

視 覚 特 性 に 基 づ く マ ル チ バ ン ド 圧 縮 画 像 の 画 質 評
価 と 適 応 的 量 子 化 へ の 応 用

近 藤 弥 * ・ 津 村 徳 道 * ・ 三 宅 洋 一 *

* 千 葉 大 学 大 学 院 自 然 科 学 研 究 科
〒 263-8522 千 葉 県 稲 毛 区 弥 生 町 1-33

Evaluation of Compressed Multi-band Images Based on
Human Visual Characteristics and Its Application to Block
Adaptive Quantization

Wataru KONDO*, Norimichi TSUMURA*, Yoichi MIYAKE*

* Graduate School of Science and Technology, Chiba University
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522, Japan

要 旨

オンラインショッピングにおける商品のデジタル画像は、実際の商品の色や質感、3次元形状などの重要な要素を十分に再現できていない。正確な色再現を行うには分光情報を用いることが望ましいが、圧縮された分光データからの再現画像の画質評価に関する研究は少ない。本研究では、圧縮された分光データからの再現画像を、人間の視覚特性を考慮した Image Distortion Map によって評価する。さらに、Image Distortion Map を画質評価尺度とし、適応的量子化をすることで、より視覚特性に合った最適な圧縮方法を提案する。

Abstract

Online-shopping became popular for vending various articles via computer network. The digital images of articles, however, do not have enough information such as actual 3D shape, texture, and color of objects. For recording objects as digital images without losing their color information, we consider that the spectral reflectance is the most desirable form. In this study, we discuss on an evaluation of the image reproduced from those compressed multi-band images using image distortion map considering human visual characteristics. Furthermore, we discuss on optimal compression method with block adaptive quantization based on the image distortion map. Large error areas on the image distortion map are finely quantized, on the other hands, small error areas are roughly quantized. This compression method was very significant for improvement of signal to noise ratio.

キーワード：マルチバンド画像，圧縮，画質評価，視覚特性

Key words

multi-band image, compression, evaluation of image quality,
human visual characteristics

1. はじめに

ネットワーク技術，画像処理技術の発達により，インターネットやデジタルカメラが一般ユーザーへ急速に普及した．これにより，個人でホームページを開設し，デジタルカメラで撮影したデジタル画像を公開するなど，一般ユーザーが情報発信源となることが容易になった．これらの技術を用いた新しい市場としてオンラインショッピングがある．これはインターネットを活用したもので，販売者が商品の詳細をホームページに公開することにより，購入者はネットワークを介して遠隔地からでも商品の注文が可能である．また，販売者にとっては店舗を必要としないなどの多大な利点がある．しかし，オンラインショッピングでは実際に商品を手にとって確認できない．このため，商品のデジタル画像をホームページ上に載せる場合が多いが，商品の色や質感，形状といった，商品を購入するかどうかの決め手となる重要な要素を十分に再現しているとは言い難い．これは商品のデジタル画像データが，詳細な形状を表すための3次元データを持たず，さらに撮影された画像は撮影時の照明光の色に影響を受けることで，商品の実際の見えと異なるためである．さらに，購入者側のディスプレイに表示される色は，デバイスの特性により販売者側の意図している商品の色と異なってしまう問題もある．これらの問題により，購入者がディスプレイに表示された色や形状を期待して商品を注文したにも関わらず，期待していたものと異なる商品が届いてしまうことがある．これは販売者側にとっても返品やクレームの原因となるため，解決しなければならな

い重要な問題である．

色再現に関し，このような問題を解決する方法として，分光情報を用いて物体の持つ色を正確に再現する方法が提案されている^{[1],[2],[3]}．分光情報を用いることで，撮影時の照明光に依存しない任意の照明光源下における色再現が可能となる．このような正確な色再現を行うためには，物体固有の分光反射率を用いることが望ましいが，従来の RGB3 バンドに比べて情報量が膨大になる．これらのデータを効率良く圧縮するため，バンド間の相関を考慮し主成分分析を用いる方法が提案されている^{[4],[5]}．ここで，圧縮された画像を評価する場合，何らかの評価尺度が必要である．しかし，現在用いられているオリジナル画像と圧縮画像との誤差を測る尺度は，平均二乗誤差や SN 比などに見られるように画素単位での誤差を測るにすぎない．このため，実際に人間が見て比較した際の評価と異なる場合がある．これは，これらの画質評価方法が人間の眼の持つ色や輝度，方向に対する視感度などの視覚特性を考慮していないためである．

そこで本論文では，S-CIELAB^[6]を用い人間の視覚特性を考慮した誤差画像（Image Distortion Map^{[7],[8]}）を作成することで，画像中の劣化が認識される領域を特定し，より人間の評価に合った画質評価を行う．また，視覚特性により，画像中で劣化の認識領域は一様ではないにも関わらず，従来の JPEG 圧縮では各ブロックを同一の値で量子化処理を行っている．そこで本論文では視覚特性を考慮した誤差画像を評価尺度とし，劣化の認識される領域に対しては細かく量子化を行い，反対に劣化の認識

が少ない領域に対しては粗く量子化を行う．このように適応的量子化を行うことで，劣化の知覚されない最適な画像圧縮方法を提案する．

本論文では，第 2 章で S-CIELAB を用い，Image Distortion Map による視覚特性を考慮した画質評価方法について述べる．第 3 章では，第 2 章で得られた Image Distortion Map をもとに，劣化の認識程度によりブロック毎で量子化係数を適応的に変化させる圧縮方法について述べる．最後に第 4 章で議論と結論を述べる．

2. 視覚特性を考慮した画質評価

2.1 視覚 MTF の非等方性と S-CIELAB

人間の眼は低周波成分に比べ，高周波成分に対して感度が低い性質を持つ^[9]．このため，圧縮画像の画質を評価する場合，オリジナル画像との画素値の誤差が数値的に同じであっても，その画素が高周波領域に含まれるか低周波領域に含まれるかによって，視覚的に劣化の見えが異なる場合が多い．また，画像を鑑賞する距離によっても劣化の認識程度は変化し，画像からの距離が遠くなればなるほど劣化は認識されなくなる．従来の平均二乗誤差や SN 比による画質評価方法は，このような視覚特性を考慮しておらず，十分な画質評価尺度とは言えない．

本研究では，これらの視覚特性を考慮することでより実際の見えに合った画質評価方法を提案する．評価方法に Image Distortion Map を用いることで，劣化認識の程度とその分布を画像として表す．Image Distortion Map は Xuemei Zhang らにより S-CIELAB として提案されているが，方向による視

コメント : age

感度が等しい等方的な MTF モデルが用いられている。しかし，石原・大石ら^{[9],[12]}により斜め方向の感度の低下が測定されている。このため，斜め方向の感度低下を考慮した非等方的なモデルを用いることが，より視覚特性に合った評価を行うために必要である。本研究では輝度と色に対する視感度，非等方性を考慮した MTF モデルを用いることで，従来の S-CIELAB よりもさらに視覚特性に合った評価を行う。

2.2 Image Distortion Map の作成

Fig.1 に S-CIELAB を用いた誤差画像の作成手順を示す。まず，画像を表示するディスプレイの特性に従い，画像の RGB 値を三刺激値 XYZ に変換する。さらに得られた三刺激値を反対色空間 W/K, R/G, B/Y に変換し，視覚特性を考慮したフィルタリングを行う。フィルタリングされたデータを逆変換し元の三刺激値 XYZ に戻した後， $L^*c^*h^*$ 空間で画素毎に色差 ΔE_{94} を求めることで Image Distortion Map を得る。 Fig.1 挿入

本研究では Fig.2 に示すマルチバンド画像 5 枚を， Fig.2 挿入参考文献 [4] で提案されている圧縮方法で圧縮を行い，圧縮画像からの再現画像を大石ら^[9]によって提案されている非等方性 MTF モデルを用いた Image Distortion Map によって評価する。ここでマルチバンド画像の圧縮では，量子化係数を変化させることで圧縮率を調節している。8×8 の画素からなるブロック毎に離散コサイン変換し，得られた 64 個の DC 係数 $C(u,v)$ について量子化を行う。二次元 DCT 係数の量子化ステップサイズを $Q(u,v)$ ，量子化された DC 係数を $C_q(u,v)$ とすると，量子化は式 (2.1) で表される。

ここで $\text{round}()$ 関数は最も近い整数値への丸めを行う。また、量子化ステップサイズ $Q(u,v)$ は式 (2.2) で与えられる。

$$C_q(u,v) = \text{round}\left(\frac{C(u,v)}{Q(u,v)}\right) \quad (2.1)$$

$$Q(u,v) = L(u,v) \times \text{Scale} \quad (2.2)$$

$L(u,v)$ は輝度成分用の量子化テーブル、 Scale は量子化スケールファクタであり、式 (2.3) に従う。

$$\text{Scale} = \begin{cases} 50/Q & Q < 50 \\ (100-Q)/50 & Q \geq 50 \end{cases} \quad (2.3)$$

式 (2.3) 中の量子化係数 Q の値によるスケールファクタの調整方法は JFIF^[11] (JPEG File Interchange Format) のもので、Adobe 社製の Photoshop など、多くのアプリケーションで用いられている。量子化係数 Q を変化させることで、劣化の度合いや圧縮率を調節することができる。また、今回用いた MTF モデルは画像サイズ $512 \times 512[\text{pixel}]$ 、視距離 $0.5[\text{m}]$ を想定した。Fig.3 に作成した非等方性 MTF モデルを示す。

Fig.3 挿入

反対色空間での視覚特性を考慮したフィルタリングを行った後、 $L^*c^*h^*$ 表色系を用いて各画素における色差 ΔE_{94} を求め、画像中で劣化を認識する場所や劣化の程度を表す。この色差を画像化したものを Image Distortion Map と呼ぶ。 $L^*c^*h^*$ 表色系は均等色空間での値であるため、色差値と見えのの違いの程度に線形性が成り立つと仮定する。 ΔE_{94} において色の違いを認識する閾値はおおよそ 3 であるため、 ΔE_{94} が 3 以下の場合、画素値は 0 とした。また、 ΔE_{94} が 6 以上の値を持つ個

所は画素値を 255 とした．この処理により画像中で劣化が認識される領域は白色に，認識されない領域は黒色の画素を持つ．

2.3 Image Distortion Map による画質評価

量子化係数 Q を変化させ，圧縮率を変えたときの Image Distortion Map を Fig.4 に示す．Fig.4 より， Q の値が増えるにつれて Image Distortion Map は劣化の程度が少ないことを示す黒色に近づいていき，劣化の認識が次第に減っていくことが確認できる． Q の値を増加させて細かく量子化を行った場合は，全体がほぼ黒色になり劣化を知覚する領域はほとんど残っていない．また， Q の値が低い場合，劣化の見える領域が画像中左上の空部分や，右の木の部分など，比較的 low frequency 成分が多い領域に分布していることがわかる．これは反対色空間における視覚特性を考慮したフィルタリングによる効果であると考えられる．また，画像中に劣化の分布がばらついていることから，画質評価値を単一の数値では決定できないことは明らかである．Image Distortion Map により劣化の知覚される領域や程度が判断できるため，今後の画像処理，画質評価に応用が期待できる．そこで本研究では，Image Distortion Map を用いた応用として，Image Distortion Map を画質評価尺度として用い，視覚特性に合った最適な画像圧縮方法を提案する．

3. 画質評価に基づく最適な画像圧縮

3.1 ブロック毎の適応的量子化

一般に画像の圧縮は，上述の通り量子化テーブル

にスケールファクタをかけることで圧縮率を調節する．一般的な画像圧縮方法として知られている JPEG 圧縮では，画像中の 8×8 の各ブロックに対し同一の量子化スケールファクタを用いて量子化を行っている．しかし，一般にディスプレイで画像を鑑賞する際，ディスプレイと鑑賞者との距離によって眼の感度は変化する．つまり，画像からの視距離が離れるにつれて画像に対する視覚的なボケは大きくなり，近い距離では認識された劣化も，距離が離れるにつれて次第に認識できなくなる．

そこで本研究では，ブロック毎に適応的な量子化係数を設定し，視覚特性に合った最適な圧縮を行う方法を提案する．つまり，劣化の認識されにくい高周波領域のブロックに対しては粗く量子化を行い，反対に劣化の認識されやすい低周波領域のブロックに対しては細かく量子化を行う．Image Distortion Map を評価尺度として量子化スケールファクタを決定することで，視距離に応じた視感度を考慮し，劣化の認識されない最適な圧縮を行うことができる．最適圧縮処理の流れを Fig.5 に示す．

Fig.5 挿入

まず，マルチバンド画像を圧縮した後，Wiener 推定法により画像の各画素での分光反射率を得る．さらに光源データを与え，任意の光源下での再現画像を作成する．得られた再現画像とオリジナルの再現画像を，前章で述べた Image Distortion Map を用いて評価する．Image Distortion Map の値がある閾値以下になるまで，劣化の大きい領域は細い量子化を行う．この処理を繰り返すことで，最終的に劣化の認識されない再現画像を得る．なお，今回の処理では D65 光源下を仮定して再現画像を作成した．

3.2 画質評価値のフィードバック

Image Distortion Map の持つ値を圧縮処理にフィードバックすることで，最適な画像圧縮を行う．Image Distortion Map の持つ値は色差 ΔE_{94} であり，一般に色差 ΔE_{94} で色の違いを識別する閾値は 3 とされている．つまり，画像を圧縮する際に，原画像からの再現画像と比較して得られた Image Distortion Map の値が，この閾値を下回るようブロック毎に量子化係数 Q を設定すれば劣化は認識されず，画質を優先した最適な圧縮となる．

まず，原画像となるマルチバンド画像を参考文献 [4] で提案されている方法で圧縮する．次に原画像からの再現画像と圧縮されたマルチバンド画像からの再現画像とを比較し，Image Distortion Map を作成する．得られた Image Distortion Map の値である ΔE_{94} を用い，色差認識の閾値 3 よりも色差が大きい場合はそのブロックの量子化係数 Q を大きくし，細かく量子化を行うことでそのブロックでの圧縮率を下げて劣化を少なくする．この処理を繰り返し行い，Image Distortion Map の値を閾値よりも小さくする．すべての画素において Image Distortion Map の値が閾値を下回るときの再現画像の画質は，鑑賞者には原画像と比べても劣化が認識されないものとなる．

コメント : a

コメント :

3.3 適応的量子化処理からの再現

本研究では初期処理は各ブロックで量子化係数 $Q=50$ とし，ブロック内の色差 ΔE_{94} が閾値 $\Delta E_{94}=3$ よりも大きい場合，ブロック内で閾値を越えている画素の数により Q の増加させる数値を変化させた．なお，

Q の最大値は 100 である .

本研究で提案する最適な圧縮処理の結果を Fig.6 Fig.6 挿入に示す . 図の左に , 適応的量子化処理されたマルチバンド画像からの再現画像 , 中央にその Image Distortion Map , 右に Q の値の最大値 100 が画素値 255 になるように線形変換して画像化した Q の値を示す . Fig.6(a),(b)では , 画像中の空や木の部分などの低周波領域に誤差の知覚が認められ , Image Distortion Map では劣化が多い白色領域で表されている . Q の値の分布も低周波成分の多い画像上部分で高い値に推移していることがわかる . しかし , Fig.6(c),(d)から , 繰り返し処理の回数が増えるにつれて , 劣化の程度が少ないことを示す黒色領域が増え , 全体的に劣化が認識されなくなっている .

3.4 処理画像の画質評価

提案手法によって得られた再現画像の画質評価を行い , 適応的量子化処理の有効性を検証する . 主観評価実験は視距離 0.5[m] , 被験者 10 人に対して 5 段階評価で行った . 評価値の数値が高いほど原画像と等しい画質を表す . Fig.7 に , すべてのブロックで量子化係数を一定にして圧縮を行ったマルチバンド画像からの再現画像の画質評価値を示す . Fig.7 挿入
グラフの横軸は量子化係数 Q の値を , 縦軸は画質評価値の平均値を表している . さらに Fig.8 に , 量子化係数 Q をブロックによって可変にした場合の再現画像の画質評価値を示す . Fig.8 挿入
グラフの横軸は量子化係数 Q の更新回数 , 縦軸は画質票価値の平均値を表している . 評価結果より , Fig.7 で $Q=90$, Fig.8 では処理 10 回目あたりで , 原画像からの再現画像とほぼ変わ

りない画像を再現できている．このときの Image Distortion Map を Fig.9 に示す．再現画像の画質評価では，Fig.7，Fig.8 より同等の評価が得られているが，Q の値を可変にすることで画像中の低周波領域で色差 ΔE_{94} が小さくなり，画像全体で知覚される劣化が少なくなっていることが確認できる．反対に Q の値を一定にした場合，高周波領域での色差は小さいが低周波領域での色差が大きくなってしまっている．また，このときの画像ファイル容量は，

Fig.9 挿入

量子化係数 Q が一定の場合	:	139.22 [KB]
量子化係数 Q が可変の場合	:	133.72 [KB]

であり，Q を可変にすることで視覚特性に合った圧縮を行うことができ，圧縮効率が向上したことを確認できる．

4. 議論と結論

本研究では非等方性 MTF を用いた Image Distortion Map により，圧縮されたマルチバンド画像からの再現画像の画質評価を行った．得られた Image Distortion Map が高周波成分領域に対しては劣化の認識が低く，低周波成分領域については劣化の認識が高いことを示していることから，視覚特性を考慮した画質評価を行うことができた．さらに Image Distortion Map で得られた値を画像圧縮にフィードバックすることで，視覚特性に合った圧縮を行った．また，適応的量子化を行った画像からの再現画像に対して主観評価実験を行った．量子化係数が一定の場合の時と比較した結果，圧縮率と画質の

関係は従来法よりも良い結果であり，本手法の有効性を確認することができた．

問題点としては，視覚特性のモデルの正確性が検証されていないことである．視覚モデルは盛んに研究されている分野なので，より正確な視覚モデルを適用する必要がある．石原ら^[12]によって，輝度による視覚の感度変化も考慮した視覚モデルも提案されており，今後検討していく必要がある．また，圧縮画像には普段の撮影時には入らないブロック歪みなどのノイズが発生するため，これらの特性も考慮にいった誤差知覚を検討する必要がある．また，本手法を適用したマルチバンド画像の数が少ないことも問題であり，他の被写体を撮影し，同様の結果が得られるか検証する必要がある．特に，適応的量子化処理の結果は，画像の持つ周波数成分の違いによって左右されるため，対象画像を変えての実験が必要である．

正確な色再現性という面では，分光反射率の推定精度を議論する必要があるが，本研究では D65 光源下での再現画像による劣化程度を評価したにすぎない．照明光源によって色の知覚は変化するため，画質劣化も照明光源に依存していると言える．今後は圧縮されたマルチバンド画像による分光反射率の推定精度を考慮し，様々な光源下において劣化の認識されない最適な圧縮方法を検討することが必要である．