

アメンヘテプ 3 世王墓埋葬室壁画の デジタル画像化における色補正

犬井 正男^{*1}、加藤 勝^{*2}、佐藤 真知子^{*1}、東 吉彦^{*3}、
齋藤 大輔^{*4}、菊地 敬夫^{*5}、吉村 作治^{*6}

Color Correction for Digitizing the Mural in the Royal Tomb of Amenophis III

Masao Inui^{*1}, Masaru Kato^{*2}, Machiko Sato^{*1}, Yoshihiko Azuma^{*3},
Daisuke Saito^{*4}, Takao Kikuchi^{*5}, Sakuji Yoshimura^{*6}

We are attempting to digitize the mural in the royal tomb of Amenophis III, one of the pharaohs of ancient Egypt. Color chart was also photographed when photographing the mural to correct images. We tried color correction with three methods. The best results were obtained by the method in which nonlinear digital counts, R , G and B were transformed to linear values with sRGB, and then linear values were converted to tristimulus values X , Y and Z by measured matrix.

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 8.2m、奥行き 15.4m、高さ 3.1m（一部 4.7m）の埋葬室の壁に「アムドゥアト書」が描かれている。筆者らは、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¹⁻⁴⁾。壁画の約 2m×3m の部分ごとに約 100 枚の小画像を撮影し、接合によって数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。現在は中画像からズーム画像を作成し、ディスプレイ上で等倍の画像を拡大縮小及び移動が自由自在にでき、グローバルアースのように観察できるようになっている。

壁画の撮影時にカラーチャートも撮影し、これらをもとに撮影画像の色補正を行うため、その方法を確立することを目的として本研究を行った。

2. 色補正の流れ

詳細は後述するが、この研究で検討して求めた、壁画画像の色補正の流れを図 1 に示す。壁画を撮影した画像を接合して得た画像の赤緑青のデジタル値 R, G, B をリニアな値 R', G', B' に変換し、補正を行い、もとのデジタル値 R, G, B に逆変換で戻す。補正では、カラーチャートの三刺激値 X, Y, Z と撮影後の R', G', B' の関係を結びつける変換行列を用いる。この変換行列を作成するのに、テンプレートマッチング、アフィン変換および重回帰分析などの処理を行う。

^{*1} 東京工芸大学工学部メディア画像学科教授、^{*2} 東京工芸大学工学部メディア画像学科非常勤講師、^{*3} 東京工芸大学工学部メディア画像学科講師、^{*4} 芝浦工業大学工学部電気電子学群電気工学科助教、東京工芸大学工学部メディア画像学科客員研究員、^{*5} サイバー大学世界遺産学部准教授、早稲田大学エジプト学研究所客員研究員、^{*6} 早稲田大学名誉教授
2011 年 9 月 21 日 受理

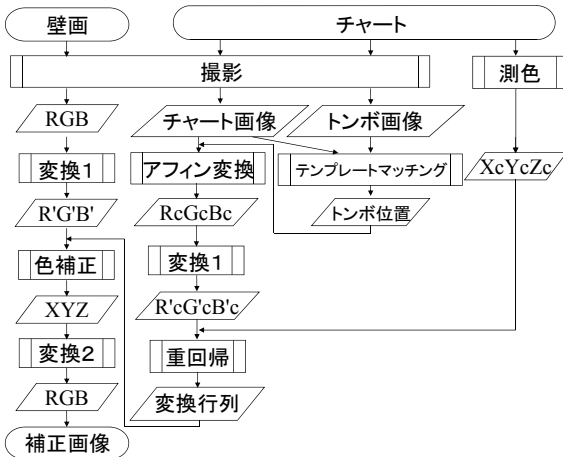


図1 王墓壁画の色補正の流れ

3. 撮影

カメラは、この研究を始めたときに 35mm 版相当の民生用デジタル一眼レフカメラで最多画素数であった 2,100 万画素のキヤノン EOS 1Ds MarkIII を使い、レンズは歪曲収差が小さいキヤノン EF180mm F3.5L マクロ USM を用いた。カメラの方向を上下左右に精度良く自動的に変えて撮影を行うようにするため、パノラマ写真自動撮影装置を作成した¹⁾。装置は上下方向に±15 度、左右方向に±360 度、それぞれ分解能 0.002 度、0.004 度で角度を変えることができる。この装置を PC と専用ソフトによってコントロールし、壁画の約 2m×3m の範囲を横 11 枚×縦 9 枚の計 99 枚撮影した。これを撮影単位とし、三脚を移動するごとに繰り返し、壁画の撮影を行っている。パノラマ写真作成用ソフト PTGui を用いて 1ヶ所で撮影した 99 枚の画像から接合を行い、約 5 億画素の 16 ビット TIFF 画像を作成した。なお、図 1 中にはこの接合を省略している。この研究では、壁画画像の色補正方法を確立することが目的であるため画素数を 1/4 にした JPEG 画像を用いる。壁画撮影時にカラーチャートも壁画と同条件で撮影しており、これを用いて色補正を行う。

4. カラーチャートのデジタル値の測定

撮影したカラーチャート画像のデジタル値 R, G, B を自動的に求めるため、まずチャートの四隅にある

トンボの自動検出をテンプレートマッチングで行った。処理はモノクロに変換した画像に対して、画像処理ライブラリ OpenCV のソフトを用い正規化相互相関係数 (以下、相関係数と略称) を求めた⁵⁾。テンプレートにカラーチャート画像から切り取った 16×16 画素のトンボを用い、図 2 に示すチャートがやや傾いた画像に適用した。トンボは 4ヶ所であるが、検出精度を調べるために相関係数の大きい 8ヶ所を検出した結果を、図 2 中に緑の円で示し、相関係数を表 1 に示す。やや傾いた画像に適用したにもかかわらず、0.92 以上の高い相関係数でトンボが検出されている。カラーチャートのボードに記載されている文字 t が 5 番目に検出されたが、その相関係数は 0.70 であり、トンボの値と大きな差がある。そのため、相関係数が大きい 4ヶ所を検出すればトンボ以外のものを誤って検出せず、トンボを自動検出できることが分かった。

表 1 チャート画像のテンプレートマッチングにおけるマッチング位置 x, y と相関係数 r

No.	x	y	r	位置
1	1743	1481	0.95	トンボ右下
2	324	1443	0.94	トンボ左下
3	1768	548	0.93	トンボ右上
4	345	508	0.92	トンボ左上
5	807	1474	0.70	$x-ri(t)e$
6	2444	698	0.68	壁面
7	1349	1492	0.65	char(t)
8	2221	925	0.65	壁面

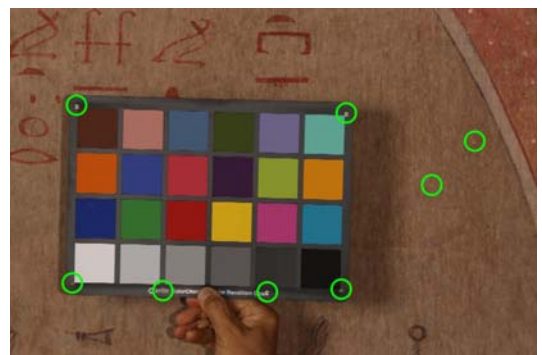


図2 テンプレートマッチングによる
トンボの検出

チャート画像のトンボは相関係数の高い順に検出され、表1の場合は図3(a)上の黒丸の番号で示すような順番になる。アフィン変換の係数を求めるためには、チャート画像のトンボの番号を図3(a)下で示すチャートと対応する位置を同じ番号にしなければならない。つまり、図3(a)上の黒丸の番号を赤丸の番号のようにしなければならない。そのため、図3(b)に示すように以下の手順で番号をつけ直した。

- 1) 検出された4点 (x_i, y_i) ($i = 1, \dots, 4$)の中央座標を (x_c, y_c) とする。
- 2) まず $k_i = 1$ とし、
- 3) $x_i > x_c$ なら k_i に 1 を加算
- 4) $y_i > y_c$ なら k_i に 2 を加算
- 5) i ごとに 2)~4) を繰り返すと、
 k の値は 1, 2
 3, 4 の順となる。

こうして求めたトンボの対応する位置座標からアフィン変換を行い、カラーチャート画像の各色パッチの内部のデジタル値の平均値を求めた。各色パッチの選択部分を図4に白色で示す。

5. デジタル値と測色値の関係

デジタルカメラで撮影した画像のデジタル値 R, G, B はsRGB^{6,7)}準拠のはずであるが、どの程度準拠しているかを調べるためにガンマ特性を測定した。カラーチャート中の白から黒までのグレイ6色の視感反射率すなわち三刺激値 Y と、撮影画像のデジタル値の関係を図5に示す。ディスプレイの特性をよく表す次式のGOG (Gain Offset Gamma)モデルの係数 γ を、これらのデータから求めた。

$$Y = aC^\gamma + b \quad (C = R, G, B) \quad (1)$$

その結果、係数 γ の値は2.50であり、sRGBでの実質的なガンマ値2.2とやや異なることがわかった。

(注 sRGBでは後述する式(4)を用いてデジタル値 R, G, B をリニアな値に変換しており、そこでは2.4乗となっているが、低い部分を除き、分母分子の定数項がない場合の2.2乗とほとんど同じである。)

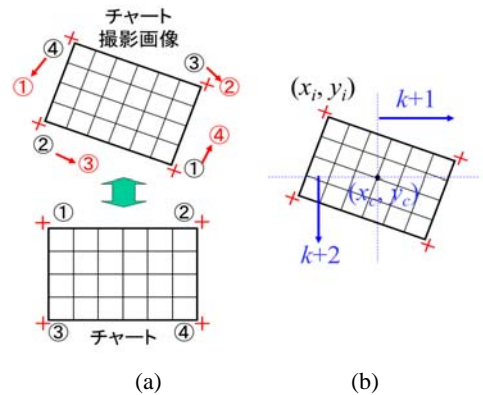


図3 トンボの検出順と並び替え

- (a) チャート画像の検出順とチャートとの対応
 (b) 並び替えの方法



図4 自動的に抽出されたパッチ部の色を測定する範囲（白色で表示）

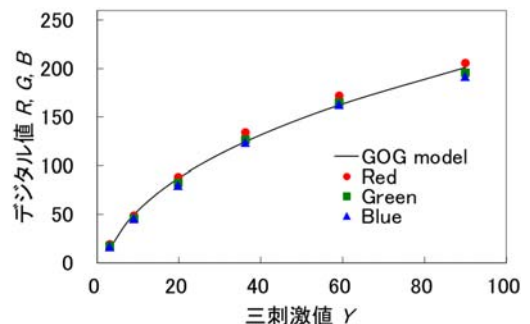


図5 デジタル値と三刺激値の関係

そのため、式(2)でノンリニアなデジタル値 R, G, B をリニアな R', G', B' に変換し、

$$C' = aC^\gamma + b \quad (C' = R', G', B') \quad (2)$$

その後、これらの R', G', B' から式(3)で三刺激値 X, Y, Z に変換することとした。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

これらの変換で用いられる定数 a, b, γ と行列 M の要素を非線形最適化で求めた。すなわち、撮影後のデジタル値から計算したチャート画像の三刺激値と被写体であるチャートの測定値との誤差が最小になるように定数の値を求めた。その結果、式(2)、(3) はそれぞれ、

$$C' = 1.70C^{2.19} + 1.70 \quad (2')$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36.8 & 28.7 & 15.1 & -81.4 \\ 21.2 & 60.9 & 1.3 & -84.2 \\ 103.0 & -4.6 & 5.9 & -105.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3')$$

となった。このように式(2') および(3')を用いて変換する方法を「方法1」とする。

式(2') のガンマは2.19で、sRGBでの値2.2とほとんど同じであった。そのため、sRGBで規定している式(4)を用いてノンリニアなデジタル値 R, G, B をリニアな R', G', B' に変換することを行った。

$$C' = \begin{cases} C/255/12.92 & (C/255 \leq 0.04045) \\ \left(\frac{C/255 + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} & (C/255 > 0.04045) \end{cases} \quad (C = R, G, B) \quad (4)$$

これらの R', G', B' と三刺激値の値から重回帰分析によって変換行列を求めた。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 70.98 & 36.55 & 37.39 & 3.61 \\ 31.59 & 102.52 & 16.52 & 3.85 \\ 4.98 & -0.22 & 181.32 & 5.48 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3'')$$

式(4) および(3'')を用いて変換する方法を「方法2」とする。

さらに、重回帰分析を行う必要がないため、すべての変換を sRGB の規定にしたがって三刺激値 X, Y, Z を求めることも試みた。すなわち、式(4)で求めたリニアな R', G', B' から

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} \quad (5)$$

として、三刺激値 X, Y, Z を求めた。なお、三刺激値 Y は、sRGB では $0 \leq Y \leq 1$ であるが、本研究では $0 \leq Y \leq 100$ として扱っているため、式(5)で得られた三刺激値を実際には100倍している。式(4) および(5)を用いて変換する方法を「方法3」とする。

このようにして3種類の方法で求めた三刺激値 X, Y, Z と元のチャートの三刺激値 X, Y, Z との関係を表2に示す。方法3は他の2方法より誤差が1桁大きくなっている。相関係数が3方法とも高くなっているが、方法3の回帰直線は原点を通る傾き1の直線とはなっていなかった。方法1と方法2の結果はほとんど同じであり、式(3')での行列の4列目すなわち定数項の値が小さすぎるため、またGOGモデルでの係数を測定する必要がないため、方法2を用いることにした。

表2 3方法での相関係数と誤差

使用した 式番号		方法1	方法2	方法3
		(2')、測定	(4)、sRGB	(4)、sRGB
X	変換行列	(3')、測定	(3'')、測定	(5)、sRGB
	相関係数	0.998	0.998	0.996
	平均誤差	1.0	0.9	12.1
Y	最大誤差	2.5	2.2	34.2
	相関係数	0.998	0.998	0.998
	平均誤差	1.0	1.0	11.7
Z	最大誤差	2.3	2.2	33.8
	相関係数	0.996	0.996	0.991
	平均誤差	1.9	1.9	14.7
	最大誤差	3.9	4.0	48.4

方法2による補正画像から求めた三刺激値 X,Y,Z とチャートそのものの三刺激値 X,Y,Z との関係を図6に示す。計算値はチャートの値とほとんど同じになっていることがわかる。

6. 壁画画像の色補正

図1の流れ図に示すように、方法2によって、すなわちsRGBにしたがい画像中の各画素のデジタル値 R,G,B から式(4)を用いてリニアな R',G',B' に変換し、それらの値を式(3')により三刺激値 X,Y,Z に変換した。その後、つぎに述べるsRGBに規定されている方法で、三刺激値 X,Y,Z からデジタル値 R,G,B に変換した。まず、三刺激値 X,Y,Z から

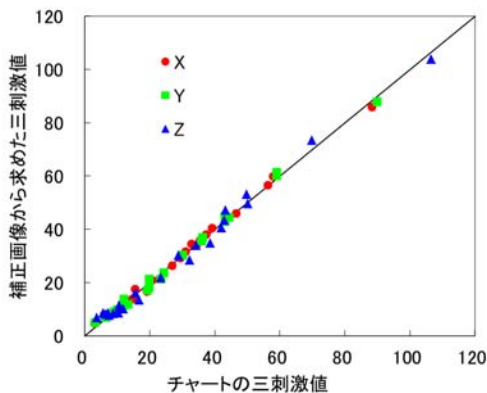


図6 補正画像から求めたカラーチャートの各パッチの三刺激値 XYZ とカラーチャートそのものの三刺激値との関係

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

と、リニアな R',G',B' に変換し、その後、

$$C = \begin{cases} (12.92C') \times 255 & (C \leq 0.0031308) \\ (1.055 C'^{1/2.4} - 0.055) \times 255 & (C > 0.0031308) \end{cases} \quad (7)$$

と、ノンリニアな値に変換した後、それらを丸めた値をデジタル値 R,G,B にした。なお、前述したように、sRGBでは $0 \leq Y \leq 1$ であるが、本研究では $0 \leq Y \leq 100$ として扱っているため、三刺激値 X,Y,Z は1/100倍してから式(6)で用いている。

このようにして色補正を行った結果を原画像とともに図7に示す。補正画像はいわゆる測色的色再現を行った結果となっており、測色値である三刺激値 X,Y,Z はカラーチャートそのものの値と近くなっている。イエローを見ると原画像ではやや赤っぽくなっていたが、補正画像ではそれがなくなり、鮮やかになっている。また、白も明るくなって、より白くなっている。色補正を行うことによって、カラーチャートの色が測色的に再現されるようになったため、壁画の色も同様に測色的に再現されていると思われる。画像全体はややコントラストが低くフラットな印象である。学術資料として研究のために観察するので、壁画を忠実に再現した画像を基本とし、コントラストの調整を行うかどうかあらためて検討していく。



図7 原画像(a)と色補正画像(b)

7. まとめ

古代エジプト王墓壁画の色補正をカラーチャートを用いて行う方法を確立した。この方法によって壁画画像の色補正を行うことができることを確認した。この色補正を、別途行っている不均一照明の補正^{8,9)}を行った後に、実際の多数の撮影画像に適用する予定である。

本研究は文部科学省科学研究費補助金（平成 20～22 年度、課題番号 20401026）の助成を受けたものである。また、本研究の一部は、文部科学省ハイテク・リサーチ・センター整備事業（平成 17～21 年度）による助成を得て行われた。

参考文献

- 1) 犬井正男、佐藤真知子、稲垣敏彦、菊地敬夫、吉村作治、アメンヘテプ 3 世王墓壁画のデジタル画像化、日本写真学会誌、第 72 巻別冊、pp.11-12 (2009)
- 2) Masao Inui, Machiko Sato, Toshihiko Inagaki, Takao Kikuchi, Sakuji Yoshimura, Digital imaging of the mural paintings in the royal tomb of Amenophis III, Image Electronics and Visual Computing Workshop 2010, 1p-7, Manuscript in CD (2010)
- 3) Masao Inui, Machiko Sato, Masaru Kato, Takao Kikuchi, Sakuji Yoshimura, Zoom-imaging of the mural painting in the royal tomb of Amenophis III, The 31st International Congress on Imaging Science (ICIS 2010), pp.801-804 (2010)
- 4) 菊地敬夫、犬井正男、佐藤真知子、吉村作治、アメンヘテプ 3 世王墓の埋葬室に描かれた壁画の史料化に向けたデジタル画像化、オリエント、53 (2)、pp.218-219 (2010)
- 5) <http://opencv.jp/>
- 6) IEC 61966-2-1:1999, Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB
- 7) <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>
- 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、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、日本写真学会誌、第 74 巻別冊、pp.40-41 (2011)

- 9) Masao Inui, Masaru Kato, Tatsushi Tochigi, Machiko Sato, Takao Kikuchi, Sakuji Yoshimura, Correcting for non-uniform lighting when photographing the mural in the royal tomb of Amenophis III (II) Applying a lighting model to mural images, AIC 2011 Midterm Meeting of the International Colour Association, Conference Proceedings, pp.435-438 (2011)