

特集 ■ プロジェクションマッピング

質感プロジェクションマッピング



天野敏之

Amano Toshiyuki

和歌山大学

1. 質感脳情報学

生理学研究所の小松英彦教授を代表とする、新学術領域研究「質感認知の神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究」（以後、質感脳情報学）では、工学、心理物理、脳科学分野から多くの研究者が集い、質感認知に関わる人間の情報処理の仕組みの解明と、質感情報の獲得や生成に関する工学技術の発展を推進している。

質感脳情報学の研究領域は平成 22 年に発足し、平成 23 年度から平成 24 年度にかけて第 1 期の公募研究が実施され、現在は第 2 期の公募研究が行われている。筆者は質感脳情報学において第 1 期より「質感の計測と表示に関わる光学的解析と技術」について研究を行う A01 班に参加し、プロジェクタとカメラから構成されるフィードバック系を用いた光投影による質感操作について研究を行ってきた。

本稿では、質感プロジェクションマッピングの研究事例として、筆者が質感脳情報学で現在までに行ってきた研究の概要を紹介する。

2. 光投影による質感の操作

物体の見かけは双方向反射率分布関数 (BRDF) や双方向透過率分布関数 (BTDF)、双方向散乱面反射率分布関数 (BSSRDF) などなどによって表される物体表面および表皮下の光学特性だけでなく、直接もしくは間接的に物体へ照射される光によっても変化する。つまり、物体の見かけが物体の光学的な特性のみで決定されない。そのため、プロジェクタなどを用いて投影光を緻密に制御することで、光学的な制約の範囲内で物体の見かけを操作することが可能であり、物体の見かけから知覚される質感の操作も可能となる。

光投影により物体の見かけを操作するプロジェクショ

ンディスプレイの研究としては、Raskar らが提案している Shader Lamps [1] が有名である。この研究ではランバート反射の仮定のもとで建築物の模型上にテクスチャや日照条件の変化に対する陰影アニメーションを提示している。ランバート反射を仮定したプロジェクションディスプレイの研究はこの他に、Mukaigawa らの投影対象の BRDF に基づく任意の陰影や反射特性の再現 [2] や、Okazaki らの高精度なモデリングによる品質の高い反射特性の再現 [3] などもある。

一方、放射輝度補償とは異なり、物体本来の見かけに応じて光投影によって物体の見かけを操作する手法 [4] [5] も提案されている。さらに、立体物への投影を行う応用として、重畳投影による劣化した遺物の仮想修復 [6] やテクスチャを持つ模型の上への重畳投影による高ダイナミックレンジ提示 [7] など提案されている。

3. プロジェクタカメラ系による連続的な操作

前述のプロジェクションディスプレイの研究では、形状と反射特性を含む投影対象のモデルに基づき、物理的に正しい精巧な見かけの操作を実現している。そのため、これらの手法はクオリティが要求されるが、事前に機材の配置や照明環境の設計が許されるテーマパークのアトラクションや博物館での展示への応用に適していると言える。しかし、あらかじめ投影対象のモデルを用意できない場合や、投影対象の配置が変化する場合には、プロジェクタとカメラを用いた適応的な補償方法 [8-10] が有利である。

筆者らは、このような適用的な処理で見かけを操作する手法として、図 1 に示すプロジェクタカメラフィードバックを用いた見かけの制御を提案している [5]。

この制御系では、カメラで計測された画像 C' に対してカラーマッチングおよびガンマ補正を施した画像 C

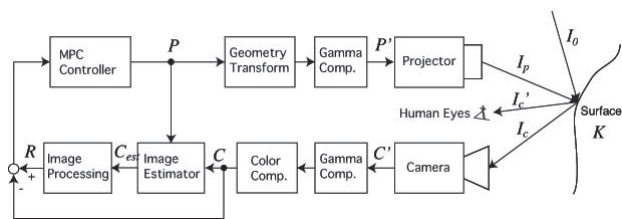


図1 見かけの制御のブロックダイアグラム

とシステム内部で生成された投影画像 P から白色照明下での見かけ C_{est} を推定する．その後、 C_{est} にユーザにより定義される画像処理を施して目標画像 R を生成し、モデル予測制御 (MPC) によって P を調整することで現実世界の見かけを連続的に操作する．例えば、この見かけの制御の画像処理部分に彩度強調や色彩除去、色相シフトなど所望のアルゴリズムを実装することで、図2に示すように現実世界の物体の見かけを光投影によって連続的に操作することが可能となる．

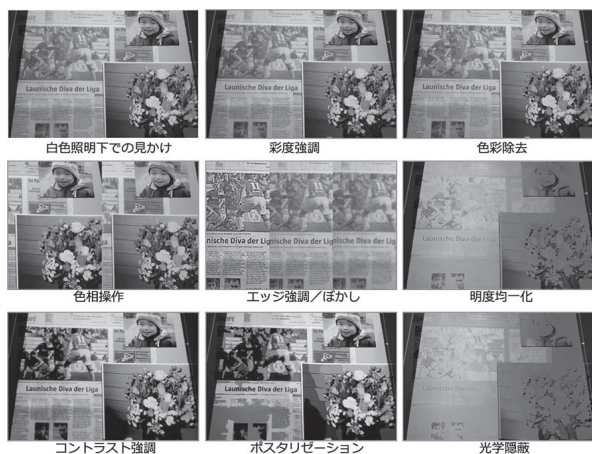


図2 見かけの制御による処理結果
* 口絵にカラー版掲載

4. 認知科学の成果を応用した質感操作

4.1 逆トーンマッピングによる透明感操作

質感脳情報学において「質感認知に関わる感覚情報の特徴と処理様式について研究」を行うB班に計画班として参加している本吉の研究[11]では、非光沢成分のコントラストと鏡面反射の鋭さは視覚による透明物体の識別に大きな影響を与えることを明らかにしている．これは言い換えると、物体像の低周波数成分に対して逆トーンマップを施して画像を再構築すると、不透明物体の見かけが透明に見えるということである．筆者らはこの知見に基づき図3に示す透明感操作手法を提案した．

具体的な処理としては、例えば (a) に示す入力画像の明度成分 I_V にガウシアンフィルタを適用することで

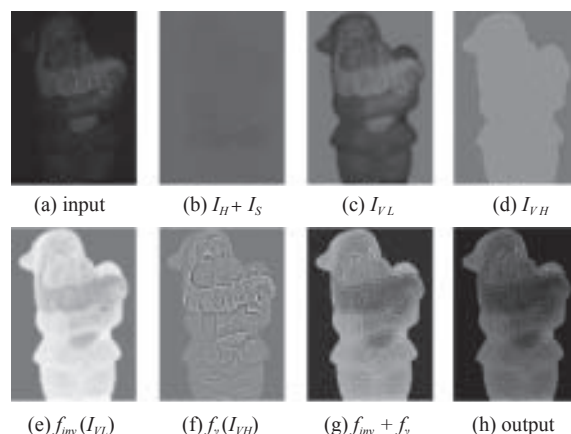


図3 画像処理による透明感の操作

低周波成分 I_{VL} を抽出し (c) , I_V から I_{VL} 減算することで明度成分の高周波成分 I_{VH} を得る (d) . その後、 I_{VL} に、

$$f_{inv}(x) = 1-x \quad (1)$$

による逆トーンマップを適用して明度を反転させる (e) .

また、 I_{VH} についてはコントラスト強調

$$f_{\gamma}(x) = x^{\gamma} \quad (2)$$

を適用し (f) , これらの結果を加算することで透明感を操作した明度成分 (g) を得る．最後に、これを (b) に示す色相・彩度成分 $I_H + I_S$ と合成することで出力 (h) を得る．

4.2 ヒストグラムのひずみ操作による光沢感操作

本吉らの別の研究[12]では、輝度ヒストグラムの歪みと画像のサブバンド・フィルタ出力の歪みが表面の光沢と相関し、物体表面の拡散反射率と負の相関を持つことが示されている．つまり、入力画像に適切なトーンカーブを適応し、出力画像の明度ヒストグラムに正の歪みを持つ分布が得られれば、入力画像として与えられたマットな物体の見かけ物体像に光沢を与えることができることが期待できる．筆者らは、この知見に基づき光沢感操作手法も提案している．

例えば、出力画像の明度ヒストグラムを操作するためには、透明感の操作と同様に図4 (a) に示す入力画像の明度成分 I_V に対して正の歪みを生成するトーンカーブを適用すればよいが、 I_V のヒストグラムも画像により様々

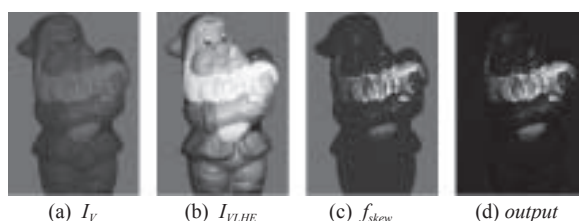


図4 画像処理による光沢感の操作

であり、適したトーンカーブは画像毎異なる。そこで、提案手法では、まず I_r に対してヒストグラム平坦化を行い、 I_{rHE} を得る (b)。その後、トーンマッピング

$$f_{skew}(x) = (1-\beta) x^{\gamma_g} + \beta \quad (3)$$

を施して出力画像の明度成分 (c) を得る。最後に、 I_H 成分、 I_S 成分と合成して出力 (d) を得る。

このようにヒストグラム平坦化を施すことによって、出力画像の明度ヒストグラムは常に

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x < \beta \\ \frac{1}{\gamma_g(1-\beta)^{1/\gamma_g}} (x-\beta) x^{\frac{1-\gamma_g}{\gamma_g}}, & x \geq \beta \end{cases} \quad (4)$$

となり、正の歪度を持つことが保証される。

本研究ではこのトーンマップのパラメータ β, γ_g を調整することで入力画像の光沢感の操作を試みた。

5. 質感操作結果

5.1 瞳位置が一致したプロジェクタカメラ系

1600x1200 画素のカメラと 2500lm, Full HD 液晶プロジェクタを用いて図 5 に示す光学系を試作した。この光学系では、プレート型ビームスプリッタによってプロジェクタとカメラを光学的に同じ位置に配置することが可能であり、投影対象によらず投影画像とキャプチャ画像の画素対応が一定となる。従って、この光学系に先に述べた質感操作アルゴリズムを実装すれば、操作対象の形状モデルを用意することなく、連続的に投影対象の透明感や光沢感を操作することが可能となる。もちろん、投影画像の位置合わせも必要としない。

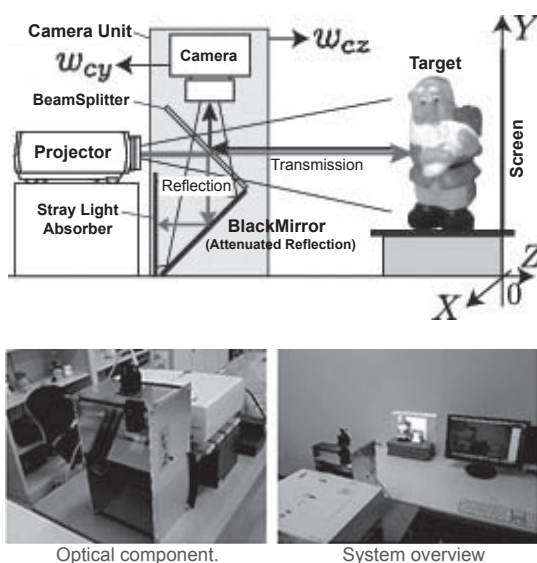


図 5 瞳位置が一致したプロジェクタカメラ系

しかし、プロジェクタからの投影光はビームスプリッタの反射率に応じて筐体下方に反射される。この光がカメラの視野範囲で拡散反射すると撮影像が白濁し、制御性能が低下する。そこで、この光学系ではビームスプリッタ下方の黒色ガラス板で迷光を減衰反射させ、その先の植毛紙で吸収する効果的な迷光処理を採用した。

5.2 透明感の操作結果

コントラストパラメータを $\gamma_t = 2.0$ とし、混合パラメータ α を変化させて透明感を操作した結果を図 6 に示す。この結果を見ると、 α の増加とともに、小人 (上段左、陶器、ラッカー仕上げ) やクマ (上段右、素焼き) の顔や胴体の輪郭が次第に明るくなっている。このような見かけは表面の拡散反射だけでは説明ができないため、光の屈折や発光などが想起され、透明感の知覚が促されることが期待できる。しかし、いずれの結果においても鏡面反射が提示されていないため光沢のあるガラスのような透明感を与えることは困難である。

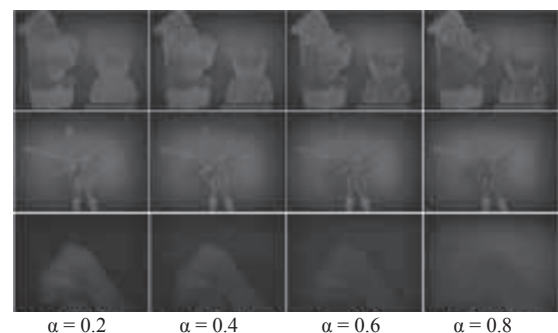


図 6 透明感の操作結果
* 口絵にカラー版掲載

処理結果に鏡面反射が提示されない原因は、いずれの投影対象も本来の見かけに強い鏡面反射成分を持たないことにある。この解決方法としては形状推定に基づく擬似的な光沢付与が考えられる。

5.3 光沢感の操作結果

明度ヒストグラムにおける歪度を変化させて対象の見かけを制御した結果 (図 7) を見ると、 γ_g の増加とともに見かけの光沢感が強くなっており、特に、クマの顔や胴体では美しい光沢が提示できていることが確認できる。

しかし、小人の顔や胴体では γ_g の増加とともに黒潰れが発生している。原因は領域ごとに反射率が異なり、トーンカーブが均一に適用されなかったためである。この解決方法としては色彩の領域ごとに処理を行う方法や、アルベドを事前に分離しておく方法が考えられる。

本稿で紹介した結果は、いずれも OpenMP, OpenGL, OpenCV などのライブラリを用いて Xeon ベースのマルチコア PC (12Core Mac Pro 2.4GHz) で並列実装したものであり、処理速度は 8fps 程度であった。

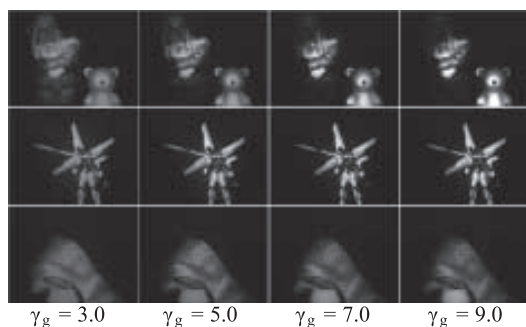


図 7 光沢感の操作結果
* 口絵にカラー版掲載

6. おわりに

質感を光学的に操作するプロジェクションディスプレイ技術は、テーマパークや博物館、シアター、ショーウィンドウでの演出など、多くの場面への利用が期待できるが、その普及のためには扱いやすいことが重要である。

本研究では、見かけの制御技術に認知科学の知見に基づく画像ベースの質感操作アルゴリズムを導入した。また、入射瞳位置が一致したプロジェクタカメラ系に実装することによって、操作対象のモデル形状モデルや投影光の位置合わせなどを必要とせず、連続的な操作が可能な質感プロジェクションマッピングを実現した。

現在は、操作対象の前面だけでなく、側面や後方についても見かけを操作する全周囲の質感操作、再帰性反射を用いた構造色の質感プロジェクションマッピングについて研究を行っている。今後、機会があればこれらの成果についても報告したい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費、新学術領域研究 (質感脳情報学) 23135523, 25135723 の助成によるものである。

参考文献

- [1] R. Raskar, G. Welch, K.-L. Low, and D. Bandyopadhyay. Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination. In Proc. of the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, pp. 89-102 (2001)
- [2] Y. Mukaigawa, M. Nishiyama, and T. Shakunaga. Virtual photometric environment using projector. In Proceedings of the International Conference on Virtual Systems and

Multimedia, pp. 544-553 (2004)

- [3] T. Okazaki, T. Okatani, and K. Deguchi. A projector-camera system for high-quality synthesis of virtual reflectance on real object surfaces. IPSJ Tran. on Computer Vision and Applications, 2, pp. 71-83 (2010)
- [4] O. Bimber and D. Iwai. Superimposing dynamic range. ACM Trans. Graph, 27 (5) :150:1-150:8 (Dec. 2008)
- [5] T. Amano and H. Kato. Appearance control using projection with model predictive control. In Proc. of ICPR, pp. 2832-2835 (2010)
- [6] D. G. Aliaga, A. J. Law, and Y. H. Yeung. A virtual restoration stage for real-world objects. ACM Trans. Graph., 27(5):149:1-149:10 (Dec. 2008)
- [7] S. Shimazu, D. Iwai, and K. Sato. 3d high dynamic range display system. In Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, ISMAR'11, pp. 235-236 (2011)
- [8] S. K. Nayar, H. Peri, M. D. Grossberg, and P. N. Belhumeur. A projection system with radiometric compensation for screen imperfections. In IEEE International Workshop on Projector Camera Systems (2003)
- [9] M. D. Grossberg, H. Peri, S. K. Nayar, and P. N. Belhumeur. Making one object look like another: Controlling appearance using a projector-camera system. In Proc. IEEE Conf. CVPR, vol.1, pp.452-459 (2004)
- [10] K. Fujii, M. D. Grossberg, and S. K. Nayar. A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments. In Proc. of the CVPR, volume 2, p. 1180 (2005)
- [11] I. Motoyoshi. Highlight-shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials. J Vis, 10 (9) :6 (2010)
- [12] I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan, and E. H. Adelson. Image statistics and the perception of surface qualities. Nature, 447:pp. 206-209 (Apr. 2007)

【略歴】

天野敏之 (AMANO Toshiyuki)

和歌山大学システム工学研究科知的計測クラスタ准教授。2000 年大阪大学大学院博士後期課程修了。同年名古屋工大助手、2007 年奈良先端大助教、2011 年山形大准教授を経て 2012 年 10 月より現職。パターン認識、コンピュータビジョン、拡張現実感に興味を持つ。現在の専門はプロジェクタカメラ系による拡張現実感。