

質感と工学

津村 徳道^{*,†}・平井 経太^{*}・山本 昇志^{**}・中口 俊哉^{*}・三宅 洋一^{***}

Appearance Reproduction for Engineering

Norimichi TSUMURA^{*,†}, Keita HIRAI^{*}, Shoji YAMAMOTO^{**}, Toshiya NAKAGUCHI^{*} and Yoichi MIYAKE^{***}

With the recent progress of broad-band network, accurate appearance reproduction across the various environments is required for objects in various applications such as e-commerce, designing process, and tele-medicine. Multispectral imaging techniques are expected to perform the cross-environment color reproduction for objects. However, color is just one attribute for appearance of the objects. Other attributes such as glossiness, graininess and translucency should be also considered for practical cross-environment appearance reproduction. In this report, a frame-work for appearance reproduction is introduced with relating the computer graphics, computer vision, and image processing techniques. The case studies are introduced for skin appearance reproduction, appearance control using projector, video quality assessment on display.

Key words: computer vision, computer graphics, image analysis and synthesis, subjective evaluation

飛行機により世界が狭くなったように、情報技術の急速な発展により世界の時間が速く進むようになった。製造業では商品の開発サイクルが短くなり、また消費者の個性的な嗜好の変遷を反映した商品の提供が求められている。このとき、商品の色や質感は、商品の印象を大きく左右する重要な要素のひとつである。開発段階においては、色や質感は、数値的な値ではなく実際に物体を観察することでのみ評価されることが多い。形状に関しては、モックアップを作成したり、コンピューターグラフィックスにより表示したりすることにより、試作前にある程度評価は可能である。しかし、色や質感に関しては、その表示デバイス依存性、照明環境依存性や、色や質感の正確な表現技術の未成熟さ等から、試作前の評価は困難であり、開発サイクルにおけるボトルネックとなっているケースが多い。したがって、商品の色や質感を予測し、人間の目に観察される画像

として正確に再現することが、現在求められている。さらに、異なる場所（地域）に所在をもつセクションが、ネットワークを介して協調し、商品開発を短いサイクルで実現するためには、ネットワークを介した色や質感の正確な伝送が必要となる。色や質感は観察者の照明などの環境に大きく依存するため、異なる環境下間の色や質感の正確な再現が求められている。

異なる環境下間の正確な色再現のために、分光画像を用いた再現方法が開発されている¹⁻¹⁴⁾。物体の各点の分光反射率を、マルチバンドカメラにより計測することにより、任意の照明下の正確な三刺激値を計算することができる。マルチバンドカメラでは、通常5つ以上のカラーフィルターをモノクロ CCD カメラの前に回転フィルターとして用いて撮影し、得られたマルチバンド画像から各点の分光反射率を推定する。しかしながら、色は物体の質感に対する

* 千葉大学大学院融合科学研究科 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

** 東京都立産業技術高等専門学校 (〒116-0003 東京都荒川区南千住 8-17-1)

*** 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

† E-mail: tsumura@faculty.chiba-u.jp

一属性に過ぎない。光沢感、粒状感や透明感などの他の属性も、実用的な質感の再現システムでは考慮する必要がある。

本報告ではまず、質感工学（色や質感）の要素技術とその応用に関わるフレームワークについて、簡単に述べる¹⁵⁾。また、そのフレームワークに従った3つの取り組みについて紹介する。1つ目は、肌の質感と合成方法である。肌画像には色、粒状感（テクスチャ）、透明感という多くの属性が含まれるため、質感に関する研究対象として適切である。次に、プロジェクターを物体への照明と画像情報投影の双方に用いることにより、実物体の質感合成が可能となった事例を紹介する。最後に、視覚特性を考慮した動画像解析手法として、動画像を表示する際のディスプレイにおける動きばやけに関する研究例を紹介する。なお、本稿に含まれていない事例研究については、著者らの解説「デジタルミュージアムのための質感再現」¹⁶⁾に紹介されている。

1. 質感再現のフレームワーク

1.1 質感再現とコンピューターグラフィックス

図1に、試作品の色と質感を評価する流れを非常に単純な図で示す。材料に手を加えることにより試作品が作られ、それをある照明下で人間が観察し、評価する状態を模式的に示している。評価結果がプロセスや材料にフィードバックされ、試作品の改善が行われる。しかし、この試作・評価の過程には多大な労力と時間を要し、開発サイクルのボトルネックとなっている。

コンピューターグラフィックス (CG) 技術を用いることで、図1に示すように、実際に材料から試作することなく、計算機内で加工し、表示デバイスに画像として商品の色や質感が表示することができる。このとき、3D形状を作成し、表面の反射特性を付加する処理を、CGではモデリング (modeling) とよぶ。計算機内で構築された3D物体に、光線追跡などにより計算機内で照明をあて、仮想カメラで撮影する処理をレンダリング (rendering) とよぶ¹⁷⁾。

これまで、光線追跡などによるリアルなレンダリングには、大変な時間を要した。そのため、見る角度を変化させたり照明条件を変化させたりして観察することは困難であった。しかし、近年グラフィックボードに搭載されるグラフィック・プロセッシング・ユニット (GPU) の進化が目覚しく、ビデオレート程度の速さで、異方性や羽毛感などのさまざまな反射特性、さまざまな周囲照明環境下の画像を再現することが可能となった。

これまでCGにおいては、R、G、Bの3色と透明性を

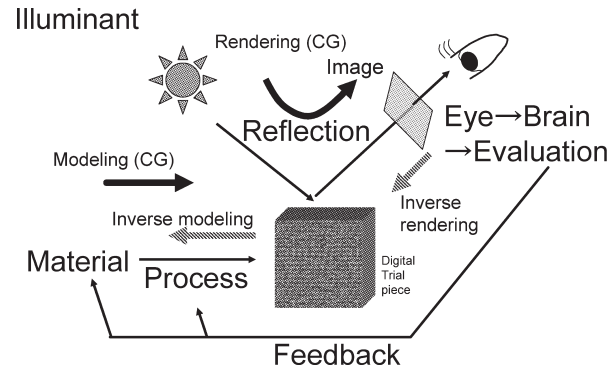


図1 試作品を用いた質感評価の流れとコンピューターグラフィックス、コンピュータービジョン。

決める α の4つの色属性のみで計算されてきた。しかし、周囲照明による色の変化や、物体間の相互反射などの計算では、抽象的な4つの色属性のみでは十分に再現できない。そこで、色の物理情報である分光情報を利用する spectral rendering の機運がCGの分野でも活発になっている¹⁸⁻²¹⁾。プログラミング可能なグラフィックハードウェアの進展にともない、spectral rendering がリアルタイムに実現することが可能になりつつある。この spectral rendering の発展にともない、コンピューターグラフィックスのパーツとして用いられる物体の BRDF やテクスチャーの計測においても、分光画像に基づく計測がますます期待されている²²⁾。

CGで計算される輝度のレンジは、一般のディスプレイに表示可能なレンジを大幅に超えている。このようなハイダイナミックレンジな特性をもつCG画像を、どのように限られたレンジの中でシーン内の光沢感などを損なわずに再現できるかに関して、この約10年間でさまざまな手法が提案されてきた。また、一方では、ディスプレイに表示可能なレンジを広くする開発も行われてきた。本報告では、3章において、プロジェクターを照明かつ画像投影に用いることで光沢などの合成を行う手法を紹介する。

1.2 質感再現とコンピュータービジョン

前節で述べたように、CGを用いたリアルな再現技術が近年急速に充実してきた。しかし、モデリングには多大な時間を要し、また実物の製作は可能であるがプロセスを計算機で書き出すことが不可能な場合も多々ある。たとえば化粧品開発において、顔画像のモデルは非常に重要であるが、実際の顔のようにリアルなものは容易に作成できない。また、個人にカスタマイズした忠実なモデリングなど、より困難である。そこで、撮影された画像または画像群から三次元形状や反射特性を推定する image based modeling が、1990年代後半から活発に研究され実用化さ

れてきた¹⁶⁾。画像から再構成されたモデルに、異なる視点、異なる周囲照明下での画像をレンダリングすることで、簡易にリアルな画像を合成することができる (image based rendering)。これらは画像からシーンを解析するコンピュータビジョン (CV) の技術に応用したものである。

図1におけるインバースレンダリングは、撮影された画像群から、照明や視線の影響のない物体固有の反射特性や3D形状を復元する過程である。インバースモデリングは、さらにその反射特性や3D形状を生成する要素に分解する過程である。物体固有の反射特性や3D形状を復元することにより、さまざまな環境下での画像、反射特性を変化させたときの画像を予測することが可能である。さらに、インバースモデリングにより材料特性まで分解することにより、その材料を変化させた場合の画像の予測が可能となる。CG技術とCV技術を対象に応じて使いこなすことで、簡易にさまざまな製作・観察条件下のリアルな画像を作成することができる。

インバースレンダリングとインバースモデリングにおいて、レンダリングとモデリングのプロセスを厳密に考慮する必要がある。厳密なプロセスは、物理に基づくプロセスであることは明らかである。分光画像に基づく手法は、物理に基づくプロセスのために重要な技術となる。

1.3 質感再現とネットワーク・質感解析

前節までは、作成された画像をその場で観察することを想定して説明してきた。しかし、近年の開発プロセスにおいて、距離による時間短縮のためネットワークを介して遠隔で評価することが求められている。例えば、従来のハードコピーによる色校正は、印刷の色再現を評価したり参照したりするために広く用いられてきたが、実物の移動コストや時間短縮を目的として、正確なデジタルカラープールの利用が印刷業界では大いに期待されている。さらに、電子商取引や遠隔医療では、これが重要な要求となる。このとき、観察する環境により、表示デバイスの特性や、周囲環境が異なる。したがって、これらを考慮した色と質感の再現技術が必要となる。周囲環境光の変化による色の見えの変化に対しては、分光画像を用いた正確な色再現が必要となる。

さらに、開発においては商品の完成具合を視覚的に確認することが一般的であるが、多くの実物体が空間的な照明空間の中で観察されるのに対して、ディスプレイは限定された平面での表示であり、どうしても感覚の一致が困難であった。いわゆる、見えのモードが一致しなかった。また、光沢などの質感は時に非常に高いコントラストを生み出し、現在の高性能ディスプレイにおいても同じ輝度コン

トラストを生成するのは困難である。そこで3章にて、計算機で生成したさまざまな質感を投影画像として他の実物体上に再現する、新たな表示再生技術を紹介する。投影装置はディスプレイと異なり、周囲物体も含めて自在な位置に輝度分布を生成することができるとともに、高コントラストな映像再現が可能である。そのため、製造途中の見本上に質感を投影して、その出来栄をシミュレートすることなどが実現可能となる。本報告ではこの投影画像による再現手法を説明するとともに、色、光沢を実際に再現した結果を紹介する。

これまで、観測者に画像で対象を提示することにより製品の評価を得て、材料やプロセスへのフィードバックを行う枠組みを述べた。このとき、画像や動画像に対して主観的な評価と相関の高い客観的な評価尺度が得られれば、人による評価を省くことができ、より製品開発サイクルを短くすることができる。4章では、視覚特性を考慮した動画像の画質解析手法として、動画像を表示する際の動きぼやけに関する研究例を紹介する。

2. 画像に基づく顔の質感の解析・合成法

肌色の再現は、写真や印刷の分野において従来からもっとも重要であるとされてきた。近年、カメラ付き携帯電話、TV電話、メイクアップアドバイスシステム、遠隔医療システムなどの新しい画像システムの登場により、肌の色の再現は、画像コミュニケーション、メイクアップアドバイス、遠隔医用診断等の多種の応用のためにますます重要となっている。

カメラ付き携帯電話やデジタルカメラに付属のソフトで行われる美白処理等は、画像を明るくしたりする階調変換が主である。この場合、変換された画像は、現実には存在しえない肌色になることがある。欧米人とは異なりアジア人は、化粧に対して自然な肌色の変化をもとめる傾向がある。すなわち、化粧とは、現実には存在しうる好ましい肌色を、化粧品を塗布することにより作り出すことといえる。人間の肌色は、表皮に存在するメラニン色素、真皮に存在するヘモグロビン色素によりほぼ決定される。これらの成分にしたがって肌色を変化させることにより、自然な好ましい肌色を再現することが可能であると考えられる。そこで、メラニン色素とヘモグロビン色素を考慮した物理特性と皮膚生理に基づく画像処理によるe-コスメティック手法を紹介する。

2.1 肌色の制御²³⁻²⁵⁾

図2に手法の全体的な処理の流れを示す。オリジナル画像は、偏光板を組み合わせることで用いることにより、肌の表面

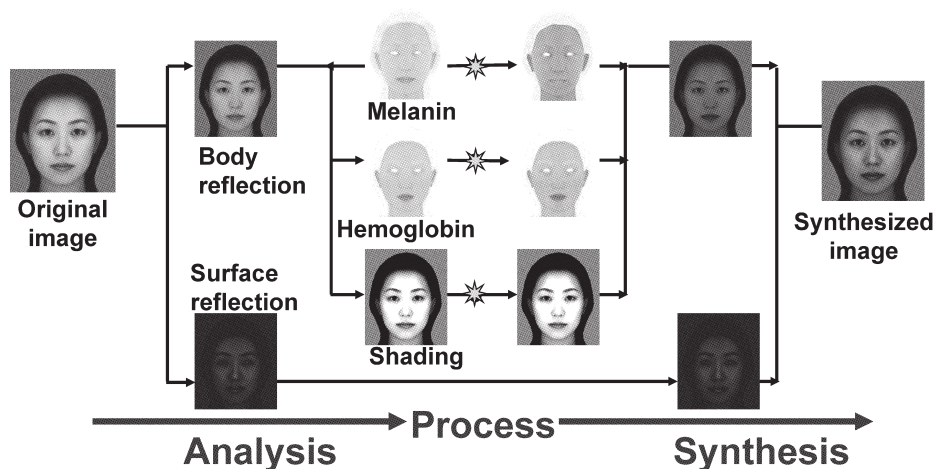


図2 画像に基づく肌の質感解析と合成 (花王(株)と共同)。

のみで反射される表面反射成分と、色素により吸収された後反射される内部反射成分とに分離される。得られた内部反射成分は、陰影除去法を組み込んだ独立成分分析法により、ヘモグロビン成分、メラニン成分、陰影成分に分離される。抽出されたヘモグロビン成分、メラニン成分において、皮膚生理学的画像処理が行われ、変化された成分は再び合成され画像を得ることができる。

上記手法の皮膚生理学的な妥当性を実験により確認した結果を図3に示す。被験者の腕に対して、メラニン成分のために紫外線を照射、また、別の腕に対してヘモグロビン成分のためにニコチン酸メチルを塗布している。ニコチン酸メチルは、ヘモグロビンを増加させることが知られている。紫外線を矩形パターンで照射後、2週間後の腕をデジタルカメラで撮影し、提案する手法で解析している。ニコチン酸メチルを円形パターンに塗布後、30分で同様にデジタルカメラにより撮影し、提案する手法で解析している。図3(a)(b)(c)に紫外線照射に関する結果、図3(d)(e)(f)に、ニコチン酸メチルによる結果を示している。双方とも適切に、メラニン成分、ヘモグロビン成分が抽出されていることがわかる。また陰影も除去されている。これにより、提案する手法の有効性と生理学的妥当性が確認されている。

図4にヘモグロビン成分、メラニン成分量を肌色領域に関して一様に変化させて顔色をさまざまに変化させた画像を示している。図4の真中の画像がオリジナル画像である。陰影の影響を受けず、自然な顔色の合成が実現されていることがわかる。

2.2 肌テクスチャーの制御²⁶⁾

図5に、紹介する肌テクスチャーの解析・合成の流れを示す。本手法では、まず、先に述べた肌の色素成分分離計

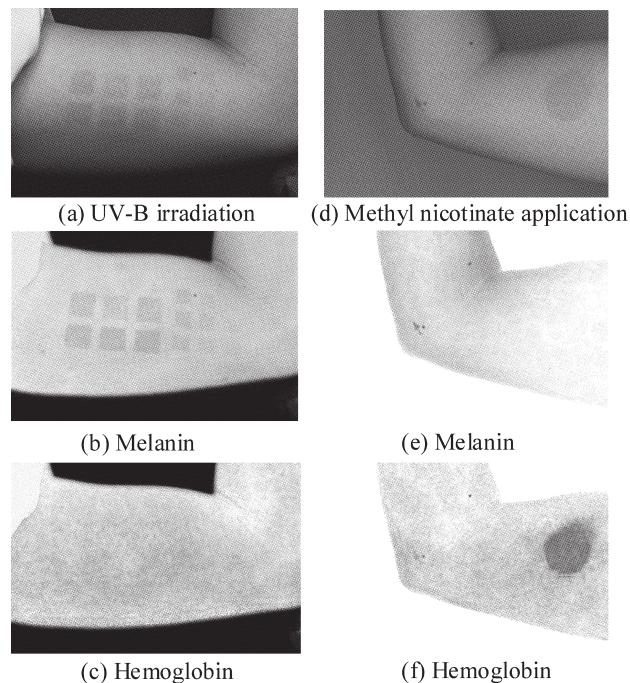


図3 実験結果 (a) 矩形パターンに紫外線照射後2週間の画像、(b)(c) 紫外線照射画像をメラニン、ヘモグロビン色素に分解した画像、(d) 円形パターンにニコチン酸メチルを塗布後30分後の画像、(e)(f) 血流を増加させた塗布画像をメラニン、ヘモグロビン色素に分解した画像。

測法によりメラニン・ヘモグロビン各強度画像を取得している。次に、取得したメラニン強度画像を入力画像として、画像ピラミッドを用いたテクスチャー合成法を適用している。画像ピラミッドは、高解像度から低解像度の画像を階層的に保持したもので、空間分布情報を周波数情報として取得できる。

任意の特徴をもつ肌画像を合成するため、メラニン強度画像において、いくつかの特徴量によるモデル化を行って

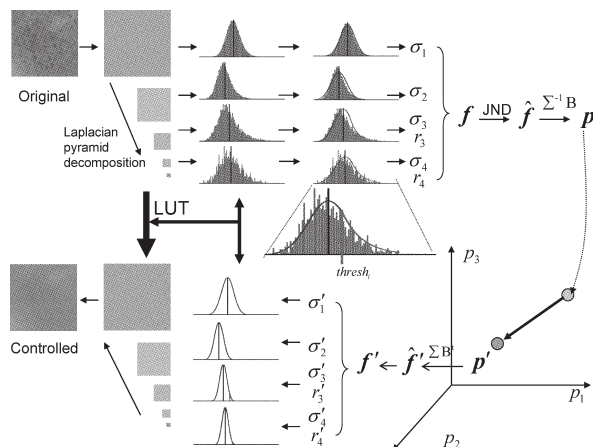


図5 肌のメラニンテクスチャーの解析と合成。

いる。ここでは、得られた各階層のヒストグラムをおもにガウス近似し、その平均・標準偏差等をもって特徴量としている。各画像の特徴量を、視覚的な寄与によって重みづけを行った後、主成分分析の結果得られた特徴空間内で、ベクトルをシフトさせている。シフト後の特徴ベクトルをピラミッド分解と逆の処理を行うことで、特徴空間内で所望の特徴を与えるテクスチャーを合成することができる。

本研究では、加齢変化シミュレーションの実験を行っている。「年齢」の評価値を主成分と結びつけ、主成分空間における視覚的特徴の軸を決定している。これらの軸に沿って主成分を変化させ、肌画像を合成することで任意の印象をもつ肌画像を得る。図6に合成されたメラニン画像を顔全体に反映させた結果を示す。メラニンテクスチャーの変化がリアルにシミュレーションできていることがわかる。

2.3 肌の透明感（陰影）の質感制御²⁷⁾

分離された陰影を制御することで、肌の透明感を制御することができる。肌の透明感は、光の内部散乱による点広が関数 (point spread function, PSF) に起因する。したがって、被写体の陰影とその PSF とのデコンボリューション演算を行うことによって、画像から PSF の影響を取り除くことができる。そして、得られた画像と、予測したい内部散乱特性を表す PSF をコンボリューション演算することによって、新たな内部散乱特性（透明感）をもつ画像を合成することができる。撮影された陰影画像を I 、撮影画像の PSF を PSF_0 、新たに適用する PSF を PSF_1 、合成画像を O とし、フーリエ変換を $\mathcal{F}(\cdot)$ と表すと演算式は次のようになる。

$$\mathcal{F}(O) = \mathcal{F}(I) \div \mathcal{F}(PSF_0) \times \mathcal{F}(PSF_1) \quad (1)$$

PSF の測定のため、白色光源の光を光学系に通し、微小面積に集約して被写体に当て、光の広がる様子をデジタルカメラで撮影する。光源とカメラの角度は 45° とし、偏光板を用いて内部散乱光と表面反射光を分離し、内部散乱光のみを使用する。

測定から得られた PSF を用いることで透明感を制御可能であるが、実際の肌は色素の空間的な分布をもっており、これも内部散乱の影響を受ける。肌のもつおもな色素はメラニン、ヘモグロビンの2つであり、それぞれの分布の層は異なる。表面形状により生じる陰影と、この2つの色素成分はすべて内部散乱により受ける影響が異なるため、提案手法をそのまま肌に適用することはできない。そこで2.1節にて分離されているメラニン、ヘモグロビン、陰影の3つの成分に対して、おもにメラニン、陰影成分に PSF を適用する。図7（上段）に肌画像を、その肌画像に対して測定から得られた PSF をデコンボリューション演算した結果の画像を示す。結果から毛穴などの溝の陰の部分が際立ち、不透明な質感になっていることが見て取れる。このデコンボリューション演算された画像に対して、新たな PSF をコンボリューションすることで新たな透明感の肌画像を合成することができる。上記手法の結果と RGB 各成分一様に PSF をかけた結果を、図7（下段）に示す。これらの画像を比較すると、全体に PSF をかけた画像はピントがずれたような画像となるのに対し、上記手法はメラニン色素分布の情報が比較的残り、リアルな透明感合成ができていていることがわかる。図8に透明感の制御結果を顔に合成した例を示す。

3. プロジェクターを用いた質感再現

製造シミュレーターでは、計算機上で再現した質感を CRT や液晶ディスプレイに表示して、完成具合を視覚的に確認することが一般的であるが、多くの実物体が空間的な照明空間の中で観察されるのに対して、ディスプレイは限定された平面での表示であり、どうしても感覚の一致が困難であった。また、光沢などの質感は時に非常に高いコントラストを生み出し、現在の高性能ディスプレイにおいても同じ輝度コントラストを生成するのは困難である。そこで、計算機で生成したさまざまな質感を投影画像として他の実物体上に再現する、新たな表示再生技術を紹介する。

プロジェクターにより実物体の質感を再現する基本構成を図9に示す。プロジェクターは固定しており、プロジェクターが結像可能な作業台上で物体を観察する構成としている。作業台上には通常、質感を再現する模擬物体のみが

Hemoglobin control



Melanin control



図4 色素変化にともなう肌色の合成.

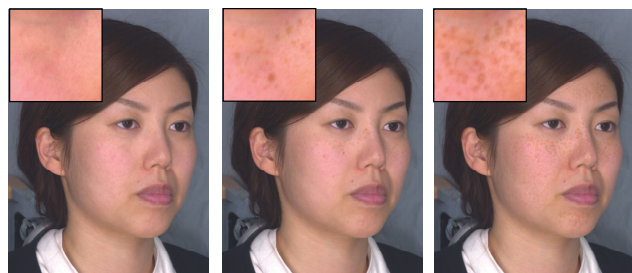
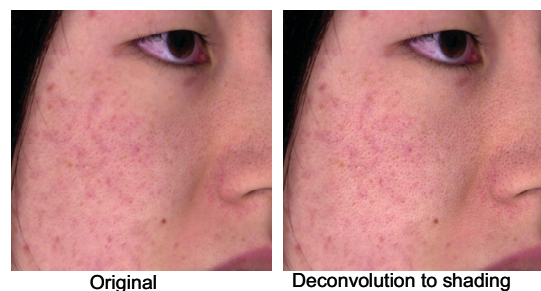
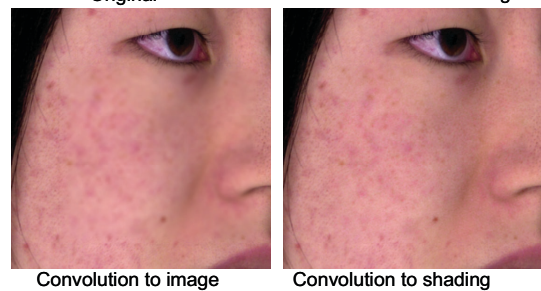


図6 肌のメラニンテクスチャーの合成結果.



Original

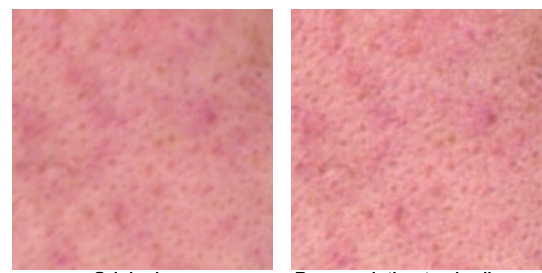
Deconvolution to shading



Convolution to image

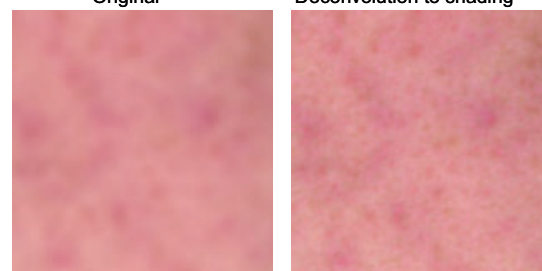
Convolution to shading

図8 肌の透明感の制御 (顔).



Original

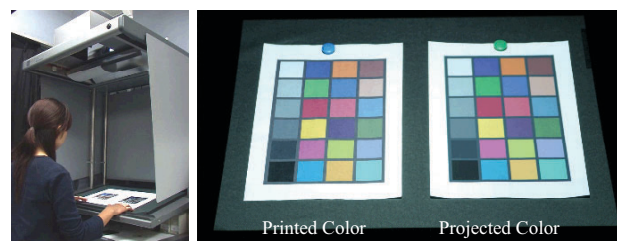
Deconvolution to shading



Convolution to image

Convolution to shading

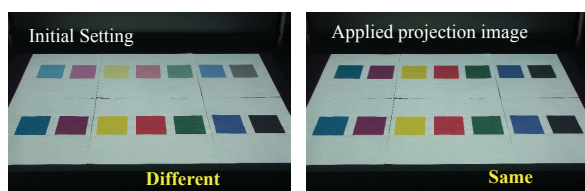
図7 肌の透明感の制御.



Printed Color

Projected Color

図10 投影画像と反射画像の比較 (色校正後).



Initial Setting

Applied projection image

Different

Same

図11 分光情報を考慮した色再現結果.



Colored paper White mat paper

White illumination Additional appearance

(Real object) (Mock object)

(Real object) (Mock object)

図13 ヘッドトラッキングを用いた質感再現システムの結果.

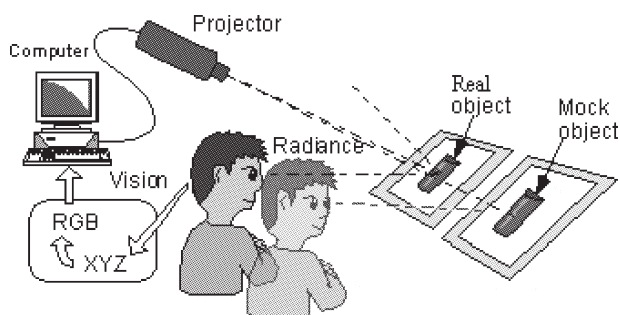


図9 投影画像による質感シミュレーションの概要。

設置されているが、現段階では質感再現の正確さを判定するために、隣に実物体を設置して比較検証を行っている。この構成で観察者の位置が決定した場合、その位置に応じて再現すべき質感が決定される。なお、投影画像による正確な制御を可能にするため、作業台や模擬物体は局所的な表面反射が起こりにくい拡散物体であるとしている。

投影装置、物体位置および形状、観察者位置が決定して、実物体に任意の輝度を与えた場合、光線追跡により観察者位置での輝度が計算可能となる。観察者位置で得られる輝度は、次式で表すことができる。

$$L_e(\lambda, x_e, y_e) = R(\lambda, x_r, y_r) L(\lambda, x_i, y_i) \quad (2)$$

ここで、 $L_i(\lambda, x_i, y_i)$ は投影装置から物体へ照射される輝度、 $R(\lambda, x_r, y_r)$ は物体の反射率、 x, y はそれぞれ網膜、投影面上、投影装置画素の位置を示しており、本構成では各位置が1対1に対応している。式(2)を用いて実物体の観察者位置での輝度を求め、その輝度を模擬物体上で再現するために必要な投影画像を決定すればよい。

3.1 色のシミュレーション^{28,29)}

上で説明した投影装置の制御方法を利用して、色のシミュレーションを実施した。サンプルとしてマクベスカラーチャートを用意し、分光放射輝度計で計測した。その結果を元に画素値を計算して、印刷物と同じ白台紙の上に再現を行っている。結果を図10に示す。両者の色を色差評価した結果、 $\Delta E_{94}^* \leq 2$ の精度で色を再現できることが明らかになっている。また、図10に示すように、プロジェクターで照明された印刷画像と、プロジェクターで白色紙上に投影された画像間の違いを見分けることが困難であることがわかる。

一方、上記のように再現すべき色数が少ない場合には分光放射輝度計での計測でも対応できるが、一般絵柄のように複雑なテクスチャーの再現には分光放射輝度計での計測は大変な作業である。そこで、簡易な3つの波長帯域をもつカラーカメラ等で再現すべき反射輝度を測定する実用化

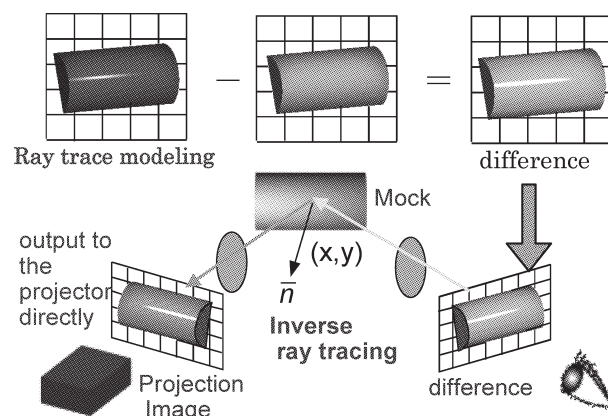


図12 光線追跡による再現方法。

策も検討している。詳細な説明は割愛するが、3つのバンドから、ウィーナー推定により分光反射率の推定を行い、分光空間における演算により色予測精度を高めている。これは再現すべきサンプルの分光反射率から、反射率変化における支配的な波長帯域を最小二乗法で求める方法である。通常、正確な分光反射率の推定には可視光領域で5～6バンドの帯域が必要となるが、ここでは3バンドでの測定値で反射率を推定し、投影画素値の算出に用いている。すでに着色された印刷物に対して、追加的に投影画像を重ね合わせ、実物体との色一致を行った結果を図11に示す。

図11では、上列に現状サンプル、下列に目標サンプルを設置し、上列の分光反射率を3バンド測色機で計測した結果から下列に一致させる投影画像を算出している。その結果、 $\Delta E_{94}^* \leq 2$ の色一致精度を得ている。3バンドの測定は分光反射率推定としては精度不十分であるが、色の変化をつかさどる主成分での分光反射率変化のみを捉えれば、投影画像算出として十分な精度をもつことが興味深い。

3.2 光沢のシミュレーション³⁰⁾

次に、物体の質感表現として重要な光沢感の再現手法について述べる。光沢感は産業的にニス塗装や磨きなど高級感を与えるため、非常に重要な質感のひとつである。しかしながら非常にコントラストが高く、また観察者の視線移動に敏感に変化するため、リアルな再現が困難であった。そこでコンピューターグラフィックス技術である光線追跡と graphic processing unit (GPU) を用いることにより、現実の観察に近いリアルタイム再現を実現した手法を紹介する。

光線追跡による光沢再現のプロセスを図12に示す。光沢をもつ目標物体の質感を無光沢の模擬物体上に再現する。観察者位置での光沢物体の反射輝度分布は、光線追跡

を用いることにより計算することができる。また、投影対象である模擬物体の反射輝度分布も、同様に計算可能である。この模擬物体と目標物体の差分が投影すべき輝度分布となる。そこで両者の差分輝度分布を光源と置き換え、逆光線追跡により投影画像を算出する。なお、光線追跡における光沢は Phong の反射モデル³¹⁾を用いて計算を行っている。

また、観察者の視線位置移動に対する光沢移動については、磁気位置センサー (FastTrack, Polhemus 社) で観察者位置を測定し、その結果を観察者位置に反映している。これら計算をリアルタイムに行うため、図 12 に示した計算プロセスは GPU (GeForce6800, NVIDIA) 上に実装され、30 fps 以上の再現能力を実現している。再現結果を図 13 に示す。

再現映像に対して、客観評価と主観評価を行った結果は以下のとおりである。客観評価は実物体と再現物体の光沢部、拡散反射部それぞれを色彩輝度計で計測する方法で実施している。正確な評価のため、再現側の視点は位置固定とし、その位置から計測を行っている。計測結果から、光沢部の反射光量差は $1 [\text{cd}/\text{m}^2]$ 以下、拡散部も色差 $\Delta E_{94}^* = 0.90$ と両者ともよく一致している。また、主観評価は 14 人の被験者により実施されている。光沢が付加されていない拡散画像のみの場合を 0 点、光沢が付加された再現画像が実物体と完全に一致する場合を 10 点として、実物体との一致を点数付けする簡易的な方法を用いている。評価の結果、平均が 7.1 点、標準偏差が 0.61 と、すべての被験者から再現画像を付加した模擬物体でも光沢実物体と遜色がない光沢再現ができているという評価を得ている。

4. ディスプレイの動きぼやけと MPRT 測定法

本章では、画像や動画像に対して主観的な評価と関連の高い客観的な評価尺度が得られれば、人間による質感評価 (官能評価) 過程を省くことができ、製品開発サイクルをより短くすることが可能であることを説明する。

近年、デジタル放送への移行にともない、フラットパネルディスプレイ (FPD) が広く用いられるようになった。LCD や PDP は CRT に比べ、大型化・薄型化が可能という利点がある反面、LCD は動画質劣化、特に動きぼやけが大きいという課題が挙げられている^{32,33)}。そのため、倍速表示や黒フレーム挿入など、LCD における動画表示性能の改善手法が多く提案されている³⁴⁻³⁶⁾。これに伴い、動きぼやけを定量的に示す動画質評価法を明らかにすることは、人間による評価も自動化でき開発サイクルは

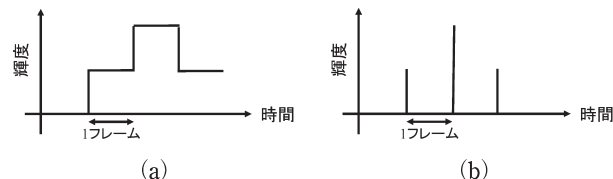


図 14 表示方式の違い。(a) ホールド型表示方式 (LCD)、(b) インパルス型表示方式 (CRT)。

より短縮化することが期待される。

動画質評価法として、moving picture response time (MPRT)³⁷⁻⁴⁰⁾が現在、VESA (Video Electronics Standard Association) で規格化されており⁴¹⁾、動きぼやけの指標として広く用いられている。しかし近年、この手法を用いて定量化した値はその算出過程において人の視覚特性を考慮していないため、知覚するぼやけを十分に表せないという報告がなされている⁴²⁾。画質評価に関する研究分野では、従来、視覚特性を考慮した評価方法を用いることが多い。画像は最終的には視覚系を通して観測されるため、入力画像、画像出力システムの特性に加えて視覚特性が複雑に絡み合っており、最終的に知覚する画像となる。静止画像のぼやけを評価するにあたり、入出力システムの鮮鋭度を示す視覚系の空間周波数特性であるコントラスト感度関数 (contrast sensitivity function, CSF) をフィルターとして用いることで、知覚する鮮鋭度を評価する方法は古くから用いられてきた^{43,44)}。これと同様に、Oka らは動きぼやけを評価する方法として、MPRT の算出過程で得られる物理評価値に視覚特性である CSF をフィルターとして用いることで、人が知覚する動きぼやけと高い相関があると考えられる物理評価値 perceived blur edge width (PBEW) を提案した^{45,46)}。

そこで本章ではこれらの動向を踏まえ、MPRT 測定法、PBEW を中心としたディスプレイの動画質評価法、また各動きぼやけ評価値と知覚との関係について紹介する。

4.1 動きぼやけが発生するメカニズム

LCD の動きぼやけの要因は、液晶の応答速度が遅いため引き起こされていると考えられていた。そこで、LCD の動画表示性能の物理尺度として応答速度が用いられてきた。しかし、Kurita らは液晶の応答速度が理想的に 0 ms であっても、ホールド型表示方式を用いている LCD では動きぼやけが発生することを明らかにした³²⁾。

ホールド型表示方式において、ディスプレイは一定のフレームレートで静止画を 1 枚ずつ表示することで動画表示しているが、この 1 フレームの時間が始まって次のフレームが来るまでの間、常に表示を続ける。図 14 (a) に、液

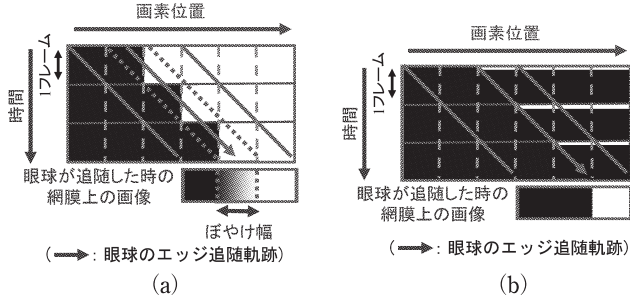


図 15 ディスプレイ上におけるエッジの離散的動作と眼球の追跡軌跡，その際に知覚される動きぼやけの概念。(a) LCD, (b) CRT.

晶の応答速度が 0 ms としたときの 1 画素の表示輝度と時間の関係を表したグラフを示す。一方，CRT はインパルス型表示とよばれる表示形式であり，図 14 (b) に示されるように，1 フレームの間に一瞬しか表示されない。

図 15 はディスプレイ上に表示された等速度で動くエッジの時間軸・空間軸での離散的な動きと眼球がエッジを追跡した際の連続的な動き，そして知覚される動きぼやけの概念を示している。眼球がスクロールエッジを追跡するとき，知覚する画像はエッジを見ている際の時間積分として考えられる。そのため，図 15 (a) に示すとおり，ホールド型表示方式ディスプレイにおいて，エッジを追跡した際の網膜上の画像はぼやけを生じ，それが知覚される。一方，図 15 (b) に示すとおり，インパルス型表示方式のディスプレイでは網膜上のエッジ位置は常に一定になっており，動きぼやけは生じない。

4.2 MPRT 測定法

ホールド型表示方式による動きぼやけを考慮した評価法として，MPRT 測定法が提案されている。この手法は，ディスプレイ上をスクロールするエッジ画像の境界部を，追従する CCD カメラで撮影することで境界部分のぼやけた画像を取得し，この画像から動きぼやけに関する値を算出する（図 16）。ディスプレイの画面サイズや解像度，画素ピッチが異なると，撮影画像のぼやけ幅も変化する。そのため，異なる機種の結果の比較を容易にするために，単純な画像のぼやけ幅ではなく，共通の尺度として時間（ミリ秒）を用いる。この値が小さいほど動きぼやけが少ない。

MPRT 測定法では液晶素子の応答特性を考慮し，エッジの階調差を左右 7 種類ずつ，計 42 パターンの組み合わせに対し測定を行う。エッジが通過する前の階調を initial gray，後の階調を final gray とする。階調 Y_n は，測定対象のディスプレイの最大，最低輝度をそれぞれ Y_6 ， Y_0 としたとき，その値域を視覚空間（明度 L^* ）において 6 等分することで算出される。

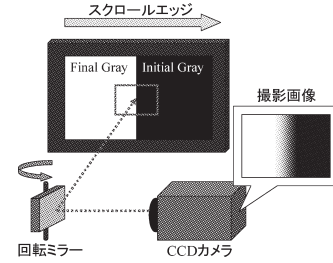


図 16 MPRT 測定における画像撮影の概要。

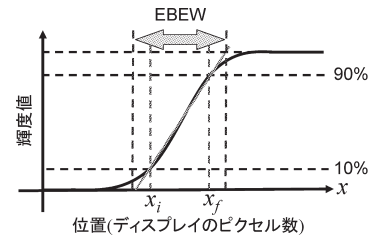


図 17 EBEW の定義。

次に撮影画像の輝度値を正規化し，水平方向にプロットした輝度プロファイル（図 17）を作成する。Initial gray から final gray の画素値を値域としたとき，相対輝度の 10% と 90% を閾値とし，このラインを破線で示す。この 2 本の破線が輝度値のグラフと交わる位置をそれぞれ x_i ， x_f とする。このとき，式 (3) により extended blur edge width (EBEW) を求める。

$$EBEW = \frac{x_f - x_i}{0.9 - 0.1} \quad (3)$$

最後に，スクロールエッジの速度 v_p [pixels/frame] とディスプレイにおける 1 フレームの時間 t_f [ms/frame] を用いて，式 (4) により EBEW を時間尺度に変換した値 extended blur edge time (EBET) を算出する。MPRT は全 42 エッジパターンにおける EBET の平均値として求められる。

$$EBET = EBEW \cdot \frac{t_f}{v_p} \quad (4)$$

4.3 MPRT 値と知覚

MPRT 測定法は動画質評価法として広く用いられるようになったが，その有効性については十分に検証されていなかった。そこで，Someya らは MPRT 値と知覚との関係について検証を行っている⁴²⁾。その結果，MPRT は知覚との高い相関がみられるが，従来用いられてきた閾値設定（10%～90%）については十分な有効性がみられなかった。そのため，MPRT 測定法による閾値設定については，今後十分検討すべきであると Someya らは結論づけた。そこで，Oka らはこのような閾値設定に左右されない新

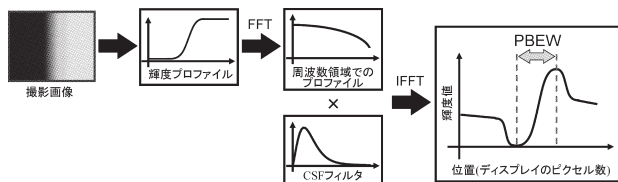


図 18 PBEW の算出の流れ。

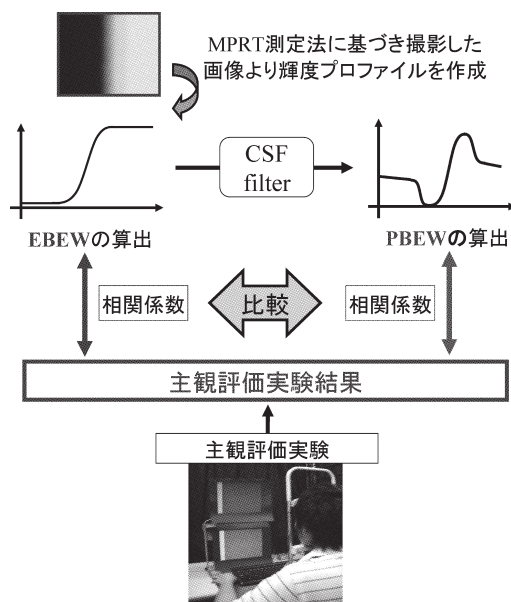


図 19 一対比較実験による PBEW 検証実験の流れ。

たな動きぼやけの物理評価尺度として、視覚系の空間周波数特性であるコントラスト感度関数 (CSF) を用いた PBEW を提案している^{45,46)}。PBEW の算出の流れを図 18 に示す。PBEW の算出では、EBEW と同様にまず、撮影画像から輝度プロファイルを作成する。この輝度プロファイルに周波数領域で CSF をかけたプロファイルを作成する。そして、このプロファイルのピーク間のピクセル数を PBEW とする。

得られた PBEW などの物理評価値は、主観評価実験の結果との相関の高さにより、その良し悪しが判断される。今回、同一ディスプレイ上に異なるエッジパターンを表示した際の一対比較実験により、動きぼやけの比較を行っている様子を図 19 に示す。一対比較実験による主観評価値は心理尺度値として得られ、この心理尺度値と物理評価値である EBEW, PBEW との相関係数を求めることで、PBEW の有効性を検証することができる。このようにして有効性検証された評価基準は、製品開発においてその開発指針を与える重要な要素となる。

以上、これからの製品開発、電子商取引などにおいて重

要な要素となる、色と質感に対するモデル、記録、再現に関して、さまざまな技術間の関係を簡単であるが概説した。本フレームワークは、すでにさまざまな分野で実践されている。花王(株)の小島氏に非常に多くの実践例と示唆をいただいた。色彩の基礎に関する研究は長年にわたり科学的追求が行われ、色彩科学の理論が体系的にまとめられている。現在、色は工学的フィールドで活発に議論され、色彩工学としてまとまりつつある。つまり産業的に応用することができるレベルまで手法は洗練され、標準化も進んでいる。一方、われわれが感じる物質の質感は脳の認知機能とも深く関わりとされており、その科学的解析には長い時間を要すると思われる。しかし、産業界ではすでに質感を議論・解析、利用したいとする要望が高まっており、色彩が科学的追求から工学的な議論へ遷移したような時間的余裕は与えられていない。つまり、質感科学として基礎理論の解明⁴⁷⁾を進めると同時並行的に、質感工学として産業応用を可能とするような質感のモデル化とその評価・解析が急務である。

文 献

- 1) P. D. Burns and R. S. Berns: "Analysis multispectral image capture," *Proc. 4th IS & T/SID Color Imaging Conference* (1996) pp. 19-22.
- 2) H. Maitre, F. Schmitt, J.-P. Crettez, Y. Wu and J. Y. Hardeberg: "Spectrophotometric image analysis of fine art paintings," *Proc. of the Fourth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications* (Scottsdale, Arizona, 1996) pp. 50-53.
- 3) F. H. Imai, N. Tsumura, H. Haneishi and Y. Miyake: "Prediction of color reproduction for skin color under different illuminants based on the color appearance models," *J. Image Science and Technology*, **41** (1997) 166-173.
- 4) Y. Yokoyama, N. Tsumura, H. Haneishi, J. Hayashi, M. Saito and Y. Miyake: "A new color management system based on human perception and its application to recording and reproduction of art printing," *IS&T/SID's 5th Color Imaging Conference, Color Science, Systems and Applications* (Scottsdale, Arizona, 1997) pp. 169-172.
- 5) M. Yamaguchi, R. Iwama, Y. Ohya, N. Ohya and Y. Komiya: "Natural color reproduction in the television system for telemedicine," *Proc. SPIE*, **3031** (1997) 482.
- 6) 津村徳道, 羽石秀昭, 三宅洋一: "重回帰分析によるマルチバンド画像からの分光反射率の推定", *光学*, **27** (1998) 384-391.
- 7) R. S. Berns, F. H. Imai, P. D. Burns and D. Y. Tzeng: "Multi-spectral-based color reproduction research at the Munsell Color Science Laboratory," *Proc. SPIE*, **3409** (1998) 14-25.
- 8) F. H. Imai and R. S. Berns: "High-resolution multi-spectral image archives: A hybrid approach," *Proc. IS&T/SID's 6th Color Imaging Conference* (1998) pp. 224-227.
- 9) N. Tsumura, H. Sato, T. Hasegawa, H. Haneishi and Y. Miyake: "Limitation of color samples for spectral estima-

- tion from sensor responses in fine art painting,” *Opt. Rev.*, **6** (1999) 57-61.
- 10) J. Y. Hardeberg, F. J. Schmitt and H. Brettel: “Multi-spectral image capture using a tunable filter,” *Proc. SPIE*, **3963** (1999) 77-88.
 - 11) F. H. Imai, M. Rosen and R. S. Berns: “Comparison of spectrally narrow-band capture versus wide-band with priori sample analysis for spectral reflectance estimation,” *IS & T/SID Eighth Color Imaging Conference* (2000) pp. 234-241.
 - 12) J. Y. Hardeberg, F. Schmitt and H. Brettel: “Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter,” *Opt. Eng.*, **41** (2002) 2532-2548.
 - 13) A. Ribes, H. Brettel, F. Schmitt, H. Liang, J. Cupitt and D. Saunders: “Color and multispectral imaging with the CRISTATEL multispectral system,” *Proc. PICS IS&T* (2003) p. 215.
 - 14) K. Cherdhirunkorn, N. Tsumura, T. Nakaguchi and Y. Miyake: “Spectral based color correction technique compatible with standard RGB system,” *Opt. Rev.*, **13** (2006) 138-145.
 - 15) N. Tsumura: “Appearance reproduction and multi-spectral imaging,” *Color Research and Application*, **31** (2006) 270-277.
 - 16) 津村徳道, 中口俊哉, 宮田公佳, 三宅洋一: “デジタルミュージアムのための質感再現”, *光学*, **35** (2006) 217-223.
 - 17) コンピュータグラフィックス (CG-ART 協会, 2004).
 - 18) G. M. Johnson and M. D. Fairchild: “Full-spectral color calculations in realistic image synthesis,” *IEEE Computer Graphics & Applications*, **19** (1999) 47-53.
 - 19) G. Ward and E. V. Elena: “Picture perfect RGB rendering using spectral prefiltering and sharp color primaries,” *Thirteenth Eurographics Workshop on Rendering* (2002) pp. 117-124.
 - 20) F. Herbert, J. Kirkenaer and O. U. Ecker: “Achieving a multi-spectral virtual reality,” *Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision (CGIV 2004)* (Aachen, Germany, 2004) pp. 235-241.
 - 21) F. Herbert and O. U. Ecker: “Soft proofing of multi-color documents in a panoramic environment using real time spectral processing,” *The 13th Color Imaging Conference* (Scottsdale, USA, 2005) p. 320.
 - 22) M. Tsuchida, H. Arai, M. Nishiko, Y. Sakaguchi, T. Uchiyama, M. Yamaguchi, H. Haneishi and N. Ohyama: “Development of BRDF and BTf measurement and computer-aided design systems based on multispectral imaging,” *Proc. AICO5* (2005) pp. 129-132.
 - 23) N. Tsumura, H. Haneishi and Y. Miyake: “Independent component analysis of skin color image”, *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 2169-2176.
 - 24) N. Tsumura, H. Haneishi and Y. Miyake: “Independent component analysis of spectral absorbance image in human skin,” *Opt. Rev.*, **7** (2000) 479-482.
 - 25) N. Tsumura, N. Ojima, K. Sato, M. Shiraishi, H. Shimizu, H. Nabeshima, S. Akazaki, K. Hori and Y. Miyake: “Image-based skin color and texture analysis/synthesis by extracting hemoglobin and melanin information in the skin,” *ACM Transactions on Graphics*, **22** (2003) 770-779.
 - 26) N. Tsumura, T. Nakaguchi, N. Ojima, K. Takase, S. Okaguchi, K. Hori and Y. Miyake: “Image-based control of skin melanin texture,” *Appl. Opt.*, **45** (2006) 6626-6633.
 - 27) N. Tsumura, R. Usuba, K. Takase, T. Nakaguchi, N. Ojima, N. Komeda and Y. Miyake: “Image-based control of skin translucency,” *Appl. Opt.*, **47** (2008) 6543-6549.
 - 28) S. Yamamoto, K. Ueda, N. Tsumura, T. Nakaguchi and Y. Miyake: “Projector-based color simulator for print industry,” *IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci.*, **E89-A** (2006) 2962-2969.
 - 29) K. Ueda, S. Yamamoto, N. Tsumura, T. Nakaguchi and Y. Miyake: “Color simulator for accurate color reproduction,” *The First International Workshop on Image Media Quality and Its Application (IMQA2005)* (Nagoya, 2005) pp. 56-60.
 - 30) S. Yamamoto, M. Tsuruse, K. Takase, N. Tsumura, T. Nakaguchi and Y. Miyake: “Real-time control of appearance on the object by using high luminance PC projector and graphics hardware,” *The 13th Color Imaging Conference* (Scottsdale, USA, 2005) pp. 31-35.
 - 31) B. Phong: “Illumination for computer-generated pictures,” *Commun. ACM*, **18** (1982) 311-317.
 - 32) T. Kurita, A. Saito and I. Yuyama: “Consideration on perceived MTF of hold type display for moving images,” *Proc. of IDW '98* (1998) pp. 823-826.
 - 33) J. Miseli: “Motion artifacts,” *SID '04 Symposium Digest* (2004) pp. 86-89.
 - 34) M. A. Klompenhouwer: “Comparison of LCD motion blur reduction methods using temporal impulse response and MPRT,” *SID '06 Symposium Digest* (2006) pp. 1700-1703.
 - 35) T. W. Su, J. J. Su, T. J. Chang, P. L. Chen, K. Y. Lin and C. T. Liu: “Moving-image simulation for high-quality LCD TVs,” *J. Soc. Inf. Display*, **15** (2007) 71-78.
 - 36) M. Baba, G. Itoh and H. Okumura: “Software-processed edge- and level-adaptive overdrive (SELAO) method for high-quality motion pictures,” *J. Soc. Inf. Display*, **15** (2007) 205-211.
 - 37) K. Oka and Y. Enami: “Moving picture response time (MPRT) measurement system,” *SID '14 Symposium Digest* (2004) pp. 1266-1269.
 - 38) Y. Igarashi, T. Yamamoto, Y. Tanaka, J. Someya, Y. Nakakura, M. Yamakawa, Y. Nishida and T. Kurita: “Summary of moving picture response time (MPRT) and futures,” *SID '04 Symposium Digest* (2004) pp. 1262-1265.
 - 39) K. Teunissen, Y. Zhang, X. Li and I. Heynderickx: “Method for predicting motion artifacts in matrix display's,” *J. Soc. Inf. Display*, **14** (2006) 957-964.
 - 40) W. Song, X. Li, Y. Zhang, Y. Qi and X. Yang: “Motion-blur characterization on liquid-crystal displays,” *J. Soc. Inf. Display*, **16** (2008) 587-593.
 - 41) VESA FPDM2: Video Electronics Standards Association, Flat Panel Display Measurements Standard, Version 2.0 (May, 2005).
 - 42) J. Someya and H. Sugiura: “Evaluation of liquid-crystal display motion blur with moving picture response time and human perception,” *J. Soc. Inf. Display*, **15** (2007) 79-86.
 - 43) 三宅洋一: “デジタルカラー画像の解析・評価 (東京大学出版会, 2000).
 - 44) 平井経太, 三宅洋一: “視覚の時空間特性とディスプレイの評価”, *映像情報メディア学会誌*, **62** (2008) 322-328.
 - 45) K. Oka and Y. Enami: “Image quality degradation of moving pictures: Perceived blur edge width,” *Proc. of IDW '05* (2005) pp. 815-818.
 - 46) K. Oka and Y. Enami, J. Lee and T. Jun: “Edge blur width analysis using a contrast sensitivity function,” *SID '06 Symposium Digest* (2006) pp. 10-13.
 - 47) I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan and E. H. Adelson: “Image statistics and the perception of surface qualities,” *Nature*, **447** (2007) 206-209.

(2009 年 7 月 2 日受理)