

仏像写真の数理的色彩復元法の試論

A Treatise on Mathematical Color Inpainting of Japanese Old Statues

坂田 年男¹、竹之内 和樹¹、能野 謙介¹、前原 一満²
Toshio Sakata, Kazuki Takenouchi, Kensuke Nouno, Kazumitsu Maehara
堀内 隆彦³
Takahiko Horiuchi

九州大学大学院芸術工学研究院¹、芸術工学府 修士課程²、福岡市南区塩原 4-9-1
Kyushu University, 4-9-1 Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka
千葉大学大学院融合科学研究科³、千葉市稲毛区弥生町 1-33
Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba

あらまし：経年変化により退色した仏像本体の写真がデータベースに多く散見されるが(当然写真上も色彩が欠落している)、これに対して、現代の数理的画像技術で色彩を回復する手法について、試論を行なう。本当の意味でのこうした歴史的に貴重な仏像の色彩の修復にはきわめて膨大な準備と調査が必要なことは明らかであるが、本論文は、本体に対する詳細な職人芸的な知識を使用せずに、写真と数理的な画像技術だけを使用してどれだけ写真上の色彩の復元が可能であるかについて考察する。

Summary: There are many photos of statues having lost its coloring in any Japanese old statues database. This is a treatise on color inpainting of these photos of old statues. In reality, for color inpainting of old valuable statues, it is needless to say that we must pay tremendous efforts and detailed pre-research of statues themselves. On the contrary, in this treatise, we argue how can we contribute to the color inpainting of the photos, not of the statues themselves, by using mathematical image analysis techniques assuming with no professional profound knowledge of statue inpaintings.

キーワード： カラー修復, 仏像写真, ポアソン方程式, カラー転送, 疎表現

Keywords: Color inpainting, Photos of old statues, Poisson equation, Color transfer method, Sparse coding theory

1. 導入

著者の一人は国宝「鑑真和尚展」を拝覧する機会があり(鑑真和尚展[12])、そのとき、仏像の偉容に心を打たれるとともに、ところどころに散見される経年変化による「傷み」に、心を動かされた。何とか修復できないものであろうかと。もちろん、仏像本体の修復には筆舌につくし難い苦勞が伴うことはよく知られている。仏像本体の修復は我々素人のなせる業ではないが、せめて写真のお顔の色だけでも、修復してみたいとの念が募り、この試論へと発展した次第である。我々の有している技術は数理的画像処理技術(それとて、これらの理論がカバーする領域の一部に過ぎない)のみ

である。これを使用してどこまで思いが遂げられるか、この原稿を書いている時点において、筆者らにも可能性が定かに見えないのであるが、我々の用いる手法についての解説とその現時点での適用結果を本試論にまとめることにより、今後の研究のための足がかりの第一歩としたい。

さて、我々は最終目標を唐招提寺の四天王の色彩の復元と定めた。唐招提寺展で筆者の一人が最も感銘を受けたのが鑑真和尚坐像とこの四天王像(図 1 (a) ~ (d))であったからである。

もちろん、これは、素人には大胆すぎる目標であるといえよう。東大寺修復工房、奈良国立博物館修復課、

および美術院国宝修理所の御意見を拝聴したところ、像の元の色彩はほとんど残存していないそうである。それゆえ、この四天王の色彩を復元した試みはないそうである。当時の仏像製作の様式や、仏像の持つ色彩の意味などをたよりに、EXAMPLE からの外挿およびわずかに残る残存色彩からの外挿を手だてに、(おもに前者)色彩を修復することになる。この四天王と同じ天平時代の作に、彩色を残している像として、東大寺法華堂 四天王・金剛力士(阿吽)・執金剛神東大寺戒壇堂 四天王などがあるそうである。なお、唐招提寺の四天王については奈良六大寺大観 13 卷「唐招提寺 2」(岩波 2001)に製作手法の詳細な記述がある。また、他の四天王の修復例として、新薬師寺執金剛 12 神の 3D 技術を駆使した復元も参考になるだろう (<http://www.k5.dion.ne.jp/~shinyaku/juni.html>)。また、日本各地の四天王像も参考になるだろう。

ここで、我々の用いる画像色彩復元のための数理的な手法について簡単に説明しよう。詳細は各手法のために節を設けて詳しく説明し、適用例を紹介する。まず、2 節で説明するポアソン方程式を解く手法によるカラー復元法は、Sapiro[8]の論文に現れた手法で、現代の最適化による画像復元手法(Chan-Chen[2]、Sapiro[9]、Tschumperlie-Deriche[10]等)の一つと位置

付けられる。RGB 空間ではなく(Y, Cb, Cr)空間で画像を考えYを基本として、最適化を試みる手法である。3 節の 1 項で取り扱う Color Transfer 法には、最適化を行う LEVIN 法、適当なカラーを種として与えてそれを伝搬させる種画素伝搬法、および EXAMPLE に基づく方法などが主な方法である。ただし、本試論では必ずしも色彩伝搬法はうまく機能しなかったために、より詳細に色彩情報を考察して復元を試みた結果を 3.2 項で掲載している。

最後に、4 節で扱うスパース表現論に基づく手法は Mairal-Elad-Sapiro[7]に現れた手法である。スパース

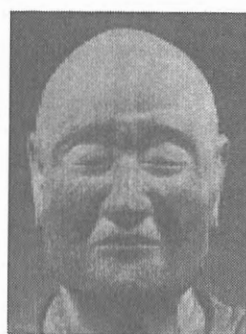


図 2 鑑真和尚坐像の顔部分



(a) 広目天



(b) 増長天



(c) 持国天



(d) 多聞天

図 1 四天王像

表現とはまず画像を微細領域に分割し、それを複数の数値ベクトルとしておいて、過剰基底を辞書として用意し、その中の少ない元を用いて各ベクトルを誤差を小さくして表現するものである。アルゴリズム的には直交マッチング追跡というアルゴリズムに立脚する KSVD 法 (Aharon-Elad-Bruckstein[1]) を用いて実現できる。EXAMPLE による画像修復の一種ともみなせる手法である。この手法にはどのような辞書を用意するかが問題となる。以下の各節で、本稿で考える数理的手法のそれぞれについて、比較的うまくいく事例 (鑑真和尚顔画像 (図 2) と四天王の中の「増長天」 (図 1 (b)) の色彩復元に適用した結果を述べて、上手くいく場合と行かない場合の差はどこから来るかを考察し、問題点をさぐることにする。

2. ポアソン方程式法による色彩復元

NTSC 信号や jpeg ファイルの内部表現に用いられる輝度 Y と色差 Cr, Cb による色空間表現において、輝度情報を手がかりに色差 Cr と Cb を推定して色彩復元を行なう方法で、Sapiro は画像の輝度分布の輪郭と色

差の分布のそれとが関係することから、勾配を媒介として両者を関連づけて、次式で最適化をはかることを提案している (Sapiro[8])。

$$\min_{Cb} \int_{\Omega} \rho (\|\nabla Y - \nabla Cb\|) d\Omega \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 、 Γ は画像領域全体である。

式 (1) の評価において Γ には様々なノルムを選択可能であり、 L_2 ノルムを用いれば、式 (1) は次式の Poisson 方程式に帰着される (Sapiro[8])。元画像の輝度情報、すなわち、元画像をモノクロとしたときの明暗の変化を右辺項とする Poisson 方程式を解いて、色差を復元する。

$$\Delta Cr = \Delta Y \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ であり、もうひとつの色差 Cb についても同様に扱う。

式 (2) を境界値問題として解くには妥当な適切な条件が必要で、これはモノクロ画像内およびその周辺に選定した位置に修復目標となる色を置いて与える。

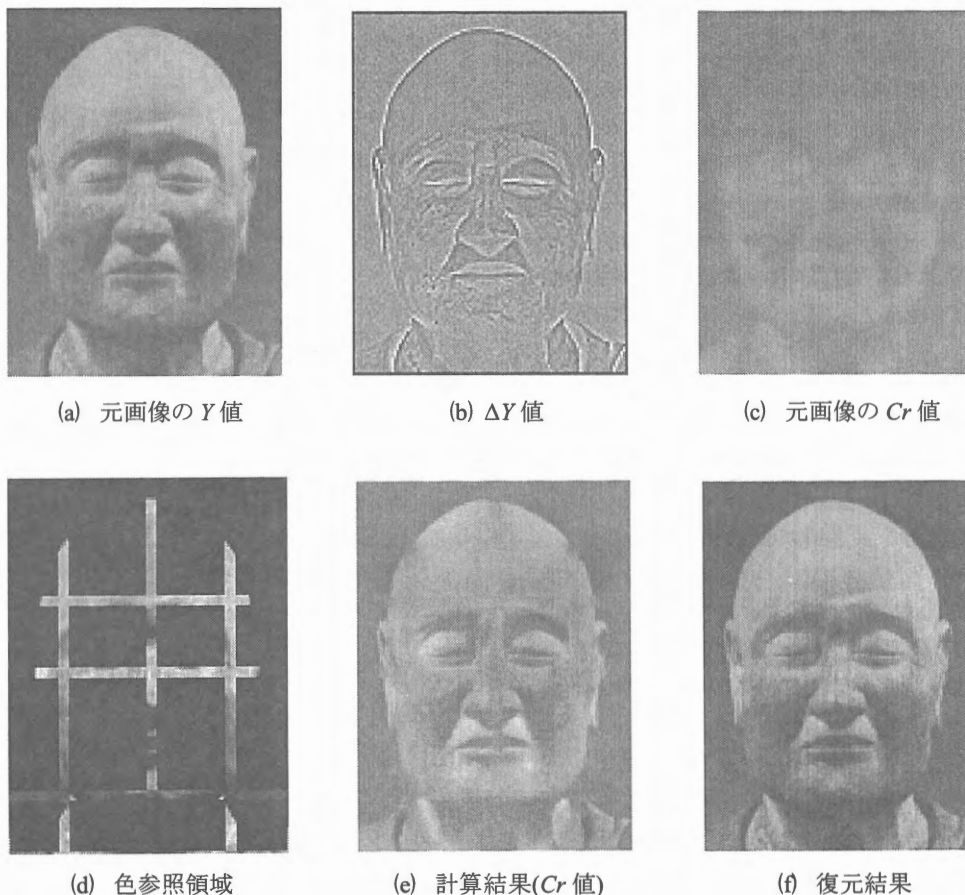


図 3 ポアソン方程式法による色彩復元

図 3 (a) ~ (f) に、この方法による鑑真像画像 (図 2) の特性、過程と色復元の結果を示す。なお、式 (2) の 2 階微分は式 (3) のように等格子間隔 h の中心差分で近似し、彩色復元領域において式 (4) を反復法で解いて、収束値として彩色復元画像の Cr を得た。 Cb についても同様である。

$$\Delta Y = \frac{Y_{i+1,j} + Y_{i-1,j} + Y_{j+1,i} + Y_{j-1,i} - 4Y_{ij}}{h^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$Cr_{ij} = \left(\frac{Cr_{i+1,j} + Cr_{i-1,j} + Cr_{j+1,i} + Cr_{j-1,i}}{h^2} - \Delta Y_{ij} \right) \frac{h^2}{4} \dots (4)$$

ただし、添字 i, j はピクセルの数で表した画像内の点の位置で、画像左上隅を $(i, j) = (1, 1)$ として、それぞれ下向き、右向きに増加する。この (i, j) をそのままピクセルの座標として用いているので、式 (3) において $h = 1$ となる。

図 3 (a) は元画像 (図 2) の Y 値であり、カラー写真をモノクロ化した画像に相当する。これに式 (3) の演算を施せば、図 (b) の ΔY が得られる。輝度の変化に対応して画像内容の輪郭など、特に輝度の変化率が大きい部分を捉えている様子がわかる。また、輪郭付近を詳細に見れば、元画像が横×縦=106 ピクセル×141 ピクセルと粗いことも関係していると思われるが、 ΔY の絶対値大きいことを示す白いピクセル (正值) と黒いピクセル (負値) が隣接しており、エッジを強調する補正が施されている可能性が見て取れる。これに対して図 (c) の Cr 値の分布は、いくらか元画像の内容は推定できるものの、輪郭の表出が弱く、一様に近い。ここでは割愛しているが Cb も類似の様相を示している。これらのことは、鑑真和尚像は顔料の退色により彩度が低く、場所によっては下地の黒漆が露出しているなどモノクロ画像に近い状態であることに対応する。

このような特性を有する画像の彩色復元において、復元目標色を与えた位置を図 (d) に示す。修復目標色は、肌色を基本とし、元画像の現在の色を強調して、幾分明く鮮やかな色を選定した。なお、この目標値を導入する位置や大きさは、彩色復元の結果に主要な影響を与えると考えられるので、複数の候補における計算結果を比較するなどにより好適導入指針を検討すべきであるが、今回は、数理的手法による彩色復元の可能性に関する研究の第 1 段階として、図に示す格子状とした。

復元結果に関する画像を図 3 (e)、(f) に示す。

図 (e) の Cr の推定結果を図 (c) と比較すれば、参照領域の Cr 情報と図 (b) の ΔY 値を式 (4) に代入した計算により、色情報が図 (c) よりも強く得られたことが知られる。頭部輪郭の復元色参照領域の近傍においては、

色参照情報と復元結果との間の滑らかさが十分でない領域も認められ、前述のように適切な境界条件導入位置や境界値選定指針の検討が必要と考えられる。

図 (f) の最終結果は、図 (a) の Y 値に計算によって推定された Cr (図 (e)) と Cb を重ねて得られる。図をみれば、画像領域全体が彩色され、顔の大部において復元目標に設定した肌色が拡散していることが確認される。ただし、 ΔY の絶対値が大きい (図 (b) の白および黒) 領域の付近では、緑、マゼンタといった想定外の色が見られる。 Y 値は、元画像のまま変化しないため、この結果は Cr, Cb の推定結果から生じている。そこで、図 3 (e) の Cr をみれば、 ΔY と類似の画像が得られている。 $YCrCb$ と RGB との対応を与える式

$$\begin{cases} R = Y + 1.402 Cr \\ G = Y - 0.714 Cr - 0.344 Cb \dots\dots\dots (5) \\ B = Y \qquad \qquad \qquad + 1.772 Cb \end{cases}$$

において、 Cr と Cb の分布が類似する場合には R, B は互いに同じ位相で変化し、一方 G は前者らとは逆位相になり、修復された画像には場所により $R+B$ か G のいずれかが強くでる結果になることがわかる。

ここで、対象としている画像が顔部分と背景とから成り、色の種類に乏しいため、その明暗のみが変化する性質が強く出て、 Y の分布がほぼそのまま Cr, Cb に転写されて 3 者の分布が類似して上の図 (f) の結果になったとすれば、本方法においては参照色の適切な調整と分布が好ましい色復元に重要であると考えられる。

また、復元目標色が元画像に矛盾しないためには、目標色の Y 値は元画像のそれと同じであることも要求される筈であり、復元目標色を暫定的に設定した後、元画像の輝度との整合性を与えるための補正が必要になる場合が生じると考えられる。これらについては、今後の課題としたい。

3. 色彩情報に基づく色彩復元

3.1. 色彩伝搬法

ここでは、堀内[7]の提案しているカラーブレンド法を増長天へ適用した結果を紹介する。冠に残存しているわずかの金色および胸部の類似色および背景色など 20 点を SEED として適用したものが図 4、顔の赤褐色を基調に背景を含めて SEED を 20 点採用した結果が図 5 である。どちらの場合も全く修復は不完全である。Seed 法の単純な適用はうまくいかないことが分る。明度を手掛かりとする Seeds 法はこのように明度そのものが不完全であり、カビなどのノイズが入っており、色彩も欠落があるような複雑な場合には、良い結果を生まないことがわかる。もっと適用に工夫が必要である。



図4 黄色の Seeds

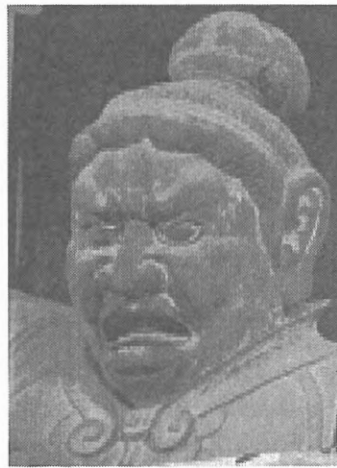


図5 赤褐色の Seeds

次節では、色彩情報をもう少し詳しく利用する方法を考えてみる。またもう少し退色の様子が単純である鑑真和尚の顔画像に適用する。

3.2. 色彩情報の詳細な吟味による色彩復元

パソコンで表示される写真等は1画素を赤(R)、緑(G)、青(B)の3色で表現し、その明るさを、

$$0 \leq R \leq 255$$

$$0 \leq G \leq 255$$

$$0 \leq B \leq 255$$

それぞれ256段階に変化させることにより約1670万(=2²⁴)色を表現可能である。この色のRGB表現は人間にとって直感的でなく、RGBの値は分かってもどのような色かは分からない。そこで、直感的に分かりやすい、色合い(色相H)、色の鮮やかさ(彩度S)、色の明るさ(明度V)で表現するHSV表色系を使用して色彩の復元を検討する。

HSV色空間は図6に示すように、円周方向に色相

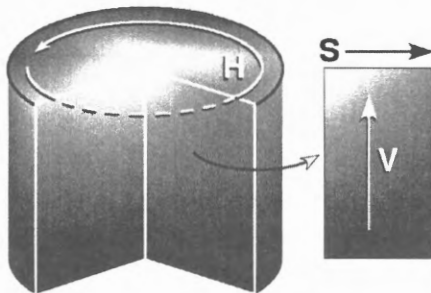


図6 HSV表色系[14]

Hを角度で表現し、

$$0^\circ \leq H < 360^\circ$$

の値を取る。H=0°が赤(R)で、H=60°は黄色(Y)、H=120°は緑(G)、H=180°はシアン(C)、H=240°は青(B)、H=300°はマゼンタ(M)を表す。

半径方向は彩度Sを表現し、

$$0 \leq S \leq 1$$

の値の範囲を取る。S=1はその色相の色で最も鮮やかな色を表現する。S=0は最も彩度は低く、灰色(黒、白)になる。0と1の間は最も彩度の高い色を白色で薄めていった色になる。

上下方向は色の明るさ(明度)Vを表現し、

$$0 \leq V \leq 1$$

の値の範囲を取る。V=1は白色を、V=0は黒色を、その中間は灰色を表す。

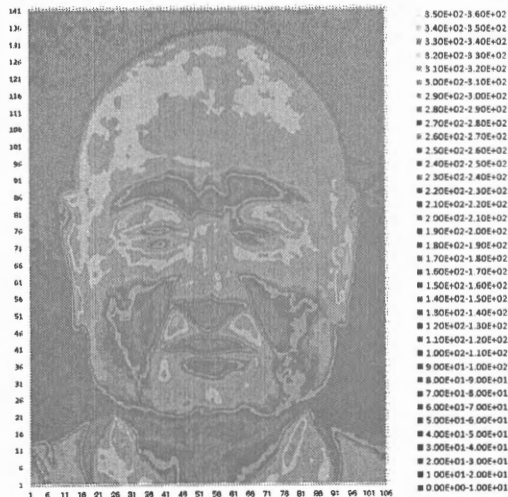
前章と同じく、図2の鑑真和尚の画像を対象として、彩色復元を試みる。

鑑真和尚の像は長年の埃や汚れのために、額から頭頂部にかけては白っぽくなっており(明度は高いが、彩度は低い)、また、頬から眉毛辺りにかけては黒ずんでいる(明度も彩度も低い)。この画像をもとにして、HSV表色系へ変換して、等高線で表現したものを図7の(a)~(c)に示す。

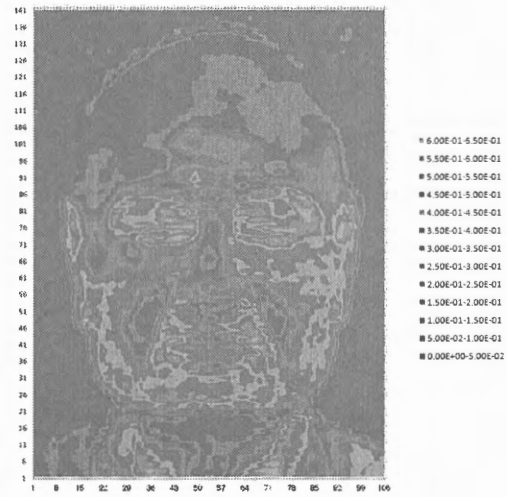
図7(a)より分かるように、額から頭頂部にかけて白っぽくなった部分も、頬から眉毛にかけての黒っぽくなった部分も、無彩色にならずに色相情報が保存されており、顔のほかの部分の色相の値とあまり変わらず、マゼンタ〜赤〜黄色の色相である。式で表現すると、

$$0^\circ \leq H \leq 60^\circ \quad 300^\circ \leq H < 360^\circ \dots\dots\dots (6)$$

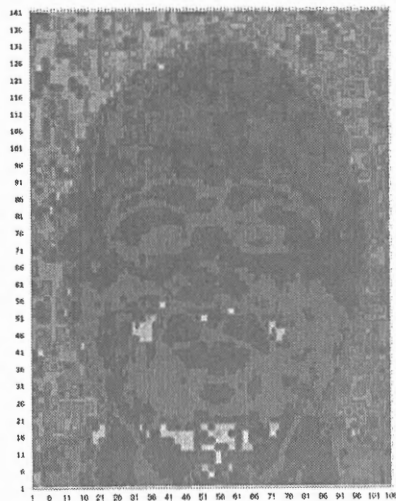
の範囲にある。図7(b)から、額から頭頂部にかけてお



(a) 色相の等高線図



(b) 彩度の等高線図



(c) 明度の等高線図

図7 鑑真和尚像の画像のHSV表示

よび頬から眉毛にかけての部分は彩度が低下していて、白っぽくまたは黒っぽく見えていることが分かる。

図8に色相角のヒストグラムを示す。図から分かるように、色相角 30° (橙色) を中心に $\pm 30^\circ$ の範囲に集中的に分布している。この結果から制作当時、色相角 30° 前後で彩色されていたと考えられる。このことから、制作当時の状況を以下のように仮定して色彩の修復を試みる。

仮定

1. 顔はほぼ全面に色相角 30° (橙色) に彩色されていた

2. 汚れのために色域が広がった
3. 汚れのために彩度が低下した

修復方法

1. 式(6)の色相を $15^\circ \leq H \leq 45^\circ$ へ圧縮する
2. 色相を圧縮した部分の彩度を高める

実際には、

$$0^\circ \leq H \leq 60^\circ \text{ の場合: } H \leftarrow 0.5H + 15$$

$$300^\circ \leq H < 360^\circ \text{ の場合: } H \leftarrow 0.5H - 135$$

の式で変換し、 $15^\circ \sim 45^\circ$ の範囲へ圧縮する。また、圧縮した部分では、

$$S \leq 0.8 \text{ の場合: } S \leftarrow 0.5S + 0.4$$

とし、彩度 S が0から0.8の変化を0.4から0.8の間での変化になるようにし、彩度を高める。以上の処理を図2の鑑真和尚の画像に行った結果を図9に示す。

図から分かるように、額から頭頂部にかけての白っぽくなっていた部分はほぼ取り除くことが出来た。また、頬から眉毛あたりにかけた黒ずみのある程度減少した。しかし、頭頂部に灰色の部分が残っており、この部分の改善が必要である。頭頂部の灰色の部分は $S=0$ の無彩色の部分と式(6)の範囲外で色相 H がランダムに変化する2つの部分から構成されている(図7(a))。この部分は上下方向に非常に薄い層であり、この灰色の部分が j 行 k 列であれば、下の行の近くの3つの値を平均化した値を用いることとする。式で表現すると、

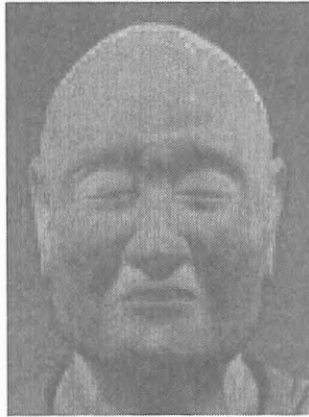


図9 色相の圧縮と彩度を高める処理を施した画像



図10 最終画像

とし、彩度 S が 0 から 0.8 の変化を 0.4 から 0.8 の間での変化になるようにし、彩度を高める。以上の処理を図 2 の鑑真和尚の画像に行った結果を図 9 に示す。

図から分かるように、額から頭頂部にかけての白っぽくなっていた部分はほぼ取り除くことが出来た。また、頬から眉毛あたりにかけた黒ずみのある程度減少した。しかし、頭頂部に灰色の部分が残っており、この部分の改善が必要である。頭頂部の灰色の部分は $S=0$ の無彩色の部分と式 (6) の範囲外で色相 H がランダムに変化する 2 つの部分から構成されている (図 7 (a))。この部分は上下方向に非常に薄い層であり、この灰色の部分が j 行 k 列であれば、下の行の近くの 3 つの値を平均化した値を用いることとする。式で表現すると、

$$\begin{aligned} S_k^j &= \frac{S_{k-1}^{j-1} + S_k^{j-1} + S_{k+1}^{j-1}}{3} \\ H_k^j &= \frac{H_{k-1}^{j-1} + H_k^{j-1} + H_{k+1}^{j-1}}{3} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で求める。この処理を図 9 に適用した結果を図 10 に示す。額から頭頂部にかけての白っぽくなった部分および頬から眉毛にかけての黒っぽい部分を改善することが出来た。しかし、頬や顎の下に黒い点が見え、また、周りと色相の異なる点が見え、改善する必要がある。

4. 疎表現による色彩復元

信号の疎表現による圧縮、復現理論が最近活発に研究されている。画像の世界では画面を小さなパッチに分割し、パッチのための過剰辞書 (たくさん例画像) を用意しておいてその中の少ない画像の最適な線形和 (疎表現) で元パッチ画像を表現しこれを全体画像の構成要素とする。これを実現するアルゴリズムが KSVD 法で、Ahron 等 [1] で提案された。グレースケール画像に対してノイズ除去の成功事例が報告されている。Mairal [7] 等の最新論文ではこの疎表現理論をカラー復元に適用するアルゴリズムを提案し、成功事例が報告されている。本論文では仏像の色復元にこの理論の適用を試みる。疎表現法は可能性のある手



図11 ノイズ画像



図12 ノイズ除去画像

Poisson 方程式法では、空間形状を考慮した、いわば多様体上の方程式を解くように改良する必要がある。

RGB を与えると、 $YCrCb$ が一意に決定される。輝度値に整合する seed を与えた場合と不整合の場合とで結果はどのように変化するかを考えてみるのも面白い。疎表現法では四天王の復元に的を絞った場合にどのような辞書を構築すべきかが今後の検討課題である。

6. 謝辞

貴重なコメントをいただいた早稲田大学理工学部の村田昇先生にこの場を借りてお礼申し上げます。また、唐招提寺の四天王の色彩について詳しくご教示賜りました東大寺工房の林様に感謝いたします。

7. 参考文献

- [1] Aharon M., Elad M. and Bruckstein A.M. (2007): The K-SVD: An Algorithm for Designing of Overcomplete Dictionaries for Sparse Representations, IEEE Transactions on Signal Processing, (to be appeared).
- [2] Chan T.F. and Shen J.K. (2005): Image Processing and Analysis, SIAM.
- [3] Chung D.H. and Sapiro G.: On the Level-Lines and Geometry of Vector-Valued Images, IEEE Signal Processing Letters 7, pp.241-243, Sept., 2000.
- [4] Elad M. and Aharon M. (2006): Image Denoising Via Sparse and Redundant Representations over Learned Dictionaries, IEEE Transactions on Image processing, 15, 12, pp.3736-3745.
- [5] Horiuchi T. and Hirano S.: Colorizing Algorithm for Grey Scale Image by Propagating a Seed Pixels IEEE Proc. of International Conf. of Pattern.
- [6] Horiuchi T. (2007): Colorization of Monochrome Pictures. (2007), 特集「デジタルアーカイブにおける色彩」, 日本色彩学会誌 31 巻, 4 号
- [7] Mairal J., Elad M. and Sapiro G. (2007): Sparse Representation for Color Image Restoration. IMA preprint series, No.2139. <http://www.ima.umn.edu/preprints/oct2006/2139.pdf>
- [8] Sapiro G.: Geometric Partial Differential Equations and Image Analysis, (2001), Cambridge University Press.
- [9] Sapiro G. (2005): Inpainting the Colors. Image Processing ICIP, IEEE. International Conference, Vol.2, II-698-701.
- [10] Tschumperle D. and Deriche R. (2005): Vector-Valued Image Regularization with PDE's. IEEE. Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 27, 4.
- [11] Yatzir L. and Sapiro G. (2006): Fast Image and Video Colorization Using Chrominance Blending. IEEE. Trans. On Image Processing, 15, No.5, pp.1120-1129.
- [12] 国宝「鑑真和上展」(2007), 福岡市博物館・RKB 毎日放送・西日本新聞社.
- [13] 奈良六大寺大観 13 巻, 唐招提寺, 岩波書店 (2001).
- [14] http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%94%BB%E5%83%8F:HSV_cylinder.jpg