I-045

PCA による無相関化と回転を用いたディジタル画像の色合い変換

Color Transfer for Digital Image using Uncorrelation and Rotation based on PCA

桶谷 新也* 藤田 和弘† 中森 伸行‡

Shinya Oketani Kazuhiro Fujita Nobuyuki Nakamori

1 はじめに

近年，ディジタルカメラの普及に伴い，ディジタル画像の色合いを容易に変更できるようになってきた．例えば，新緑の画像を紅葉の画像へ変換することが可能である．しかしながら，画像編集ソフトを用いてディジタル画像の色合いを変換する場合，対象画像の色合いを参照画像の色合いに近づける作業が必要となり，作業に時間と編集スキルを要する．

これまでの画像の色合い変換に関する研究として，画像の RGB 成分の統計的な情報である自己共分散行列に着目した手法が，Xiao ら [1] により提案されている．対象画像の RGB 成分の自己共分散行列を SVD 分解 (Singular Value Decomposition, 特異値分解) した結果である直交行列と固有値を用いて，対象画像を平均 0，標準偏差 1 の無相関な色空間へ変換した後，参照画像の自己共分散行列の SVD 分解結果である固有値と直交行列を利用して参照画像の色空間へ写像する方法である．また，PCA(Principal Component Analysis) および ICA(Independent Component Analysis) を用いた画像の色合い変換として，Shao ら [2] は，基本的には Xiao ら [1] の方法と同様に，RGB 成分の自己共分散行列に対する固有ベクトルと固有値を用いて，対象画像の色空間を参照画像の色空間へ写像する方法を提案している．その際に，PCA による無相関な色分解後に，ICA を用いて独立になるように色分解を行い，より良好な結果が得られることを示している．

Xiao ら [1] の方法および Shao ら [2] の PCA を用いた方法と本提案手法は，PCA を用いた色合い変換の手法という観点からは，処理アルゴリズムとして基本的に同じである．ただし，本提案手法では，PCA を用いた手法を発展させ，利用者が色合いの調整を行える手法を提案している．新規な部分は，以下の二点である．

- 「RGB 成分に対する PCA を行った後，ICA で独立な色分解を行うのではなく，色空間で回転行列を用いて直交軸を回転させていること．」
- 「対象画像の色空間を参照画像の色空間と完全に一致させるだけでなく，中間の色合いに調整できるようなパラメータを導入すること．」

2 PCA と ICA を用いた画像の色合い変換

PCA および ICA に基づき，参照画像の色合いを参考に対象画像の色合いを変換し，変換後画像を得る方法について述べる．

2.1 RGB 成分に対する自己共分散行列の固有値問題

対象画像の位置座標 (m, n) における画素の RGB 成分 $(x_R[m,n], x_G[m,n], x_B[m,n])$ からなる画素値ベクトル $\boldsymbol{x}[m,n]$，平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_x$ および自己共分散行列 R_x を，以下に定義する．

$$\boldsymbol{x}[m,n] \equiv \begin{pmatrix} x_R[m,n] \\ x_G[m,n] \\ x_B[m,n] \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\mu}_x \equiv \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \boldsymbol{x}[m,n] \tag{2}$$

$$\mathrm{R}_x \equiv \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\boldsymbol{x}[m,n] - \boldsymbol{\mu}_x)(\boldsymbol{x}[m,n] - \boldsymbol{\mu}_x)^T \tag{3}$$

ここで，M,N は画像の縦横各方向の画素数である．

つぎに，次式に示す自己共分散行列 R_x に対する固有値問題を解き，固有値 $\lambda_x[k]$，固有ベクトル $\boldsymbol{u}_x[k]$ を求める．

$$\mathrm{R}_x \boldsymbol{u}_x[k] = \lambda_x[k] \boldsymbol{u}_x[k] \quad k = 0, 1, 2 \tag{4}$$

ここで，固有値 $\lambda_x[k]$ を主対角とする行列 Λ_x，固有ベク

* 京都府中小企業技術センター，Kyoto Prefectural Technology Center
† 龍谷大学，Ryukoku University
‡ 京都工芸繊維大学大学院，Graduate School, Kyoto Institute of Technology

トル $\boldsymbol{u}_x[k]$ からなる行列 U_x を次式で定義する．

$$\Lambda_x \equiv \mathrm{Diagonal}(\lambda_x[0], \lambda_x[1], \lambda_x[2]) \tag{5}$$

$$\mathrm{U}_x \equiv (\boldsymbol{u}_x[0], \boldsymbol{u}_x[1], \boldsymbol{u}_x[2]) \tag{6}$$

同様に，参照画像について，画素値ベクトル $\boldsymbol{y}[m,n]$，平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_y$，自己共分散行列 R_y とし，固有値問題より，固有値 $\lambda_y[k]$，固有ベクトル $\boldsymbol{u}_y[k]$ を求め，固有値 $\lambda_y[k]$ を主対角とする行列 Λ_y，固有ベクトル $\boldsymbol{u}_y[k]$ からなる行列 U_y を定義する．また，同様に色合い変換後の画像についても，画素値ベクトル $\boldsymbol{x}'[m,n]$，平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_{x'}$，自己共分散行列 $\mathrm{R}_{x'}$ を定義する．

2.2 色の線形変換 (PCA)

対象画像の画素値ベクトル $\boldsymbol{x}[m,n]$ を，次式により変換後画像の画素値ベクトル $\boldsymbol{x}'[m,n]$ へ線形変換することを考える．

$$\boldsymbol{x}'[m,n] = \mathrm{A}\boldsymbol{x}[m,n] + \boldsymbol{b} \tag{7}$$

ここで，行列 A は変換行列を，ベクトル $\boldsymbol{b}$ はシフトベクトルを表す．

対象画像，参照画像，変換後画像の各画素値ベクトル $\boldsymbol{x}[m,n]$，$\boldsymbol{y}[m,n]$，$\boldsymbol{x}'[m,n]$ の確率密度関数が，ガウス性を有していると仮定する．

$$\begin{aligned} &p_x(\boldsymbol{x}[m,n]) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}|\mathrm{R}_x|^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}[m,n]-\boldsymbol{\mu}_x)^T \mathrm{R}_x^{-1}(\boldsymbol{x}[m,n]-\boldsymbol{\mu}_x)} \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} &p_y(\boldsymbol{y}[m,n]) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}|\mathrm{R}_y|^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(\boldsymbol{y}[m,n]-\boldsymbol{\mu}_y)^T \mathrm{R}_y^{-1}(\boldsymbol{y}[m,n]-\boldsymbol{\mu}_y)} \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} &p_{x'}(\boldsymbol{x}'[m,n]) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}|\mathrm{R}_{x'}|^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}'[m,n]-\boldsymbol{\mu}_{x'})^T \mathrm{R}_{x'}^{-1}(\boldsymbol{x}'[m,n]-\boldsymbol{\mu}_{x'})} \end{aligned} \tag{10}$$

このとき，各画素値ベクトルの確率密度関数は，1 次モーメントである平均ベクトルと 2 次モーメントである自己共分散行列により規定される．したがって，変換に対する条件として，変換後画像の平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_{x'}$ および自己共分散行列 $\mathrm{R}_{x'}$ が，参照画像の平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_y$ および自己共分散行列 R_y と一致するように変換を行う．つまり，

$$\boldsymbol{\mu}_{x'} = \boldsymbol{\mu}_y \tag{11}$$

$$\mathrm{R}_{x'} = \mathrm{R}_y \tag{12}$$

次式で示すように，対象画像の画素値ベクトル $\boldsymbol{x}'[m,n]$ を，Λ_x，U_x，Λ_y，U_y を用いて，平均ベクトル $\boldsymbol{\mu}_y$，自己共分散行列 R_y を有する変換後画像の画素値ベクトル $\boldsymbol{x}'[m,n]$ へ線形変換する．

$$\boldsymbol{x}'[m,n] = \mathrm{U}_y\Lambda_y^{\frac{1}{2}}\Lambda_x^{-\frac{1}{2}}\mathrm{U}_x^T(\boldsymbol{x}[m,n] - \boldsymbol{\mu}_x) + \boldsymbol{\mu}_y \tag{13}$$

この変換は，対象画像の RGB 空間において PCA により求めた固有ベクトル $\{\boldsymbol{u}_x[k]\}$ を基底ベクトルとする座標空間から，参照画像の RGB 空間において PCA により求めた固有ベクトル $\{\boldsymbol{u}_y[i]\}$ を基底ベクトルとする座標空間への写像を意味している．

2.3 色の線形変換 (ICA)

PCA を用いた画像の色合い変換では，画像の RGB 成分に対して正規分布を仮定し，PCA による主成分のマッチングを行うことにより色合いの変換を行うが，実際の RGB 成分の分布は必ずしも正規分布で十分に近似できるとは限らない．そこで，ICA を用いた色合い変換を考える．

PCA を用いて対象画像 $\boldsymbol{x}[m,n]$ を無相関化したベクトル $\boldsymbol{X}[m,n]$ に対して，次式により対象画像の独立成分 $\boldsymbol{X}'[m,n]$ を抽出する．

$$\boldsymbol{X}[m,n] = \Lambda_x^{-\frac{1}{2}}\mathrm{U}_x^T(\boldsymbol{x}[m,n] - \boldsymbol{\mu}_x) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{X}'[m,n] = \mathrm{W}_x^T\boldsymbol{X}[m,n] \tag{15}$$

W_x は直交行列であり，分解後の各成分におけるネゲントロピーの積が最大となるように決定する．対象画像 $\boldsymbol{x}[m,n]$ と同様に，参照画像 $\boldsymbol{y}[m,n]$ に対して無相関化したベクトル $\boldsymbol{Y}[m,n]$ から独立成分 $\boldsymbol{Y}'[m,n]$ を抽出し，直交行列 W_y を得る．

$$\boldsymbol{Y}[m,n] = \Lambda_y^{-\frac{1}{2}}\mathrm{U}_y^T(\boldsymbol{y}[m,n] - \boldsymbol{\mu}_y) \tag{16}$$

$$\boldsymbol{Y}'[m,n] = \mathrm{W}_y^T\boldsymbol{Y}[m,n] \tag{17}$$

PCA を用いた色の線形変換 (式 (13)) に対して，無相関化後に独立成分への分解を行う変換を付加し，ICA を用いた色合い変換を次式にて行う．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}''[m,n] = &\mathrm{U}_y\Lambda_y^{\frac{1}{2}}\mathrm{W}_y\mathrm{W}_x^T\Lambda_x^{-\frac{1}{2}}\mathrm{U}_x^T(\boldsymbol{x}[m,n] - \boldsymbol{\mu}_x) \\ &+\boldsymbol{\mu}_y \end{aligned} \tag{18}$$

ここで，W_x および W_y は直交行列であるので，自己共分散行列に対する影響はなく，PCA による色合い変換と同様に，変換後画像の自己共分散行列 $\mathrm{R}_{x''}$ は参照画像の自己共分散行列 R_y と等しい．

(a) 対象画像 (Case1)　(b) 参照画像 (Case1)　(c)PCA 色変換 (Case1)　(d)ICA 色変換 (Case1)

(e) 対象画像 (Case2)　(f) 参照画像 (Case2)　(g)PCA 色変換 (Case2)　(h)ICA 色変換 (Case2)

(i) 対象画像 (Case3)　(j) 参照画像 (Case3)　(k)PCA 色変換 (Case3)　(l)ICA 色変換 (Case3)

図 1　色合い変換の処理例（従来法）

2.4　PCA とＩＣＡを用いた色の線形変換の例

図 1 に，対象画像（図 1(a),(e),(i)）を，参照画像（図 1(b),(f),(j)）の色合いになるように，PCA を用いて色合い変換した画像（図 1(c),(g),(k)）及び ICA を用いて色合い変換した画像 (図 1(d),(h),(l)) を示す．

PCA を用いた色合い変換では，Case1，Case2 に対する各処理結果（図 1(c),(g)）は，各対象画像が，参照画像 の色合いに変換されていることが確認できる．一方，Case3 に対する処理結果（図 1(k)）は，地面の色が不自然な色合いとなり，奥の緑の葉の部分も紅葉に変換されず，不十分な結果となっている．これは，PCA では，無相関な成分に分解されるが，各成分は互いに独立と限らないため，色空間における直交軸全体の回転要素が加味されていないためと考えられる．

ICA を用いた色合い変換では，Case1，Case3 に関しては，良好な色合い変換後の画像（図 1(d),(l)）が得られているが，Case2 に対する処理結果（図 1(h)）は，花の部分が黒色や灰色に，葉の部分が紫色に，背景部分が緑色に変換され，配色が不自然な結果となっている．この理由として，PCA では，変換後の各主成分は，固有値の大きさ順に分解されるため，配色順序の情報が維持されるが，一方，ICA では，独立な各主成分の順序については，アルゴリズム上，制限されることなく分解されるためと考えられる．

そこで，著者らは，PCA を用いた処理結果をベースに，画像の色合い調整ができる新たな手法を提案する．

3　PCA を用いた色合いの調整

PCA を用いた色合い変換および ICA を用いた色合い変換について上述したが，PCA では，図 1 の Case3 のように十分な色合い変換結果が得られない場合があり，ICA では，図 1 の Case2 のように配色順序が異なる不自然な処理結果となる場合がある．また，実際に，色合い変換したい利用者を想定すると，参照画像と対象画像の中間の色合いに変換したいという要望が想定される．そこで，以下，PCA を用いた新しい色合いの調整方法について述べる．

色合いの調整後の画像 $\boldsymbol{z}_{\rho,\theta}[m,n]$ への線形変換を以下で定義する．ρ は，対象画像から参照画像の色合いへの変換の程度を表すパラメータであり，変換結果は，$\rho=0$ で対象画像と等しくなり，$\rho=1$ で参照画像の色合いとほぼ等しくなる．また，θ は，色合いの調整を行うパラメータであり，$\theta=0^\circ$ が参照画像に対応し，θ を正負に変化さ

せることにより，色合いの微調整を行うことができる．

$$\boldsymbol{z}_{\rho,\theta}[m,n] = \mathrm{U}_{z_\rho}\Lambda_{z_\rho}^{\frac{1}{2}}\mathrm{T}(\theta)\Lambda_x^{-\frac{1}{2}}\mathrm{U}_x^T(\boldsymbol{x}[m,n]-\boldsymbol{\mu}_x) + \boldsymbol{\mu}_{z_\rho} \tag{19}$$

ここで，$\boldsymbol{\mu}_{z_\rho}$，$\Lambda_{z_\rho}$，$\mathrm{U}_{z_\rho}$ および $\mathrm{T}(\theta)$ を次式で定義する．

$$\boldsymbol{\mu}_{z_\rho} \equiv (1-\rho)\boldsymbol{\mu}_x + \rho\boldsymbol{\mu}_y \tag{20}$$

$$\Lambda_{z_\rho} \equiv (1-\rho)\Lambda_x + \rho\Lambda_y \tag{21}$$

$$\mathrm{U}_{z_\rho} \equiv (1-\rho)\mathrm{U}_x + \rho\mathrm{U}_y \tag{22}$$

$$\mathrm{T}(\theta) \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \tag{23}$$

提案手法では，参照画像の平均値ベクトル $\boldsymbol{\mu}_y$, 固有値 Λ_y, 固有ベクトル U_y をそのまま用いず，対象画像のそれらと ρ で一次補間した値を用いることで，中間の色合いを表現できる．また，回転行列 $\mathrm{T}(\theta)$ は，画像を PCA により分解した際，主に輝度成分を表す第一成分を固定し，色差成分に相当する第二および第三主成分について，色空間で回転を行うものであり，ICA による色変換の $\mathrm{W}_y\mathrm{W}_x^T$ に類似する変換である．

3.1 PCA を用いた色合いの調整結果

ρ および θ を変化させながら，式 (19) により図 1(i) を対象画像とし，図 1(j) を参照画像として変換した結果を，図 2 に示す．ρ を 0 から 1 へ変化させることにより，新緑から紅葉へ色合いを変化させることができ，0.5 で中間の色合いになった．また，θ を $-60°$ から $60°$ まで変化させることで，色合いの調整ができることがわかった．従来の PCA による色変換 $\rho = 1$, $\theta = 0°$(図 1(k) と同図) では，奥の緑の葉の部分が紅葉に変換されていないが，$\rho = 1$, $\theta = -60°$ では紅葉に変換され，地面の色も自然な色合いとなった．また，この画像 ($\rho = 1, \theta = -60°$) は，ICA を用いた結果画像 (図 1(l)) に近い結果であることがわかる．

4 おわりに

本研究では，画像の色合いを変換するために，PCA を用いた新しい色合い変換手法を提案した．提案手法は，RGB 成分に対する PCA を行った後，回転行列を用いることで，色空間における直交軸を回転させることができる．さらに同時に，対象画像と参照画像の中間の色合いに変換することができ，色合いの微調整が可能である．

参考文献

[1] X.Xiao, L.Ma: “Color Transfer in Correlated Color Space”, Proc. ACM VRCIA’06, pp.305-309 (2006)

[2] F.Shao, G.Jiang, M.Yu: “ Color Correction for Multi-view Images Combined with PCA and ICA ”, WSEAS Trans. on Biology and Biomedicine, Vol.4, No.5, pp.73-79 (2007)

図 2　PCA を用いた色合い調整結果（提案法）