

## 一般論文

アメンヘテプ 3 世王墓壁画撮影時の不均一照明の補正 (I)  
照明モデルの構築とその検証Correcting for Non-Uniform Illumination When Photographing the Mural in the Royal Tomb of Amenophis III (I)  
Development of an Illumination Model and Its Verification

犬井正男\*・加藤 勝\*・佐藤真知子\*・東 吉彦\*・齋藤大輔\*\*・水野統太\*・  
菊地敬夫\*\*\*,\*\*\*\*・吉村作治\*\*\*\*

Masao INUI\*, Masaru KATO\*, Machiko SATO\*, Yoshihiko AZUMA\*, Daisuke SAITO\*\*, Tota MIZUNO\*,  
Takao KIKUCHI\*\*\*,\*\*\*\*, Sakuji YOSHIMURA\*\*\*\*

**要 旨** 我々は古代エジプト王アメンヘテプ 3 世の王墓壁画のデジタル化を行っている。均一な照明を行うために 2 灯のストロボをアンブレラにつけて撮影を行っている。しかし、照明はまだ均一にはなっていない。この不均一照明を照明モデルを用いて補正することを試みた。この照明モデルでは、ストロボをアンブレラにつけた照明をより遠方にある点光源からの照明と見なしている。壁画を模した画像に白色パッチを貼って撮影した画像から補正を行い、さらに白色パッチの代わりに均一な背景部だけから補正を行うことにより、この照明モデルの有効性を確認した。

**Abstract** We are attempting to digitize the mural at the royal tomb of Amenophis III, one of the pharaohs of ancient Egypt. When photographing the mural, two strobe lights with umbrellas were used to provide uniform illumination. However, it was difficult to illuminate uniformly. We tried to correct this non-uniform illumination by applying an illumination model in which a strobe and an umbrella were assumed as a point light source located at a long distance. The illumination model was verified for model mural images with white patches and with uniform backgrounds instead of white patches.

キーワード：古代エジプト王墓壁画、不均一照明の補正、照明モデル、仮想点光源、アメンヘテプ 3 世

**Key words:** mural of royal tomb of pharaoh, non-uniform illumination, illumination model, virtual point light source, Amenophis III

## 1. はじめに

エジプト・ルクソールの王家の谷に古代エジプト王アメンヘテプ 3 世の王墓があり、幅 8.2 m、奥行き 15.4 m、高さ 3.1 m (一部 4.7 m) の埋葬室の壁に「アムドゥアト書」が描かれている。多くの研究者が活用できるような環境で公開することを念頭に置き、ディスプレイ上に実寸大で表示できるように、この壁画のデジタル画像化を行っている<sup>1-5)</sup>。壁画を約 2 m×3 m の部分ごとに分割し、それぞれを 2100 万画素で 99 枚撮影し、これらの小画像から接合によって約 5 億画素の中画像を作成している。さらにこれらを接合し、東西南北の各

壁面ごとに大画像を作成しつつある。

壁画への照明を均一にするために、左右からアンブレラをつけた 2 灯のストロボを壁画に照射して撮影を行っている。しかし、室内にある柱やストロボのパワー不足が原因で遠方から照射することができず、照明の均一性を得るのが困難である。

顕微鏡画像等では何もない状態で撮影したときの輝度分布を用いて不均一照明の補正が行われている。また、照度分布を多項式で近似して、補正が行われている<sup>6)</sup>。放射線画像のトレンド除去にも 2 次式が用いられている<sup>7)</sup>。我々は、ストロボとアンブレラからの照明光を点光源とみなし、これをも

平成 23 年 8 月 29 日受付 平成 23 年 11 月 7 日受理 Received 29th, August 2011, Accepted 7th, November 2011

\*東京工芸大学工学部 〒243-0297 神奈川県厚木市飯山 1583

\*Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, 1583 Iiyama, Atsugi, Kanagawa 243-0297, Japan

\*\*芝浦工業大学工学部 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5

\*\*College of Engineering, Shibaura Institute of Technology, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548, Japan

\*\*\*サイバー大学世界遺産学部 〒162-0853 東京都新宿区北山伏町 1-11

\*\*\*Faculty of World Heritage, Cyber University, 1-11 Kitayamabushi-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0853, Japan

\*\*\*\*早稲田大学 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

\*\*\*\*Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

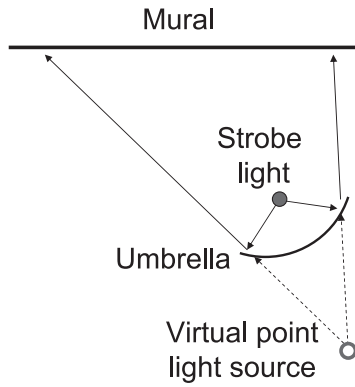


Fig. 1 Illumination model in which illumination provided by light from a strobe light reflected from an umbrella is assumed to act as a virtual point light source.

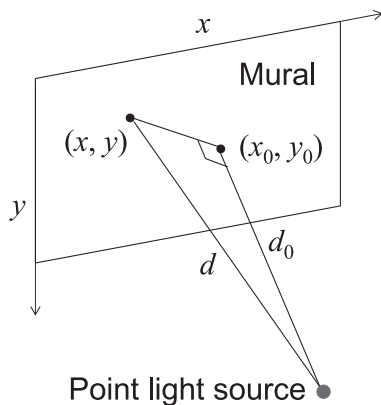


Fig. 2 Geometric arrangement of a light source and mural.

とにした照明モデルを新たに考案した。このモデルを用いて不均一照明が補正できることを示し、さらに撮影画像だけから不均一照明を補正する方法を試みた<sup>8)</sup>。

## 2. 照明モデル

ストロボとアンブレラを用いた照明を、Fig. 1 に示すように、より遠方にある点光源からの照明とみなす。点光源からの照度は逆2乗則が成立するため、壁画上の点  $(x, y)$  における照度  $E$  は次式で与えられる。

$$E = \frac{p}{d^2} = \frac{p}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + d_0^2} \quad (1)$$

ここで、 $p$  は仮想点光源の光度であり、Fig. 2 に示すように、 $d$  は光源と点  $(x, y)$  との距離、 $(x_0, y_0)$  は光源から壁画に下した垂線の足の座標、 $d_0$  は光源と壁画の距離である。

提案モデルの式 (1) は1光源の場合であるが、これを2光源に拡張すると、次式のように式 (1) が2光源別々に必要となり、定数の数は倍の8になる。

$$E = E_1 + E_2 = \frac{p_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + d_1^2} + \frac{p_2}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + d_2^2} \quad (2)$$

提案モデルのほかに、トレンド除去などでよく用いられている2次元の2次式を照度の分布とした、次式で表される2次式モデルも比較のため用いた<sup>6)7)</sup>。

$$E = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (3)$$

ここで、 $a, b, c, d, e, f$  は定数である。

2次式モデルの利点は、2光源に拡張してもそれぞれの式 (3) の和はまた2次式となり、定数の数は6と変わらず、取り扱いが便利である。

$$E = E_1 + E_2 = a_1x^2 + b_1xy + c_1y^2 + d_1x + e_1y + f_1 + a_2x^2 + b_2xy + c_2y^2 + d_2x + e_2y + f_2 = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f \quad (4)$$

壁画への照度を直接測定することは困難である。同じ反射率の点からの輝度は、その点への照度に比例した値となっている。また、デジタルカメラで撮影して得られた画像のデジタル値は、輝度に比例した三刺激値  $Y$  から変換した値を記録している。それゆえ、同じ反射率を持っている部分を撮影した画素のデジタル値から求めた三刺激値  $Y$  は照度に比例した値となっている。この研究における照度は絶対値である必要はなく、相対値で充分である。そのため、同じ反射率の部分を撮影して得られた画像のデジタル値  $R_d, G_d, B_d$  から求めた三刺激値  $Y$  を照度として用いる。なお、座標  $(x, y)$  として、デジタル画像における画素の位置座標を用いる。

## 3. デジタル値と三刺激値の変換

不均一照明の補正で用いるため、IEC が定めた標準色空間 sRGB での三刺激値  $X, Y, Z$  とデジタル値  $R_d, G_d, B_d$  の変換方法を簡単に述べる<sup>8)</sup>。

まず三刺激値  $X, Y, Z$  はリニアな  $R, G, B$  に次式で変換する。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

なお、 $0 \leq Y \leq 1, 0 \leq R, G, B \leq 1$  である。

これらの  $R, G, B$  から

$$C' = \begin{cases} 12.92C & (C \leq 0.0031308) \\ 1.055 C^{1/2.4} - 0.055 & (C > 0.0031308) \end{cases} \quad (6)$$

としてノンリニアな  $R', G', B'$  にする。ここで、 $C=R, G, B, C'=R', G', B'$  である。

さらに、 $C_d=R_d, G_d, B_d$  としたとき、

$$C_d = \text{round}(255C') \tag{7}$$

として, 8 ビットのデジタル値  $R_d, G_d, B_d$  にする.

逆に, デジタル値  $R_d, G_d, B_d$  から三刺激値  $X, Y, Z$  に変換するには, まず

$$C' = C_d / 255 \tag{8}$$

$$C' = \begin{cases} C' / 12.92 & (C' \leq 0.04045) \\ \left( \frac{C' + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} & (C' > 0.04045) \end{cases} \tag{9}$$

とし, これらのリニアな  $R, G, B$  を次式により, 三刺激値  $X, Y, Z$  に変換する.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{10}$$

#### 4. 不均一照明の補正方法

照明モデルとして 1 光源の提案モデル, それを拡張した 2 光源の提案モデル, 2 次式モデルの 3 種類があるが, ここでは 1 光源の提案モデルについて説明を行う. 他のモデルについても同様であり, 式と定数が異なるだけである.

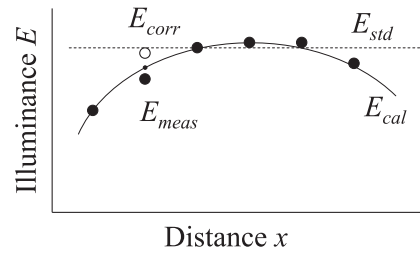
不均一照明を補正するためには, モデル式すなわち式 (1) を用いて各画素への照度を基準の照度に合わせるようにする. モデル式に用いられている 4 定数  $p, x_0, y_0, d_0$  の値を測定値から求める必要がある. それらの値は多数の点  $(x_i, y_i)$  ( $i=1, \dots, n, n$  は点の数) における照度  $E_i$  の測定値から非線形最適化により求める. すなわち, 照度の測定値とモデル式による計算値との差の 2 乗和を最小にするような 4 定数の値を求める. この計算では, 画像に記録されたデジタル値  $R_d, G_d, B_d$  から式 (8), (9), (10) によって計算された三刺激値  $Y$  を照度として用いる.

具体的な照度の補正方法を Fig. 3 に示す. ここでは, 本来 2 次元曲面における照度を, 説明のために簡略化して 1 次元の距離  $x$  における照度として表している. まず黒点で示されている照度の測定値  $E_{meas}$  から, 最適化によりモデル式の 4 定数  $p, x_0, y_0, d_0$  の値を求める. すなわち, 仮想点光源の相対光度  $p$  と位置  $(x_0, y_0, d_0)$  を求める. Fig. 3 中の実線はこのモデル式が表す曲線であり, 測定値にフィットしているだけでなく平滑にもなっている. この曲線を基準照度  $E_{std}$  を表す破線の直線にすることが, 不均一照明の補正である. 各点における照度を基準照度  $E_{std}$  にする補正係数  $k$  を, モデル式から計算された照度  $E_{cal}$  から求め,

$$k = \frac{E_{std}}{E_{cal}} \tag{11}$$

次式によって照度の補正值  $E_{corr}$  を求める.

$$E_{corr} = k E_{meas} \tag{12}$$



$E_{meas}$  (●) : measured illuminance  
 $E_{cal}$  (---) : calculated illuminance from the proposed model  
 $E_{corr}$  (○) : corrected illuminance  
 $E_{std}$  (---) : standard illuminance

Fig. 3 Correction method of illuminance.

Fig. 3 の例では, 測定照度  $E_{meas}$  は計算照度  $E_{cal}$  よりやや小さいため, 補正照度  $E_{corr}$  は基準照度  $E_{std}$  よりやや小さくなっている.

式 (12) により照度すなわち三刺激値  $Y$  が  $k$  倍されたため, それに合わせて他の三刺激値  $X$  と  $Z$  も  $k$  倍する. こうして照度が補正された三刺激値  $X, Y, Z$  から, 式 (5), (6), (7) を用いて補正画像のデジタル値  $R_d, G_d, B_d$  を求めファイルに記録する.

#### 5. 白色パッチ画像を用いた照明モデルの検証

予備調査で撮影した画像をプリントした模擬壁画 (幅 2.4 m × 高さ 1.6 m) に対してモデルを適用した. 後述する Fig. 4 に示すように, 35 枚の白色パッチを模擬壁画上に貼り, 左側だけ, 左右両側, あるいは右側だけからの 3 種類の照明でそれぞれ撮影を行った. 撮影に使用したカメラとレンズは, それぞれソニー  $\alpha 900$  と AF 50mm 1:1.7 である. また, ストロボはワイドトレード TOKISTAR e-Z Flash BP 2.0, アンブレラは拡散性を重視し白色のサンテック SP-UMBRELLA S-100 を用い, レンズの絞りを F18 として撮影した.

原画像の各画素のデジタル値は sRGB に準拠していると見なし, 画像上の白色パッチ部のデジタル値  $R_d, G_d, B_d$  から三刺激値  $Y$  を求めた. この値  $Y$  は照度  $E$  の相対値である. 白色パッチの 35ヶ所の位置座標  $(x, y)$  とそれぞれの位置での三刺激値  $Y$  から, 式 (1), (2), (3) で表されるそれぞれの照明モデルで用いられている定数の値を非線形最適化計算で求めた. 原画像の各画素のデジタル値  $R_d, G_d, B_d$  を sRGB に準拠して三刺激値  $X, Y, Z$  に変換し, これらの  $X, Y, Z$  をその画素での照度の相対値である  $Y$  に応じて補正し, 補正した  $X, Y, Z$  を  $R_d, G_d, B_d$  に逆変換することにより, 各画素での色補正を行った.

3 種の照明で模擬壁画を撮影した原画像と補正画像の白色パッチの三刺激値  $Y$  の標準偏差を Table 1 に示す. 左右どちらか一方からの偏った照明では, 提案モデルでは標準偏差は約 1/10 に減少しているが, 2 次式モデルでは約 1/4 にしかなくない. 両側からの照明では両モデルとも約 1/7 になって



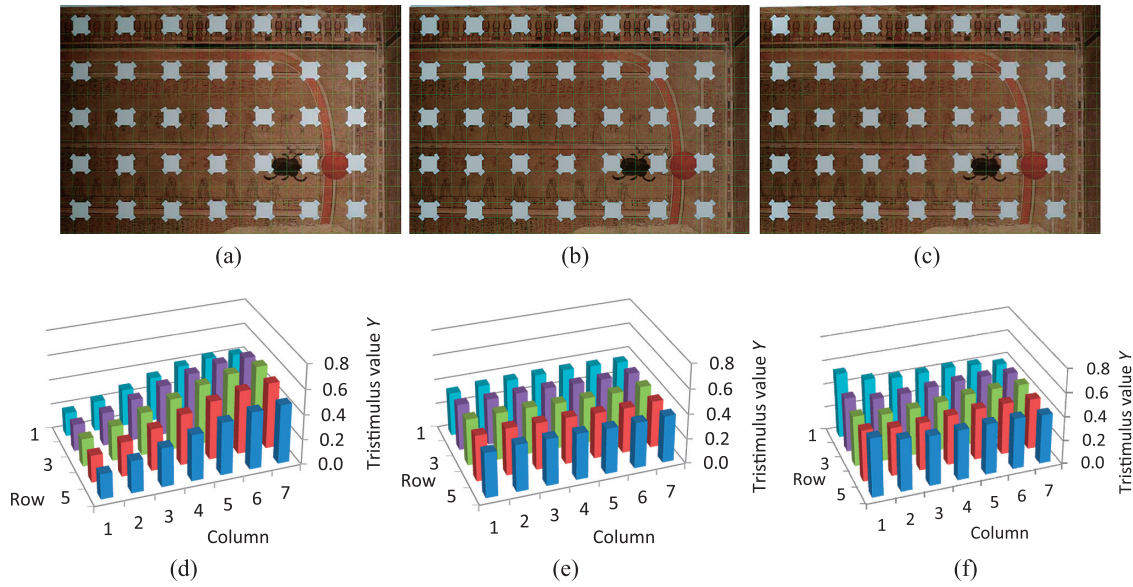


Fig. 4 Original images illuminated solely from the right-hand side (a) and the corrected ones by using the proposed model (b) and two-dimensional second-order polynomial model (c). The lower figures (d), (e) and (f) show tristimulus values  $Y$  of white patches in corresponding above images. Standard deviations  $\sigma$  are 0.109, 0.007 and 0.028, respectively.

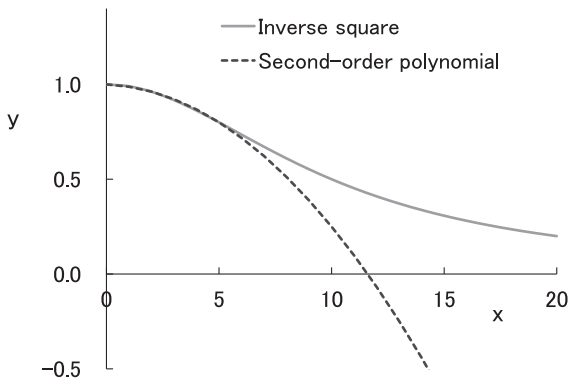


Fig. 5 Graphs of inverse square formula and second-order polynomial.

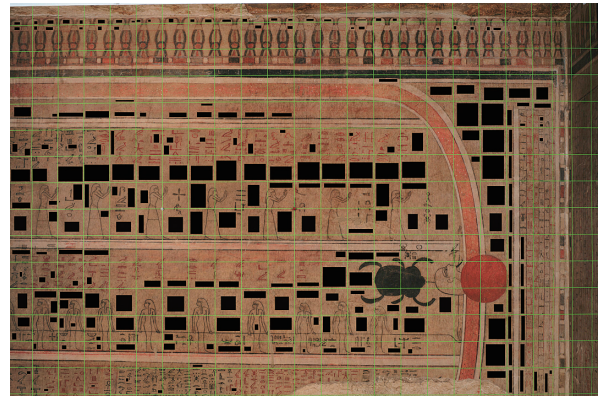


Fig. 6 Extraction of backgrounds which is assumed to be same color.

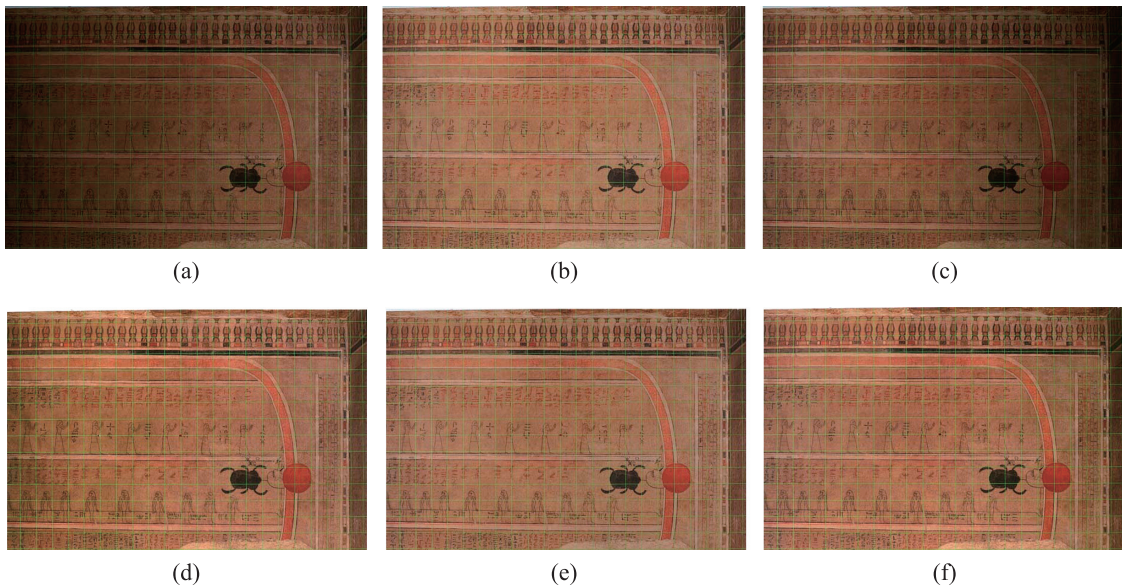


Fig. 7 Original images of the simulated model mural (a), (b) and (c), which are the images photographed with left-hand side, both sides and right-hand side illumination, and corrected images by using the proposed illumination model (d), (e) and (f), respectively.

Table 1 Standard deviations of back ground tristimulus values  $Y$  for original and corrected images by using two models. Ratio is  $\sigma_{\text{corr}}/\sigma_{\text{org}}$ .

Lighting side	Original image		Corrected image		
	$\sigma_{\text{org}}$	$\sigma_{\text{corr}}$	Point light source model		Second-order polynomial model
			Ratio (%)	$\sigma_{\text{corr}}$	Ratio (%)
Left	0.158	0.021	13	0.034	22
Both	0.055	0.008	15	0.008	15
Right	0.109	0.007	6	0.028	26
mean			11		21

いる。両モデルの差が顕著であった右側だけからの照明で撮影した画像の補正前後の画像と白色パッチの三刺激値  $Y$  を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a) は右側だけからの偏った照明で撮影した原画像である。この画像を式 (1) の提案モデルを用いて補正したのが Fig. 4 (b) であり、均一に照明されたような画像となっている。背景部は右側がやや明るくなっているが、これは模擬壁画のものとなっている画像を撮影するときの照明が不均一であったため、模擬壁画そのものの右側が明るくなっていることに起因する。Fig. 4 (c) は 2 次式モデルで補正を行った結果である。Fig. 4 (d) (e) (f) はそれぞれ上の (a) (b) (c) の 35 枚の白色パッチの三刺激値  $Y$  を示しており、それぞれの標準偏差は Table 1 で示されているように、原画像で 0.109、提案モデルでの補正画像で 0.007、2 次式モデルでの補正画像で 0.028 であった。これらからわかるように、提案モデルによる補正画像の白色パッチの三刺激値  $Y$  は殆ど同じ値になっており、この研究で設定した照明モデルが有効であることが確認できた。

2 次式モデルでは、Fig. 4 (c), (f) で示されているように、左上の白色パッチがやや明るくなっている。これは、Fig. 5 に示す例のような理由によると思われる。すなわち、提案モデルで用いている逆二乗式と 2 次式は  $x$  が 0 から 5 までの領域では殆ど一致しているが、それ以上の領域では逆二乗式は徐々に低下しているのに対し 2 次式では急激に低下している。式 (11) における計算値  $E_{\text{cal}}$  が小さな値になると  $k$  が大きくなり、式 (12) での補正値  $E_{\text{corr}}$  が大きくなってしまふ。このような理由で、2 次式モデルでは周辺において明るくなってしまうと思われる。同じことが以前に行った研究でも確認されている<sup>8)</sup>。

提案モデルは、用いられている定数は物理的な意味があり、実験値によくフィットし、最適化の際に  $p > 0$  などの制約条件をつけることが可能となるため、以後はこちらのみを用いることにする。

## 6. 画像背景部を用いた照明モデルの検証

照明モデルの検証で用いてきた白色パッチを貴重な遺跡である王墓室壁画に貼ることはできない。そのため、白色パッチの代わりに殆ど同じ色の背景部を用いることにした。Fig. 6 に黒く示しているように、白色パッチなしで撮影した画像のほぼ均一と思われる 239ヶ所の背景部を矩形で選択した。こ

Table 2 Standard deviations  $\sigma$  of back ground tristimulus values  $Y$  for original and corrected images by using the proposed model, Point light source model. Ratio is  $\sigma_{\text{corr}}/\sigma_{\text{org}}$ .

Lighting side	Original image		Corrected image
	$\sigma_{\text{org}}$	$\sigma_{\text{corr}}$	Ratio (%)
Left	0.0306	0.0112	37
Both	0.0262	0.0175	67
Right	0.0347	0.0131	38
mean			47

れらの矩形領域のデジタル値  $R, G, B$  から白色パッチ画像のときと同様に補正を行った。3 種の照明で撮影した画像の補正前後の画像を Fig. 7 に示す。(a), (b), (c) が原画像である。全て同じ露出で撮影したため、1 灯だけで照明した (a) と (c) はやや暗くなっている。しかし、補正画像 (d), (e), (f) は式 (11) で用いられている基準照度  $E_{\text{std}}$  を同じ値にして、明るさが同じになるようにした。これらの補正画像は均一な照明で撮影したように見える。前述したように、模擬壁画そのものは右側がやや明るくなっていたが、補正画像ではそれが観察されず、模擬壁画そのものの不均一照明も補正されている。

3 種の照明で模擬壁画を撮影した原画像と補正画像の背景部の三刺激値  $Y$  の標準偏差を Table 2 に示す。左右のどちらか一方のみからの偏った照明では、提案モデルでは標準偏差は約 1/3 に減少しているが、両側からの照明では約 2/3 になっている。右側だけからの照明で撮影した画像の補正前後の画像、すなわち画像 (c) と (f)、の背景部の三刺激値  $Y$  を Fig. 8 に示す。背景の番号は、上の行から下に、各行ごとに左から右に向けて番号を順次つけている。補正後の三刺激値の変動が 1/3 程度に小さくなっていることがわかる。白色パッチを用いたときより標準偏差の比がやや大きくなっているのは、背景部が白色パッチほど均一になっていないためと思われる。

このように、白色パッチを用いていない画像からも照明モデルを用いて不均一照明の補正を行うことができることを確認した。なお、背景部として本研究では 239ヶ所抽出したが、以前に行った研究では 44ヶ所 で良好な結果が得られたため<sup>8)</sup>、これほど多く抽出する必要はないと思われる。

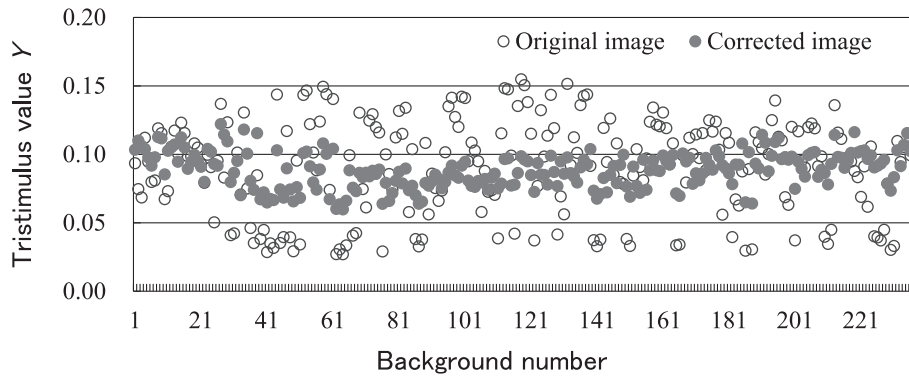


Fig. 8 Tristimulus values  $Y$  of backgrounds in original and corrected images shown in Fig. 7 (c) and (f). Standard deviations  $\sigma$  are 0.046 and 0.011, respectively.

## 7. まとめ

ストロボとアンブレラを用いた照明を仮想的に点光源と見なした照明モデルを構築し、白色パッチ画像および白色パッチを用いない通常の画像から補正できることを示し、構築したモデルの有効性を確認した。

実際の撮影では左右から2光源で照明しているため、これまで撮影してきた画像に2光源の照明モデルを適用していく。不均一照明を補正した画像をさらに色補正を行い<sup>5)</sup>、東西南北ごとの大画像を作成してゆく予定である。

## 謝 辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金(課題番号20401026)の助成を受けて行われた。実験に協力して下さった栃木達史氏と猪股圭太郎氏に感謝致します。また、模擬壁画をプリントして下さったセイコーエプソン株式会社に感謝致します。

## 引用文献

- 1) 犬井正男, 佐藤真知子, 稲垣敏彦, 菊地敬夫, 吉村作治, 日本写真学会誌, **72**, 11 (2009).
- 2) M. Inui, M. Sato, T. Inagaki, T. Kikuchi and S. Yoshimura, "Image Electronics and Visual Computing Workshop 2010", 2010, p. 1-7.
- 3) M. Inui, M. Sato, M. Kato, T. Kikuchi and S. Yoshimura, "The 31st International Congress on Imaging Science (ICIS 2010)", 2010, p. 801.
- 4) 菊地敬夫, 犬井正男, 佐藤真知子, 吉村作治, "日本オリエント学会第52回大会", 2010.
- 5) 犬井正男, 加藤 勝, 佐藤真知子, 東 吉彦, 齋藤大輔, 菊地敬夫, 吉村作治, 東京工芸大学工学部紀要, **34**, 掲載予定 (2011).
- 6) T. Tasdizen, E. Juras and R. T. Whitaker, <http://www.miaab.org/miaab-2008-papers/01-miaab-2008-paper-01.pdf>
- 7) IEC 62220-1:2003
- 8) 犬井正男, 加藤 勝, 栃木達史, 佐藤真知子, 菊地敬夫, 吉村作治, 日本写真学会誌, **74** 別冊, p. 40 (2011).
- 9) IEC 61966-2-1:1999