6章 ダイナミックプロジェクションマッピング

渡辺 義浩[†], 末石 智大^{††}, 石川 正俊^{††} (正会員)

キーワード: 高速画像処理, ビジュアルフィードバック, 高速トラッキング, 高速プロジェクタ, 高速光軸制御,
ダイナミックプロジェクションマッピング

1. まえがき

プロジェクションマッピングは, 巨大な建造物への投影, コンサートや展示会での映像演出など, アート・エンタテインメント分野で急速に広がりを見せている。さらには, ユーザインタフェース, 学習・作業支援, 拡張現実などの研究分野でも, さまざまな可能性が探求されてきている。

このような流れの下, 運動物体の表面にぴったり一致する映像を継続的に投影する機能が必要なシーンが増えてきている¹⁾²⁾。このような機能を実現するプロジェクションマッピングは, ダイナミックプロジェクションマッピングと呼ばれている。ダイナミックプロジェクションマッピングが切り拓く応用分野は潜在的に幅広いことが期待されているが, 完成度の高い技術を確認するためには数多くの課題が残されていることがわかっている。

特に顕著な課題が, 遅延である。運動する現実の物体と仮想的に提示される映像の間に, 人間が幾何学的不整合を知覚しないためには, 遅延が可能な限り小さい必要がある。具体的に許容される遅延として, Ngらの研究では6 ms程度であることが示されている³⁾。この研究では, 最小遅延1 msで応答する投影型のタッチパネルを用いて被験者実験を行っている。その結果, 遅延が被験者平均で6.04 msを超えると, 遅延1 msとの違いを知覚することが明らかにされている。この遅延性能は, ダイナミックプロジェクションマッピングのコンテンツに応じて変化する可能性はあるが, 運動する対象の位置・姿勢・形状を認識するセンシングから, 投影像の生成と投影を行うプロジェクションまでを数msのレベルで完了するシステムを構築する必要があることがわかる。

このように, ダイナミックプロジェクションマッピングのデザインにおいては, 実世界の変化に対して, 投影される映像が時空間的に融合することが必須であり, その要請

を満たすためにはシステムの遅延を最小化することが重要な課題となる。この課題は, プロジェクタ単体の機能向上だけでは解決が困難である。高速なセンシングと高速なプロジェクション, さらにはそれらのインテグレーションが牽引する多くの周辺技術の進化が求められるものである。

このような背景の下, 二つのアプローチがダイナミックプロジェクションマッピングの実現に向けて有効であることが示されている。第1のアプローチでは, 速度性能を大幅に向上させた独自の高速プロジェクタと高速・高精度なトラッキング技術を連携することで, その完成度を上げる可能性が試されている。第2のアプローチでは, 投影方向を高速に制御可能な光学モジュールを組込むことで, 広範囲を運動する物体への継続投影を実現する可能性が試されている。以降の節では, これらについて詳細を述べる。

2. 高速プロジェクタ方式

本方式で用いられる高速プロジェクタ DynaFlash は, 最大1,000fps (frames per second) で8bit階調の映像を, 最小遅延3 msで投影するDMD (Digital Micromirror Device) 型のシステムである⁴⁾。DynaFlashでは, DMDの制御に加え, DMDに照射する光源の明滅制御を両者の限界性能で連携させることで高速化を実現している。さらに, 独自の通信インタフェースによって, 画像を高速転送する回路を計算機に搭載することで, 映像生成から投影までの遅延を抑えている。

DynaFlashはプロジェクタ単体での運用ではなく, さまざまな高速なセンサとの連携によって初めてその価値を発揮するものである。その応用展開は幅広く, ダイナミックプロジェクションマッピングへの挑戦はその一角を担っている。

本方式に基づく具体的な実現例として, 変形する紙面やTシャツなどのような非剛体曲面にプロジェクションマッピングする事例が報告されている⁵⁾。同事例では, 独自のマーカを赤外インクで対象に付与することで, 複雑な変形や遮蔽が生じた場合にも, 正確かつ高速に運動を把握するセンシング技術が組み込まれている。この高速センシング

[†] 東京工業大学

^{††} 東京大学

"Dynamic Projection Mapping" by Yoshihiro Watanabe (Tokyo Institute of Technology, Tokyo), Tomohiro Sueishi and Masatoshi Ishikawa (The University of Tokyo, Tokyo)

図1 高速プロジェクタ方式に基づくさまざまなダイナミックプロジェクションマッピング

技術と DynaFlash の連携によって、図1上段に示すように、高速な動きに追従した映像投影が矛盾なく行われていることが確認できる。さらに、使用するカメラ台数を10台に拡張することで、より大きな変形をより広範囲で認識できるとともに、3次元的な運動を捉えることが可能となっており、リアリティの高いエフェクトが実現されている⁶⁾。

また、顔へのダイナミックプロジェクションマッピングも実現されている⁷⁾。同事例では、顔へのプロジェクションマッピングやコンピュータグラフィクス表現によって世界的に評価が高いビジュアルデザインスタジオ WOW、テクノロジーを絡めた映像やCMなどで世界的な賞を獲得してきたクリエイティブプロダクション TOKYO、Madonna などのダンサーを務める世界的ダンサー AyaBambi、そして筆者らのコラボレーションによって、新たな映像作品「INORI (prayer)」が生み出されている。

さらに、物体の3次元運動を捉えることで、実世界の対象表面の視覚的な質感をプロジェクションマッピングによって動的に再現する応用も報告されている⁸⁾。質感は視点と物体と光源の3次元的な配置によって認識される高次の情報である。特に、これらを人間が能動的に変化させることで得られる視覚情報は、質感の理解を深めるうえで重要であるが、実世界上に仮想の質感を自在に再現することは、プロジェクタとセンシングの両者の速度不足により難しかった。実現された事例では、3次元プリンタで生成された石膏製の人形が、動きに伴ってあたかも金属光沢をもつような再現が行われている。図1中段にその動作の様子を示す。なお、対象表面のドットは3次元運動を捉えるためのマーカであり、インクの工夫により不可視化することが可能である。

さらに、対象にマーカを付与することなく、ダイナミックプロジェクションマッピングを実現する事例も報告され

ている⁹⁾。同事例では、構造化光法に基づく高速な3次元計測を用いたトラッキング技術を用いることで、剛体の3次元位置と姿勢を高速にマーカレスで認識している。認識結果に応じて、投影像を動的に生成することで、ウサギの人形の表面全体に毛や顔の模様が再現されていることが確認できる。

以上では、高速な画像センシングとの融合を中心に述べたが、高速プロジェクタは他のセンシングとの組合せでも興味深い応用を生み出すことができる。例えば、現実の物体を空間中に動的に並べたり、二つ以上の現実の物体をブレンドしてアピランスを制御したりすることで、リアルなディスプレイを構築した事例がある^{10) 11)}。これは、人間の視覚残像効果を利用したディスプレイである。同事例では、高速回転する現実の物体に対して、アクチュエータのエンコードと同期したパターン光を高速プロジェクタから投影している。これによって、毛糸を使ってアニメーションを生成したり、ザラザラした拡散性の強い物体とキラキラした鏡面性の強い物体を混ぜ合わせたその中間特性を実世界上で提示する応用が実現されている。このタイプのリアリスティックディスプレイは、裸眼で実現できるとともに、立体視可能であり、光線も完全に再現されている点で強力である。

3. 高速光軸制御方式

高速プロジェクタ方式とは異なり高速光軸制御方式は、通常の低速なプロジェクタを用いてもある程度のダイナミックプロジェクションマッピングが実現可能な手法である。図2に高速光軸制御方式^{12) 13)}の模式図を示す。1,000fpsの高速ビジョンと高速なガルバノミラー(2枚の回転ミラー)を用いて、プロジェクタの投影光軸を対象に向け続けるものである。そのためプロジェクタ自体のレイテ

図2 高速光軸制御方式：高速ビジョン・瞳転送光学系・ガルバノミラーの3要素が重要

図3 「るみぺん2」¹⁶⁾¹⁷⁾のシルエット認識の画像処理

ンシが大きくと、投影像が動的対象にびたりと貼り付いたようなプロジェクションマッピングが可能となる。

3.1 高速光軸制御の仕組み

従来からプロジェクタの光軸を制御する方式のシステム¹⁴⁾は存在していたが、主に重いプロジェクタ自体を駆動する電動雲台式であったため、低速な応答しか実現できていなかった。一方で、高速光軸制御系¹²⁾¹³⁾はカメラの前方に設置した軽量のミラーを駆動することで光軸を制御する。ここで、カメラとミラーの間に瞳転送光学系と呼ばれるレンズ系を導入することが重要で、光学中心(光線束の最も細くなる箇所)を2枚のミラー間に仮想的に転送している。通常カメラから遠い2枚目のミラーが非常に大きくないと十分な画角を達成できないが、この瞳転送光学系のおかげで2枚ともミラーを小さく(すなわち軽量に)することができ、画角と高速性の両立を達成可能としている。プロジェクタもカメラと光の方向が異なるだけの光学系として、同様に画角と高速性の両立が可能である。

実際非常に高速な光軸制御が可能となり、3~4m前方において音速で移動する高速飛翔体¹⁵⁾を画角内に継続的に捉えた撮像すら可能となるため、プロジェクションマッピングで扱う程度の速度の動的対象は十分に追従可能である。

3.2 高速プロジェクタ方式との比較

高速プロジェクタ方式と比較すると、高速光軸制御系の一番の優位性は画角と解像度の両立である。高速プロジェクタは画角の動かない固定投影系の一種であり、対象の広い運動範囲を投影対象とするために広角レンズを利用すると、動的対象へ投影可能な画素数はわずかなものとなり、解像度に制約が存在する。一方で望遠レンズを利用すると対象が容易に投影範囲から外れるため、単一の動的対象においては光軸制御が必要不可欠となる。また、現在実現されている高速プロジェクタ DynaFlash⁴⁾はモノクロで、通常の市販のカラープロジェクタが利用可能な高速光軸制御系は多彩な投影コンテンツが可能となる点も特徴である。

一方で市販のプロジェクタを利用した高速光軸制御系では、プロジェクタのレイテンシは依然大きいと、対象の

回転・変形などへの対応は困難である。それゆえ現状では剛体のみしか扱うことはできないが、スポーツのボールなど球体は回転不変な形状であるため、十分にダイナミックプロジェクションマッピングとして成立する。球体は容易に広範囲を動き回ることが可能であるため、高速光軸制御系が得意とする動的投影スクリーンであると言える。

3.3 再帰性反射背景を利用した「るみぺん2」

同一光軸で投影と対象認識の高速画像処理を同時に行う場合、従来手法¹³⁾ではスクリーン対象と投影コンテンツの区別が課題であった。それに対して「るみぺん2」¹⁶⁾¹⁷⁾は再帰性反射背景を導入し、充分明るい背景の前に存在する対象のシルエットを認識することで、多彩な投影コンテンツを実現しつつ、コンテンツを認識上無視した高速トラッキングを実現した。これは背景の再帰性反射特性と対象の拡散反射特性の違いを上手く利用した光学的工夫である。

「るみぺん2」¹⁶⁾¹⁷⁾における対象認識の概要を図3に示す。インタラクティブなダイナミックプロジェクションマッピングにおいて、トラッキング対象以外の物体の影響をいかに排除するかが重要である。最初の背景差分法と適応的ウィンドウ法を利用した認識¹⁶⁾から、現在は輪郭検出とRANSACによる円検出¹⁷⁾まで改良が進んでいる。1msの高速な形状検出まで達成している点は非常に意義がある。

「るみぺん2」によるデモの様子¹⁷⁾を図4に示す。最初の手法¹⁶⁾による跳躍する地球のデモは経済産業省デジタルコンテンツEXPO2015でも好評を博したが、改良手法¹⁷⁾によるデモはさらに安定かつ正確な投影を実現している。

4. むすび

本稿では、高速ビジュアルフィードバック技術に基づく動的対象へ位置ずれによる違和感を生じさせないダイナミックプロジェクションマッピングの概念を示し、高速プロジェクタ方式・高速光軸制御方式の二つの原理を紹介した。従来のレイテンシの大きなプロジェクタ・カメラ系では実現できなかった、非常に臨場感の高いコンテンツの創出が可能となり今後の更なる発展が期待できる。また、二

図4 高速光軸制御「るみぺん2」¹⁷⁾によるデモの様子(連番画像の合成)
跳躍する白い球体に映像を投影。

方式は相反するものではなく、両技術の連携によってステージ上の人間など、回転・変形を伴い動き回る対象へのダイナミックプロジェクションマッピングの実現も期待される。
(2018年1月29日受付)

〔文 献〕

- 1) C. Siegl et al.: "Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping", ACM Trans. Graph., 34, 6 (2015)
- 2) H. Asayama et al.: "Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping", IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, 24, 2 (2017)
- 3) A. Ng et al.: "Designing for low-latency direct-touch input", Proc. of UIST (2012)
- 4) Y. Watanabe et al.: "High-speed 8-bit image projector at 1,000 fps with 3 ms delay", Proc. of IDW (2015)
- 5) G. Narita et al.: "Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker", IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, 23, 3, pp.1235-1248 (2017)
- 6) 遠藤ほか: "ダイナミックプロジェクションマッピングのための複数カメラを用いた高速非剛体3次元トラッキング", 信学技報, 117, 391 (2018)
- 7) "INORI -PRAYER-: WOW・TOKYO・AyaBambiとのコラボレーション", http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/vision/WOW_TOKYO_AYABAMBI/index-j.html
- 8) Y. Watanabe et al.: "Extended dot cluster marker for high-speed 3D tracking in dynamic projection mapping", Proc. of ISMAR (2017)
- 9) 田畑ほか: "高速3次元トラッキングを用いたマーカレスダイナミックプロジェクションマッピングの検証", 信学技報, 117, 391 (2018)
- 10) L. Miyashita et al.: "ZoeMatrope: A System for Physical Material Design", ACM Trans. Graph., 35, 4 (2016)
- 11) T. Yoshida et al.: "Phyxel: Realistic Display of Shape and Appearance using Physical Objects with High-speed Pixelated Lighting", Proc. of UIST (2016)
- 12) 奥村ほか: "アクティブビジョンの高速化を担う光学的視線制御システム", 日本ロボット学会誌, 29, 2, pp.201-211 (2011)
- 13) 奥村ほか: "高速光軸制御を用いた動的物体への投影型拡張現実感",

映情学誌, 67, 7, pp.J204-J211 (2013)

- 14) J. Ehnes et al.: "Projected augmentation-augmented reality using rotatable video projectors", Proc. of ISMAR (2004)
- 15) T. Sueishi et al.: "Tracking background-oriented schlieren for observing shock oscillations of transonic flying objects", Applied Optics, 56, 13, pp.3789-3798 (2017)
- 16) T. Sueishi et al.: "Lumipen 2: Dynamic Projection Mapping with Mirror-Based Robust High-Speed Tracking against Illumination Changes", PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, 25, 4, pp.299-321 (2017)
- 17) 三河ほか: "動的プロジェクションマッピングに向けた輪郭情報に基づく高速球体トラッキング", 第22回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1E4-03 (2017)

渡辺 義浩 2002年, 東京大学工学部計数工学科卒業。2004年, 同大学大学院情報理工学系研究科修士課程修了。2007年, 同大学専攻博士課程修了。現在, 東京工業大学工学院情報通信系準教授。センシングとディスプレイの超高速化技術の実現とその応用に関する研究に従事。博士(情報理工学)。正会員。

末石 智大 2012年, 東京大学工学部計数工学科卒業。2014年, 同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。2017年, 同大学専攻博士課程修了。2014～2017年, 日本学術振興会特別研究員(DC1)。2017年, 同研究科特任助教となり, 現在に至る。高速光軸制御を用いた画像計測ならびに新規応用開拓の研究に従事。博士(情報理工学)。正会員。

石川 正俊 1977年, 東京大学工学部計数工学科卒業。1979年, 同大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年, 通産省工業技術院製品科学研究所研究員。1989年, 東京大学工学部計数工学科助教授。現在, 同大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。2002年, 2003年度, 同大学総長特任補佐。2004年度, 同大学副学長。2005年度, 同大学理事・副学長。超並列・超高速ビジョン, センサフュージョン, メタ・パーセプションなどの研究に従事。工学博士。正会員。