

一般論文

## DLP プロジェクタ照明下における物体の質感制御

山本昇志<sup>1,II</sup>, 鶴瀬麻依子<sup>II</sup>, 植田久美子<sup>II</sup>,  
津村徳道<sup>II</sup>, 中口俊哉<sup>II</sup>, 三宅洋一<sup>II,III</sup>

<sup>I</sup>三菱重工業株式会社 技術本部 先進技術研究センター

<sup>II</sup>千葉大学大学院 自然科学研究科

<sup>III</sup>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

住所

<sup>I</sup> 〒236-8515 横浜市金沢区幸浦 1-8-1

<sup>II, III</sup> 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Paper

### **Reproducing an appearance of the objects illuminated by DLP projector**

Shoji YAMAMOTO<sup>1,2</sup>, Maiko TSURUSE<sup>2</sup>, Kumiko UEDA<sup>2</sup>,  
Norimichi TSUMURA<sup>2</sup>, Toshiya NAKAGUCHI<sup>2</sup>, Yoichi MIYAKE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD,

<sup>2</sup>Graduate School of Science and Technology, Chiba University

<sup>3</sup>Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University

Address

<sup>1</sup> 1-8-1, Sachiura, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-8515, Kanagawa, Japan

<sup>2,3</sup> 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522, Chiba, Japan

## 要旨

我々は高輝度プロジェクタを用いた質感再現システムを構築するために、色一致、視点追従の光沢画像生成手法を開発した。色一致では、プロジェクタに入力する RGB 値と投影により生じる反射光強度の XYZ 三刺激値との関係を解析し、PCA スプライン手法と LUT 手法の両者を複合的に用いる方法を提案した。光沢画像生成手法はプロジェクタ、物体、視点位置と物体の反射特性から光線追跡を用いて生成画像を決定する手法を明確にした。また、光沢画像再現を観察者の視点移動に追従すべく、簡易な計算手法も提案した。計測された観察者位置に基づき、光源位置を仮想的に移動させることで光沢画像を簡易に生成でき、リアルタイムな追従が可能である。これらの手法を用いて、光沢感などの質感再現について主観評価を行った。光沢を持つ実物体と本手法による再現物体の比較を 14 人の 10 段階評価で行い、再現画像について平均点 7.1 点、標準偏差 0.61 と高得点を得ることができた。この結果から本手法の正確さが確認できた。

## キーワード

プロジェクタ, カラーマッチング, 質感再現, リアルタイム

## Abstract

We propose a new method of image projection to reproduce similar appearance of real object by using the high luminance DLP (Digital Light Processing) type projector. In this projection, the tristimulus values of image corresponding to the absolute tristimulus values of real object are estimated by combination of the PCA-Spline method and the LUT method. The BRDF (Bi-Directional Reflectance Distribution Function) model is also introduced to fix the geometry between the projector and the viewing location of observer. The result shows that the color difference  $\Delta E^*_{94}$  between the estimated image and the real object was less than 2.0 and the gloss of the object could be reproduced on the mat paper without any difference of appearance in comparison with the imitated coated paper.

## Keyword:

Projector, Color-matching, Reproduction, Gloss, Appearance, Real-Time

## 1. はじめに

近年, プロジェクタは高輝度, 高コントラストへの改善が目覚しく, 従来の CRT や液晶ディスプレイと比較して, 色再現能力はほぼ同等, 輝度に至っては数倍以上の表現が可能である. このため, 主な使用用途であるプレゼンテーション表示だけでなく, 映画用投射装置や大画面を共有する TV 会議システムなど, 新しい分野での利用が検討されている<sup>1-3)</sup>. 更にプロジェクタは実物体に画像を投影表示することにより, 仮想的な見えを再現することができる. このような特性を利用して, 表示システムや複合的な現実感システムを構築することは産業応用分野に大きく影響を与える. 例えば CAD (Computer Aided Design) や CAE (Computer Aided Engineering) でのデザインやシミュレーション結果を可視的に表現する, デジタルモックアップ分野で利用が期待できる<sup>4,5)</sup>.

実際, プロジェクタを用いた様々な仮想表現研究が行われている. Rasker<sup>6)</sup>は表示対象である 3次元物体の色や模様を自在に変化させるシステムを開発した. プロジェクタの位置と 3次元物体の形状情報を利用して, それぞれの面に特徴的なテクスチャを貼り付けることで仮想表現を実現している. またプロジェクタの動画表示機能を活用し, 車輪や背景の動きを加えるリアルな表現を行っている点が興味深い. また向川<sup>7,8)</sup>は 3次元物体に対する光沢, テクスチャ, 陰影を光学的な計算に基づき, 投影表示する手法を開発している. 照明位置を仮想的な位置に設定して光沢, テクスチャ, 陰影を計算し, それら情報を投影することで様々な方向からの見えを再現することができる. このように, 投影対象を 3次元物体まで広げたプロジェクタの表示再生技術は, 実際に変化が困難な物体の見えを可変にすることで新たな応

用分野に展開できる。しかしながら、従来の研究では、計算機で生成した擬似的な見えを投影情報として利用しており、実物のお見えに近い再現は困難であった。

そこで本論文は DLP プロジェクタの高輝度、高コントラストな特徴を利用して、自然物体のお見えに一致した表現手法について述べる。我々は日常生活で認識する自然物体の色や質感特性をプロジェクタの色再現制御とコントラスト制御で実現する手法を開発した。2 節ではまず、我々の質感再現方法の概要について述べる。3 節では質感再現で基礎となる反射光強度の一致方法について説明する。従来、制御が困難であった高輝度プロジェクタを高精度に制御して、実印刷物との色比較により一致精度を確認している。4 節においては無光沢物体の表面に光沢を生成して、その再現性能を考察した。光沢画像の再現方法や視線に追従した光沢部分の動き、及び 3 節で構築した反射光強度の制御を組み合わせて実物との質感一致を考察している。

## 2. プロジェクタでの質感再現手法の提案

図 1 にプロジェクタを用いた質感再現の全体概念とシステム構成を示す。我々は質感制御手法の効果を明らかにするために、実物体で発生する質感を模擬物体上に投影して、両者のお見えを比較する方法を用いた。プロジェクタで投影されるスクリーン上に材質の異なる 2 つの同一形状物体を設置し、一方を実物体、もう一方を模擬物体と定義する。

Fig.1  
挿入

観察者が実物体と材質の異なる模擬物体で同じ見えを感じるためには、両者を観察する環境条件の一致、両者物体からの反射光強度の一致、そして両者物体で発生する質感の一致が必要である。図 1 に示す

ように、我々の質感再現システムでは同一のプロジェクタ照明下で両者を観察するため、観察のための環境の一致は成立する。

両物体からの反射光強度を一致させるためには、照明された実物体と投影画像が付加された模擬物体からの反射光を、観察する三刺激値 XYZ で一致させる必要がある。物体の反射率が既知の場合、観察者が知覚する反射光強度の三刺激値 XYZ はプロジェクタで発生する放射強度を経て、プロジェクタへ指示される RGB 信号と対応している。そこで三刺激値とプロジェクタへの RGB 入力信号間の関係を明らかにすることで、観察者が知覚する反射光強度の三刺激値 XYZ は制御可能となる。RGB 入力信号とプロジェクタの光強度の関係は投影される画像を算出するのみに適用されるだけでなく、実物の照明光制御にも適用することができる。光沢などの高いコントラストを実現するためには、照明光による実物側の光強度制御も重要である。

Fig.2  
挿入

実物体と模擬物体の質感一致は、両物体の持つテクスチャ情報と光沢情報が一致することで達成される。テクスチャ情報は物体拡散面からの反射色や模様であり、上記の反射光制御を用いることで一致させることができる。一方、光沢情報は光沢部とテクスチャ部とのコントラストや光沢発生分布で表現される。テクスチャ部と光沢部のコントラストは実物体と同じになるように両部の強度比率を制御することで一致可能となるが、光沢発生分布は両物体のスペキュラ反射特性を考慮して光沢画像を形成する必要がある。そのため、我々のシステムでは光反射モデルを計算に用い、実物体と模擬物体の BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution) 特性を与えることにより、光沢画像を生成する。更に、光沢画像は観察者が自由な視点から見たときに発生する位置が大きく変化する。そこで図 2 に示すように、観

察者の視点を計測し，その動きに合わせて模擬物体上の光沢画像位置をリアルタイムに変化させることで，実物体との完全な一致が可能となる．

本論文では以上の提案方法を具現化するための校正手法と再現アルゴリズムを以下に示す．テクスチャ情報に当たる拡散反射光についてはプロジェクタの RGB 入力と物体から反射される光の三刺激値を一致させることで実現した．光沢情報については光反射モデルによる光線追跡計算による一致手法を開発し，テクスチャ情報の一致手法と合成して質感再現を実施している．

### 3. プロジェクタによる反射光強度の制御

#### 3. 1 反射光強度の制御手法

実物体と模擬物体からの正確な拡散反射光強度の一致のために，我々は一般的な液晶プロジェクタを用いて，光学系で発生するフレアの補正や投影面の反射特性などを考慮した手法を示した<sup>9)</sup>．しかし，高輝度プロジェクタとして代表的な DLP (Digital Light Processing, Texas Instruments) 型プロジェクタは，輝度確保のためにカラーフィルタ (R,G,B) に加えて透明フィルタを使用しており，再現する反射光と入力信号の関係が容易に決定できない．図 3 に DLP 型プロジェクタの出力計測結果を示す．横軸に入力画素値，縦軸に標準白板を反射物としたときの計測輝度  $Y[\text{cd}/\text{m}^2]$  を示しており，それぞれ R,G,B 単色の変化と  $\text{Gray} = R+G+B$  での出力計測結果をプロットした．この DLP プロジェクタでは入力画素値が 135 階調以上になると透明フィルタが作用し始め，RGB 単色輝度の和と Gray 輝度が一致せず，加法混色が成立しない．このような DLP プロジェクタの複雑な輝度と入力値の関係は，これまで

Fig.3  
挿入

のところ、モデル化されていない<sup>10,11)</sup>。

そこで我々は、複数のカラーマッチングモデルを組合す複合的な方法を考案した<sup>12)</sup>。加法混色が成り立つ領域においては、入力画素値 RGB に対する反射光強度の三刺激値 XYZ の変化を主成分分析し、スプライン曲線でモデル化する手法（PCA スプライン手法）を適用した<sup>13)</sup>。一方、透明フィルタが作用する領域においては、入出力関係を直接的に対応づける LUT（Look Up Table）手法を適用する<sup>14)</sup>。各手法の概念を図 4 に示す。この複合的な手法において、重要な問題は適用範囲の区分けである。我々はこの問題に対し、一度、PCA 手法で反射光推定した結果に基づく誤差で判断して、その領域を入力値である RGB 指示信号で分離する方法を採用した。図 5 に本手法の処理フローを示す。計測した学習サンプルから算出した主成分を基に、PCA スプライン手法を用いて全色空間で推定を実施する。推定精度は実物体と推定された物体色の色差として、(1)式を用いて評価できる。

Fig.4  
挿入

Fig.5  
挿入

$$\Delta E_{94}^* = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \dots (1)$$

ここで、 $k_L, k_C, k_H$  は設定パラメータであり、本論文では全て 1 とする。重み関数の値はそれぞれ、 $S_L = 1, S_C = 1 + 0.045 C_{ab}^*, S_H = 1 + 0.015 C_{ab}^*$  で計算される。

計測される反射光強度の三刺激値 XYZ は最大入力画素値 (R,G,B) =(255,255,255) で投影された標準白板からの反射光強度の三刺激値  $X_0 Y_0 Z_0$  を用いて正規化されるため、投影画像の強度分布を反射物体色として評価できる。また、L\*C\*H\*表色系に変換することで、推定され

た反射光強度の三刺激値  $XYZ_{estimate}$  と実際の反射光強度の三刺激値  $XYZ_{real}$  の誤差は色差  $\Delta E^*_{94}$  として計算することができる。

評価結果に基づき、推定精度が  $\Delta E^*_{94} < 2$  の場合は PCA スプライン手法が適用できる色空間であると判断し、入力信号である RGB 空間で分離を行う。次に PCA スプライン手法での評価が  $\Delta E^*_{94} \geq 2$  の領域については LUT 手法を再帰的に適用して、適用する手法と領域（クラスター）を自動的に決定していく。

### 3.2 複合的な反射光制御手法の分類

上記手法による反射光強度の制御範囲を実測データに基づき分類した。装置構成と幾何学的配置を図 6 に示す。プロジェクタは DLP 型（Dell, 3200MP）を使用し、白紙が貼られたスクリーンからの反射光の三刺激値は色彩輝度計（コニカミノルタ, CS-100A）で計測される。プロジェクタ、反射面、輝度計測装置の位置関係は正反射の影響が少なく、拡散反射光のみ計測できるように決定した。

Fig.6  
挿入

投影画像は入力信号である RGB 値をそれぞれ 15 階調ピッチ（0～255 階調）で発生させた。発生色の組み合わせは単色での変化（R,G,B） $= (15,0,0) \sim (255,0,0)$ ,  $(0,15,0) \sim (0,255,0)$ ,  $(0,0,15) \sim (0,0,255)$ , 2 色の同階調変化（R,G,B） $= (15,15,0) \sim (255,255,0)$ ,  $(0,15,15) \sim (0,255,255)$ ,  $(15,0,15) \sim (255,0,255)$ , 3 色の同階調変化（R,G,B） $= (0,0,0) \sim (120,120,120) \sim (255,255,255)$  とし、全色数は 120 色である。この色組み合わせの中で、実際に PCA を計算するために使用するのは単色変化の 48 色のみであり、その他の色は推定精度を検証するために使用した。色彩輝度計で測定した値と入力信号を元に PCA スプライン関数を決定して、入力 RGB 値から三刺激値を推定する。推定精度の評

Fig.7  
挿入

価結果を図 7 に示す．なお，我々の取り組みでは，実測した XYZ 値と  
の色差が  $\Delta E^*_{94} \leq 2$  となる条件で領域分けしている．

色差判定の結果から，低輝度領域は加法混色が成立するため，PCA  
スプライン関数での推定色差は  $\Delta E^*_{94} \leq 2$  (・印) となる．一方，加法  
混色が成り立たない高輝度領域は  $\Delta E^*_{94} > 2$  (×印) となる．誤差評価  
結果をもとに，色差  $\Delta E^*_{94} = 2$  で分離した RGB 空間での画素値関係を  
図 8 に示す． $\Delta E^*_{94} > 2$  の領域においては，非線形的な扱いが可能で  
ある LUT 手法を適用して評価を進める．LUT 手法では全ての表示値  
が  $\Delta E^*_{94} > 2$  になるまで領域分割を継続するが，本プロジェクタの場  
合，PCA スプライン適用領域と 1 つの LUT 適用領域の 2 領域で分割  
が終了した．色差評価に基づき，入力 RGB 空間で領域分けを実施した  
ところ，(165,180,135)を頂点とする空間で領域分けが可能となった．

Fig. 8  
挿入

複合的な色推定手法の総合精度，特に PCA 手法から LUT 手法への  
境界変化を検証するために，学習に用いた RGB 値とは異なるサンプル  
を用い，推定精度を検証した．用意したサンプルはそれぞれ 15 階調ピ  
ッチの値で，単色変化 (R,G,B) =(10,0,0)～(250,0,0)，(0,10,0)～  
(0,250,0)，(0,0,10)～(0,0,250)，2 色の同階調変化 (R,G,B) =(10,10,0)  
～(250,250,0)，(0,10,10)～(0,250,250)，(10,0,10)～(250,0,250)，3  
色の同階調変化 (R,G,B) =(0,0,0)～(115,115,115)～(250,250,250)と  
し，全色数は 119 色である．各色を実測し，推定結果との色差評価を  
行った．結果を図 9 (a) に示す．PCA スプラインを適用する領域と  
LUT を適用する領域でそれぞれ精度が異なるが，境界で推定誤差が大  
きくなる現象も無く， $\Delta E^*_{94} > 2$  で推定が実施されていることがわか  
る．更に PCA 手法から LUT 手法への境界変化については，グラデー  
ションによる再現評価を行った．PCA 手法から LUT 手法へ切り替え

Fig. 9  
挿入

が行われる任意の座標  $(R, G, B) = (80, 129, 135)$  において、表示した場合の  $Y_{xy}$  計測値は  $(Y, x, y) = (58, 0.2400, 0.2962)$  であり、三刺激値 XYZ に換算すると  $(X, Y, Z) = (47, 58, 90.8)$  となる。そこで、Z の値のみを  $Z=89\sim 94$  まで、0.1 ピッチで変化させた三刺激値 XYZ を作成して、対応する RGB を推定することで、PCA 手法と LUT 手法の境界を含むグラデーションを作成した。両者の境界は  $(R, G, B) = (165, 180, 135)$  なので、 $B=135$  が  $B=136$  に変わるところで PCA から LUT に切り替わる。結果を図 9 (b) に示す。グラデーション故に、ほんのわずかな段差が確認されるが、階調的に 1~2 階調の変化であるため、推定による誤差とは考えにくい。

評価結果から、DLP を用いた高輝度プロジェクタにおいても正確な反射光制御が可能となった。本手法は全色空間を 15 階調ピッチ = 5832 色で LUT を構築する場合に比べて、PCA と LUT の複合境界を解明するために 120 色、境界以上で LUT  $(165, 180, 135) \sim (255, 255, 255)$  を作成するために 376 色と、合計 496 色で複雑な色空間を表現することができ、色校正に必要な時間を大幅に短縮することができる。

### 3. 3 複合的な反射光強度の制御精度評価

上記手法による対応領域分けと複合的なカラーマッチング手法を適用した際の反射光制御手法の精度を検証した。プロジェクタ投影面にマクベスカラーチャートに準じて印刷した 24 色を設置し、プロジェクタによる白色  $(RGB) = (255, 255, 255)$  で照明された時の反射光強度の三刺激値 XYZ を色彩輝度計にて計測した。計測された三刺激値に対して、3.2 節で確立した反射光強度の制御ルールを用いてプロジェクタ入力値を求め、隣に投影表示することで、色一致精度を検証した。

Fig.10  
挿入

表示結果例を図 10 に，両者の反射光を色彩輝度計で計測して，色差として評価した結果を図 11 に示す．

Fig.11  
挿入

色差評価の結果から，任意の入力値に対しても推定精度が色差  $\Delta E^*_{94} \leq 2$  を実現可能であることが明らかである．また，プロジェクタ画像を印刷物と同じ紙面上に投影しているために，紙の質感が全く同じと知覚できる利点も明らかになった．これらの結果から，我々のシステムはプロジェクタが表現できる輝度空間において，人間が差異をほとんど感じない精度で反射光の三刺激値一致や制御が可能である．

#### 4. 高輝度プロジェクタによる光沢感再現

##### 4. 1 光線追跡法による光沢画像の生成

前節の手法を用いて，高輝度プロジェクタによる質感再現手法を検討した．質感には様々な要素があるが，今回は物体からの表面反射で生成される光沢について再現を行った．図 12 に光沢再現の概念図を示す．

Fig.12  
挿入

スクリーン面に同形の円筒立体を設置し，一方には光沢のある紙を，もう一方には無光沢の紙を貼り付けている．光沢紙と無光沢紙の反射特性は予め，偏角分光反射率計（村上色研）にて計測されている．プロジェクタの位置は固定し，光沢紙には照明としての白色光を投影する．一方，無光沢紙にはプロジェクタと視点位置から計算された光沢画像を投影する．

無光沢円筒立体上に投影する光沢画像の，具体的な生成手順を図 13 に示す．視線位置が決定した場合，観察者が知覚する光沢円筒と無光沢円筒の見えは一意に決定される．無光沢円筒上に光沢円筒と同じ見えを再現するためには，無光沢円筒上に光沢円筒と同様の見え画像を

投影すればよい．そこでまず，ある視点において観察される光沢円筒と無光沢円筒の反射光強度の画像を，光線追跡法を用いて計算する（図 13-(a)）．光源の位置と輝度，反射物体の位置，形状，反射特性，視点の位置が明らかになれば，(2)式の反射モデルを用いて視点位置での反射光強度の画像を計算することは可能である<sup>15,16)</sup>．

$$L_r(x, y, \omega') = f_r(x, y, \omega', \omega) \cdot E_r(x, y, \omega) \quad \dots (2)$$

ここで， $L_r$ は物体表面 $(x, y)$ から $\omega'$ 方向に反射される輝度， $f_r$ は物体表面 $(x, y)$ での反射特性， $E_r$ は物体表面 $(x, y)$ に $\omega$ 方向から入射する輝度を示している．

両物体の見えを一致させるために必要な投影輝度画像は，計算した両反射光強度の画像差分をとることで明らかになる（図 13-(b)）．この場合，符号がマイナスになる場合が生じるが，これは現在照明している輝度より減光させることを意味する．この差分画像を視点位置で発生すべき反射光強度の画像と置き換え，逆光線追跡により，プロジェクトで発生すべき輝度画像を計算する（図 13-(c)）．この逆光線追跡は，光沢を再現すべき無光沢物体の反射特性を用いて求められる．

## 4. 2 視点追従を考慮したリアルタイム生成

4.1 節で検討した光沢画像生成手法はある視点位置に対する計算を示している．実際には，光沢画像は視点位置によって大きく変化するため，リアルな再現のためには，視点位置に追従した再現を行う必要がある．そこで我々は観察者の頭部に設置した磁気センサ（Fastrack, Polhemus 社）から視点位置を取得することで，視点追従の光沢画像

再現を行った。しかしながら 4.1 節で検討した手法はプロジェクタと物体、視点間の光線追跡を 2 度行う必要があり、計算負荷の問題からリアルタイムな表示が困難となる。そこで、視点とプロジェクタ位置を置き換えることによって、簡易的な計算でリアルタイムな表示を実現できる手法を考案した<sup>17,18)</sup>。光源と視点位置の変換幾何に関する説明を図 14 に示す。

Fig.14  
挿入

通常、光沢の見えるは光源と視点方向が物体表面上の法線に対して対称となる位置に発生する。よって光源が固定の場合、視線の移動に伴って光沢発生位置は変化する。しかし、視点と光源の位置は光沢発生位置での物体法線に対して対称な関係であるため、視線位置の移動は、光源位置の移動に換算できる。そこで、視線位置から光源位置を決定して、視点位置が変化した時に発生する光沢画像を推定する。この方法を用いると光源移動に対する光沢画像を生成するだけで済むため、計算に要する光線追跡は 1 回で済む。

#### 4. 3 光沢再現実験と評価

上記手法を実装した光沢感再現システムの構成を図 15、無光沢円筒上に光沢画像を再現した結果を図 16 に示す。光沢画像生成は Phong モデルを用い、モデルの係数は測定した偏角反射光分布とフィッティングすることで求めた。また、高コントラストな画像が生成できるプロジェクタといえども、発生できる輝度には限界があるため、実物体である光沢円筒側の照明光を調整している。調整はまず、再現する光沢画像の最大反射光量と実物体上の光沢部における最大反射光量が同じになるように、光沢円筒側の照明光を減少させる。光沢画像の最大反射光量はプロジェクタの特性から既知であり、実物体の光沢部に

Fig.15  
挿入

Fig.16  
挿入

おける最大反射光量も偏角分光反射率計測で取得した BRDF 特性から計算することが可能である。そのような調整の後に、再現する画像の拡散反射光を光沢円筒側の拡散反射光と一致させた。再現画像の光沢部と拡散部の反射光量や色制御は 3 節で用いた反射光制御手法を用いている。

最終評価として、再現映像に対して客観評価と主観評価を行った。客観評価では図 16 に示した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た。正確な評価のため、再現側の光沢視点移動は任意位置固定とし、その位置から計測を実施している。計測点及び計測結果を図 17 及び表 1 に示す。光沢部については輝度で、拡散部については色差で評価を行っているが、光沢部反射光量差は  $1[\text{cd}/\text{m}^2]$  以下、拡散部も色差  $\Delta E^*_{94}=0.90$  と両者とも良く一致していることがわかる。一方、主観評価は 14 人の被験者により実施された。図 16 に示すように実物体を隣接させ、再現画像において、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た。評価結果を図 18 に示す。平均が 7.1 点、標準偏差が 0.61 と全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た。視点の移動に対しても光沢画像がリアルタイムに追従するため、質感的一致も高い。しかしながら、視点を固定した静止観察の場合、光沢分布に微妙な違和感を生じたり、光沢画像内部の粒状感の違いなどが指摘された。これらの結果から、質感再現は観察者にとって非常に感度が高く、詳細部分に至るまで正確な表現が要求されることが明らかになった。

Fig.17  
挿入

Table1  
挿入

Fig.18  
挿入

## 5. 結論

我々は高輝度プロジェクタを用いた質感再現システムを構築するために、反射光強度の一致、視点追従の光沢画像生成手法を検討した。反射光強度の一致では、プロジェクタで発生させる RGB 値と投影により生じる反射光強度の三刺激値 XYZ との関係を解析し、PCA スプライン手法と LUT 手法の両者を複合的に用いる方法を提案した。両者の使用範囲は最初に PCA スプライン手法で推定計算された誤差から、再帰的に領域を分割して決定される。この方法を用いて、RGB+透明フィルタを用いた DLP 型プロジェクタなどの複雑な投影方法に対しても、精度良く反射光強度の制御が行えることを印刷物との色一致で確認した。

光沢画像生成手法はプロジェクタ、物体、視点位置と物体の反射特性から光線追跡を用いて生成画像を決定する手法を明確にした。実物体と模擬物体の質感を一致させるべく、両者の反射光画像をモデルベースで計算し、その差分反射光量を逆光線追跡で求める手法により、実現可能となる。また、光沢画像再現を観察者の視点移動に追従すべく、簡易な計算手法も提案した。計測された観察者位置に基づき、光源位置を仮想的に移動させることで光沢画像を簡易に生成でき、リアルタイムな追従が可能である。

これらの手法を用いて再現した模擬物体に対して、光沢感やテクスチャ一致についての主観評価を行った。実物体との比較による 10 点段階評価を 14 人で実施し、平均 7.1 点と高得点を得ることができ、本手法の正確さが確認できた。しかしながら光沢感再現には視線位置ずれや粒状感、微細な分布など、複雑なパラメータも含まれることが明ら

かになった。今後、これらパラメータを質感再現にフィードバックすることにより、高輝度プロジェクタによる実物体再現の高精度化研究を進める予定である。

## **謝 辞**

本研究は総務省戦略的情報通信研究開発の支援を受けて実施した。

## 【参考文献】

- 1) R.Raskar, G.Welch, M.Cutts, A.Lake, L.Stesin, H.Fuchs, "The Office of the Future: Unification of Image-Based Modeling and Immersive", *Proc. of ACM Siggraph*, pp.179-188, (1998).
- 2) F.Kuester, M.A.Duchaineau, B.Hamann, "DesignersWorkbench: Towards real-time immersive modeling", *Proc. of SPIE*, VII, Jan 24-Jan 27 (2000).
- 3) B.Johanson, A.Fox, T.Winograd, "The Interactive Workspaces Project: Experiences with Ubiquitous Computing Rooms", *IEEE Prevasive Computing Special Issue*, April-June, pp.67-74, (2002).
- 4) D.Borro, J.Savall, A.Amundarain, J.J.Gil, A.Garcia-Alonso, L.Matey, "A large haptic device for aircraft engine maintainability", *Computer Graphics and Applications, IEEE*, Vol. 24, Issue: 6, pp.70-74, (2004).
- 5) O.Bimber, L.M.Encarnação and A.Stork, "Seamless integration of virtual reality in habitual workplaces", *Journal for Industrial Science*, Munich University of Technology, vol.55, no.2, pp. 103-112, (2001).
- 6) R.Raskar, K.Low, G.Welch, "Shader Lamps: Animating Real Objects with Image-Based Illumination", *Proc. of 12th Euro graphics*, Workshop on Rendering, London, England, (2001).
- 7) Y.Mukaigawa, M.Nishiyama, T.Shakunaga, "Virtual Photometric Environment using Projector", *Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, pp.544-553, (2004).
- 8) 向川康博, 永井悠文, 大田友一, "SpaceRelighter:パターン投影による照明環境の再現", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.2, pp.155-162, (2005).
- 9) 植田久美子, 山本昇志, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, "画像コンテンツを考慮した投影型プロジェクタの色再現", 日本写真学会年次大会講演要旨, pp.28-29, (2004).
- 10) W.Kunzman, G.Pettitt, "White Enhancement for Color Sequential DLP," *SID Conference Proceedings*, (1998).
- 11) M.C.Stone, "Color Balancing Experimental Projection Display", *Proc.IS&T/SID Color Imaging Conference*, (2001).
- 12) 山本昇志, 鶴瀬麻依子, 津村徳道, 中口俊哉, 三宅洋一, "投影型高輝度プロジェクタによる質感表現技術", カラーフォーラム JAPAN2004 論文集, pp.79-82, (2004).
- 13) N.Tamura, N.Tsumura, Y.Miyake, "Masking model for accurate colorimetric characterization of LCDs", *Journal of SID*, Vol.11, no.2, pp.333-339, (2003).
- 14) T.Funamoto, O.Yamada, H.Motomura, "Extraction of non-linear components from 3D-LUT in ICC

- profiles and re-composition of new profile for better color reproduction”, *Proc. The 13<sup>th</sup>. IS&T Non-Impact Printing Technology*, pp.475-478, (1997).
- 15) T.J.Purcell, I.Buck, W.R.Mark, P.Hanrahan, “Ray Tracing on Programmable Graphics Hardware” *ACM Transactions on Graphics*. **21** (3), pp.703-712, (2002).
  - 16) I.Wald, T.J.Purcell, J.Schmittler, C.Benthin, P.Slusallek, “Real-time Ray Tracing and its use for Interactive Global Illumination”, *Eurographics State of the Art Reports*, (2003).
  - 17) S.Yamamoto, M.Tsuruse, K.Ueda, N. Tsumura, T.Nakaguchi, Y.Miyake, “Reproducing an appearance of the objects using high bright projector”, *Proc. of AIC05 Annual Conference*, (2005).
  - 18) 鶴瀬麻依子, 山本昇志, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一, “視点移動を考慮した投影型プロジェクタによる物体の光沢感制御と再現”, 日本写真学会年次大会講演要旨, pp.32-33, (2005).

## Figure captions

**Fig. 1:** Schematic illustration of Appearance-Based Display system

**Fig. 2:** Summary illustration of proposed display system

**Fig. 3:** Measurement result of the radiance with DLP projector

**Fig. 4:** Schematic illustration of color matching method

**Fig. 5:** Flow chart of calculation for color matching

**Fig. 6:** Experimental condition of color and radiance control

**Fig. 7:** Experimental result of discrimination with two color matching method

**Fig. 8:** Experimental result of discrimination by using input RGB values

**Fig. 9:** Experimental result of multiple color matching

(a) Result of  $\Delta E^*_{94}$  between measured and estimated XYZ which is generated 15 digit pitches in 255/8bit

(b) Result of estimated RGB value and gradation on the boundary that changes from PCA-Spline method to LUT method

**Fig. 10:** Experimental result of matching between printed color and projected color

**Fig. 11:** Result of color matching by using the Macbeth color chart

**Fig. 12:** Geometric illustration of matching with gloss appearance

**Fig. 13:** Schematic illustration of ray tracing calculation

(a) Calculation of view images for gloss and non-gloss object

(b) Illustration for the differential calculation

(c) Inverse calculation to determine the projected image

**Fig. 14:** Transformation between light position and eye position

**Fig. 15:** Experimental system using the projector and 3D tracking system

**Fig. 16:** Experimental results that the proposed display system with gloss appearance

(a) Picture of the experiment under white illumination

(b) Projected image

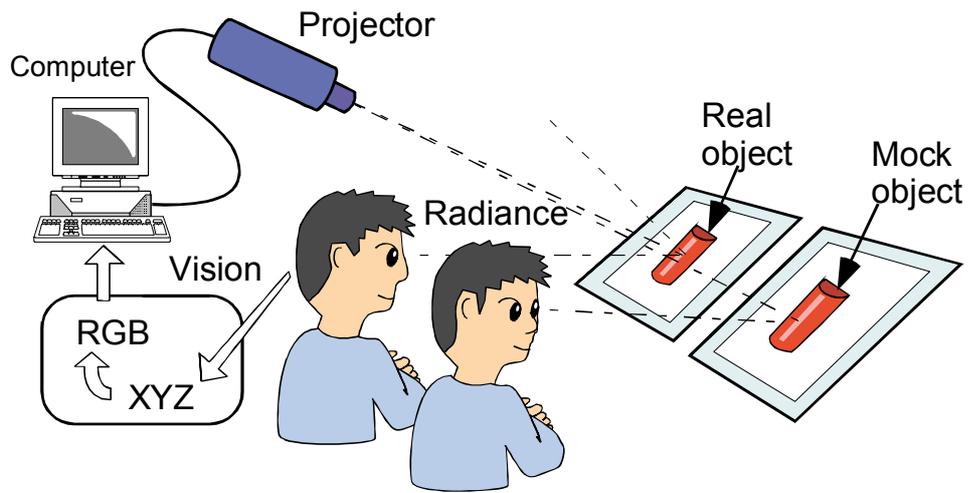
(c) Picture of the experiment in addition to the projected image

**Fig. 17:** The points of measurement for gloss brightness and diffuse color

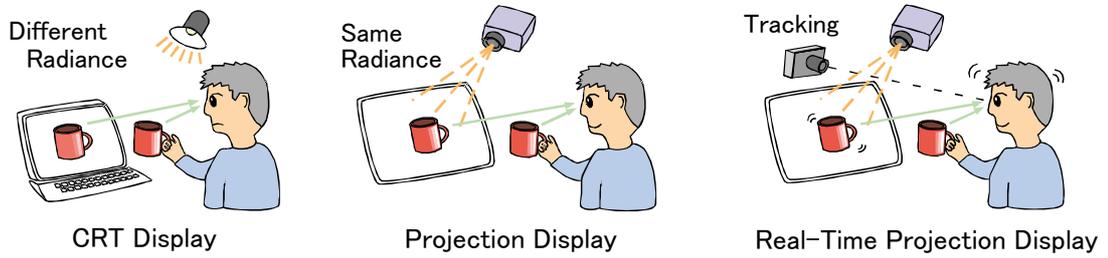
**Fig. 18:** Result of the subjective evaluation for gloss appearance reproduction

**Table caption**

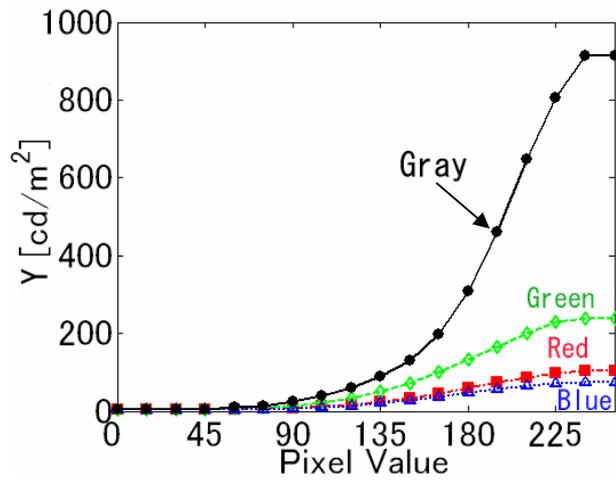
**Table. 1:** Result of color and brightness measurement using the tristimulus colorimeter



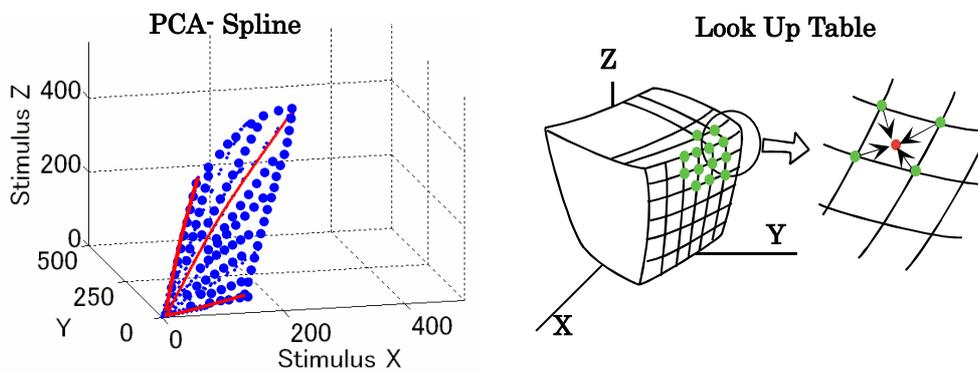
**Fig. 1:** Schematic illustration of Appearance-Based Display system



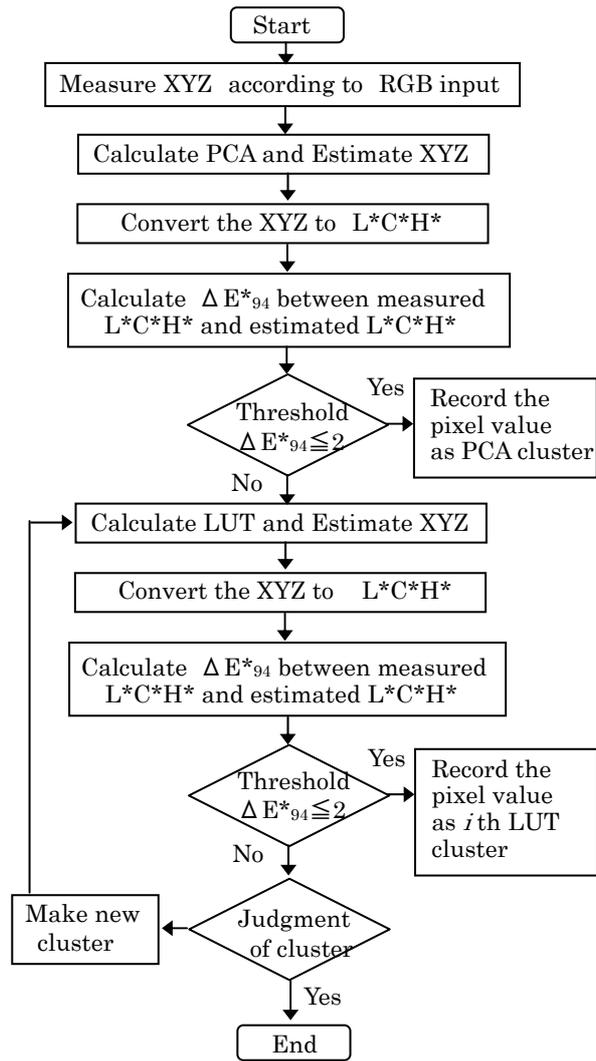
**Fig. 2:** Summary illustration of proposed display system



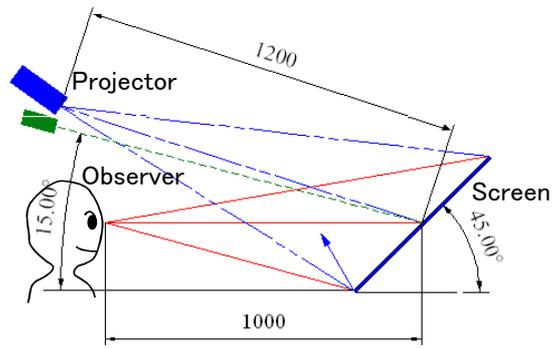
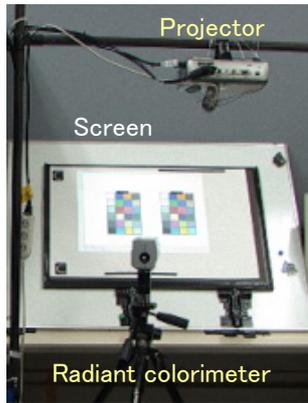
**Fig. 3:** Measurement result of the radiance with DLP projector



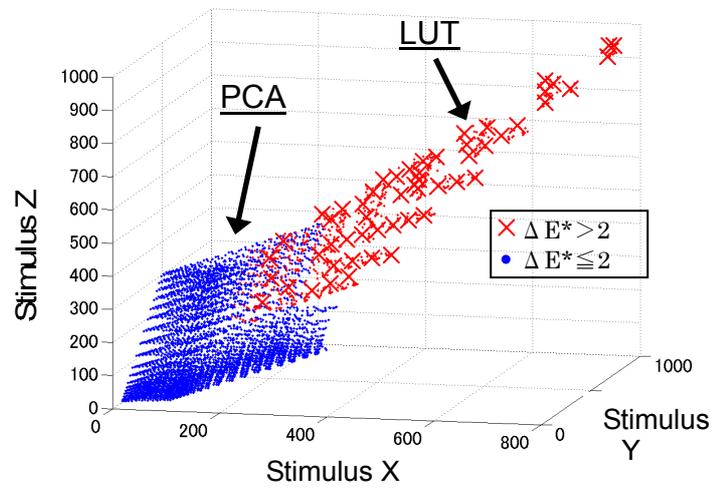
**Fig. 4:** Schematic illustration of color matching method



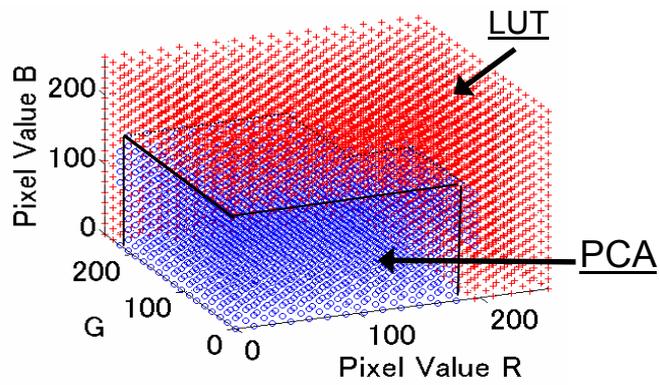
**Fig. 5:** Flow chart of calculation for color matching



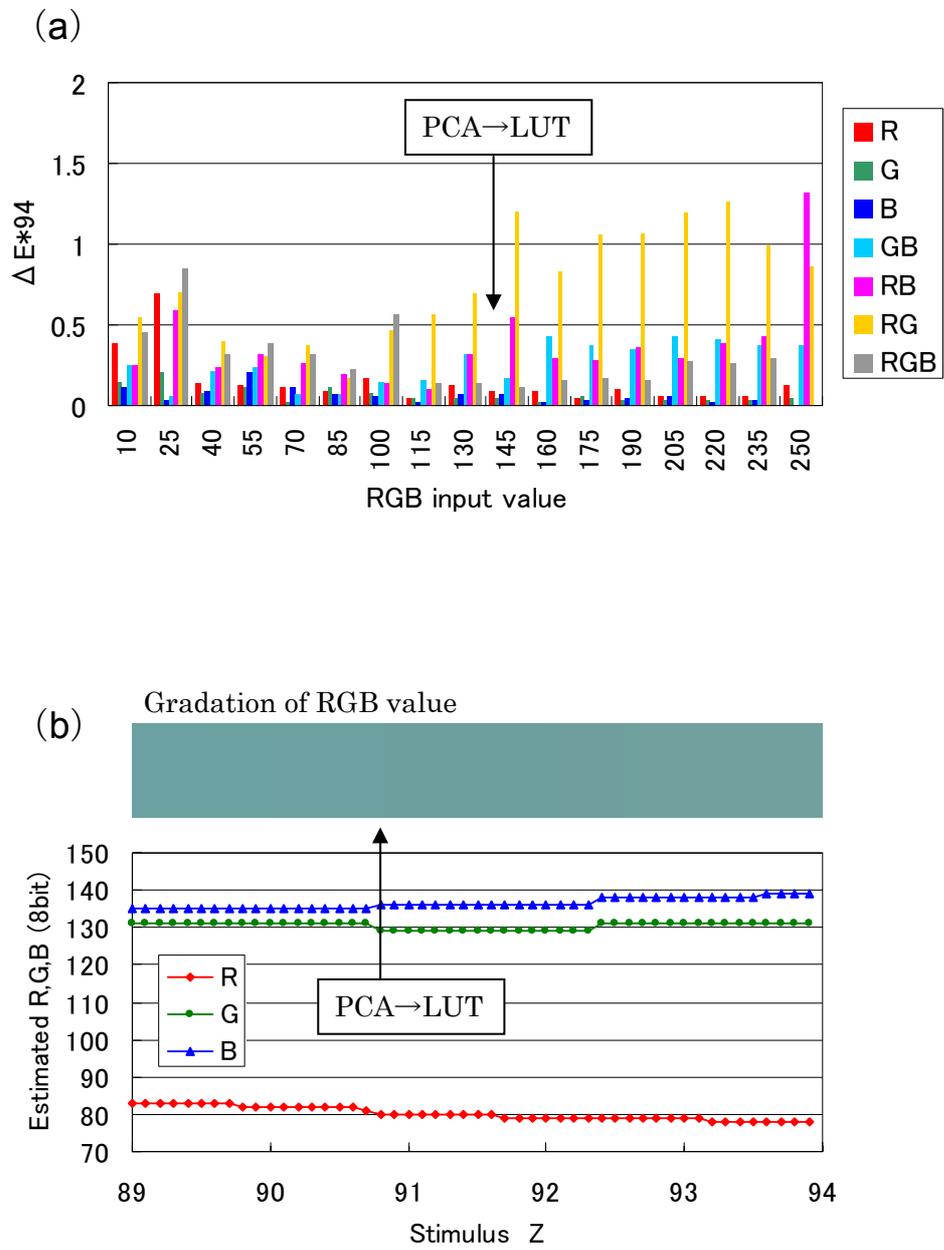
**Fig. 6:** Experimental condition of color and radiance control



**Fig. 7:** Experimental result of discrimination with two color matching method

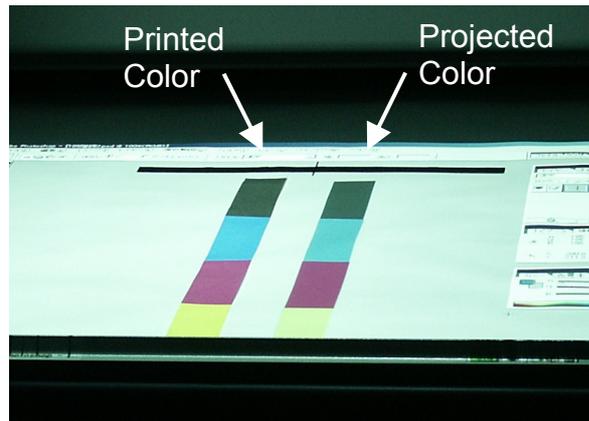


**Fig. 8:** Experimental result of discrimination by using input RGB value

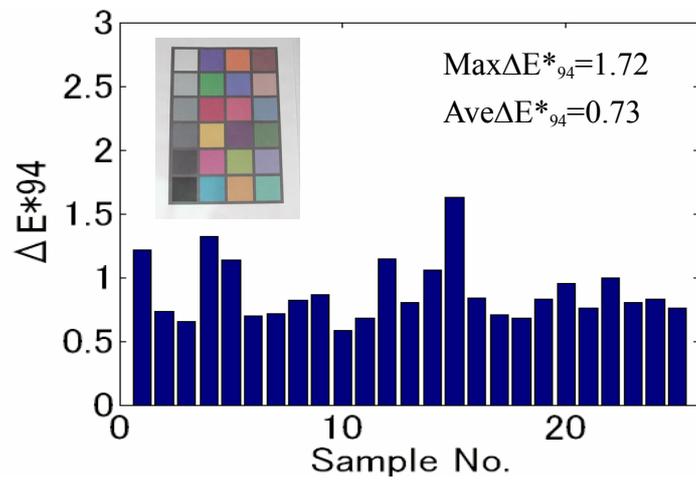


**Fig. 9:** Experimental result of multiple color matching

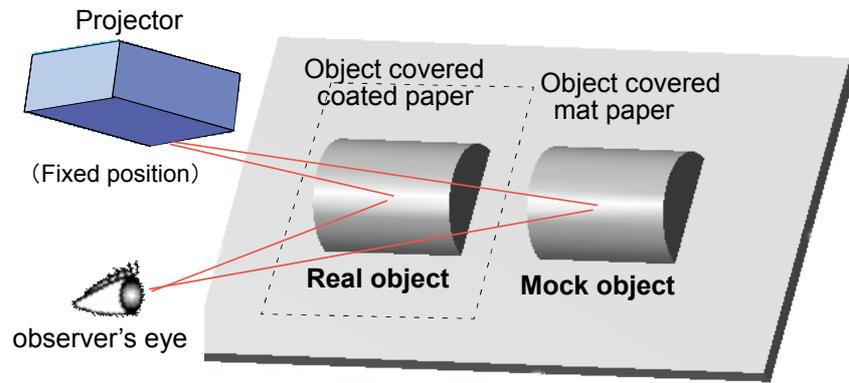
- (a) Result of  $\Delta E^*_{94}$  between measured and estimated XYZ which is generated 15 digit pitches in 255/8bit
- (b) Result of estimated RGB value and gradation on the boundary that changes from PCA-Spline method to LUT method



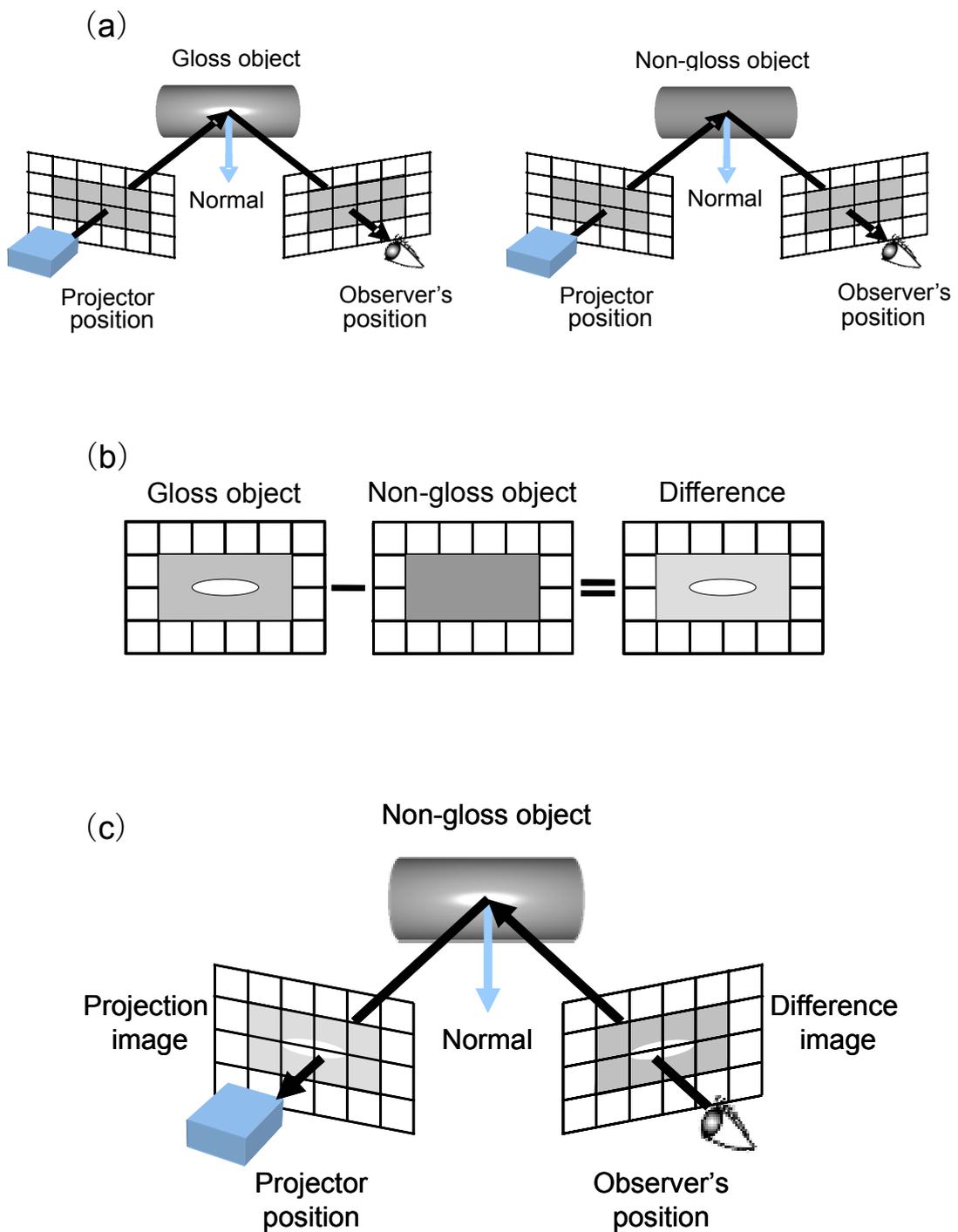
**Fig. 10:** Experimental result of matching between printed color and projected color



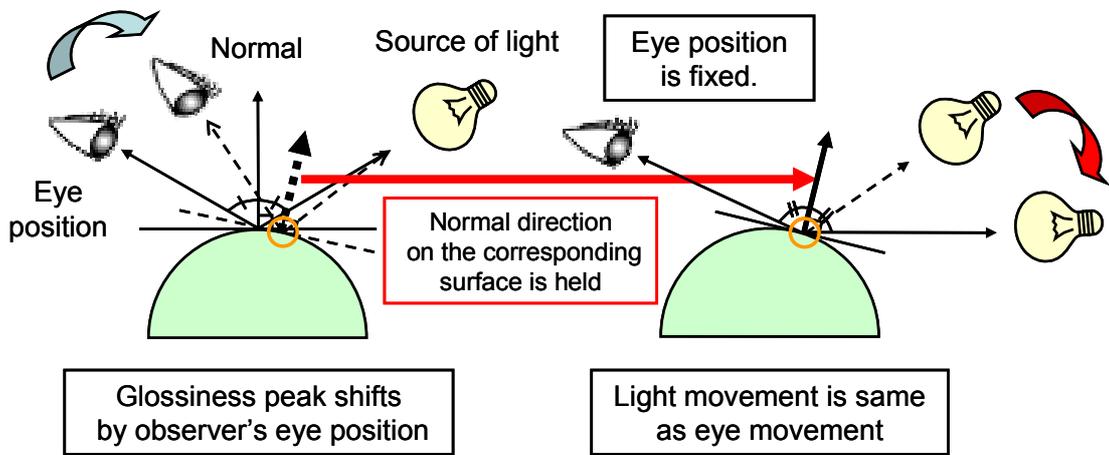
**Fig. 11:** Result of color matching by using the Machbeth color chart



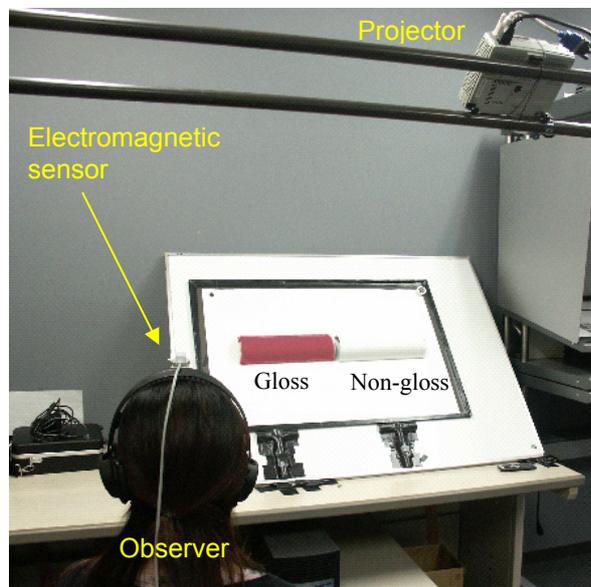
**Fig. 12:** Geometric illustration of matching with gloss appearance



**Fig. 13:** Schematic illustration of ray tracing calculation  
 (a) Calculation of view images for gloss and non-gloss object  
 (b) Illustration for the differential calculation  
 (c) Inverse calculation to determine the projected image

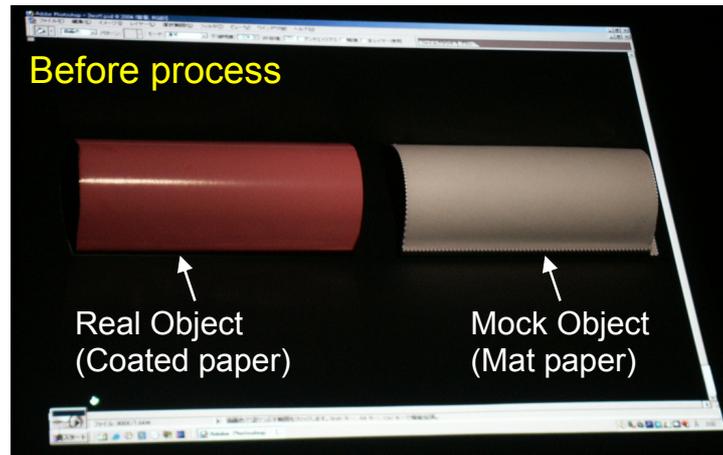


**Fig. 14:** Transformation between light position and eye position

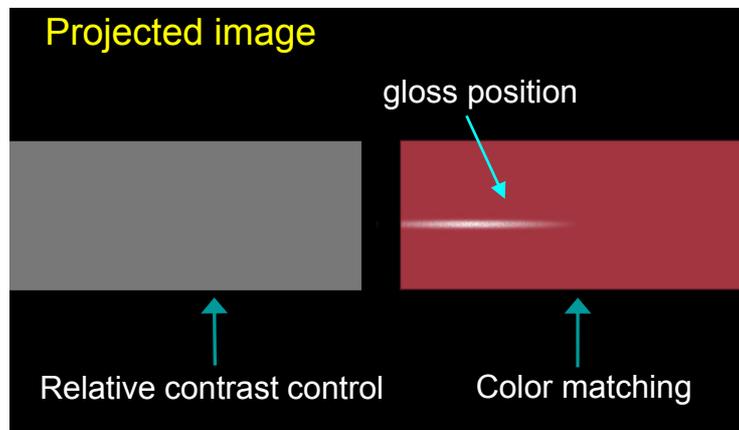


**Fig. 15:** Experimental system using the projector and 3D tracking system

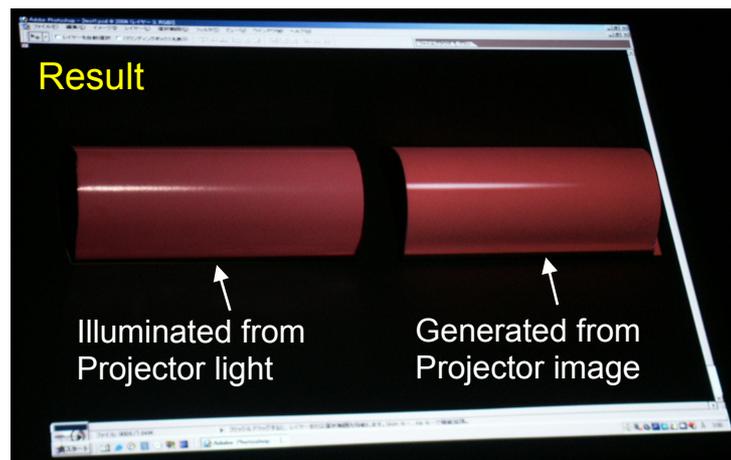
(a)



(b)



(c)



**Fig. 16:** Experimental results that the proposed display system with gloss appearance

(a) Picture of the experiment under white illumination

(b) Projected image

(c) Picture of the experiment in addition to the projected image

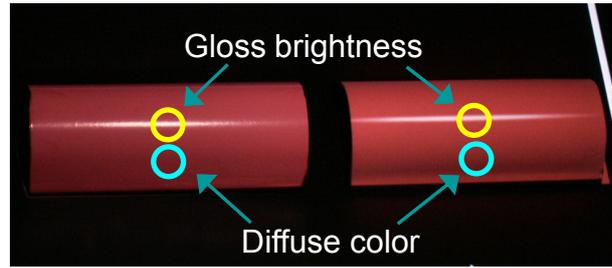


Fig. 17: The point of measurement for gloss brightness and diffuse color

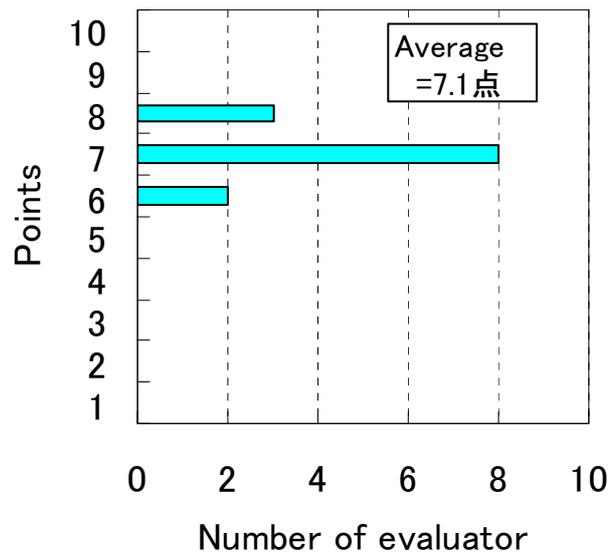


Fig. 18: Result of the subjective evaluation for gloss appearance reproduction

**Table 1:** Result of color and brightness measurement using the tristimulus colorimeter

Times	Gloss brightness Y [cd/m <sup>2</sup> ]		Diffuse of Real object			Diffuse of Mock object		
	Real object	Mock object	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	27.56	26.61	35.23	25.88	12.34	35.11	26.07	13.82
2	27.33	26.42	35.19	26.12	12.51	35.01	26.11	13.54
3	27.54	26.58	35.09	25.11	11.98	34.98	26.31	13.78
4	27.66	26.71	35.14	26.21	12.03	34.95	26.34	13.50
5	27.45	26.75	35.22	26.09	12.44	35.09	26.25	13.78
Average	27.51	26.61	35.17	25.88	12.26	35.03	26.22	13.68

Difference=	0.89	$\Delta E^*_{94} =$	0.90
-------------	------	---------------------	------