

## 表面質感を保存展示するイメージベースデジタルアーカイブ法

○酒田 善史, 佐藤 宏介, 井口 征士

大阪大学大学院 基礎工学研究科

〒560-8531 豊中市待兼山町1番3号

E-mail:{sakata,sato,inokuchi}@inolab.sys.es.osaka-u.ac.jp

あらまし：博物館などで展示する歴史的に貴重な文化財の実環境中の照明条件下に適応するデジタルアーカイブ化について考える。文化財には複雑形状、光に対する特殊な反射特性を持つものがあるため、物理特性を計測すること無しに質感を表現できる Image-Based Rendering の考え方で、多光源画像(多様な光源環境下で撮影された画像群)によって作成することが有望視されている。この多光源画像を作成するための従来の多光源照明システムの欠点を補う新しいプロジェクション方式の多光源システムを提案する。また、実環境中の照明の方向、明るさ、色を計測することで、多光源画像より実環境中の照明条件に適応する画像を合成する。

キーワード:Image-Based-Rendering, 画像データベース, 博物資料のデジタル保存, 色彩情報処理, 記録保存技術, デジタル博物館

## 3D Digital Archives with Interactive Photometric Light

○Yoshifumi Sakata Kosuke Sato Seiji Inokuchi

Faculty of Engineering Science, Osaka University

1-3 machikaneyama-cho, Toyonaka City, Osaka 560-8531 Japan

E-mail:{sakata,sato,inokuchi}@inolab.sys.es.osaka-u.ac.jp

Abstract: This report describes three dimensional digital archives which can adapt virtual objects to the real light condition in a museum. These image archives are consisted of multiple light source images which are captured with dome-like distributed light sources. The virtual objects to be presented, which are illuminated under an arbitrary light condition controlled by a user. The arbitrary light condition is realized by synthesizing from the multiple light source images. By integrating an observer of the real light condition with fish-eye camera, these archives are able to reflect the real light environment to the virtual object.

Keyword : Image-Based Rendering, Multiple Lightsource Image, Light Space, Digital Archives, Digital Museum

## 1. はじめに

現在、人類の遺産を後世に残していくため多様な種類の事物のデジタルアーカイブ化が盛んになっている。アーカイブとは事物を記録し収蔵するものである。例えば、音のアーカイブとしてはアナログの磁気テープで保存するミュージックライブラリがあったが、そこでは今、情報の劣化しない CD や MD 等のデジタルメディアが使用されるようになってきている。図書情報では、古書や専門書などの本をデジタルアーカイブ化しようとしている。デジタルアーカイブ化する利点として、情報の劣化しない、ネットワークを介してデジタル化した情報の公開が容易であるなどが挙げられる。

今後これらの利点を活かすことができる分野としては、現在博物館に収蔵されているような文化財などのアーカイブ化が考えられる。地中に埋まっていた木製品などは地中から掘り出すと直ちに乾燥のため変型したり、また遺跡などは風化してしまったり発掘時の形状を保つことが難しいため、アーカイブ化により情報の劣化を防止することが必要となるからである。

更にこれらの情報がデジタル化されれば情報のコピー（複製作成）が容易となる。コピーが容易であると複数の箇所ですべてその文化財を同時に展示することができる。例えば、ヨーロッパにあるブロンズ像と日本の仏像を並べて展示することも可能となる。また、詳細な情報も同じに電子化することにより、検索が容易となる。最後に、インターネットなどのネットワークを介して情報を公開することが容易となり、世界中でアーカイブ化された文化財をいつでも観賞することができる。

そこで著者らは、絵画や木造物などの歴史的に貴重な文化財の高精細なデジタルアーカイブ化を考える。文化財をデジタルアーカイブ化し、そのデジタルアーカイブを博物館などで展示する方法としては、MR(Mixed Reality)技術を用いて展示するのがよいと考えられる。MR は複合現実感とよばれ仮想現実感(VR)の派生技術で実物を基本とした仮想空間の構築法を言う。MR 技術を用いる理由としては、VR では仮想世界中の仮想物体しか見ることができず実世界が見えないので、周りに実物の文化財があ

ったとしても直接見るできないことが挙げられる。また、文化財を写真やホログラムで記録して実世界上に展示したとしても、写っているものは撮影時の環境に依存しており撮影時の環境は後で変更不可能であるため実世界の環境になじまないことがある。従って人間が写真を見た場合、違和感を感じてそこに物体があるようには感じられない。この問題を解決するためにも MR 技術を用いることができる。後で文化財の周囲の光源環境を自由に変更できるようにデジタルアーカイブ化すれば、どのような環境にも文化財を適応させることができるからである[1]。このような照明条件を再生時に変更できる三次元物体デジタルアーカイブを用いて実現する MR 展示システムを提案する。以下、MR 展示システムの構成について述べる。

## 2. MR 展示システムのご概念

### 2-1 システム構成

図1に MR 展示システムの構成を示す。このシステムでは、はじめに環境光を天空カメラなどで取り込み展示スペース内の光源の方向を推定する。次に、推定した光源方向により実環境に融合した画像を作成し、仮想空間となるディスプレイ上に表示させることで複合現実感 (Mixed Reality)を実現する。

### 2-2 表現方法

光源方向より実環境に適した画像を作成するためには、CG では、物体の形状、反射率などの物理パラメータが必要となるが、そのようなパラメータを物理計測するのは困難である。よって、物理計測するのではなく Image-Based Rendering の考え方で、多様な光源環境下で撮影された画像群よっても作成することが可能である。この様な光源環境下で撮影された画像群を多光源画像と呼ばれている。また、多光源画像を用いて、再生時に照明のインタラクティブな変更を行うことによって光沢感を感じることもできる。多光源画像を作成するためのプロジェクトを用いたリアルタイムに撮影が行えるシステムを3章で述べる[2]。

実環境に適した画像を作成するためには多光源画像を作成するだけではなく、実空間中で物体に照射

される環境光を取り込まなければならない。全方位からの環境光より照明の方向を検出し、対応する多光源画像に重み付け、加算することで実環境に適した画像を作成し仮想空間中表示する。環境光の取得方法については4章で述べる。

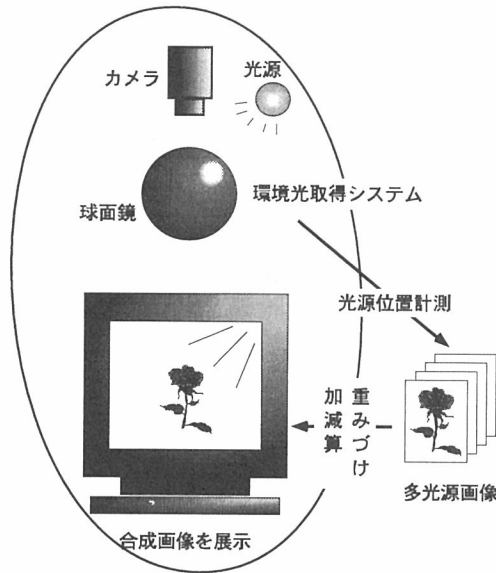


図 1 MR 展示システムの構成

### 3. プロジェクション方式による物体照明法の提案

多様な照明環境を合成するためには、あらかじめ多様な光源を用い多方向から物体へ光を照射することが必要となる。そこで本研究では照明ドームへの光学プロジェクションを用いて多様で動的な照明環境を作成するシステムを提案する。

#### 3-1 従来の多光源照明システム

従来の全方位からの照明が行える多光源照明システムとして、ロボットアームを用いて光源の位置・照明の方向を制御するシステムや光源を複数個用意するもの、ターンテーブルを利用するものが例として挙げられる[3]。しかし、光源の色変化・形状変化を行う際には、光源を切り替えなければいけないので効率よく撮影ができないという欠点がある。そこで、本研究では効率的に光源の色変化・形状変化を行える多光源照明システムを提案する。

#### 3-2 提案する多光源照明システム

本研究で提案する多光源照明システムでは、従来の多光源照明システムで欠点であった光源の電子的な色変化・形状変化の実現を目指す。

##### 3-2-1 システム構成

システムは図2のようにプロジェクタ、散乱照明ドーム、ミラー、回転テーブルからなっている。まずプロジェクタより任意の映像を照明ドーム上に投影する。ここで投影された映像は照明ドームで散乱、透過され対象物体に照射されるので、対象物体からすると照明ドーム上に拡散光源が作成されることに等しい。従来のシステムで欠点であったリアルタイムな光源の形状、色の変化も、プロジェクタの映像をCGで合成することで可能となる。

また、対象物体を回転テーブルの上に載せることで、対象物体を360度のどの方向からでも撮影することができる。

##### 3-2-2 照明パターン

本システムのプロジェクタから投影する映像例を図3に示す。一番上の行の横方向への変位は光源の位置変化を表しており、一番左の画像を投影すると物体にはカメラの視線方向からみて右上方から照明が当てられていることに相当する。また、2行目の投影画像は形状変化の例を表しており一番右の画像を投影すると楕円状の光源を実現できる。最後に3行目の投影画像は色変化の例であり、投影画像の色を変化させることで光源の色を変化させることができる。

##### 3-2-3 本システムの特徴

本システムの問題点として、プロジェクタで照明となる映像を物体上の散乱板に投影するため、物体に対して水平方向に位置する光源を作成できない。しかし、蛍光灯にしても太陽にしても光が対象物体に対して水平から入射することはあまりなく実用上の問題とはならないといえる。

他の得失として、映像投影用プロジェクタを用いその映像で光源を実現しているため光量の問題があり微小な点光源の作成は実用上困難である。しかし、面光源や線光源等の任意形状の作成は容易という利

点がある。

また、プロジェクタで黒色を表示させると光が全く照射されないのが理想であるが、今回用いたプロジェクタの仕様上微弱な光が照射される。つまり背景を黒色にして光源パターンを作成しても、光源以外の黒色のところからも対象物体に光が照射される。この問題を解決するために黒い背景だけの画像を表示して撮影した画像を、黒い背景上に光源がある画像を表示して撮影した画像から引く（対応する画素値を引く）バックグラウンド差分処理を行う。

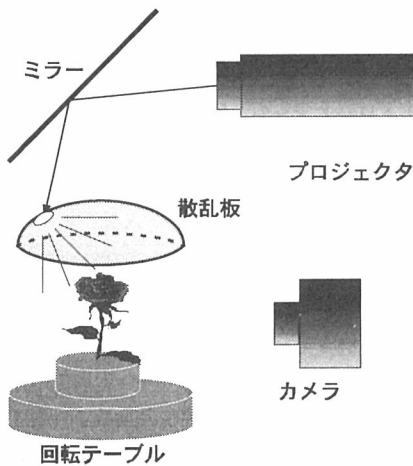


図 2 提案する多光源照明博物館撮影システム

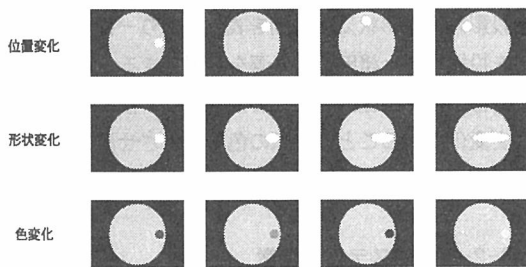


図 3 プロジェクタの投影画像例

#### 4. 環境光の取得による質感の再現

##### 4-1 システム構成

図 4 に実環境中の環境光を取得するシステムの構成を示す。中央に球面鏡を配置し、その上方に CCD カメラを下向きに設置する。簡単のため、カメラは球面鏡から十分遠方にあるものとし、球面鏡は平行投影で撮影面に撮像されるとする。

ここで、実空間中の球面鏡の半径と撮影面の球面

鏡の半径の比が決定できれば、画像中の光っている位置を認識し、幾何変換することによって三次元実空間中のどの方向から光が入ってきているのかを特定できる。

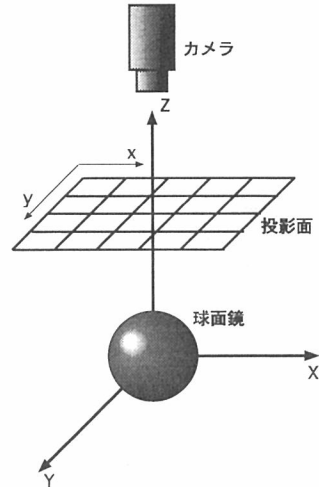


図 4 環境光を取得するシステム

図 5 に示すように球面鏡の中心と撮影面の中心が一致するように設置し、球面鏡半径を  $r$  とする。図 5 に示すように半径  $r$  の球面鏡が撮影面に投影された時の半径を [画素] とする。このとき、撮影面上の 1 画素は三次元空間中では  $r/1$  に対応する。また、三次元空間中の原点を球面鏡の中心にとる。このように設定し、原点から光源に向かう方向ベクトル  $L=(X_l, Y_l, Z_l)$  を求める。

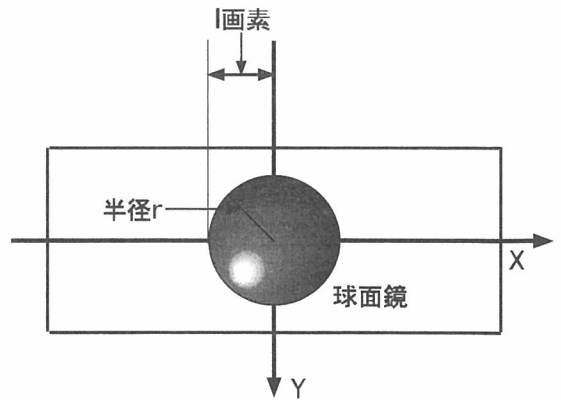


図 5 投影面の座標系

## 4-2 環境光の取得方法

### 4-2-1 点光源の検出方法

投影面中の球面鏡より光沢部分の画素(x,y)を得ることにより、三次元空間中の光沢部分の  $(X_n, Y_n) = (x r/l, y r/l)$  が導ける。  $Z_n$  は球の方程式  $X^2 + Y^2 + Z^2 = r^2$  を用いることにより求めることができ、球面鏡の表面の三次元空間座標は

$$(X_n, Y_n, Z_n) = \left( x \frac{r}{l}, y \frac{r}{l}, \sqrt{r^2 - X_n^2 - Y_n^2} \right) \quad (1)$$

となる。この座標は、図6の示すように三次元空間の原点が球面鏡の中心にあることから球面鏡の表面の法線ベクトル  $\vec{n}$  も表している。この法線ベクトルを正規化すると、光の反射ベクトル  $\vec{v} = (0, 0, 1)$  であることから（平行投影近似を行っているため）、光源の方向ベクトルは次式の様になる。

$$\begin{aligned} \vec{L} &= (X_l, Y_l, Z_l) = 2\{(\vec{n} \cdot \vec{v})\vec{n} - \vec{v}\} + \vec{v} \\ &= (2Z_n X_n, 2Z_n Y_n, 2Z_n^2 - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

よって、投影面中の座標(x,y)から原点から光源へ向かうベクトル  $\vec{L} = (X_l, Y_l, Z_l)$  を導くことができる。

このようにして求めた光源への方向ベクトル  $\vec{L}$  は球面鏡の中心から光源へ向かうベクトルであり、球面鏡の表面から光源へ向かうベクトルではない。しかし、光沢感のみを再現すれば良いので正確な方向ベクトルは必要ではなく、この近似で十分である。

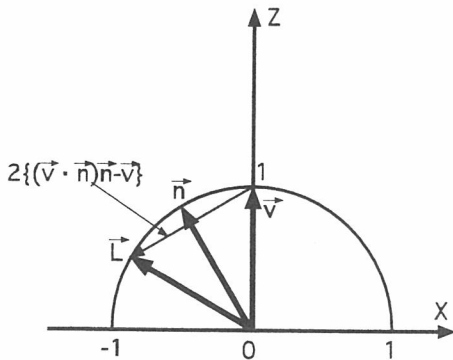


図6 光源方向の推定

### 4-2-2 面光源への対応

5-2-1 では投影面中の画素(x,y)と点光源への方向ベクトル  $\vec{L}$  の対応関係を示した。しかし、本研究で用いた多光源照明システムはプロジェクタで投影した面光源であるため、面光源に対応させなければならない。そこで、対応させる方法として点光源の方向ベクトルと全ての面光源の中心へのベクトルの相関をとり、最も相関が高い面光源を方向ベクトル  $\vec{L}$  上の光源として採用する。このとき、相関値として点光源と面光源の方向ベクトルを正規化した内積を用いた。

つぎに、面光源の強度  $I$  (多光源画像の重み) としては、対応する投影面中の画素の輝度値  $i$  を輝度値の上限  $i_{\max}$  と投影面中の面光源の面積となる画素数  $S$  で割った値を採用する。すると、面光源の強度  $I$  は次式(3)で求まる。

$$I = \frac{1}{i_{\max} S} \sum i \quad (3)$$

## 4-3 光沢感の再現方法

### 4-3-1 正確な RGB 光源下の画像作成

環境光から光沢感を再現するためには全ての方位からの（本システムでは天空のみ）、全ての色光源を用いて撮影した画像を得なければならない。そこで、全ての方位からの光源は多光源照明システムにより作成し、本システムは目視を前提としているため全ての色光源は赤 (R)、緑 (G)、青 (B) のそれぞれの色光源で作成した多光源画像の加重計算で実現する。ここで赤色光源で多光源画像を作成する際に、原理的に R, G, B は独立であることから正確な赤光源しか存在しない環境では、物体からの反射光も赤であるはずなので R の値だけを保存しておけば良いように思われる。しかし、本研究では有色金属や蛍光など特殊な反射表面を有する物体をも対象としているので R, G, B の値全てを保存する。

また、プロジェクタの投影光下で撮影された画像のホワイトバランスを得ることは高品質な映像を得るために重要である。一般的にホワイトバランスを行う方法では、まず白色物体に白色光を射て撮影した画像の RGB の値を調べる。ここで白色光であれば、画像中の白色物体の RGB 値に偏りが生じない。

偏りがあるということはプロジェクタが正確な分光で投影していないか、あるいは RGB カメラが正確な分光で撮影していないといえる。よって、偏りがあれば RGB 値それぞれに重み付けをすることでホワイトバランスをとることができる。

しかし、今回は全ての色光源を R, G, B のそれぞれの光源によって撮影した画像の合成によって行うのでこの方法では正しい色合成が行えない場合がある。正しい色合成ができない原因は、プロジェクタで赤色だけを投影しようとしても投影光が正確な赤ではないという点にある。なぜ正確な赤が必要になるのかというと、緑や青の成分を含んでいるとすると図 7 のように画像の RGB 値に重み付けをするだけでは緑や青の投影光の成分が除去できないからである。除去することができなければ、正確な赤色光源下の画像を作成することができない。実際、今回使用したプロジェクタでは赤を投影しても緑や青の成分も少なからず投影されている結果となった。これは緑や青に対しても同じことがいえる。

そこで、本研究では RGB それぞれに重み付けを行うのではなく、画像に重みを付けて画像の加減算を行いホワイトバランスをとる。手順としてはまず、赤、緑、青の投影光を白い物体に射てることでそれぞれの投影光の成分を調べる。その調べた成分を図 8 の(a)のようであるとする。このとき、それぞれの成分は明らかに独立であるからそれらの画像に重み付けをして加減算することで、図 8 の(b)のような赤、緑、青だけの光源下で撮影した画像と等価な画像が得られる。

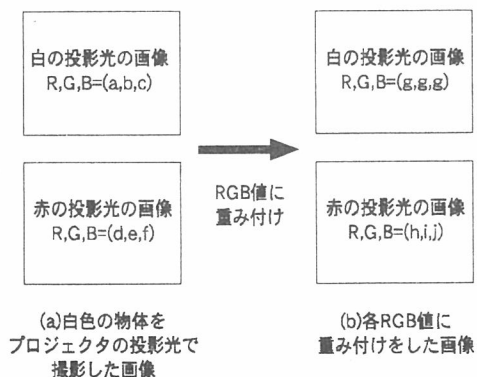


図 7 ホワイトバランス

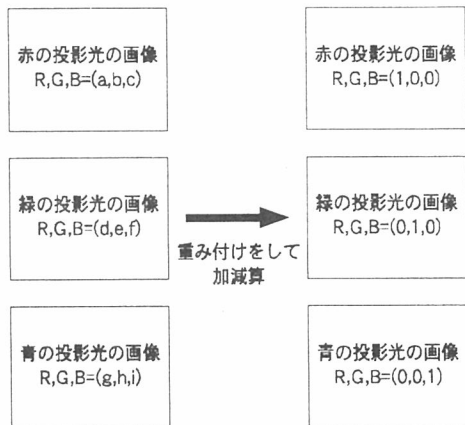


図 8 正確な RGB 光源下の画像作成

プロジェクタの赤、緑、青の投影光の成分から正確な赤色光源の成分を求める式を以下に示す。

$$\frac{(a,b,c) - \frac{b}{e}(d,e,f) - \frac{c-bf/e}{i}(g,h,i)}{a - \frac{b}{e}d - \frac{c-bf/e}{i}g} = (1,0,0) \quad (4)$$

ここで、 $(a,b,c)$  はプロジェクタの赤の投影光の成分である。また、 $(d,e,f), (g,h,i)$  は緑と青の成分である。これらの成分にかかる係数や加減算を画像単位で行うことで正確な赤色光源下の画像が得られる。同様な考え方で正確な緑色光源下の画像、青色光源下の画像を得ることができる。

#### 4-3-2 環境光の反映

4-2 で述べた環境光の追跡により環境光の方向と色(RGB)が推定できる。先ほど述べたように、光沢感を再現するにはその方向と色光源を作成しなければならない。多光源画像の光源の方向は多光源画像を取得する際に光源位置を一意に決めているので既知である。また、投影面中の画素値からその方向にある光源の色(RGB 値)がわかる。この色(RGB 値)を用いて多光源画像に重み付けをし加算することで環境光を反映する。

#### 4-4 推定した光源の方向，強度と多光源画像による合成結果

##### 4-4-1 計測システムの具体的仕様

- ・デジタルカメラ D1(Nikon)  
Zoom-NIKKOR-55mm 1:2.8  
カメラ-物体間 10cm
- ・プロジェクタ VL-1035(NEC)
- ・照明ドーム 直径9cm  
対象物体底面から6cm

##### 4-4-2 実画像と合成画像

図9に球面鏡の撮影画像を示す。この画像は球面鏡の右上方に緑色の点光源，左上方に黄色色の点光源を設置してある環境下で撮影した。ここで，光源の光が飽和した場合，正しく光源色の推定が行われないためシャッタースピードを飽和しないように設定する，しかし，シャッタースピードを早くすることによって二次反射の微弱な光の情報が失われている。鏡のような物体であれば二次反射の影響が明らかに目に見えるので，二次反射のような微弱な光も取り込むダイナミックレンジ（光の強度を表す範囲）が広い画像を作成する必要がある。そこでシャッタースピードを変化させることにより広いダイナミックレンジを持つ画像を作成を行った[4]。

図10，図12にこの環境下で実際に撮影した画像と図9の球面鏡の画像を用いて光源の方向を推定し，その結果と多光源画像を用いて合成した画像が図11，図13である。



図9 球面鏡の撮影画像

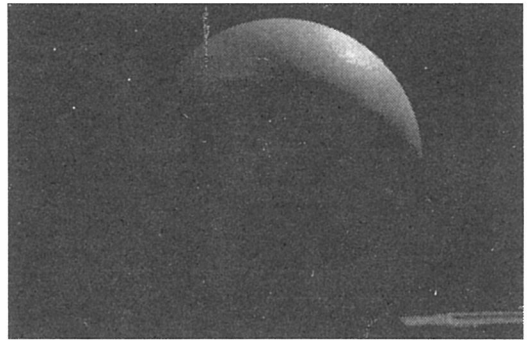


図10 実画像(白球)

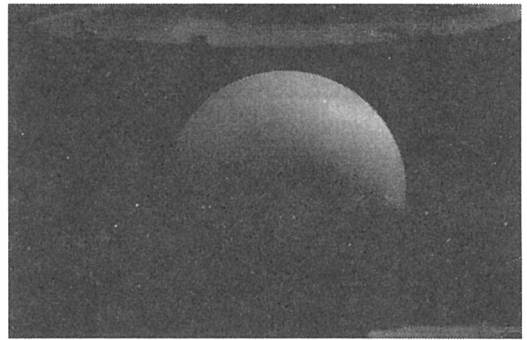


図11 合成画像(白球)

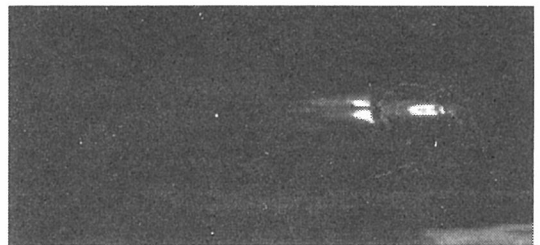


図12 実画像(玉虫)



図13 実画像と合成画像(玉虫)



#### 4-4-3 考察

白黒印刷では表現できないが、図 10、図 12 の実際の環境下で撮影した画像と図 11 と図 13 の多光源画像を合成した画像では、光源色は目視上同等である。よって R、G、B のそれぞれの光源で撮影した多光源画像による色合成が行えているといえる。しかし、実際の画像と合成された画像には光が照射されている面積に違いがある。この違いは、対象物体と光源間の距離の違いのによると考えられる。実際の環境では対象物体と十分離れていたため、対象物体に射たる光は平行投影であると近似できる。しかし、試作した多光源照明博物撮影システムでは、対象物体のすぐ上に照明ドームが位置してあり照明ドーム上に光源が作成されるので、対象物体と光源間の距離は短く近接光源となっている。近接光源であると対象物体に射たる光は平行投影に近似することができないので、平行投影された光に比べて光が照射されている面積が小さくなる。この問題を解決するためには、原理的には照明ドームを大きくすれば良いのだが、プロジェクタの投影する映像がより広い面積に照射されるので、今回使用したプロジェクタでは光量が足りなくなるといった問題がある。

#### 5. おわりに

歴史的に貴重な文化財の高精細なデジタルアーカイブ法として文化財の Image-Based Rendering の考え方で R、G、B の 3 原色の光源を用いた多光源画像の作成を提案した。また、その多光源画像を作成するために必要である形状・色変化が容易である新しい多光源照明システムの提案した。そして環境光取得システムを開発し、その取得した環境光情報より作成した多光源画像から、実環境に適した画像の合成法を提案した。

今後の予定としては、提案したプロジェクション方式の多光源照明博物撮影システムでは光量の面で問題があるため、光量が十分である従来の多光源システムで撮影した多光源画像と提案したシステムで撮影した多光源画像を統合することによってより実環境に適した画像の合成方法を考える。

また、本手法における撮影パラメータ（光源方向分解能、撮影枚数等）は最終出力する際の画像分解

能に大きく影響を受ける。画像分解能との光源方向分解能関係については物体表面の光沢度にも依存し、その関係は複雑であるが、今後精査し研究したい。

#### 参考文献

- [1] 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史, “全方位ステレオによる実光源環境の計測とそれに基づく仮想物体の実画像への重ね込み”, 電子情報通信学会誌, D-II, J81-D II, 861-871, 1998.05
- [2] 酒田善史, 佐藤宏介, 井口征士, “パターン光源撮影による高質感なデジタルアーカイブ法”, 電子情報通信学会基礎・境界講演論文集 pp.317 (2000)
- [3] 松井 明, 佐藤 宏介, 千原 國宏, “多光源画像の KL 展開と環境観測に基づく実照明と仮想照明の複合”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU97-111~120, pp.29-36
- [4] Paul E. Debevec. Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography. In SIGGRAPH 98, August 1997.