

プロジェクターのハードウェア限界を超える質感表現編集技術

岩 井 大 輔

Projector-based Apparent Material Editing by Overcoming Technical Limitations

Daisuke Iwai

Projection mapping technology, which visually manipulates the texture of physical objects around us by projecting images from a projector, enables texture editing that can be observed with the naked eye and does not impair the presence and three-dimensionality of physical objects. In this article, I will discuss technologies that have made it possible to edit textures that were not possible due to the technological limitations inherent in hardware, such as image projection that does not produce shadows even when shielded.

Key words: projection mapping, computational displays, augmented reality

はじめに

プロジェクターからの映像投影によって、身の回りの実物表面の見えを変調するプロジェクションマッピング技術は、実物の質感を編集する用途での研究が急速に進展している。頭部搭載型ディスプレイ（head-mounted display; HMD）やスマートフォンなど、拡張現実感（augmented reality; AR）で一般的に用いられるディスプレイ技術と異なり、裸眼で観察できる点と、実物の存在感・実在感を損なわない点が特長である。一方、離れた位置から映像を投射し実物上に重畳するという技術的性質により、提示される見えは物理世界の光学的環境に強く制約を受ける。例えば、プロジェクターからの映像が遮られると、実物上に影が生じ、質感編集が破綻してしまう。

本稿では、このようなハードウェア特有の技術限界を克服する種々の技術について解説する。特に、影の生じにくい映像投影、実物の見えの空間高周波パターン抑制、明室でコントラストを保った質感編集、そして、鏡面物体の質感編集の4つの技術を紹介する。

1. 影の生じにくい映像投影

プロジェクションマッピングによる実物の質感編集では、その周囲から複数人が同時に観察し、それを指差しするなどしてコミュニ

ケーションすることが想定される。このとき、実物とプロジェクターとの間に観察者が入り込んでしまうと、投射された光が遮られ、実物上に影が生じてしまう、という問題がある。従来、複数台のプロジェクターを用いて影を補い合う技術の研究が進展していたが、実物上の各点で全てのプロジェクターの遮蔽の有無を算出し、それぞれが投影すべき輝度を計算する処理を高速に行う必要があった（動的環境でのプロジェクションマッピングの許容遅延時間は6ミリ秒程度であることが実証されている）。

我々はこれに対し、空中像提示用の光学素子（二面直交リフレクタアレイ）を大口径のプロジェクターレンズと見立てる新たな投影系を構築した¹⁾。採用した光学素子は、幅の狭い短冊状のミラーアレイが直交して2層重なった平板である。実物（以降、コピーと呼称する）から拡散した光線がこの光学素子に入射すると、その反対側で結像する。結像する位置にコピーと鏡面对称となる形状の実物（以降、ターゲットと呼称する）を設置すると、コピーからの光線がターゲット上で結像し、その見えが転写される。面積の大きな光学素子を用いれば、多方向から光線が照射されることになるため、ユーザの手などで一部の光線が遮られても、ターゲット上の投影コ

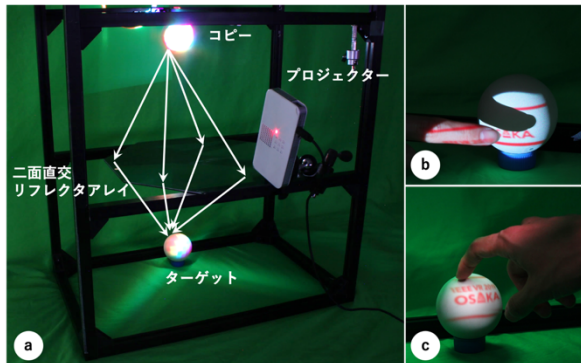


図 1：影の生じにくい映像投影：(a) 試作システム，(b) 通常のプロジェクションマッピングでは投影光を遮ると影が生じる，(c) 試作システムでは多方向から光線が投射されているため遮蔽による影が生じにくい¹⁾

コンテンツが完全に遮蔽されることがなく，影の生じにくい映像投影が実現できる（図 1）。

2. 実物の見えの空間高周波パターン抑制

プロジェクターから投影される画素は，対象面上では一定のサイズの領域を占める．このため，その領域よりも細かく見えを操作することはできない．つまり，対象面の模様のうち，プロジェクターの空間解像度よりも高周波なパターンを操作することができない．実物の見えの高周波パターンを抑制することは，光沢感が減少するなど質感編集の有効な手段であることが分かっている．プロジェクションマッピングでは，この空間解像度に関する制約により，このような質感編集を行うことはできなかった．

我々は，焦点距離を変調できる電気式焦点可変レンズを眼鏡として観察者が装着し，それと同期した高速プロジェクタを実物への照明として用いることで，実物上の模様の高周波成分を抑制し，その質感を変調することを実現した²⁾．具体的には，まず，眼鏡の屈折力を 60 Hz で高速に変調する．そして，実物の模様の内，周波数変調しない箇所は屈折力がゼロのときに照明し，高周波成分を抑制する箇所はそれ以外のときに照明する．これにより，実物の所望の領域の見えの高周波パターンを抑制して提示することを可能にした．

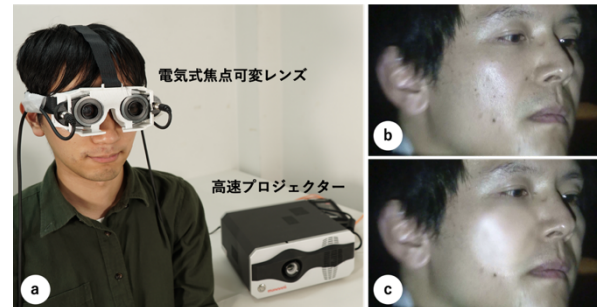


図 2：実物の見えの空間高周波パターン抑制：(a) 試作システム，(b) 人の頬の通常の見え，(c) 試作システムで空間高周波パターンを抑制した時の見え²⁾

図 2 は，人の頬の領域のみ高周波パターン抑制することで，肌の質感を編集している例を示している．

3. 明室でコントラストを保った質感編集

ここまで述べてきた例を含め，プロジェクションマッピングは通常，暗室での利用が想定されている．明室では，投影映像の実物上での反射に環境照明の反射が加わるため，低輝度の表現が困難になるためである．一方，人が実物の質感を認識する際，周囲の光環境は重要である．例えば，鏡面物体の見えにとって，周囲環境の映り込みが主要な構成要素である．このため，暗室でのプロジェクションマッピングでは，実物の見かけを物理的に正確に切り替えることができたとしても，観察者にとっては暗闇に明るく浮かび上がる印象を与え，所望の質感を提示できるとはかぎらない．

我々は最近，環境照明をプロジェクターに置き換えるアプローチでこの問題に取り組んでいる³⁾．複数台のプロジェクターを用いて，対象物以外の実空間に環境照明を再現するよう計算した映像を投影する．対象物には，所望の質感を表現するよう計算した映像を投影する．これにより，一般的な環境照明下での映像投影と比べて，コントラストを高く保ったまま対象の質感を編集できることを確認した（図 3）．

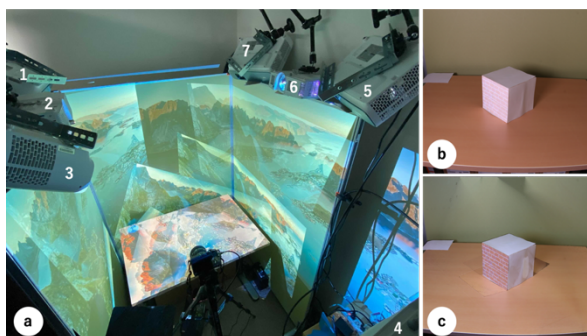


図3：明室でコントラストを保った質感編集：(a) プロジェクター7台を用いた試作システム，(b) 一般的な環境照明下でレンガ模様を白色立方体の一面に投影した結果，(c) 提案する手法でプロジェクションマッピングによる環境照明下で同様の模様を投影した結果³⁾

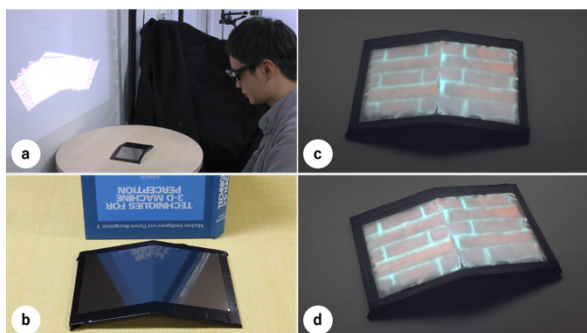


図4：鏡面物体の質感編集：(a) システム動作風景，(b) 質感編集対象面は，くの字に折れ曲がった鏡面物体，(c)(d) 異なる方向から質感編集結果を観察した例⁴⁾

4. 鏡面物体の質感編集

環境照明をプロジェクターに置き換えることで，鏡面物体の質感を編集することも可能になる．通常，鏡面物体に直接映像を投影しても，ほとんどの光が特定方向（正反射方向）に鏡面反射してしまうため，物体表面の見えを編集することは困難となる．

我々はこの問題に対して，鏡面物体に映像を投影するのではなく，鏡面反射によって写り込んでいる環境面の見えをプロジェクションマッピングにより操作することで，あたかも鏡面を見えを操作したかのように見せる技術を開発した⁴⁾．具体的には，ユーザ視点位置と対象面の法線方向から，正反射方向を計

算し，その方向にある環境面の見えをプロジェクションマッピングにより変調する．実験の結果，鏡面反射を有する対象の見えを操作でき，また，その質感を鏡面から拡散面に切り替えられることを確認した（図4）．

5. おわりに

本稿では，プロジェクターハードウェアに起因する技術的な限界を克服して，より自由度の高い実物の質感編集を可能とする技術を紹介した．最後に，最近のハードウェアの技術動向について述べておきたい．従来，白色・平面の固定スクリーンに映像を投射するために最適設計されてきたプロジェクターだが，プロジェクションマッピング応用が注目されるに従い，模様付き・非平面・動的な実物に映像を投射するために様々な技術革新がもたらされている．特に近年，高速化に関して進歩著しく，すでに 1,000 Hz での映像投影が可能なプロジェクターが市販され，動的な対象にピタッと映像を位置合わせすることが可能になってきている．今後も，明るさや色域，画素数といった既存の指標における性能向上にとどまらないプロジェクターの進化によって，実物の質感編集の可能性と応用範囲がさらに広がっていくことを期待している．

文 献

- 1) K. Hiratani, D. Iwai, P. Punpongsanon and K. Sato: "Shadowless Projector: Suppressing Shadows in Projection Mapping with Micro Mirror Array Plate," *Proc. of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR)*, (2019) pp.1309-1310.
- 2) T. Ueda, D. Iwai, T. Hiraki and K. Sato: *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, **26** (2020) 2051-2061.
- 3) 竹内正稀, 岩井大輔, 佐藤宏介: "プロジェクションマッピングによる実環境照明再現," 電子情報通信学会総合大会 情報・システム講演論文集 2, (2021) p.72.
- 4) T. Kaminokado, D. Iwai and K. Sato: "Augmented Environment Mapping for Appearance Editing of Glossy Surfaces," *Proc. of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, (2019) pp.65-75.