

近接光学シースルー方式 複合現実感ディスプレイのための光学補正モデル

中嶋 康博^{†1} 堀井 千夏^{†2} 佐藤 宏介^{†1}

本研究は近接光学シースルー環境における色再現精度の向上を目指す。近年、複合現実感技術を用いて仮想的に実物体の色を再現する研究が盛んに行われている。従来の研究では安価で小型な光学シースルー方式が多く用いられているが、ディスプレイと実物体が近接する場合に色再現精度が低下するといった問題が生じる。これはハーフミラーを透過するディスプレイの放射光による影響が原因である。本稿では、まず、簡略化された光学シースルー環境においてグレースケールで放射光を補正する手法を提案し、シミュレーションにより提案手法の有効性を確認した。

Optical Correction Model for Proximity Optical See-Through Mixed Reality Display

YOSHIHIRO NAKAJIMA,^{†1} CHINATSU HORII^{†2}
and KOSUKE SATO^{†1}

The authors aim to control color of real object's surface for proximity optical see-through mixed reality display. Recently, there are many researches which control real object's color by using mixed reality technologies. In previous researches, optical see-through methods using a monitor and a half mirror are often used to overlay a virtual image on a real object. If the distance between the monitor and the object is short, the accuracy of color reproduction is reduced because the light emitted from the monitor passes through the half mirror and is reflected on the object. As the first step of the research, this paper explains a simplified optical correction model with a gray scale image and a simulation was conducted to show the availability of the model.

^{†1} 大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{†2} 摂南大学経営情報学部

Faculty of Business Administration and Information, Setsunan University

1. はじめに

近年、実空間とコンピュータによって作り出された仮想空間を融合する複合現実感技術に関する研究が盛んに行われている。この複合現実感技術を用いることで、実空間中の対象物体に仮想空間の映像を重畳させ対象物体の形や色などの見えを仮想的に変えることができる。この特徴を利用して、対象物体の色を仮想的に変化させ、ユーザの意図する色を再現する研究が注目されている。

色を再現するために、プロジェクタを用いるプロジェクション方式¹⁾⁻³⁾とディスプレイとハーフミラーを用いる光学シースルー方式^{4),5)}と呼ばれる二種類の手法が一般的に用いられ、プロジェクション方式では色を調節したプロジェクタ光を対象物体に対して投影し対象物体の色を再現し、光学シースルー方式ではハーフミラーによってディスプレイに表示された画像と対象物体を網膜上で重畳することで色を再現する。しかし、プロジェクション方式は対象物体に直接、投影を行うために対象物体を劣化させてしまう。また、反射率の低い物体に対しては色再現を行うことができず、更に、プロジェクタを用いるために高価で稼働不可能な大型なシステムとなるといった短所がある。一方、光学シースルー方式は、対象物体に直接、投影を行うことがなく対象物体を劣化させることはない。また、ハーフミラーの透過率を調節することで反射率の低い物体や高い物体に対しても色再現を行うことができ、更に、小型な液晶ディスプレイを用いることにより小型で稼働可能な色再現システムを構築することが可能である。しかし、小型な色再現システムにおいて、従来の手法⁵⁾により色再現を行うと色再現精度が低下するといった問題が生じる。これは、小型な色再現システムでは対象物体とディスプレイの距離が近く、従来手法では考慮されていなかったディスプレイから放射されハーフミラーを透過する光(ディスプレイからの放射光)がカメラで観測されることが原因である。

そこで、本研究ではディスプレイからの放射光を補正し、色再現精度の向上を目指す。本稿では、まず、簡略化された光学シースルー環境においてグレースケールの下でディスプレイからの放射光の補正を考える。この時、ディスプレイに表示された画像を重畳画像、カメラで観測される画像を観測画像とし重畳画像と観測画像の関係式を合成積を用いて表し、関係式を重畳画像について解くことによりディスプレイからの放射光を補正する。

本研究は、小型で稼働式の色再現システムにおいて色再現精度を向上させることができる。この色再現システムを用いて、時間経過により色が劣化した博物館の展示物の劣化前の色を再現することが可能となる。

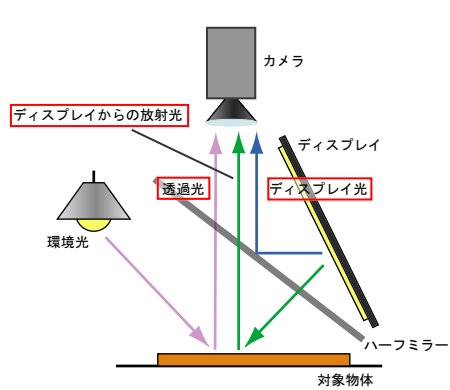


図1 ディスプレイが対象物体に近接する場合の光学シー
スルー環境

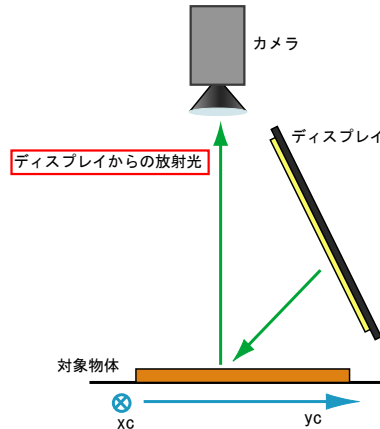


図2 本稿で想定する環境

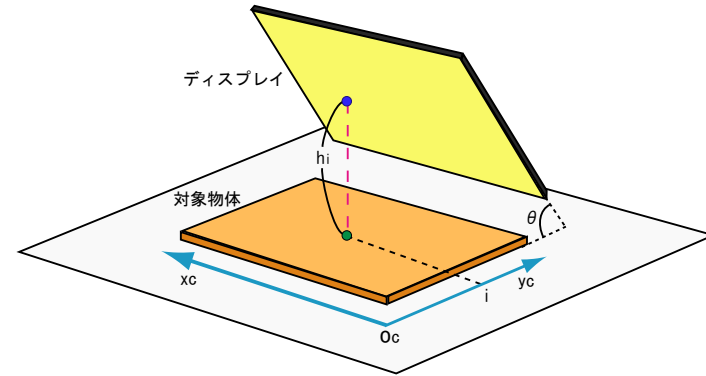


図3 対象物体とディスプレイ間の高さと傾き

2. ディスプレイからの放射光の補正方法

本稿では、対象物体は平面で反射率一定の均等拡散面、ディスプレイは点光源の集合であると仮定し、ディスプレイからの放射光を補正する．図1に示すディスプレイが対象物体に近接する場合の光学シースルー環境において、カメラに入る光は、ディスプレイ光、透過光、ディスプレイからの放射光の三種類である．本稿では、まず、ディスプレイからの放射光に着目し、図1の環境からハーフミラーを除いた図2の簡略化された環境においてグレースケールの下で補正を行う．

2.1 重畳画像と観測画像の関係

本稿で想定する図2の環境において、ディスプレイの画素を点灯させるとカメラで観測される画像は二次元ガウス分布に従うものと仮定する．また、二次元ガウス分布の分散は対象物体からディスプレイを光らせた場所までの高さに比例することになる．つまり、重畳画像と観測画像の関係は次式で表される．

$$c(x_c, y_c) = \sum_{i=0}^{M_c} (p_i * \delta_i d)_{x_c, y_c} \quad (1)$$

$$\delta_i(x_c, y_c) = \begin{cases} 1 & (y_c = i) \\ 0 & (else) \end{cases} \quad (2)$$

$$p_i(x_c, y_c) = \frac{a}{2\pi\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{x_c^2 + y_c^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_i = mh_i \quad (4)$$

ただし、ディスプレイに表示する重畳画像の座標系をカメラで観測される観測画像の座標系に合わせておくものとし、カメラの解像度を $M_c \times N_c$ とする．観測画像の座標系は、図2の矢印の方向とする．観測画像において、 y 座標が小さい位置に写っている物体ほど、物体からディスプレイまでの高さが大きいことを表す．また、 a, m は定数とし、 h_i は図3に示すように重畳画像の y 座標が i である点から対象物体までの高さとする． p_i は点拡がり関数 (Point Spread Function : PSF) と呼ぶ．

2.2 目標画像からの重畳画像の推定方法

重畳画像と観測画像の関係を表した式 (1) から、PSF が画像の座標に大きく影響されると言える．すなわち、PSF のピークと拡がりが増えることが確認できる．ただし、本稿では、PSF のピークを PSF の最大値、拡がりを PSF の変曲点までの距離とする．この時、

PSF p_i のピークは、式 (3)、式 (4) により、 $\frac{a}{2\pi m^2 h_y^2}$ と表すことができる。また、PSF の拡がりは、PSF が二次元ガウス分布 p_i であることから σ_i となる。本稿では、ディスプレイからの放射光を補正するために、まず、画像の座標に依って変化する PSF を持つ画像に、座標に依らず PSF が一様となる変換を施す。この変換は輝度変換と座標変換という二段階の変換から成り立っていると考えることができる。輝度変換とは画像の画素値を変換し PSF のピークを一様にする変換であり、座標変換とは画像の座標系を変換し PSF の拡がりを一様にする変換である。この二段階の変換を画像に施すことにより PSF を画像上の座標に依らない関数に変換することができる。この過程の概念図を図 4 に示す。また、図 4 左側の青い点線に沿った画素値の変化を図 4 の右側に示す。輝度変換により PSF のピークが、座標変換により PSF の拡がりが一様に変換されることが分かる。本稿では、二段階の変換後の画像の PSF が変換前の画像の y 座標が 0 の時の PSF p_0 となる輝度変換と座標変換を施すことにする。輝度変換、座標変換については後述する。二段階の変換を式 (1) 中の重畳画像と観測画像に施すことにより式 (1) は次式で表される。

$$c_T = p_0 * d_T \quad (5)$$

ただし、 c_T 、 d_T は、それぞれ c 、 d に輝度変換、座標変換を施した画像とする。式 (5) の両辺にフーリエ変換を施すと次式となる。

$$C_T = P_0 D_T \quad (6)$$

ただし、 C_T 、 D_T 、 P_0 をそれぞれ c_T 、 d_T 、 p_0 のフーリエ変換とする。式 (6) を D_T について解くと次式で表される。

$$D_T = P_0^{-1} C_T \quad (7)$$

式 (7) の両辺に逆フーリエ変換を施し、輝度変換、座標変換の逆変換を施すと式 (8) で表される。ただし、 \mathcal{F}^{-1} は逆フーリエ変換、 T^{-1} は輝度変換、座標変換の逆変換とする。

$$d = T^{-1} \{ \mathcal{F}^{-1}(P_0^{-1} C_T) \} \quad (8)$$

式 (8) により目標画像から重畳画像の画素の画素値を得ることができ、これを重畳画像のすべての画素について行うことにより目標画像から重畳画像を求めることができる。

2.3 輝度変換

前述した二段階の変換の内の輝度変換について述べる。この輝度変換により、PSF のピークを画像の座標 (x, y) に依らない一様な $y = 0$ の場合のピーク $\frac{a}{2\pi m^2 h_0^2}$ に変換する。変換前の画像の座標 (x, y) における PSF のピークを p_{max_y} とする。この時、 p_i の拡がりが小さく、 p_{max_y} は点 (x, y) 周りの PSF の影響のみを受けるとすると p_{max_y} は式 (9) で表される。ただし、 ϵ は p_{max_y} が PSF の影響を受ける範囲とする。

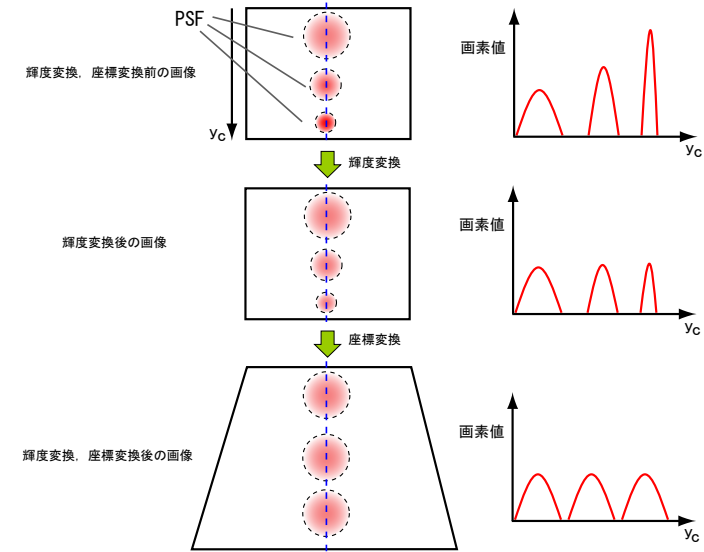


図 4 輝度変換、座標変換による PSF の変化の過程の概念図

$$p_{max_y} = \sum_{j=x-\epsilon}^{x+\epsilon} \sum_{i=y-\epsilon}^{y+\epsilon} p_i(x-j, y-i) \quad (9)$$

ϵ が微小であり、点 (x, y) 周りの微小区間において、 p_i が i に依らない関数 p_y であるとし、式 (9) を次式で表す。

$$p_{max_y} = (2\epsilon + 1)^2 \max \{ p_y(x, y) \} \quad (10)$$

$$= \frac{ka}{2\pi m^2 h_y^2} \quad (11)$$

ただし、 $k = (2\epsilon + 1)^2$ とし、 $\max \{ f(x, y) \}$ を関数 $f(x, y)$ の最大値とする。 p_{max_y} を y に依らず一定の $\frac{a}{2\pi m^2 h_0^2}$ とするために、変換前の画像の座標 (x, y) の画素値を $d(x, y)$ 、変換後の画素値を $d'(x, y)$ として輝度変換を次式と定める。

$$d'(x, y) = \frac{h_y^2}{k h_0^2} d(x, y) \quad (12)$$

この輝度変換により、PSF のピークを画像の座標に依らない一様なピークに変換すること

ができる．

2.4 座標変換

前述した二段階の変換の内の座標変換について述べる．この座標変換により，画像の座標 (x, y) に依って変換する PSF の拡がりを一様な $y = 0$ の場合の拡がり σ_0 に変換する．変換する PSF の拡がり，式 (4) に示したように画像上の点からディスプレイまでの高さに比例して大きくなる．このため，高さの逆数に比例した変化率で画像の座標系を変換することで PSF の拡がりを一様にする可以考虑，座標変換前の画像の座標を (x, y) ，座標変換後の座標を (x', y') とし座標変換を次式と定める．

$$x' = \frac{h_0}{h_0 - y \tan \theta} x \quad (13)$$

$$y' = \frac{h_0}{\tan \theta} \log \left(\frac{h_0}{h_0 - y \tan \theta} \right) \quad (14)$$

ただし， θ は図 3 に示すようにディスプレイと対象物体の成す角とする．式 (13) を x について，式 (14) を y についてそれぞれ偏微分すると， x, y 軸両方向についてそれぞれの変化率が高さの逆数に比例することが分かる．これは，画像の y 座標が小さい時，座標変換により PSF の拡がりはあまり変化せず，画像の y 座標が大きい時，座標上の点からディスプレイまでの高さに比例して，PSF の拡がりが拡大されることを表わしている．この座標変換によって PSF の拡がりを画像の座標に依らない一様な拡がりに変換することができる．

3. シミュレーション実験

提案手法によりディスプレイからの放射光を補正し，目標画像のような観測画像を得るためにディスプレイに表示すべき重畳画像を求めるシミュレーション実験を行った．ここでは，シミュレーション環境，実験の流れ，実験結果について述べる．

3.1 シミュレーションにおいて想定する環境

シミュレーションにおいて想定する環境を図 5 に示す．対象物体は分光反射率が 1 の均等拡散面とした．図 5 においてディスプレイの真上にカメラが配置されているが，このカメラはディスプレイを撮影するのではなく対象物体の表面を撮影するものとする．重畳画像，観測画像，目標画像をそれぞれ 8bit のグレースケール画像とした．

3.2 実験手順

提案手法を用いる場合と用いない場合の二つのシミュレーションを行った．提案手法を用いる場合のシミュレーションでは，まず，提案手法を用いて目標画像のような画像をカメラ

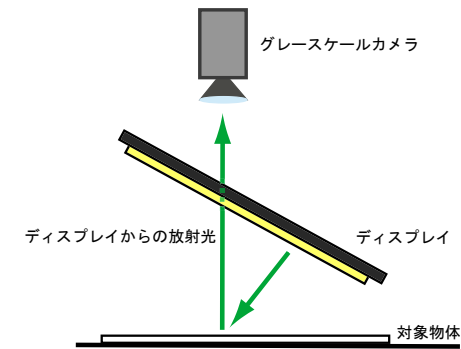


図 5 シミュレーションにおいて想定する環境

で観測するために必要なディスプレイに表示すべき重畳画像を求めた．次に，式 (1) より観測画像を得て，得られた観測画像と目標画像の各画素の差の絶対値を求めた差分画像と RMS (Root Mean Square) を計算した．提案手法の用いない場合のシミュレーションでは，提案手法を用いずに重畳画像を求め，次に観測画像を求め，求めた観測画像と目標画像の差分画像と RMS を計算した．最後に，二つのシミュレーションで得られた差分画像と RMS をそれぞれ比較し評価を行った．

提案手法を用いて目標画像から重畳画像を求める過程は図 6 のようになった．まず，目標画像に輝度変換，座標変換を施し PSF を一様にし，そして，PSF を一様にした画像をウィナーフィルタによりデコンボリューションした．デコンボリューションにより求められた画像に輝度変換，座標変換を施し，観測画像の座標系で表された重畳画像を求め，そして，重畳画像の座標系を変換し重畳画像の座標系で表された重畳画像を求めた．提案手法を用いない場合は目標画像の座標系を重畳画像の座標系に変換し重畳画像を求めた．

3.3 実験結果

基本的な図形として用いた格子模様とイラスト画を目標画像としてシミュレーション実験を行った．格子模様を目標画像として実験を行った結果を表 1 の左側に，イラスト画を目標画像として実験を行った結果を表 1 の右側に示す．表 1 の提案手法を用いて求めた観測画像と用いずに求めた観測画像を比較すると，提案手法を用いて求めた観測画像の方がエッジの部分が明瞭になっていることが分かる．このことは，目標画像と観測画像の差分画像を比較した時に提案手法を用いた方が差分画像のエッジ部分が黒く差分が小さくなっていることから明らかである．また，表 1 の目標画像と観測画像の RMS を比較すると提案手法を用

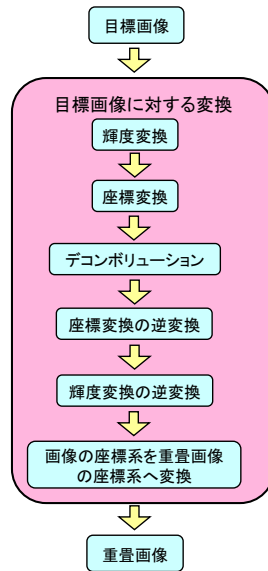


図 6 提案手法により目標画像から重畳画像を求める過程

いた方が RMS が小さく、提案手法を用いて求めた重畳画像により観測画像を目標画像のような画像に補正できることが分かる。

4. 考 察

実験結果の差分画像や RMS から、目標画像と観測画像が完全には一致していないことが分かる。ここでは、一致しない原因について考察し、更に提案手法をカラー画像へ拡張する方法について述べる。最後に本研究により実現される展示物色再現システムについて述べる。

4.1 目標画像と観測画像の間に誤差が生じた原因

差分画像や RMS から目標画像と観測画像が完全には一致していないことが分かる。これは求めた重畳画像に誤差があるためだと考えられる。そこで、誤差が発生したいくつかの原因について考察する。まず、誤差が発生した原因として画像が 0 から 255 の整数値で表現されていることが考えられる。デコンボリューションによって求められる画像は実数値であるが、重畳画像を求めるために 0 から 255 の整数値に変換しておりこのために誤差が発生し

表 1 実験結果

	格子模様		イラスト画	
	適用なし	適用あり	適用なし	適用あり
目標画像				
提案手法の適用の有無	適用なし	適用あり	適用なし	適用あり
重畳画像				
観測画像				
差分画像				
RMS	27.6919	26.8692	13.6165	12.6973

たとえられる。次に、輝度変換、座標変換における誤差も考えられる。輝度変換、座標変換では PSF の拡がり微小であることを仮定しているが、シミュレーション実験では PSF の拡がり大きく、仮定とは異なっている。PSF の拡がり大きいため輝度変換、座標変換時に誤差が発生し、その結果、重畳画像に誤差が発生したと考えられる。更に、本稿では目標画像から重畳画像を求めるためにウィナーフィルタを用いてデコンボリューションを行った。今回のシミュレーションでは、シミュレーションを繰り返しながらウィナーフィルタのパラメータを目標画像と観測画像の RMS が小さくなるように求めたため、今回シミュレーションで用いたパラメータが RMS を最も小さくするパラメータではない。従って、パラメータの調整によって更に RMS を小さくすることが可能であり、目標画像と観測画像を近づけることができると考えられる。

4.2 カラー画像への拡張

提案したディスプレイからの放射光の補正法は、グレースケール画像について有効であった。ここでは提案手法をカラー画像へ拡張することを考える。グレースケールの画像の場合、重畳画像と観測画像の関係は式(1)で表わされた。そこで、式(1)をカラー画像に拡張し、カラー画像に対する重畳画像と観測画像の関係を式(15)で表す。ただし、 $c_A(x_c, y_c)$ はカメラの (x_c, y_c) の画素におけるA成分の画素値とし、 p_{ABi} は式(1)で表されるPSFを定数倍したものとする。

$$\begin{cases} c_R(x_c, y_c) = \sum_{i=0}^{M_c} \{ (p_{RRi} * \delta_i d_R)_{x_c, y_c} + (p_{RGi} * \delta_i d_G)_{x_c, y_c} + (p_{RBi} * \delta_i d_B)_{x_c, y_c} \} \\ c_G(x_c, y_c) = \sum_{i=0}^{M_c} \{ (p_{GRi} * \delta_i d_R)_{x_c, y_c} + (p_{GGi} * \delta_i d_G)_{x_c, y_c} + (p_{GBi} * \delta_i d_B)_{x_c, y_c} \} \\ c_B(x_c, y_c) = \sum_{i=0}^{M_c} \{ (p_{BRi} * \delta_i d_R)_{x_c, y_c} + (p_{BGi} * \delta_i d_G)_{x_c, y_c} + (p_{BBi} * \delta_i d_B)_{x_c, y_c} \} \end{cases} \quad (15)$$

それぞれの式について、本稿で定義した輝度変換、座標変換を施し更にフーリエ変換を施すことにより重畳画像と観測画像の関係は行列の形で表すことができる。この行列の逆行列を求めることで、カラー画像において目標画像から重畳画像を求めディスプレイからの放射光を補正することができる。しかし、この逆行列は常に求めることができる保証はないため、逆行列を求めることができない場合の処理を考える必要がある。

4.3 展示物色再現システム

本研究を用いた小型で稼働式の色再現システムは博物館の展示物の色再現に利用することができる。博物館の展示物は時間経過などにより色が劣化していることがあり劣化前の色を見ることはできない。しかし、ユーザが本システムを通して展示物を見ると、ディスプレイに表示された画像と展示物が重なって見え、仮想的に再現された劣化前の展示物の色を見ることができる。本システムにより、ユーザが展示物を近くで見てディスプレイと展示物が近接しても精度を低下させることなく色再現を行うことが可能となる。また、PhoneGuide⁶⁾や A Handheld Augmented Reality Museum Guide⁷⁾といった小型な博物館展示物ガイドシステムがある。これらの博物館展示物ガイドシステムはビデオシースルー方式と呼ばれる複合現実感技術を利用したシステムであり、展示物と2D/3Dグラフィック、文章、アニメーションなどを用いて作成した展示物の解説を合成して表示することで展示物に対する情報を付加する。本システムとこれらのシステムを組み合わせることでガイドシステムに色再

現を保証し、ユーザに対して展示物のより正確な情報を提示することができる。

5. 結 論

本稿では色再現精度の向上させるために、ディスプレイと対象物体が近接した際に従来手法では考慮されていなかったディスプレイからの放射光に着目し、まず、簡略化された光学シースルー環境においてグレースケールの下で重畳画像と観測画像の関係を提案した。更に、提案した関係式により目標画像から重畳画像を求めディスプレイからの放射光を補正するために輝度変換と座標変換という二つの変換を提案した。提案したディスプレイからの放射光の補正法の有効性をシミュレーションを用いた実験により確認し、提案手法により求めた重畳画像を用いて観測画像を目標とする画像に補正することができた。

本稿で提案したディスプレイからの放射光の補正法をカラー画像へ拡張し、従来手法と組み合わせることでディスプレイと対象物体が近接した場合においても精度の高い色再現システムの構築が期待できる。

参 考 文 献

- 1) Raskar, R., Welch, G., Low, K. and Bandyopadhyay, D.: Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination, *Rendering Techniques 2001: Proceedings of the Eurographics Workshop in London, United Kingdom, June 25-27, 2001*, Springer (2001).
- 2) 吉田壮伸, 堀井千夏, 佐藤宏介: 複合現実感のための反射色計測に基づくプロジェクタ投影テクスチャ, 日本 VR 学会論文誌, Vol.9, No.1, pp.97-104 (2004).
- 3) Ashdown, M., Okabe, T., Sato, I. and Sato, Y.: Robust content-dependent photometric projector compensation, *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'06), Projector-Camera Systems (PROCAMS)*, p.6 (2006).
- 4) 柳川由紀子, 堀井千夏, 佐藤宏介: 複合現実感によるデザイン画彩色支援システム, システム制御情報学会論文誌, Vol.16, No.6 (2003).
- 5) 青木洋一, 堀井千夏, 佐藤宏介: 透過度可変型光学シースルー方式を利用した実物体の色再現手法, 日本 VR 学会論文誌, Vol.10, No.3, pp.411-420 (2005).
- 6) Föckler, P., Zeidler, T., Brombach, B., Bruns, E. and Bimber, O.: PhoneGuide: Museum Guidance Supported by On-Device Object Recognition on Mobile Phones, *Proceedings of the 4th international conference on Mobile and ubiquitous multimedia*, ACM New York, NY, USA, pp.3-10 (2005).
- 7) Schmalstieg, D. and Wagner, D.: A Handheld Augmented Reality Museum Guide, *Proceedings of IADIS International Conference on Mobile Learning* (2005).