocus and Occlusion Compensation of Projected Imagery by Model-Based Optimal Projector Selection in Multi-projection Environment," *Virtual Reality*, Vol. 15, No. 2, pp. 119-132 (2011)

【略歴】

佐藤宏介 (SATO Kosuke)

大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授

1983 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒, 1985 年同大学院修士了。1986 年同大助手, 1994 年奈良先端科学技術大学院大学助教授, 2003 年より現職。専門は 3 次元画像計測, プロジェクタ応用工学, 情報考古学など。