

Raw data を復号可能な JPEG データの生成方法 ～ 新しい Raw data 圧縮 ～

田中 正行, 奥富 正敏

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻
東京都目黒区大岡山 2-12-1

mtanaka@ok.ctrl.titech.ac.jp, mxo@ctrl.titech.ac.jp

概要 近年, カラーフィルタアレイを有した単板式カラー撮像素子の普及が著しい. また, 単板式カラー撮像素子の出力である RAW データを効率よく圧縮したいという要求も高まっている. そこで, 本論文では, RAW データを直接圧縮する新しい方法を提案する. まず, JPEG-RAW データという RAW データを復号可能な JPEG データという考え方と生成方法を提案する. この JPEG-RAW データとは, 既存の JPEG 復号器で復号し, さらにダウンサンプリングすることにより, RAW データが復号できるデータである. JPEG-RAW データは, RAW データが復号できるばかりではなく, 画像データを JPEG 復号器で復号することにより, 簡便にデータを画像として確認することができる. いくつかの画像に対して, 提案手法と従来法を比較し, 提案手法が RAW データを効率的に圧縮できることを示す.

Raw data decodable JPEG data ～ A novel raw data compression ～

Masayuki TANAKA and Masatoshi OKUTOMI

Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

mtanaka@ok.ctrl.titech.ac.jp, mxo@ctrl.titech.ac.jp

Abstract A single color CCD with color filter array has been became very popular. An effective compression of the raw data captured by the single color CCD is highly demanded. This paper proposes a novel raw data compression. We show the concept of the JPEG data from which the raw data can be extracted. An preview functionality is realized by using this JPEG data. We can preview by the normal JPEG decoder. Experiments using standard image and real image demonstrate that the proposed method can effectively compress the raw data.

1 まえがき

多くの低コストなカラーデジタルカメラには、カラーフィルタアレイを有する単板式カラー撮像素子が利用されている。ベイヤーパターンはカラーフィルタアレイとして最も広く普及している [1]。ベイヤーパターンのカラーフィルタアレイを有する単板式カラー撮像素子では、1つの画素はR,G,またはBの1つの色しか観測することができない。単板式カラー撮像素子の出力は、色チャンネルは異なるものの1つの画素に対して1つの画素値であり、1枚のグレイ画像であると考えられることもできる。この単板式カラー撮像素子の出力画像は、RAWデータと呼ばれる。このようなRAWデータから、フルカラー画像を生成する方法はデモザイキング処理と呼ばれ、数多くの方法が提案されている [9]。近年、RAWデータから、フルカラー画像を生成する方法は“RAW現像”とも呼ばれており、RAWデータを保存しておき、PC等で後からデモザイキング処理等を行うという方法も利用されつつある。また、複数の低解像度画像から1つのカラー高解像度画像を生成する処理であるカラー超解像処理においても、再構成に直接RAWデータを利用することにより、効果的に超解像処理を行うことができる [10, 11]。

ところが、効率的にRAWデータを保存する方法や、適切な保存形式は確立されておらず、非圧縮のままRAWデータが保存されているのが現状である。さらに、RAWデータの保存形式も統一されておらず、高圧縮かつ低歪みでRAWデータを保存する方法が望まれている。一方、フルカラー画像に対しては、数多くの保存形式が提案されている。特に、JPEG[2]は非常に普及が進んでおり、デファクトスタンダードの1つとも言える。JPEG-LS[3]やJPEG-2000[4]といった新しい保存形式が提案されているものの、JPEGの普及に遠く及ばない。

ここで、単板式カラー撮像素子を有したデジタルカメラを利用して、画像を撮影、保存し、画像を表示するまでの標準的な方法を確認する。一般的に、単板式カラー撮像素子により観測されたRAWデータは、デモザイキング処理によりフルカラー化され、さらにデータ圧縮が行われ、画像データとして保存される。そして、保存されたデータは復号器によって、フルカラー画像に復元され、表示される。

近年、効率的にRAWデータを圧縮するための新しい方法が提案されている [5, 6, 7, 8]。これらの方法は、RAWデータを色チャンネルごとに分離し、その後、各色チャンネルの画像をグレイ画像ととらえ、既存の画像圧縮方法を適用するという共通点がある。このような方法を利用することにより、高圧縮かつ低歪みでRAWデータを圧縮し、保存することが可能である。フルカラー画像を復号する際には、RAWデータの復号、カラーモザイク画像の再構成およびデモザイキング処理が必要である。

ところで、画像データの保存においては、高圧縮

かつ低歪みでデータを圧縮できることはもちろんのこと、データを簡便に画像として確認できることも重要である。本論文では、保存データを簡便に画像として確認することをプレビューと呼ぶことにし、プレビューのために生成される画像をプレビュー画像と呼ぶことにする。既存のRAWデータ圧縮手法では、データを画像として確認する場合は、専用の画像復元処理を行う必要がある。そのため、既存の復号器で簡便にプレビューすることができず、普及の妨げになるものと思われる。

そこで、本論文では、最も広く普及しているJPEGに基づいたRAWデータ圧縮方法を新しく提案する。まず、RAWデータを復号可能なJPEGデータという考え方を導入する。このJPEGデータをJPEG-Rawデータと呼ぶことにする。つまり、提案手法は観測されたRAWデータに基づきJPEG-Rawデータを生成する方法である。JPEG-Rawデータとは、JPEG復号器で復号したフルカラー画像に対して、ダウンサンプリングのような簡単な操作により、RAWデータを復号できるJPEGデータである。単純にJPEG-RawデータをJPEG復号器で復号した画像はプレビュー画像として利用可能である。

提案手法では、JPEG復号器の復号過程を定式化し、復号されるRAWデータと実際に観測されたRAWデータとの誤差が小さくなるように、JPEG-Rawデータを生成する。このようにJPEG-Rawデータを生成することにより、RAWデータを高圧縮かつ低歪みで圧縮することができ、プレビューも可能となる。また、提案手法はRAWデータを直接圧縮する方法であるため、圧縮前にデモザイキング処理によりフルカラー化する必要もない。本論文では、標準画像および実画像に対して、提案手法を適用し、従来の方法と比較し、提案手法の有効性を示す。

2 JPEG 圧縮概要

2.1 JPEG 符号化

JPEG圧縮は、フルカラー画像に対する圧縮方法として広く知られている。図1にJPEG符号化の概要を示す。まず、単板式カラー撮像素子により観測されたRAWデータは、デモザイキング処理され、フルカラー画像に変換される。このフルカラー画像は、YCrCb色空間に変換され、離散コサイン変換された後に、量子化処理が行われる。このように量子化された離散コサイン変換のデータを量子化DCT係数と呼ぶことにする。量子化DCT係数は、ランレングスおよびハフマン符号化され、JPEGデータが生成される。色差(Cr,Cb)は空間方向に間引きされることが多い。提案手法は色差間引きにも対応しているが、本論文では簡単のため色差間引きを考慮しないことにする。JPEG符号化では、最小符号化ユニット(MCU)ごとに符号化されるが、色差間引きをしない場合、MCUは 8×8 の大きさになる。

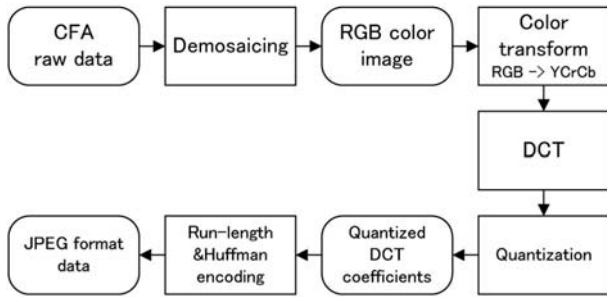


Fig. 1. Block diagram of JPEG encoding process.

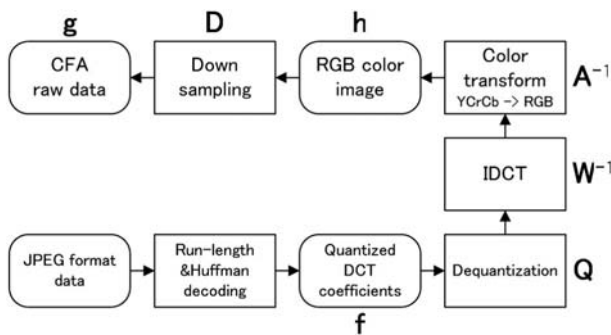


Fig. 2. Block diagram of JPEG decoding process.

2.2 JPEG 復号の定式化

JPEG データを復号する方法の概要を図 2 に示す。復号も MCU ごとに行われるため、ここでは 1 つの MCU を復号することのみを考える。まず、JPEG データはランレングスおよび Huffman 復号化され、量子化 DCT 係数 f となる。量子化 DCT 係数は、逆離散化、逆離散コサイン変換、および色変換が施され、フルカラー画像が復号される。それぞれの処理は、行列演算で表現することができ、これらの復号は式 (1) のようにあらわされる。

$$\mathbf{h} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{Q} \mathbf{f} = \mathbf{P} \mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、ベクトル \mathbf{h} はフルカラー画像のベクトル表現を表し、行列 \mathbf{Q} は逆量子化を、行列 \mathbf{W}^{-1} は逆離散コサイン変換を、行列 \mathbf{A}^{-1} は色変換を、それぞれ表す行列である。今、MCU を 8×8 と考えているので、量子化 DCT 係数 \mathbf{f} およびフルカラー画像 \mathbf{h} は 192 次元のベクトルであり、行列 \mathbf{A}^{-1} , \mathbf{W}^{-1} , \mathbf{Q} , \mathbf{P} は 192×192 次元の行列である。

3 JPEG-RAW データの提案

本章では、まず、RAW データ圧縮に求められている特徴を述べる。ついで、RAW データを復号可能な JPEG データである JPEG-RAW データを提案し、その特徴を述べる。

3.1 RAW データ圧縮に求められる特徴

RAW データを非可逆圧縮することを考える。このとき、RAW データ圧縮に求められる特徴としては、まず第一に、できるだけ少ない情報量で、RAW データを小さな誤差で復号できることがある。このような性質を満足していれば、圧縮効率が高いということにする。また、RAW データを、画像として簡便に確認できることも重要である。このように圧縮されたデータを画像として確認する機能のことをプレビューと呼ぶことにする。プレビュー用の画像には、高い画質は必要ないものの、既に普及している復号器で簡便に画像化できることが必要である。デジタルカメラ上での画像の確認や画像の検索などを考えた場合、このプレビュー機能は非常に重要な必須の機能であると考えられる。

ところで、単板式カラー撮像素子により撮影された RAW データは、一般に図 3 のように処理される。この図からもわかるように、単板式カラー撮像素子の出力である RAW データを高い圧縮効率で保存するということは考慮されておらず、あくまで圧縮はデモザイキングされたカラー画像を圧縮・保存することのみが考慮されている。また、現在利用されている RAW データの保存方法は、非圧縮であり、既存の復号器でプレビュー用の画像を生成することはできない。これまでに提案されている RAW データの圧縮方法は、図 4 に処理の流れを示すように、いずれも RAW データを各チャンネルに空間的に分離することを基本としている [5, 6, 7, 8]。このため、プレビュー画像を簡便に生成することはできない。

圧縮効率のみを考慮した場合、可逆圧縮である ZIP 形式や RAR 形式を利用して、RAW データを圧縮する方法は、高い圧縮効率が期待できる。圧縮効率を高めるように非可逆的な前処理をしたのちに、ZIP 形式や RAR 形式を利用することにより、非可逆圧縮も可能であると考えられる。しかし、このような圧縮形式は、当然、プレビュー画像を簡便に生成することはできない。

さらに、圧縮形式の普及を考えた場合、現在広く普及されている復号器で復号できることは、実用的に重要なことである。そこで、RAW データを復号可能な JPEG データである JPEG-RAW データを次節で提案する。

3.2 JPEG-RAW データの特徴

ある JPEG データを復号することによりフルカラー画像が得られる。この得られたフルカラー画像を、ダウンサンプリングすることにより RAW データを抽出する¹。このように抽出された RAW データが、観測された RAW データに対して誤差が小さいとき、元々の JPEG データを RAW データを復号可能

¹フルカラー画像から RAW データを抽出する操作は任意に設計可能であるが、ここでは簡単のためダウンサンプリングを考慮することにする。

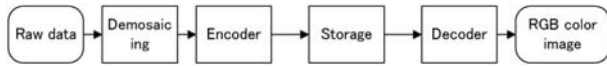


Fig. 3. Image data flow of normal JPEG format.



Fig. 4. Image data flow of existing raw data compression.

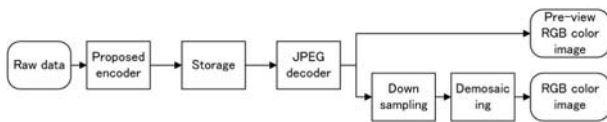


Fig. 5. Image data flow of proposed method.

な JPEG データと呼ぶことにする. このような RAW データを復元可能な JPEG データは, JPEG 復号器で単純に復号することにより, プレビュー画像が生成されるという特徴がある. また, プレビュー画像をダウンサンプリングすることにより RAW データが復号される.

次に, RAW データを復元可能な JPEG データである JPEG-Raw の特徴を定式化する. まず, ある JPEG データを復号し, ダウンサンプリングにより, RAW データを生成することを考える. もし, 生成された RAW データが観測された RAW データと一致していれば, RAW データを生成するために利用した JPEG データは, RAW データを復元可能な JPEG データであると言える. この条件は, 式 (1) の行列 \mathbf{P} を利用して, 式 (2) のように表される.

$$\mathbf{g} = \mathbf{D}\mathbf{P}\mathbf{f} = \mathbf{T}\mathbf{f} \quad (2)$$

ここで, ベクトル \mathbf{g} は RAW データを表すベクトルを, 行列 \mathbf{D} はフルカラー画像から RAW データを生成するためのダウンサンプリングを表す行列を, 行列 \mathbf{T} は量子化 DCT 係数から RAW データを復号するための復号行列を, それぞれ表す. 式 (2) を満足していれば, JPEG データから誤差無しで観測された RAW データを復号することができる. もし, このような JPEG データを符号化することができれば, RAW データを可逆圧縮していると考えられる. この RAW データの可逆圧縮の考え方は, RAW データの非可逆圧縮に拡張することができる. 非可逆圧縮は, 式 (3) の誤差が十分小さくなるように JPEG データを符号化することである.

$$E = \|\mathbf{g} - \mathbf{T}\mathbf{f}\|_2^2 \quad (3)$$

ここで, $\|\cdot\|_2$ は L2 ノルムを表す. 式 (3) の誤差が小さいような量子化 DCT 係数に対応する JPEG データを, JPEG-Raw データと呼ぶことにする. この

ような特徴を有する JPEG データは, RAW データを復号できるばかりではなく, 通常の JPEG 復号器によりフルカラー画像が得られる.

4 JPEG-Raw データの生成方法

前章では, JPEG-Raw データの特徴を述べた. 本章では, 観測された RAW データから, JPEG-Raw データを生成する方法を具体的に述べる.

まず, DCT 係数が連続の場合について検討する. ついで, 量子化 DCT 係数に対応するための繰り返し計算方法を提案する. さらに, 量子化 DCT 係数のパラメータ削減方法および量子化テーブルの再設計方法を提案する.

なお, 量子化 DCT 係数と JPEG データは, ランレングスおよびハフマン符号化で一対一に対応しているため, 本章では量子化 DCT 係数を生成する方法について述べる.

4.1 連続 DCT 係数の場合

大きさ 8×8 の MCU ごとに式 (3) の誤差を, それぞれ最小にすることを考える. ここでは, まず, DCT 係数の量子化は考慮せず, 連続 DCT 係数について考える. まず, 主要な行列とベクトルの次元を確認する. 観測された RAW データであるベクトル \mathbf{g} は 64 次元, 求めるべきフルカラー画像の DCT 係数であるベクトル \mathbf{f} は 192 次元, 復号化行列 \mathbf{T} は 192×64 次元である. つまり, 求めるべき未知数の数 (192) が拘束式の数 (64) よりも多いため, 式 (3) の誤差をゼロにする連続 DCT 係数 \mathbf{f} は無数にある.

DCT 係数の量子化を考慮しなければ, 誤差をゼロにする DCT 係数の 1 つは, 式 (2) の最小二乗最小ノルム解として与えられる. この最小二乗最小ノルム解は, Moore-Penrose の一般化逆行列を利用して, 式 (4) のように一意に求められる.

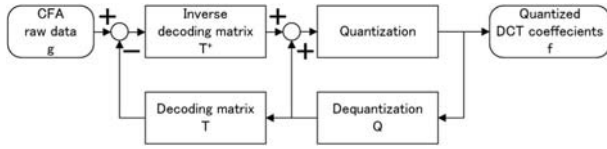
$$\mathbf{f}^c = \mathbf{T}^+ \mathbf{g} \quad (4)$$

ここで, 行列 \mathbf{T}^+ は行列 \mathbf{T} の Moore-Penrose の一般化逆行列を表す. しかしながら, JPEG データを生成するためには, 連続 DCT 係数 \mathbf{f}^c を量子化する必要がある. 量子化に伴い, 量子化誤差も同時に発生してしまう.

4.2 量子化 DCT 係数のための繰り返し計算

前節で議論したように一般化逆行列を利用して, DCT 係数を求めることができる. しかしながら, JPEG データを生成するためには DCT 係数を量子化しなければならず, 量子化誤差が発生する. この量子化誤差を低減させるため, 本節では繰り返し計算により, 量子化 DCT 係数を求める方法を提案する.

図 6 に, 繰り返し計算の手順を示す. 量子化誤差を相殺するように, 量子化 DCT 係数を更新する方



1. Initialize DCT coefficients as $\mathbf{f}_0 = \mathbf{0}$.
2. $\Delta \mathbf{f}^c = \mathbf{T}^+(\mathbf{g} - \mathbf{T} \mathbf{Q} \mathbf{f}_{n-1})$.
3. $\mathbf{f}_n^c = \mathbf{Q} \mathbf{f}_{n-1} + \Delta \mathbf{f}^c$.
4. \mathbf{f}_n is quantization of \mathbf{f}_n^c .
5. Repeat from 2 to 4.

Fig. 6. Iterative estimation of quantized DCT data.

法である。このように、繰り返し計算を行うことにより、量子化誤差を低減することができる。

4.3 パラメータ数の削減

求めるべき DCT 係数の数 (未知数) が 192 であり、RAW データのデータ数 (拘束式の数) が 64 であるので、DCT 係数の量子化を考慮しなければ、式 (3) の誤差を 0 にできることは既に述べた。また、全ての DCT 係数を利用する必要はない。そこで、式 (5) のような復号過程を考える。

$$\mathbf{g} = \mathbf{T} \text{diag}(\mathbf{s}) \mathbf{f} \quad (5)$$

ここで、行列 $\text{diag}(\mathbf{s})$ は対角要素が \mathbf{s} である対角行列を、ベクトル \mathbf{s} は要素が 0 または 1 のベクトルを表す。なお、ベクトル \mathbf{s} の次元は、ベクトル \mathbf{f} の次元と同じ 192 である。

式 (5) の最小二乗最小ノルム \mathbf{f}_s^c は式 (6) に表される。

$$\mathbf{f}_s^c = [\mathbf{T} \text{diag}(\mathbf{s})]^+ \mathbf{g} \quad (6)$$

さて、ベクトル \mathbf{s} のある要素が 0 であれば、最小二乗最小ノルム解 \mathbf{f}_s^c の対応する要素は 0 になる。また、行列 $\mathbf{T} \text{diag}(\mathbf{s})$ のランクがベクトル \mathbf{g} と等しければ、式 (3) の誤差をゼロにする連続 DCT 係数を求めることができる。

ところで、量子化 DCT 係数をランレングスおよびハフマン符号化することにより、JPEG データが得られる。そのため、高い圧縮効率を実現するためには、連続した 0 が多数含まれるようにベクトル \mathbf{s} を設計すればよい。JPEG では、DCT 係数を保存するときにジグザグ走査が採用されていること、色差の高周波成分は人の視覚はあまり知覚しないことから、図 7 に対応するベクトル \mathbf{s} を利用した。このようなベクトル \mathbf{s} を利用することにより、図 7 中で 1 に対応する周波数の DCT 係数のみが利用されることになる。このような方法により、実質的に利用するパラメータ数を 196 から 67 へ削減した。また、こ

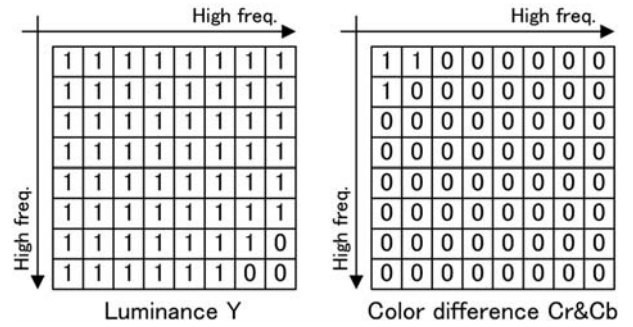


Fig. 7. Used DCT data: 1 and 0 represent used data and unused data, respectively.

のとき、行列 $\mathbf{T} \text{diag}(\mathbf{s})$ のランクがベクトル \mathbf{g} と等しいことを確認している。

4.4 量子化テーブルの再設計

国際電気通信連合 (ITU) は、人の視覚に基づいた DCT 係数のための量子化テーブルを勧告している。この量子化テーブルは広く利用されており、この量子化テーブルを定数倍することによって、圧縮率が変更されている。

ところで、量子化は DCT 係数に対して行われ、DCT 係数の量子化誤差が RAW データの量子化誤差へと伝搬する。また、量子化誤差は、DCT 係数の要素に依存せずに、同じように発生する。従って、本論文では、DCT 係数の量子化誤差が RAW データへ与える影響が、要素によらず等しくなるように量子化テーブルを再設計することにする。

まず、連続値の DCT 係数から RAW データへの復号過程から、RAW データにおける量子化誤差を求める。連続値の DCT 係数から RAW データへの復号過程は式 (8) のように変形できる。

$$\mathbf{g} = \mathbf{Y} \mathbf{Q} \mathbf{f}^c = \sum_{i=1}^n \mathbf{y}_i q_i f_i + \sum_{i=1}^n \mathbf{y}_i q_i e_i \quad (7)$$

ここで、

$$\mathbf{Y} = \mathbf{D} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{A}^{-1} \quad (8)$$

であり、ベクトル \mathbf{y}_i は行列 \mathbf{Y} の i 番目の列ベクトルを、 f_i はベクトル \mathbf{f} の i 番目の要素を、 Q_i は i 番目の要素の量子化間隔を、 e_i は i 番目の DCT 係数の量子化誤差を、 n はベクトル \mathbf{f} の要素数を、それぞれ表す。なお、前節のパラメータ削減を利用した場合、行列 \mathbf{Y} はパラメータ削減を考慮した形式になる。このとき、RAW データにおける量子化誤差 $\Delta \mathbf{g}$ は式 (9) のように表される。

$$\Delta \mathbf{g} = \sum_{i=1}^n \mathbf{y}_i q_i e_i \quad (9)$$

各 DCT 係数の要素の量子化誤差 e_i が, RAW データに与える影響を等しくするために, 各要素の量子化間隔 q_i を式 (10) のように設計する.

$$q_i = \frac{z}{\|y_i\|} \quad (10)$$

ここで, z は圧縮率を調節するための定数である.

5 実験

標準画像および実画像に対して提案手法を適用し, 提案手法の有効性を確認する. まず, 4.3 節で述べたパラメータ数の削減と 4.4 節で述べた量子化テーブルの再設計の効果を確認する. 4.2 節で述べた繰り返し計算の繰り返し回数を 3 回に固定して, パラメータ数削減および量子化テーブルの再設計を, それぞれ利用する場合としない場合で, 4 種類の方法を検討した. 図 8 に示す原画像をダウンサンプリングし, Bayer カラーフィルターアレイに対応する RAW データを生成した. この RAW データに対して, 4 種類の方法で JPEG データを生成した. 量子化間隔を変化させながら, 圧縮率と RAW データに対する CPSNR を求めた結果が図 9 である. 圧縮率は, 生成された JPEG データのサイズと RAW データのデータサイズの比であり, 値が大きいほど, 高圧縮であることを示す. CPSNR は, 復号された RAW データと原画像の RAW データとの平均二乗誤差をデシベルであらわしたものであり, 値が大きいほど元の RAW データに近いことを表している. すなわち, 図 9 において, 右上にデータが存在しているほど, 高圧縮率かつ低歪みで RAW データが圧縮されていることを示す. 図 9 から, パラメータ数の削減と量子化テーブルの再設計をともに行う方法が最も効率的に RAW データを圧縮していることが確認される.

また, 図 10 に圧縮率がおよそ 4 付近における 4 種類の圧縮方法により生成された JPEG データのプレビュー画像を示す. 図副題に CPSNR と圧縮率を, それぞれ示す. いずれのプレビュー画像も, 高品質な画像であるとは言えない. しかしながら, プレビュー画像はあくまでも, データを確認することが目的である. 図 10 の画像から十分, データを画像として確認することができ, プレビューの役割を果たすことがわかる. さらに, 4 種類のプレビュー画像の中では, パラメータ数の削減と量子化テーブルの再設計をともに利用した (d) の画質が最も良い. 以上の理由から, パラメータ数の削減と量子化テーブルの再設計をともに利用した方法を提案手法とする.

次に, 提案手法を, 一般的に利用されている JPEG, JPEG-LS および JPEG-2000 と比較する. まず, 図 8 をダウンサンプリングすることにより得られた RAW データを Adams らの手法 [12] によりデモザイキング処理をし, フルカラー画像を得る. 得られたフルカラー画像に対して, JPEG データ, JPEG-LS データおよび JPEG-2000 データを, 量子化間隔を



Fig. 8. Ground truth.

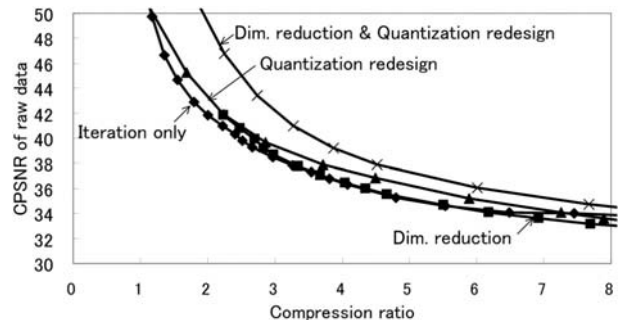


Fig. 9. Comparison of CPSNR of four different proposed methods.

変化させながら, それぞれ生成した. それぞれの画像データを復号し, ダウンサンプリングすることにより, RAW データが得られる. 図 11 に提案手法と, 既存の画像圧縮方法を利用した RAW データ圧縮方法の比較を示す. 図 11 から, どの圧縮率においても提案手法の CPSNR が最も高い値であることが確認される.

同様の比較を図 12 に示す実際に撮影された画像に対して行った. なお, 撮影には単板式カラー撮像素子を有するカメラを利用している. そのため, 図 12 はフルカラー化された画像を示している. 従来の方で圧縮する際には, Adams らの手法 [12] によりデモザイキング処理により得られたフルカラー画像に対して各種圧縮手法を適用した. 図 12 に対する, 圧縮方法の比較を図 13 に示す. 標準画像の場合とは傾向は多少異なるものの, 図 13 においても, 提案手法がいずれの圧縮率においても最も高い CPSNR を示している. つまり, 提案手法は RAW データを効率的に圧縮でき, かつプレビュー画像を簡便に生成可能であることが確認された.

カメラ上で, RAW データを手案手法により圧縮・保存し, PC 等にデータを転送した後, 計算時間がかかるが高精度なデモザイキング処理を利用するという応用が考えられる. 図 14 に図 12 の圧縮結果を示す. 図 14(a) および (b) は, Adams らの方法によりデモザイキング処理した結果を JPEG および JPEG-2000 で圧縮した結果を, 図 14(c) は, RAW データを提案手法により圧縮した結果のプレビュー画像を,



(a) Non dimension reduction & Non quantization redesign.
(CPSNR: 36.3[dB],
Comp. ratio: 4.1)

(b) Non dimension reduction & Quantization redesign.
(CPSNR: 37.5[dB],
Comp. ratio: 3.7)



(c) Dimension reduction & Non quantization redesign.
(CPSNR: 35.7[dB],
Comp. ratio: 4.0)

(d) Dimension reduction & Quantization redesign.
(CPSNR: 39.2[dB],
Comp. ratio: 3.9)

Fig. 10. Comparison of preview images.

図 14(d) は、提案手法で圧縮された RAW データに基づき Hirakawa らの方法 [13] でデモザイキング処理した結果を、それぞれ示す。Hirakawa らのデモザイキング処理は、従来の方法より高精細にデモザイキングできる方法として知られているものの、Adams らの方法に比べて計算コストが大きい。つまり、図 14(c) はカメラ上での確認のための画像を、図 14(d) は提案手法を応用して最終的に得られる画像であると考えられる。図 14(d) を図 14(a) および (b) と比較した場合、提案手法を応用した図 14(d) の画像が細部まで再現されていることが確認される。

6 むすび

本論文では、RAW データを圧縮・保存するための新しい方法を提案した。

まず、RAW データを復号可能な JPEG データである JPEG-RAW データという新しい考え方を提案した。この JPEG-RAW データとは、既存の JPEG 復号器で復号し、ダウンサンプリングすることにより、RAW データが復号できる。また、このような JPEG-RAW データは、プレビュー画像を既存の JPEG 復号器で簡便に生成することができる。

次に、観測された RAW データから、JPEG-RAW

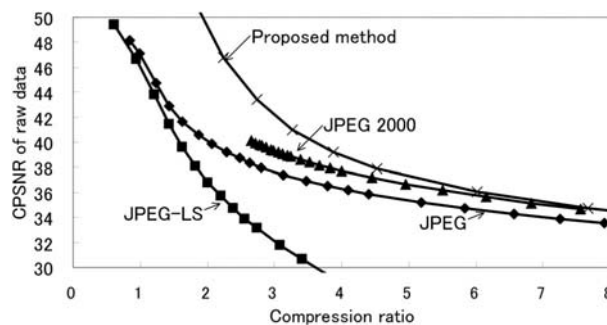


Fig. 11. Comparison of CPSNR vs. compression ratio with Lena image.

データを生成する方法を提案した。この生成方法は、JPEG の復号過程を定式化し、復号される RAW データと観測された RAW データの誤差が小さくなるように JPEG データを生成するという考え方に基づいている。量子化の影響を考慮した繰り返し演算、パラメータ数の冗長さを利用したパラメータ数削減および量子化テーブルの再設計を行うことにより、提案手法は高圧縮かつ低歪みで RAW データを圧縮することが可能である。

手案手法と、既存の JPEG, JPEG-LS および JPEG-2000 を標準画像および実画像に適用し、提案手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] B.E. Bayer, "Color imaging array," US Patent 3971065, 1976.
- [2] G.K. Wallace, "The JPEG still picture compression standard," *Communications of the ACM*, Vol. 34, No. 4, pp. 30–40, 1991.
- [3] M.J. Weinberger, G. Seroussi, and G. Sapiro, "The LOCO-I lossless image compression algorithm: principles and standardization into JPEG-LS," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 9, No. 8, pp. 1309–1324, 2000.
- [4] A. Skodras, C. Christopoulos, and T. Ebrahimi, "The JPEG 2000 still image compression standard," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 18, No. 5, pp. 36–58, 2001.
- [5] N. Zhang and X. Wu, "Lossless Compression of Color Mosaice Images," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 15, No. 6, pp. 1379–1388, 2006.
- [6] S.-Y. Lee and A. Ortega, "A Novel Approach of Image Compression in Digital Cameras with a Bayer Color Filter Array," *Proc. International Conference of Image Processing*, Vol. 3, pp. 482–485, 2001.
- [7] C.C. Koh, J. Mukherjee, and S.K. Mitra, "New Efficient Methods of Image Compression in Digital Cameras with Color Filter Array," *Trans. Consumer Electronics*, Vol. 49, No. 4, pp. 1488–1456, 2003.



Fig. 12. Image captured by single color image sensor.

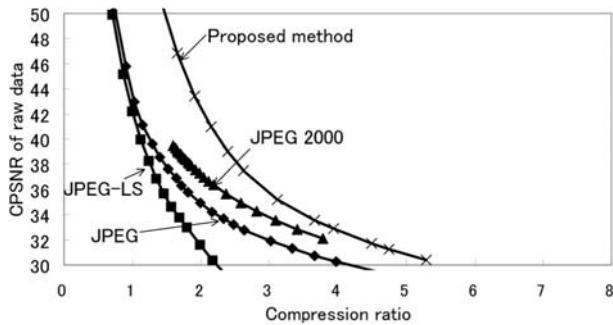
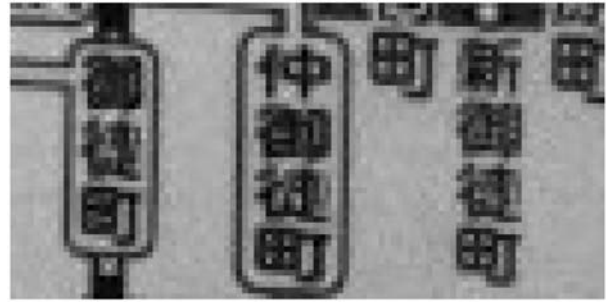
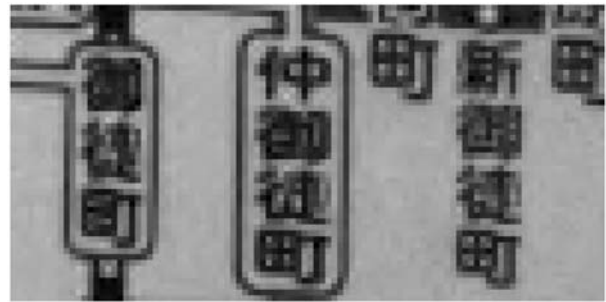


Fig. 13. Comparison of CPSNR vs. compression ration with captured image.

- [8] X. Xie, G.L. Li, Z.H. Wang, C. Zhang, D.M. Li, and X.W. Li, "A Novel Method of Lossy Image Compression for Digital Image Sensors with Bayer Color Filter Arrays," *Proc. International Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 5, pp. 4995–4998, 2005.
- [9] B. K. Gunturk, J. Glotzbach, Y. Altunbasak, R. W. Schafer, and R. M. Mersereau, "Demosaicking: color filter array interpolation," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 22, No. 1, pp. 44–54, 2005.
- [10] T. Goto and M. Okutomi, "Direct Super-Resolution and Registration Using Raw CFA Images," *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. II, pp. 600–607, 2004.
- [11] 後藤知将, 奥富正敏, 単板カラー撮像素子のRAWデータを利用した高精細画像復元, *情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア*, Vol.45, No.SIG 8(CVIM 9), pp. 15–25, 2004.
- [12] J.E. Adams and J.F. Hamilton, "Design of practical color filter array interpolation algorithms for digital cameras," *Proc. SPIE*, vol. 3028, pp. 117–125, 1997.
- [13] K. Hirakawa and T.W. Parks, "Adaptive homogeneity-directed demosaicing algorithm," *IEEE Trans. Image Processing*, Vol. 14, No. 3, pp. 360–369, 2005.



(a) JPEG (Compression ratio: 1.99)



(b) JPEG-2000 (Compression ratio: 1.98)



(c) Preview image of the proposed method (Compression ratio: 1.91)



(d) Reconstructed image from raw data compressed by the proposed method (Compression ratio: 1.91)

Fig. 14. Comparisons of images.