

Hi-Fi デジタル画像の作成： 明度と色調の1段階での補正法

片岡 裕

大谷大学 文学部 人文情報学科

kataoka@res.otani.ac.jp

貴重図書や貴重資料は、デジタル画像資料とすることで展示可能となる。したがって、デジタル図書館やデジタル博物館では、原資料と同等の品位を保ち、精度が保証されたデジタル画像資料の作成が必須である。さらに、高再現性デジタル画像は、資料の共有化を可能とし、古典学などでも極めて有効である。高分解能・高再現性画像データは、マイクロフィルムや写真印刷より高い再現性を持っており、デジタルデータであることから、肉眼では認識できない情報の抽出により、研究の範囲を拡大する。しかし、デジタル画像化の過程で、フィルムとスキャナの色感度誤差が混入してしまう。明度と色調は分解能にも影響し、補正が必須であるが、明度と色調の補正は極めて困難で実質的に不可能であり、誤差を明示できる簡便な補正手法の開発が急務となった。そのため、グレースケールを資料と同時に撮影し、その各濃度の RGB 値を、理論 RGB 値と比較して、各 RGB 値の補正カーブを作成し、わずか1ステップで補正し、誤差を数値で示す方法を開発した。結果として、3Dを超える範囲で、RGB 誤差を5%程度に抑えることが可能となった。

Preparing Hi-Fi Digital Images: The 1 step correction method for hue and lightness with error range

Yutaka Kataoka

Otani University

kataoka@res.otani.ac.jp

Old or rare items stored in the glass boxes can be displayed as the Digital Image Data. Thus, the digital images that are ensured as high fidelity with majored error should be prepared in the digital library and digital museum. The ensured Hi-Fi digital images can be used as the corresponding originals and those can be shared instead of the originals. The ensured Hi-Fi images are more accurate than the microfilms or than the printed materials. And the ensured images can bring wider researches by the digital processing. But correction of hue and lightness has been not taken by its difficulties based on human sense for color. Therefore, scientific correction method has been waited. As the result of total research of preparing digital images, correction method by "the 1 step" based on RGB correction curves that are generated from comparison of ideal values of the "gray scale" are developed.

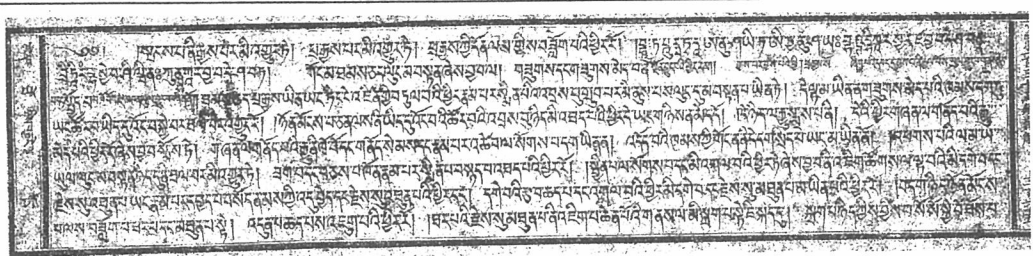


図1. 貴重図書例：北京版チベット大蔵経(35mm カラーリバーサルフィルム、5300DPI より加工)

1. 背景

デジタル画像データは、貴重資料や劣化が進行した資料のように原資料が公開不能な場合、資料の公開と共有を実現する重要なフォーマットである(図1)。資料の配布および公開の手段として、マイクロフィルムを含む写真フィルムと写真印刷が主であったが、高い利用性とデータの加工性から、デジタル画像データが多用されるようになった。原資料の直接参照が不可能である場合、一次資料の代替で利用されるため、どのような媒体で配布・提示する場合でも、その二次資料の精度が重要な課題となる。すなわち、高分解能・高精度デジタル画像データは、マイクロフィルムや写真印刷より精度が高く、今後デジタルデータが有効に多用されるためには、精度保証の問題は避けておくことはできない。

デジタル画像データの分解能に関しては、今日までかなりの研究蓄積があり[4]、線分解能が明度差の低下で現象することも明らかにされている[1、2]。明度と色調に関しては、感覚量に基づいた数量化から始まった経緯により、十分な検討がなされてきたわけではない[3]。そのため、明度と色調の補正と精度保証に関しては、補正に使用できる指標が存在していない。しかし、明度と色調は、肉眼の波長による感度差によって可読性と物理的分解能にも影響することから、補正が必須である[2]。現状では、明度と色調の補正に関しては、Pro PhotoCD(Kodak 社)などに代表される写真印刷用スキャニングでは、感覚量に基づいた少数の限定された色見本指標により補正されてい

るのみである。また、感覚量に基づいた指標からRGBの絶対値への変換は、極めて困難な変換となってしまう、補正そのものが極めて困難である。

明度と色調に対する誤差の原因を簡単にまとめると、次のようになる。カラー・マイクロフィルムを含む写真では、フィルムの感光剤の感度が、光の波長によって一定ではないことにより、色調と明度の誤差が含まれる[1、3]。同時に資料を照射する光源も、色温度の差だけでなく含まれる波長の強度が不均一でありフィルムの感度誤差を大きくしている[2]。スキャナは、CCD感度が、波長によって大きく異なるため、スキャニングでも、明度と色調に誤差が含まれる。当然、フィルムのスキャニングでは、フィルムとスキャナの誤差の和となる。

これらフィルムとスキャナからの誤差は、一般的に30%を超えることが多く、無視できないほど大きい。しかし、原資料とデジタル画像の直接比較はほとんど不可能であり、補正は記憶上の明度と色調に頼らざるを得ないこと、そして、CRTなどの表示装置の補正法[5]が一般的でないことにより、誤差を実感しにくい現状であることに注意が必要である。すなわち、カラーチャートを資料と同時に撮影しても、カラーチャートに示された小数の特定の色を基準にして、撮影に使用したフィルムの平均感度補正¹に加え、感覚的に補正さ

¹ フィルムの感光乳剤は、反応容器によって、感度と分解能が大きく異なることが、一般的に知られている。従って、ロットナンバー(通称釜番号)と呼ばれる反応容器番号を選択し指定して購入する。

れることになる。その補正結果の誤差は減少せず、新たに誤差が含まれてしまう。従って、明度と色調の誤差を再度分析する必要がある。蛇足ではあるが、写真印刷では、インクによる濃度の季節変動や、紙の反射係数の違いなどにより、デジタル画像データより色調と明度の精度が下がるのは当然である²。

このようにデジタル画像では、作成過程で多くの誤差が混入し、誤差の総和は考えられている以上に大きく、補正が必須である。そして、デジタル画像データへの依存度が急速に高まったため、今までのように、特定の色に基づく補正ではなく、明度と色調誤差を、感度範囲全域にわたり1段階で短時間に補正する簡便な手法の開発が急務となった。この補正は、誤差を数量的に示すことが可能でなければならない。デジタル化の過程を解析した結果、グレースケールの使用によって、1段階のみで明度と色調を、感度範囲の全体で補正する極めて簡便な手法を得たので報告する。

2. 明度と色調の誤差の原因とその大きさ

デジタル画像化は、1) 写真撮影、2) スキャニングによって作成される。原資料の直接スキャンは、資料に強い光を長時間照射することによって起こる光化学反応での資料の劣化と、資料のスキャナを越える物理的大きさから、一般に行われない。特に大きな資料や三次元的厚みのある資料では、直接スキャンは不可能に近い。直接スキャ

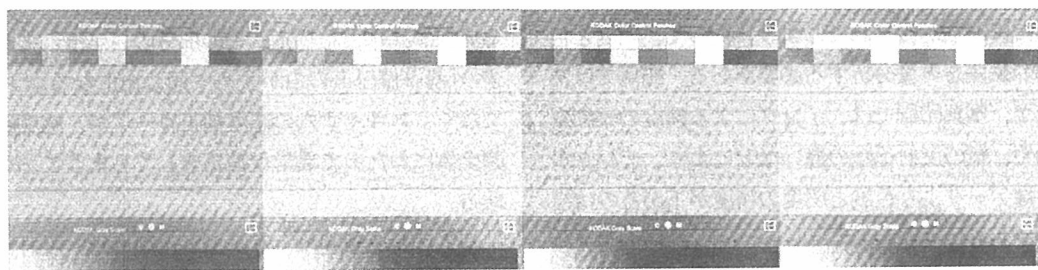
ンでは、資料中に金属がある場合、その金属による光沢が基準白を超え、その部分の白が潰れてしまう(基準値以上の白がすべて同じ白になる)だけでなく、スキャナ内の感度補正カーブが、感度範囲全体にわたって異常な補正をしてしまうことがある。

混入される誤差は、写真撮影過程では、照射光の波長分布の偏在、フィルムのRGB各色の感度特性差が主な原因である。フィルムのほぼ直線性を示す範囲は、広いものでも約3D(1Dは、1絞り分の光量差、すなわち2倍の光量に相当する)であり、それほど広くはない。さらに、フィルム感度の個体差は、感光乳剤の反応容器と、反応時期に依存し、肉眼で差が判断できるほど大きいことが知られている。そのため、精密写真撮影では、特定のロットナンバーを指定して、フィルムを購入する。このように、1ロール内での感度差は小さいが、保存条件の差などにもより、ロールごとの感度差は無視できないと言える。

スキャニングでも同様に、照射光の波長分布とCCDのRGBの感度差、そしてCCDの感度の非直線性に起因する誤差がある。さらに、スキャニング過程で、明度と色調に影響を与える無視できない原因は、スキャナに組み込まれた補正ソフトウェアである[2]。スキャナの補正ソフトウェアは、補正をキャンセルできる高度なスキャナ以外では、必ず動作してしまうことに注意すべきである。スキャナの補正ソフトウェアは、フィルムからのスキャニングの場合、各フィルムの特性に合わせた補正を選択できるものもあるが、上述のように、同じ型番のフィルムを使用しても、乳剤反応容器の違いによる差を完全に吸収できるわけではない³。

² 写真印刷は、1点で色を表すのではなく、複数点で領域の色を示すため、分解能は、原デジタルデータより低下する。インクの季節変動とは、インクの粘性が温度で異なるため、季節によってインクの溶媒の濃度を変えることによって生じる。紙は、使用する木材や加工温度によって繊維の状態が変わり、同じ連続した波長に対する反射係数の均一化は困難である。インクの直径を小さくすると、インクの厚みが減少し、吸光が低下する結果、コントラストが低下するため、インクの直径には限界がある。このような理由で、厳密な色合わせはほとんど不可能である。

³ スキャナに組み込まれた補正関数は、ブラックボックスであり、基本的に感覚的記憶にとつての美しさを求めており、真値に大きく近づくわけではない。従って、文化に依存した好みの色調に変わることが多い。



① 無補正 ② 既定補正 ③ Pro PhotoCD ④ 真値(誤差 2%以下)

図2. 明度と色調誤差

これらの誤差は、結果として感光粒子とフォトセルの非直線性誤差となるばかりでなく、RGBそれぞれ異なる有効感度範囲をとることになってしまう。これらの誤差の総和は、分解能に起因する誤差よりはるかに大きい。図2に、実際のスキヤニングによる結果を示す。図2中の画像は、①フィルムを無補正でスキヤンした画像、②使用したフィルムに依存しないスキヤナの補正機能を利用した画像、③使用したフィルムの特性に合わせた補正機能を利用した画像(Pro PhotoCD)、④真値(感度域での誤差が $\pm 2\%$ 以下)の画像である。

使用したフィルムは、カラーリバーサル・フィルム(Kodachrome 25 Professional)を用い、最適露出で撮影したものである。最適露出であるため、最も補正量が少なくなるが、図2から各画像の差は肉眼でも極めて明瞭である。なお、画像中のカラーチャートとグレースケールは、同一のものを使用している(Kodak 社製)。図2の画像をカラーヒストグラムで表示した結果を図3に示す。図3から、RGBの強度分布はそれぞれ大きく異なり、特にデジタル画像化に多用される Pro PhotoCDでは、RGB 各色と明度分布が、感覚的美しさの

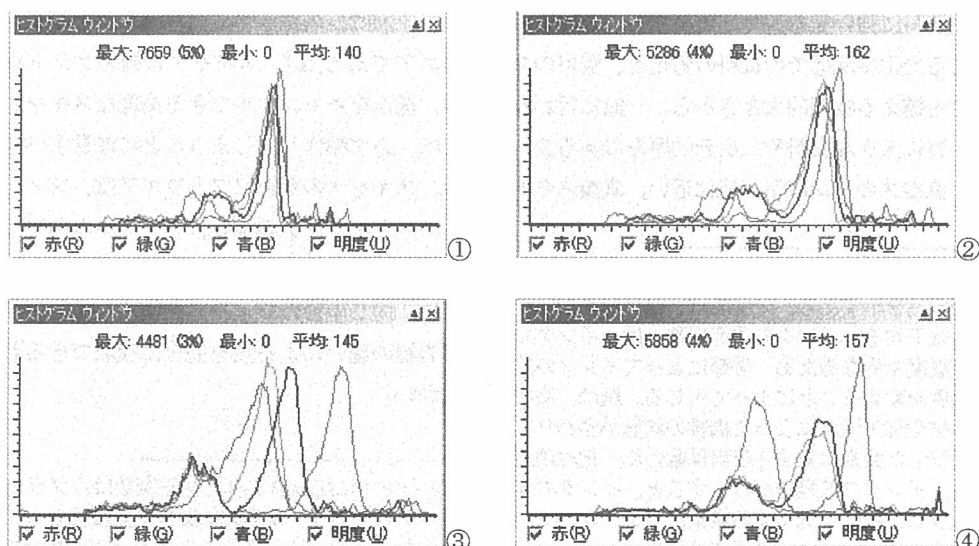


図3. 画像データ①～④のカラーヒストグラムによる比較

ために補正された結果、大きな誤差を含み、期待された精度で明度と色調を表現していないことがわかる。このように、明度と色調を正しく補正していないデジタル画像データは、想像以上に大きく真値から離れ、誤差の割合から言えば、高再現性とはみなしえない。スキャナ任せでの誤差は、不適正露出のフィルムではさらに大きくなる。なお、誤解を生じないために、Pro PhotoCDは、商業写真印刷用が本来の目的で[6]、それに適した補正を行っており、真値を求めた補正を保証しているわけではないことを明記しておく。

最終的なデジタル画像データでは、各ピクセルのRGB値の誤差は、フィルムとスキャナの非直線性誤差の和となり[3、4]、この誤差は、RGBの各強度分布の高さの差、すなわち誤差の関数として表現できる。従って、図2のRGB強度分布から明らかなように、誤差補正には、特定の色に基準を求める補正ではなく、階調範囲内の誤差の逆関数をRGBごとに求めなければならないことがわかる。

3. 補正方法とその問題

デジタル画像データのピクセル値の補正は、実画像の色調と明度を定量的に表現し、デジタル画像データと比較し校正する方法が採用されてきた。一般に、比較対照には色調に対しカラーチャートを、明度階調に対しグレースケールを用いる。カラーチャートには、特定の色調と明度のみが表現されており、資料の全範囲の補正関数を求めることはできない。実際の補正では、明度が変化すれば色調も変化し、色調と明度を別扱いとしては、正しい補正は行えない。このような検定と補正は、逆曲線を求めるという考え方ではなかった。

このような、色調と明度を別に扱う考え方は、色の表現の困難さから生じている。すなわち、補正方法を導出する前に、色とその表現と再現に関して分析する必要がある。まず、資料の色を厳密に表現することは、資料上のある点の反射関数を

求めることに等しい。言い換えれば、ある点に、波長を連続的に変化させて単一波長の光を照射し、その反射グラフを求めることである。しかし、それを資料全面で計測することは不可能であり、視覚も含め、特定の複数の波長に対する感度で色を認識し表現しているため、そのような資料と全く同じ反射光を再現することが高再現性であるとは言いがたい。現実の問題として、色のデジタル化とは、色をRGBの各強度に変換することである。実物の反射光グラフとRGB表現の差から、色を正しく計測し表現できないという誤解が生じていると考えられる。RGB値は、代表値にすぎないが、色表現としては、十分な情報を持っている。もしある1点の反射グラフを記録できると仮定すれば、その情報はRGB値よりはるかに多く、分子構造の推測まで可能となるが、目的は、色の再現であり、反射・吸光分析ではない。

さらに色に関する表現そのものが、色の捉え方をRGB値による表現から引き離してきた。色は、色彩立体などで表現されるが、その時の色調と明度は、色を固定し明度を白から黒まで変化させる表現法である。これは、感覚的な量であり、例えば、赤の場合、R値が大きくなれば、白に近づくわけではない。また、明度の低い赤は、R値のみで表現されその値が小さいわけではない。仮にR値の最大を255とした場合、R値が128の時、赤くは見えない。赤くするためには、GとBが0にはならない。すなわち、色と明度の関係は、RGB値単独に値が変化して表現されるのではなく、指標として特定の色をその理論値としてのRGB値として求めることはできないのである。

このように、色に対する指標が、RGB値での表現と一致しないため、既存のカラーチャートや色彩図形を補正用に用いることはできない。言うまでもないが、何らかの色と明度の指標を写真と共に撮影・スキャンし、作成されたデジタル画像上の指標の値を、真の値に修正することで、補正が可能となる。従って、RGB値のみに着目して、

F 値	開放	1/3	2/3	1D	1+1/3	1+2/3	2D	2+1/3	2+2/3
目盛	A	1	2	3	4	5	6	M	8
RGB 値	255.0	227.2	202.5	180.4	160.8	143.3	127.7	113.8	101.4

3D	3+1/3	3+2/3	4D	4+1/3	4+2/3	5D	5+1/3	5+2/3	6D
9	10	11	12	13	14	15	B	17	18
90.3	80.5	71.7	63.9	57.0	50.8	45.2	40.3	35.9	32.0

表 1. グレースケールの各 RGB の理論値(0~255)

指標を選択し、同時にその指標のデジタル画像としての RGB 値の理論値を決定できればよいことになる。

4. 合成補正曲線適応法の導出

求めるデジタル画像データは、印刷ではなく、RGB 値に対する発光強度が補正された CRT での表示が目的である[5]。従って、上述のように、理論的には、資料をデジタル化した後、写真撮影時での誤差曲線とスキャニング時の誤差曲線についての合成誤差曲線の逆曲線(合成補正曲線)を求め、この合成補正曲線によって各ピクセルの RGB 値を最暗部から最明部まで連続的に補正することが可能である。ここで、合成誤差曲線とそれを相殺するための逆曲線を得るために、基準画像と基準画像に対する理論値曲線が必要となる。基準画像は、合成誤差によって、理論値と異なる計測値となる。その計測値を理論値と比較し、計測値に掛けて理論値と一致させる曲線を求めればよい。

ここで、基準画像として、RGB それぞれの別のスケール画像を使用することが考えられるが、そのような画像を正確には印刷できないという問題に直面し、実際的ではない。RGB それぞれが

同じ値であるならば、RGB の和は灰色、すなわちグレーとなる。グレーの明度段階ならば、グレースケールを用いることで正確な理論画像として用意できる。グレーは、RGB 値に変換後、それぞれ R 値、G 値、B 値を取り出せるので、RGB 別々にスケール画像を用意することと等価となる。

グレースケールは、各濃度段階のピクセルの各 RGB 値が同じである画像とみなせる。よって、補正後のデジタル画像でのグレースケール上のピクセルは、RGB の各値が等しいことを示しているから、1 種類のグレーの階調に対する理論値を用意すればよいことになる。

コダック社製のグレースケール(図 4)は、3 分の 1D ごとの明度階調となっている。表 1 に、コダック社製のグレースケールをデジタル化した時の理論値を示す。フィルムでは、1D で光量が半分になるが、スキャナでは 2D で半量となる数列となることに注意が必要である。

写真フィルムをスキャンした後、グレースケール上の RGB 値がそれぞれ表 1 の値になるように補正する各 RGB 3 本の曲線を求めれば、合成補正曲線となる。高度なスキャナやフォトレタッチ

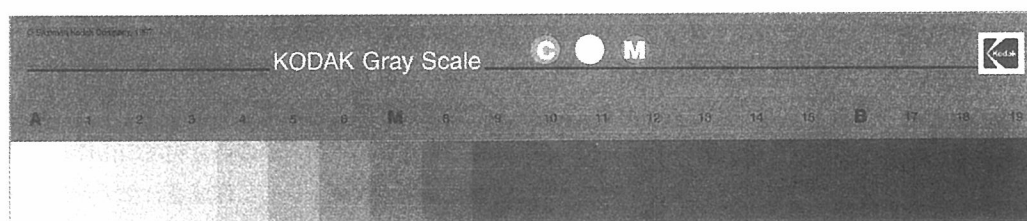


図 4. グレースケール

ソフトウェアには、グラフによって合成補正曲線を簡便に描けるツールが付属しているため、本曲線の作成は容易であり、記録して複数回の適応が可能である。

5. 合成補正曲線適応法の実際と補正可能範囲

本方法は、基準画像(グレースケール)と基準画像に対する理論 RGB 値を用意し、基準画像を資料と共に撮影し、基準画像上のグレー階調が理論値と合致するように曲線を作成し、それをスキャンした画像に適応して補正するのみで、RGB それぞれに対し補正が終了する極めて単純な手法である。光量とF値およびフィルムが同一であれば、1コマのみ基準画像を資料と共に撮影しておくだけでよい。そして、デジタル画像上で、基準画像の RGB 値を理論値に合わせるためのカーブをレタッチソフトウェアで作成し、各デジタル画像に適応して補正する。もしコマごとに撮影条件が異なれば、各資料に基準画像を添付して撮影しなければならない。基準画像は、光量ムラなどが生じないように正しく撮影されなければならない。

スキャナからの取り込みであるが、RGB 値を各 8ビットで取り込むと、誤差が大きくて使用に耐えないデータとなる。8ビット画像では、補正カーブの適応でも計算誤差が大きくなり、5%以下の精度保証は困難である。最低でも 12 ビット画像データが必要である。

各 RGB の補正カーブを効率良く作成するためには、多少の慣れが必要であるが、本研究で使用している Genascan5500(大日本スクリーン製造)では、デジタル画像の取り込み時に補正カーブを適応できるので、スキャンと同時に補正が終了してしまう。独立したレタッチソフトウェアや Genascan5500 の補正曲線を作成する機能は、グレースケール上の任意の点(範囲)の RGB 値を示す機能と、その値の補正後の値をリアルタイムで表示する機能があり、数値で誤差を読み取りながら補正カーブの簡便な作成を実現している。

求めた合成補正曲線は、フィルムと CCD の感度範囲の制限によって、グレースケールの持つ 6D の範囲をすべて補正可能なわけではない。実際に補正可能な範囲は、約 4D までである。基準白から 4D 以下では、赤の感度誤差が極めて大きく、スキニングソフトウェアによる推測値に過ぎない。また、黒は、肉眼では黒に見えていても反射があり、真値の黒は 0 にはならない。従って、黒は、正しい値では、(0、0、0)にはならず、肉眼では違和感を覚えることがある。精度は低下するが、肉眼での黒に対する感覚的な合致が必要ならば黒キャリブレーションの再設定が必要である。

図 6 に、本手法の効果の 1 例を示す。図 6 は、やや露出不足で、スキャナ任せのスキャンでは明らかに正しくスキャンできない例である。本フィルムでは、約 3D の範囲に文字情報が含まれてい

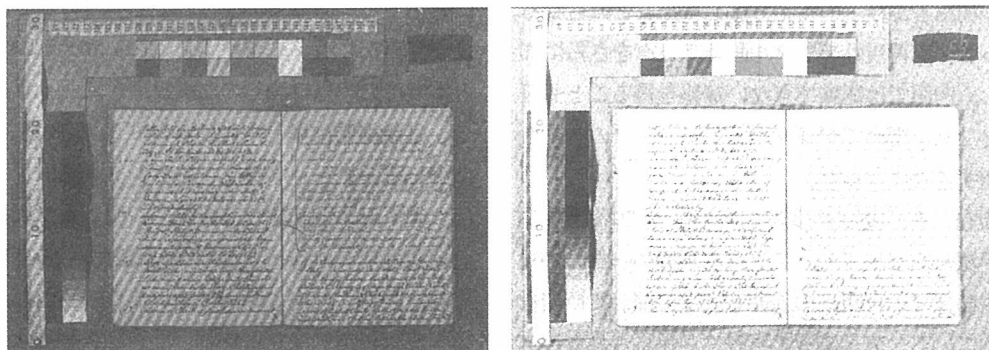


図 5. 清澤満之自筆講義ノート(西方寺所有) 左: 無補正画像 右: 補正画像

たため、かなり正確に補正が可能であった。各資料の状態やライティングが異なっている、本手法の適応により補正が可能となった。しかし、このような例では、フィルムとスキャナの感度範囲が狭くなるため、その範囲を無補正画像でのグレースケールの白値の低下から得た後、本手法を適応し、同時に精度範囲を明示すべきである。

6. 結語

図2と3に示した結果から、明度と色調の補正は必須であることが示された。さらに、RGB値を用いることで、数値として測定値と理論値の比較が可能になった。それによって、単に特定点の誤差だけでなく、フォトタッチソフトウェアのカラーヒストグラム作成機能を用いて、誤差を定量的に示すことが可能となった。また、基準画像をグレースケールとし、その理論値を求めて補正する本手法により、明度と色調の誤差が劇的に減少する。これは、デジタル画像データの精度をより高くするばかりでなく、誤差を数値化することで、一次資料の代替としての価値を、デジタル画像データにもたらすことが可能になったことを示している。

本手法により、色彩に対する専門知識がなくとも短時間で補正ができるようになり、研究者や図書館員自らの手で高再現性デジタル画像データの作成が可能になったと同時に、デジタル画像データの利用者が精度の検定方法を得たことにもなる。従って、高再現性デジタル画像データをさらに加工し、肉眼では認識できない情報を得ることも可能となり、極めてデジタル・アーカイブの有効性を増すことになった。

現在、高再現性デジタル画像データの簡便な作成手法研究が終了し、デジタル画像データの各種再生装置での再現性の範囲と向上に関して研究を進めている。表示装置の再現性が保証されなければ、資料の有効な参照はできないのである。

7. 参考文献

- [1] 柴田, et al. 北京版チベット大蔵経の高デジタル画像化: 写真撮影過程. 文部省科学研究費重点領域研究「人文科学とコンピュータ」, 文部省科学研究費重点領域研究「人文科学とコンピュータ」第6号, pp. 72-79, 1998年10月.
- [2] 柴田, et al. 北京版チベット大蔵経の高再現性デジタル画像化: 高精度スキャニング過程, 情報処理学会「人文科学とコンピュータ研究会」第43回, 人文科学とコンピュータ, 43-6, pp. 43-50, 1999年7月16日.
- [3] 写真工学の基礎、(社)日本写真学会編、コロナ社、1998年.
- [4] デジタル画像処理、長尾真監訳、近代科学社、1994年.
- [5] 高精度デジタル画像の高再現性表示、京都大学大型計算機センター第64回研究セミナー、口頭発表及び報告書 (ISSN 0910-3201), pp. 74-85, 2000年3月(24日).
- [6] 鹿野一則編、「コマーシャル・フォト・シリーズ」明解クリエイターのための印刷ガイドブック 製版・印刷編、玄光社、1988年6月15日.

謝辞

本研究は、文部省科学研究費補助金を受けている。株式会社ニコン及び、(株)堀内カラーの協力に感謝する。大日本スクリーン製造(株)の岸田氏及び実原氏には、スキャナとCCDカメラの理論と実機での誤差に関してご教授頂き、深く感謝する。写真撮影に関しては、沙加戸教授(大谷大学)に深く感謝する。本論文でのデジタル画像データは、図1および図2の③を除き、大谷大学真宗総合研究所データベース班(草野教授班長)の有松、山本、藪内、井内、箕浦によって作成された。本研究班は、清沢満之著作物、北京版大蔵経などの特にページ数の多い貴重書籍を対象とした高再現性デジタル画像データベースの作成を行っている。