映像情報メディア学会誌 Vol. 68, No. 12, pp. J528～J533（2014）
© 2014 一般社団法人映像情報メディア学会

論 文

論文特集 ■ 質感の科学-色覚・色彩科学の観点から

プロジェクタカメラ系を用いた光沢感と透明感の実時間操作

Real-time Manipulation of Glossiness and Transparency using a Projector Camera System

天 野 敏 之†

Toshiyuki Amano†

あらまし プロジェクションディスプレイ技術を応用した質感操作技術は，テーマパークや美術館での演出，プロダクトデザイン補助，さらには宝飾品のライトアップなど，様々な応用が期待できる．しかし，既存のプロジェクションディスプレイ技術による質感操作は，投影対象のモデルが必要であるうえに投影像の位置合わせも必要であり，利用者には多大な手間が要求される．そこで，本論文では認知科学により得られた知見に基づく画像処理アルゴリズムを提案し，Fujii らが提案している投影中心が一致したプロジェクタ・カメラ系と筆者らが提案している見かけの操作技術へ実装することで透明感と光沢感を光投影によって連続的に操作する方法を提案する．実験では，陶器やプラスチック，シルクへの適用結果を示し，提案手法の有効性を考察する．さらに，本論文ではプロジェクションディスプレイ技術を応用した質感操作の限界について述べる．

キーワード： 空間型拡張現実感，質感操作，プロジェクタカメラ系

1. ま え が き

プロジェクタを用いたプロジェクションディスプレイ技術は，光投影によって実世界に直接働きかけることができる空間型拡張現実感技術であり，鑑賞のために頭部装着ディスプレイや携帯ディスプレイ装置を必要としない．そのため，色鮮やかな演出によって人々を魅了するプロジェクションマッピングのように，パブリックビューイング環境における大規模構造物への応用も容易に実現できる．

プロジェクションマッピングのように光投影による演出が可能となるのは，物体の見かけは双方向反射率分布関数 (BRDF) などで表される反射特性だけでなく，照射される光によっても変化するためである．すなわち，光投影によって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，これによって物体の見かけから知覚される印象や質感を操作することも可能となる．

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の先駆けとしては，Raskar ら[13]が行った Shader Lamps がよく知られている．この研究では位置合わせをした複数のプロジェクタからの映像投影によって，白色のタージ・マハルの模型上に外壁のテクスチャを表示させた．さらに，日照条件の変化に対する陰影アニメーションを提示するなど，プロジェクションディスプレイの基礎技術を確立した．

一方，プロジェクションディスプレイの研究では質感を操作する試みもなされている．Mukaigawa ら[10]は投影対象と目標物体の BRDF を考慮した光投影を行うことで，光沢のない陶磁器上で任意の照明環境による陰影や反射特性を再現している．Okazaki ら[12]は位相シフト法と空間コード化パターン投影法を併用した高精度な形状計測により，高品質な金属光沢の表現や波長ごとに反射特性の異なる構造色物体の質感の表現が可能となることを示している．

初期のプロジェクションディスプレイの研究では，ランバート反射かつテクスチャのない物体を投影対象とした投影補償について研究がなされていたが，'00 年代後半頃からはテクスチャを有する物体を投影対象とする研究が行われている．例えば，重畳投影による劣化した遺物の仮想修復[1]や見かけの編集手法[7]が提案されている．また，3D プリンタで印刷されたテクスチャを持つ模型の上にそれと同じテクスチャを重畳することで金属光沢のようにダイナミックレンジの高いテクスチャを表示する手法[14]も提案されている．これらの手法は，物体本来の見かけの強調や変換を目的とするところが投影補償と大きく異なる．

このように，プロジェクションディスプレイ技術は投影対象の形状に合わせて映像を重畳投影するだけではなく，操作対象の反射特性を考慮した緻密な投影を行うことで，物体の美観回復や知覚される質感操作も可能にする．そのため，プロジェクションディスプレイ技術の応用は，プロジェクションマッピングに限定されるものではなく，テーマパークや美術館での演出などのアミューズメント応用，プロダクトデザイン補助や塗装シミュレーションなどのエ

2014 年 7 月 31 日受付，2014 年 9 月 4 日再受付，2014 年 9 月 16 日採録
†和歌山大学 システム工学部
（〒 640-8510 和歌山市栄谷 930, amano@sys.wakayama-u.ac.jp）

ンジニアリング応用，さらには，宝飾品などの商品のライトアップのような商業応用など，多岐に亘る分野での応用が期待できる．

しかし，既存の手法で必要とされる投影対象の形状モデルおよび反射モデル（以後，単に投影対象のモデルという）の生成や投影像の正確な位置合わせなどは，プロジェクタカメラ系を熟知していない利用者においては難解であり，また較正の作業も容易ではない．それだけでなく，投影対象のモデル生成や位置合わせが必要であるということは，操作対象はあらかじめ想定した物に限定されるうえに，投影対象の配置を変更する度に較正が必要となることを意味する．従って，既存手法を前述の応用へ用いた場合，利用者には多大な手間が要求される．

そこで，本研究では認知科学により得られた知見に基づく画像処理アルゴリズムを提案し，見かけの操作技術へ実装することで透明感と光沢感を光投影によって連続的に操作する方法を提案する．また，提案手法では Fujii らが提案している投影中心が一致したプロジェクタ・カメラ系を採用することで，投影対象のモデル生成や位置わせを必要としない処理を実現する．

2. 関　連　研　究

2.1 プロジェクションディスプレイによる質感操作

前述のプロジェクションディスプレイ技術の多くでは，事前に取得された投影対象のモデルを用いることで目標の見かけを得る投影光を算出するが，このような方法論では表面形状と環境照明による反射解析から投影光を正確に推定するだけでなく，厳密な位置合わせも必要となる．

テーマパークや博物館のように，機材の配置や照明環境の設計が許される状況では，このような方法論は高品質な見かけの操作を実現するうえで有効である．しかし，あらかじめ展示環境を設計することが困難な場合には，利用者の扱いやすさの観点からプロジェクタカメラを用いた適応的な補償[6)11)15)]を用いた方法論が適している．特に，投影中心が一致した同軸の光学系を用いれば，投影対象毎に幾何学較正を行う必要もない[5)]．

一方，プロジェクションディスプレイの研究では，プロジェクタとカメラを併用することで，物体本来の見かけを操作する手法も提案されている．Superimposed Dynamic Range[4)]では印刷媒体に重畳投影を行うことによって印刷媒体もしくは投影ディスプレイのみでは実現できない高ダイナミックレンジ表示を実現した．また，筆者らが提案した見かけの制御[3)]ではプロジェクタカメラフィードバックに反射率推定とモデル予測制御を用いることで，フォトレタッチソフトを操るように実世界の見かけを動的に操作する見かけの制御を提案している (**図 1**)．

このようなアプローチでは投影画像はキャプチャされた画像から適応的に生成される．そのため，質感操作を実現する画像処理アルゴリズムが与えられるのであれば，投影

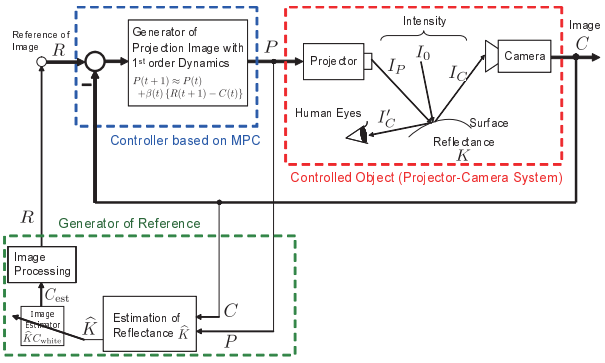


図 1　モデル予測制御を用いた見かけの制御

画像を事前に生成する必要はなく，操作対象はあらかじめ想定したものに限定されない．

2.2 見かけの制御[3)]

見かけの制御では，投影画像とキャプチャ画像のある対応する画素において，$I_0 \in \mathbb{R}^3$ と $I_P \in \mathbb{R}^3$ を RGB のカラーベクトルとして表現された環境照明と投影光とする．このとき，物体表面で反射され，カメラに入射される光を

$$I_C = K(I_P + I_0) \tag{1}$$

として表現する．ただし，$K \in \mathbb{R}^{3\times3}$ は RGB 成分で表現された物体表面の反射率であり，対角行列で表現する．また，撮影画像 $C \in \mathbb{R}^3$ とプロジェクタからの投影画像 $P \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ $C \propto I_C$，$P \propto I_P$ と仮定し，プロジェクタとカメラの色空間は事前に色混合行列で整合されているものとする．

目標画像の生成部 (Generator of Reference) では，まず

$$\hat{K} = diag\,[C./\{(C_{full} - C_0) \odot P + C_0\}] \tag{2}$$

として反射率を推定する．ただし，$C_{full} \in \mathbb{R}^3$ と $C_0 \in \mathbb{R}^3$ は最大および最小の輝度の光がプロジェクタから投影されたときに撮影された画像，./ と $\odot$ は要素ごとの除算と積算を意味する．そして，この $\hat{K} \in \mathbb{R}^{3\times3}$ と白色基準面に白色光を投影したときに取得される画像 $C_{white} \in \mathbb{R}^3$ を用いて，白色照明下での物体の見た目

$$C_{est} = \hat{K} C_{white}, \tag{3}$$

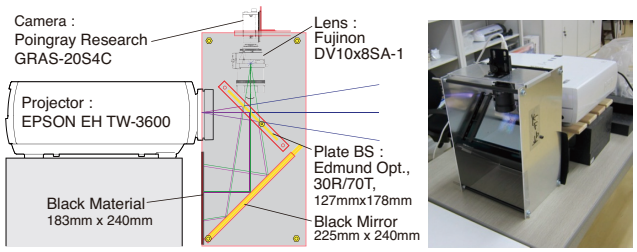
を推定し，この C_{est} に対して所望の画像処理 (Image Processing) を適用することで目標画像 R を得る．そして，制御部では R と C の偏差を減少させるように，モデル予測制御によって投影画像 P を調整する．

見かけの制御ではこのような処理を画素並列で実行することによって，投影対象のモデルや投影画像の位置合わせを必要としない，適応的な見かけの操作を実現する．

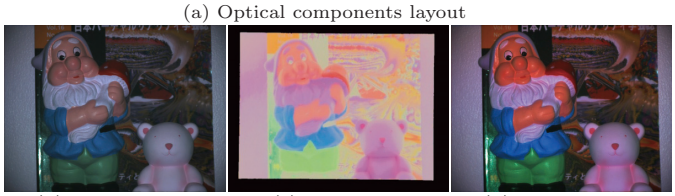
3. 提　案　手　法

3.1 投影中心が一致したプロジェクタカメラ系

本研究では投影中心が一致した同軸光学系として**図 2**(a) に示すプロジェクタカメラ系を用いる．この光学系では，

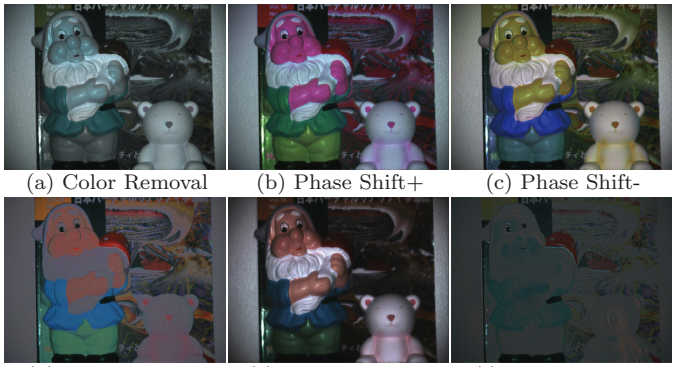


(a) Optical components layout



(b) Target Scene (c) Projection (d) Manipulated

図 2 投影中心が一致したプロジェクタカメラ系



(a) Color Removal (b) Phase Shift+ (c) Phase Shift-

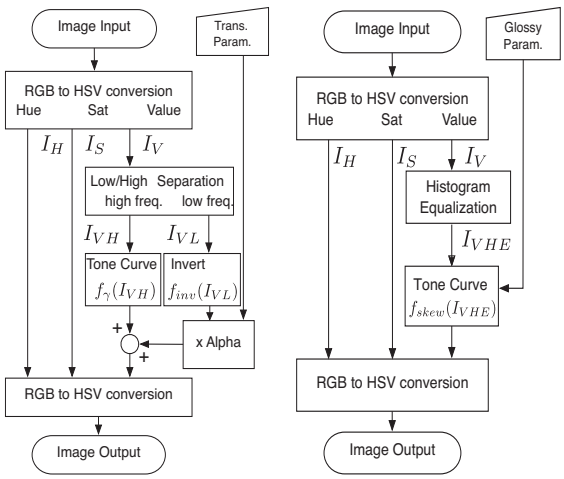
(d) Brightness EQ (e) Contrast Boost (f) Optical Hiding

図 3 さまざまな見かけの操作結果

(b) のようにキャプチャされたシーンに対して，あらかじめ求めた投影画像とキャプチャ画像の画素の対応 (ピクセルマップ) に基づき (c) のように映像を投影することで，シーンの見かけを (d) のように操作することができる．このとき，プロジェクタとカメラの投影中心は光学的に一致しているため，投影対象の形状や距離にかかわらずピクセルマップは不変である．そのため，投影対象のモデルを用意する必要はない．また，投影画像の位置合わせも不要である．

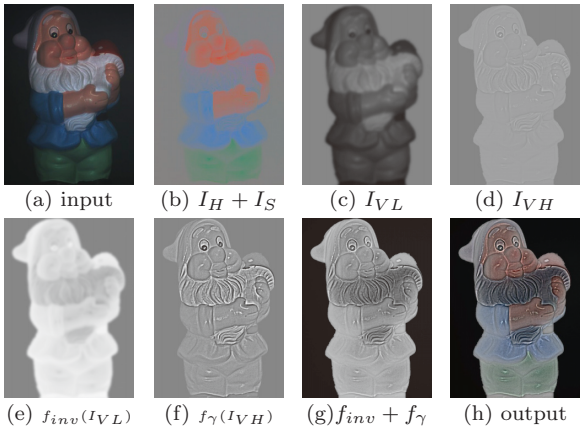
カメラとプロジェクタの投影中心の位置は，プロジェクタより校正パターンをスリット状に切り抜かれたスクリーンへ投影し，カメラで撮影された画像において，校正パターンが連続するようにカメラの位置を調整することで一致させることができる．また，高精度な位置合わせが要求される場合には，プロジェクタカメラフィードバックを応用した手法を用いることでサブピクセル精度の位置合わせ実現することもできる[2]．

この光学系に動的な見かけの操作を実装し，所望の画像処理によって R を生成すれば，**図 3** のように操作対象の見かけを自在に操作することができる．ただし，プロジェクタから投影される光束の密度は距離の二乗に反比例する．ここで，投影光の照度について逆二乗の法則を考慮すると，見かけの制御により推定される反射率はプロジェクタから d_0 離れた位置で推定される反射率 $\hat{K}(d_0)$ に対して距離 d



(a) Translucency (b) Glossiness

図 4 画像処理に基づく質感操作



(a) input (b) $I_H + I_S$ (c) I_{VL} (d) I_{VH}

(e) $f_{inv}(I_{VL})$ (f) $f_\gamma(I_{VH})$ (g) $f_{inv} + f_\gamma$ (h) output

図 5 透明感操作の詳細

では

$$\hat{K}(d) = \left\{ \frac{{d_0}^2}{d^2} + \left(1 - \frac{{d_0}^2}{d^2}\right) \frac{I_0}{I_P + I_0} \right\} \hat{K}(d_0) \quad (4)$$

と推定されることがわかる．しかし，$I_0 \ll I_P$ が仮定できればプロジェクタからの距離の自乗に反比例した相対的な反射率 $(d_0/d)^2\hat{K}(d_0)$ が推定されるため，$\hat{K}$ に適切なゲインを設定することで非平面物体についても既存の見かけの制御を適用することができる．

3.2 透明感操作

近年，視覚心理の研究において Motoyoshi[8] は非光沢成分のコントラストと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示している．具体的には，物体像の低周波数成分に対して逆トーンマップ変換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を示した．我々はこの視覚特性に基づき，**図 4**(a) に示す透明感操作手法を提案する．ただし，Motoyoshi らの研究ではモノクロ画像を刺激提示に使用していて，色彩の影響については言及していない．そこで，本研究では図に示すように HSV 変換により分離した明度成分 I_V についてトーンマッピングを施した．

具体的には，**図 5** のように I_V に Gaussian カーネルに

(a) I_V　(b) I_{VLHE}　(c) f_{skew}　(d) output

図 6　光沢感操作の詳細

よるぼかし処理を適用することで低周波数成分 I_{VL} を抽出 (c) し，I_V から I_{VL} を減算することで高周波数成分 I_{VH} を得る (d)．その後，I_{VL} に対して逆トーンマッピング

$$f_{inv}(x) = 1 - x \tag{5}$$

を適用する (e)．また，I_{VH} に対してはコントラスト強調

$$f_{\gamma}(x) = x^{\gamma_t} \tag{6}$$

を適用する (f)．その後，$f_{inv}(\cdot)$ と $f_{\gamma}(\cdot)$ を混合比 α で合成する (g)．最後に，色相と彩度成分 (b) と合成することで出力を得る (h)．

本研究では，この処理を図 1 の白色での見かけ C_{est} に対して施し，得られた出力を目標画像 R としてプロジェクタカメラ系を制御することで透明感の操作を試みる．

3.3　光沢感操作

Motoyoshi ら[9]は別の研究において，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を示した．この知見に基づけば，単調性を満たすトーンマッピングによって変換後の画像の輝度ヒストグラムに正の歪みをもつ分布が生成できれば，マットな物体の見かけに光沢を与えることができることが期待できる．このアイデアに基づき，図 4(b) に示す光沢感操作手法を提案する．

目標とするヒストグラムが与えられるのであれば，単調性の制約によってトーンマッピングを一意に決定することができる．しかし，入力される物体像のヒストグラムは多様であり，キャプチャされたフレームごとに適切なトーンマッピングを算出する必要が生じる．そこで本研究では，はじめに I_V(**図 6**(a)) に対してヒストグラム平坦化を行い，I_{VLHE} を得る (b)．その後，トーンマッピング

$$f_{skew}(x) = (1-\beta)x^{\gamma_g} + \beta \tag{7}$$

を施し (c)，得られた明度成分と H,S 成分を合成して出力を得る (d)．ただし，γ_g と β は歪度および明度オフセットの制御パラメータである．

このように，ヒストグラム平坦化を行った上でトーンマッピング $f_{skew}(x)$ 施せば，出力画像の明度 y に対するヒストグラムでは，

$$p(y) = \begin{cases} 0 & (y < \beta) \\ \frac{1}{\gamma_g(1-\beta)^{1/\gamma_g}}(y-\beta)^{\frac{1-\gamma_g}{\gamma_g}} & otherwise \end{cases} \tag{8}$$

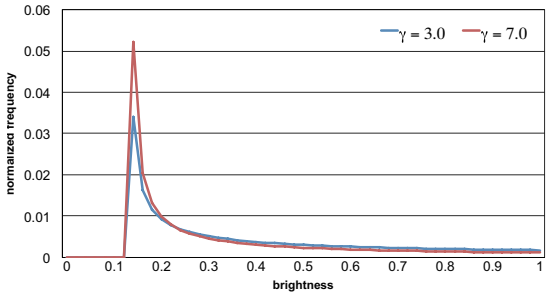


図 7　光沢感操作を施した画像の輝度ヒストグラム

(a) 陶器　(b) プラスチック　(c) シルク

図 8　操作対象

となる正の歪度をもつことが保証される．例えば，$\gamma_g = 3.0$ もしくは $\gamma_g = 7.0$，$\beta = 0.125$ とすると，光沢感操作を施した画像の輝度ヒストグラムは必ず**図 7** のようになる．

4.　実装結果および考察

実験では図 2 で示したプロジェクタカメラ系を用いた．このプロジェクタカメラ系は，1600x1200 画素 IEEE1394 カメラと 2500lm，Full HD 3LCD プロジェクタで構成される．制御用 PC には Xeon ベースのマルチコア PC(12Core Mac Pro 2.4GHz) を用い，提案手法を OpenMP で並列実装したところ，質感操作の処理速度は 8fps 程度であった．

また，質感操作実験は，外光が入らない室内照明下で行い，プロジェクタカメラ系から 1m 程度離した位置へ**図 8** に示す操作対象を配置した．この設定では，室内照明による操作対象表面の照度は 350lux であった．これに対してプロジェクタから白色光を投影した状態では 3930lux であり，前述の条件 $I_0 \ll I_p$ を満足することが確認された．

4.1　透明感の操作

はじめに，C に飽和や黒潰れが発生しないように操作対象との距離に応じて R のゲインを調整することで I_p の強度を調整した．この状態において，コントラスト強調パラメータを $\gamma_t = 2.0$ とし，混合パラメータを $\alpha = 0, 0.4, 0.8$ と変化させたところ，**図 9** に示す結果が得られた．

図 9 上段の結果を見ると，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，陶器）の顔や胴体の輪郭が次第に明るくなる一方，中心部は反対に暗くなっている．

図 8(a) に示した白色照明環境での見かけを見ると，頭部および胴体の部分でアタッチドシャドウによって周辺部に向かって連続的に明度が低下している様子が見られるが，このことは，**図 10** に示す $A - A'$ 断面 (クマの頭部および胴体) の明度分布 (White Illumination) からも確認できる．

$\alpha = 0$　　$\alpha = 0.4$　　$\alpha = 0.8$

図 9　透明感のパラメトリック操作結果

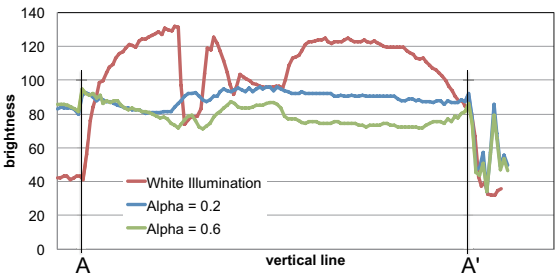


図 10　透明感の操作による明度変化

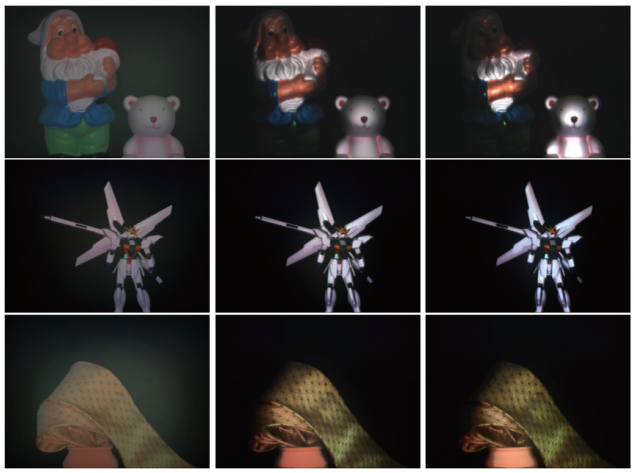
これに対し，$\alpha = 0.2, 0.6$ として透明感操作を適用した結果では，White Illumination とは凹凸が反対になった明度分布が得られており，Motoyoshi の研究[8] と同様の操作を光投影によって現実物体の上に再現することができていることが確認できる．

図 9 の中段および下段の結果を見ると，プラスチックや布地に対しても同様に低周波成分の位相を反転することができていることが確認できる．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クリアな透明感を与えることは困難であった．このように鏡面反射が提示されない原因は，図 10 からわかるように，いずれの操作対象もキャプチャ画像に強い鏡面反射によるスペキュラを含まないことにある．この問題の解決方法としては，4.3 で述べる光沢物体で発生するスペキュラを積極的に活用する方法などが考えられる．

4.2　光沢感の操作

輝度ヒストグラムにおける歪度を変化させ，提案手法により操作対象の光沢感を操作した．その結果，**図 11** に示すように操作パラメータ γ_g の増加とともに見かけの光沢感が強くなる様子が確認された．

図 8(a) に示した白色照明下と $\gamma_g = 7.0$ で光沢感を操作した結果 (図 11，上段 3 列目) について，キャプチャ画像の輝度ヒストグラムを求めた結果を**図 12** に示す．これらの結果比較すると，処理前 (Original) では，明度 (brightness)0.24 付近を中心とする幅の狭い分布と，0.3 から 0.7



$\gamma_g = 1.0$　　$\gamma_g = 5.0$　　$\gamma_g = 9.0$

図 11　光沢感のパラメトリック操作結果

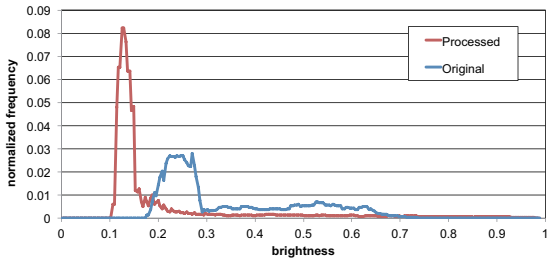


図 12　光沢感の操作による輝度ヒストグラムの変化

(a) 環境照明　　(b) 明度均一化　　(c) 透明感操作結果

図 13　鏡面反射を有する物体に対する質感操作

に亘る幅の広い分布が見られるが，処理後 (Proposed) では図 7 に示した分布と同様に明度 0.125 付近がピークとなる正の歪みを持つ単一の分布となっている．この結果より，Motoyoshi ら[9] が光沢感の知覚に関する実験で行った画像操作と同等の操作が光投影によって現実物体へ適用できていることが確認できる．

4.3　鏡面反射を有する物体に対する質感操作

提案手法による透明感および光沢感の操作は，4.1 および 4.2 で示したように，陶器，プラスチック，シルクなど，様々な物体に適用することができる．しかし，環境照明によって発生するスペキュラの輝度は拡散反射成分と比べて非常に強いため**図 13**(a) のように強い光沢を持つ物体に適用することは困難である．

例えば，図 13(b) のように見かけの操作で同一の明度となるように明度均一化の処理を施しても，鼻や耳，拳などで発生するスペキュラの影響を除去することは容易でない．そのため，提案手法では光沢を持つ物体の見かけを非光沢物体のように変化させることは困難である．

また，見かけの操作ではスペキュラによって生じた反射率の推定誤差によってダークスポットが発生する問題がある．具体的には，スペキュラが発生している部分では反射率が高く推定されるが，このスペキュラによる影響は Phong や Blinn-Phong のモデルなどから想像できるように，輝度が飽和している画素のみではなく，その近辺の領域にも影響を及ぼす．そのため，スペキュラとその周辺の反射率が高く推定され，この推定結果を用いて透明感の操作を行うと図 13(c) のように鼻や腹部中央などスペキュラが発生している部分とその周辺の投影が暗くなる．

しかし，耳や拳の部分のように低周波成分の逆トーンマッピングによって与えられる目標明度が暗い場合はダークスポットが発生しないだけでなく，環境照明により発生したスペキュラを利用することでクリアな透明感を提示することが可能となることが期待できる．

4.4　表面色と開口色について

提案手法による質感操作は，光投影を用いているために環境照明による物体の明るさよりも暗い見かけにすることはできないという制限がある．もちろん，操作後の物体の平均明度を上げて相対的に負の明るさを表示する方法が考えられるが，そのために周囲と独立して物体のみを明るくすると，物体の色彩は物体固有の反射率に起因する表面色ではなく，青空の青のように位置や距離が特定されない開口色として知覚される恐れがある．

この知覚特性は色彩に依存するが，表面色から開口色へ遷移する閾値の上限は物体の明るさが周囲の明るさの 1.8 倍程度であるとされている[16]．このような遷移は提案手法のみならずプロジェクションディスプレイ全般について言えることでもあるが，この表面色から開口色への遷移は提案手法による質感操作の限界の一つといえる．

5. むすび

プロジェクションディスプレイ技術は多くの分野での利用が期待できるが，この技術を実社会に普及させるためには，その扱いやすさが重要となる．

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，透明感の操作と光沢感の操作を実現した．また，これらの処理を投影中心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，投影対象のモデルや投影光の位置合わせなどを必要としない連続的な質感操作を実現した．

今後の研究では，持ち運びが容易な一体化したプロジェクタカメラユニットを複数製作し，操作対象を取り囲むように投影することで，制御対象の全周囲に対する質感操作も実現する予定である．さらに，見かけの操作の反射率推定に二色性反射モデルを組み込むことによって，強い光沢を持つ物体にも対応するとともに，スペキュラを積極的に利用した質の高い透明感操作も実現する予定である．

謝辞 本研究の成果は，文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究，質感脳情報学（課題番号　23135523，25135723）の助成によるものである．

〔文　献〕

1）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)
2）T. Amano. Projection center calibration for a co-located projector camera system. In Proc.IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, PP. 443–448 (June 2014)
3）T. Amano and H. Kato. Appearance control using projection with model predictive control. In Proc. of ICPR, PP. 2832–2835. IEEE Computer Society (2010)
4）O. Bimber and D. Iwai. Superimposing dynamic range. ACM Trans. Graph., 27(5):150:1–150:8 (Dec. 2008)
5）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, **2**, P. 1180 (2005)
6）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. Computer Vision and Pattern Recognition, **1**, PP. 452–459 (2004)
7）A. J. Law, D. G. Aliaga, B. Sajadi, A. Majumder, and Z. Pizlo. Perceptually based appearance modification for compliant appearance editing. Computer Graphics Forum, 30(8):2288–2300 (2011)
8）I. Motoyoshi. Highlight-shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials. J Vis, 10(9):6 (2010)
9）I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan, and E. H. Adelson. Image statistics and the perception of surface qualities. Nature, 447:206–209 (Apr. 2007)
10）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)
11）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)
12）T. Okazaki, T. Okatani, and K. Deguchi. A projector-camera system for high-quality synthesis of virtual reflectance on real object surfaces. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2:71–83 (2010)
13）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)
14）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)
15）C. H. T. Yoshida and K. Sato. A virtual color reconstruction system for real heritage with light projection. In Proc. of VSMM, PP. 1–7 (2003)
16）Y. Yamauchi and K. Uchikawa. Depth information affects judgment of the surface-color mode appearance. Journal of Vision, 5(6) (2005)

天野（あまの）　敏之（としゆき）　2000 年，大阪大学博士後期課程修了．2000 年，名古屋工業大学助手．奈良先端科学技術大学院大学助教，山形大学工学部准教授を経て，現在，和歌山大学システム工学部准教授．その間，2009 年，バウハウス大学客員研究員，2011 年，ヨハネス・ケプラー大学招聘研究員．博士 (工学)．パターン認識，コンピュータビジョン，拡張現実感の研究に従事．