カラー成分間の相関を利用したカラー画像符号化手法の一検討

正員 後藤 富朗* 非会員 奥村 剛史**
非会員 北村 正* 非会員 早原 悦朗***

A Study on Color Image Coding Technique using Correlations between Color Components

Tomio Goto*, Member, Takeshi Okumura**, Non-member,
Tadashi Kitamura*, Non-member, Etsuro Hayahara***, Non-member

RGB is the standard color format for most digital video input and output devices, such as display monitors. However, each component consisting of a natural image has a lot of redundancy. So, a color conversion, which is RGB to YCrCb, has been being used to reduce its redundancy. However, each component of YCrCb signals has no correlation under the higher compression rate, so compression performance is decreased. So, we propose a new color conversion. By implementing the proposed method, which exploits the correlations between the color components, the PSNR of traditional way is higher than that of proposed way under low compression performance. However, it can not be found that the difference of reconstructed images quality is invisible. And the PSNR of traditional way becomes worse quickly under a high compression performance, however, that of proposed way becomes worse slowly, therefore proposed way can produce a better quality of reconstructed image in a low bit-rate. As a result, the examples demonstrated that a better performance of color image coding is obtained.

キーワード：色変換, ウェーブレット変換, 画像圧縮, カラー画像

Keywords: color conversion, wavelet transform, image compression, color image

1. はじめに

画像圧縮において圧縮率や画像の再現性の観点から DCT (離散コサイン変換) 符号化は, JPEG や MPEG 等の国際標準規格に採用され, 広く用いられている。DCT 符号化では画像を任意のブロックサイズに分割し, 各ブロック毎に DCT を行い, ブロック全体にある情報を低周波数成分に集約し, 変換係数の各周波数に応じて量子化を行うことで圧縮率を増加させている。しかし, 圧縮率を増加させるにつれ, 低周波数成分の量子化によりブロック間の相関がなく

なるためブロック歪みが生じる⁽¹⁾。また, 高周波数成分の量子化によりエッジ部分がぼやけたり, モスキート雑音が混入してしまうことが知られている。そこでこれらの雑音の混入を低減できる符号化方式としてウェーブレット変換符号化が注目されている⁽²⁾。

ウェーブレット変換は, 新しい国際標準規格である JPEG2000 にも採用されており, 用いる基底により入出力特性を変化させることができる。提案された当初は, 比較的低次のフィルタを基底に用いていたが, 近年では高次のフィルタが用いられてきており, JPEG2000 では, 可逆圧縮用に整数型 5-3 フィルタが, 非可逆圧縮に Daubechies 9-7 フィルタが採用されている。

また, カラー画像においては, 赤・緑・青の光の三原色 (R, G, B 信号) を輝度 (Y) およびその色差 (Cr, Cb) 信号に変換することで輝度信号に情報を集約させ, RGB 信号の冗長を削除することで輝度信号と色差信号を独立に符号化し, 圧縮率の向上を図っている。しかし, この色変換では圧縮率を上げるにつれ, 各成分を独立に符号化することによるオーバーヘッドが無視できなくなり, 符号化効率が低下していると考えられる。

* 名古屋工業大学

〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

Nagoya Institute of Technology

Gokisocho, Showa-ku, Nagoya 466-8555

** 日本特殊陶業 (株)

〒 467-8525 名古屋市瑞穂区高辻町 14-18

NGK Spark Plug Co., Ltd.

14-18, Takatsujicho, Mizuho-ku, Nagoya 467-8525

*** 中部大学

〒 487-8501 春日井市松本町 1200

Chubu University

1200, Matsumotocho, Kasugai, Aichi 487-8501

そこで本報告では、低ビットレート時における復号画像画質の改善を目的とした新たな色変換を提案し、色変換後の各成分に対して成分間の相関を利用した符号化を行う。これにより低ビットレート時において従来の色変換による復号画像に比べ主観的にも客観的にも画質が改善されることを示す。また高ビットレート時において客観的な評価では従来法に比べ若干劣るものの主観的にはほぼ同等の復号画像が得られることを示す。以上により提案手法の有効性について検討を行う。

本論文では、まず 2. で本研究で提案する色変換について述べる。次に 3. でウェーブレット変換符号化器の設計を行い、4. で提案した手法の有効性を確認するために計算機シミュレーションによる評価を行う。最後に 5. でむすびとする。

2. 色変換

カラーの自然画像において RGB 成分間には強い相関がある。そこでカラー画像の符号化を行う際、一般的に色変換を行い、RGB 成分間の冗長を削除することで効率良く符号化を行う。

2.1 YCrCb 従来の色変換を用いた符号化システムの概略図を図 1 (a) に示す。従来の色変換では、入力信号 (R, G, B) を式 (1) を用いて Y, Cr, Cb 成分に変換し、色差成分 (Cr, Cb) を縦・横それぞれ半分に分けた後、各成分毎にウェーブレット変換を行い、量子化・符号化を行う。復号化は、符号化とは逆の手順で行い、式 (2) を用いて復号画像の RGB 信号を得る。

$$\begin{pmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.500 & -0.419 & -0.081 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 1.402 & 0.000 \\ 1.000 & -0.714 & -0.344 \\ 1.000 & 0.000 & 1.772 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ Cr \\ Cb \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

一般に人間の視覚特性において輝度信号に対する感度は高く、色差信号に対する感度は低いことが知られている。そこで従来の色変換では、式 (1) を用いることで輝度 (Y) 信号に情報を偏らせ、色差 (Cr, Cb) 信号を縦・横半分に間引

図 1 色変換を用いた符号化システムの概略図

Fig. 1. A flow of color conversion coding system.

くことで RGB 信号の冗長を削除する。これにより Y, Cr, Cb の信号間には相関がなくなるため、それぞれ独立に符号化することで圧縮率を向上させている。

2.2 LCr'Cb' 本研究で提案する符号化システムの概略図を図 1 (b) に示す。提案手法では、まず入力信号 (R, G, B) を各成分ごとにウェーブレット変換し、ウェーブレット変換係数 (r, g, b) に対して色変換を行うことで L, Cr', Cb' 信号に変換する。次に各成分ごとに量子化を行い、その後、成分間の相関を考慮した符号化を行う。本研究で提案する色変換、逆変換をそれぞれ式 (3), (4) に示す。

$$\begin{pmatrix} L \\ Cr' \\ Cb' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{r^2 + g^2 + b^2} \\ |r| - \frac{L}{\sqrt{3}} \\ |b| - \frac{L}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{pmatrix} |r| \\ |g| \\ |b| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cr' + \frac{L}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{L^2 - r^2 - b^2} \\ Cb' + \frac{L}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで L は、r, g, b を 3 次元ベクトルで考えた時のベクトル長を示しており、r, g, b が同じ数値の場合には |r|, |g|, |b| の $\sqrt{3}$ 倍となる。このことを考慮し、色差成分 Cr', Cb' を求めている。式 (3), (4) は非線形可逆変換であるため、図 1 (b) のウェーブレット変換と LCr'Cb' 変換の行う順序は代えることができない。

また式 (4) より、L, Cr', Cb' から r, g, b への逆変換では r, g, b の絶対値しか求めることができない。そのため、ウェーブレット変換係数のように負の値をとる時には、逆変換時に L, Cr', Cb' の 3 成分以外に正負の情報が必要となってしまう。しかし、式 (3) より Cr' について解くと

$$Cr'^2 + \frac{2\sqrt{3}L}{3} \cdot Cr' - \frac{2}{3}L^2 = -(g^2 + b^2) \leq 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\left(-\frac{\sqrt{3}}{3} - 1\right)L \leq Cr' \leq \left(-\frac{\sqrt{3}}{3} + 1\right)L \quad \dots\dots (6)$$

となり、 $L \rightarrow 0$ のとき $Cr' \rightarrow 0$ となる。Cb' についても同様に解くと、 $L \rightarrow 0$ のとき $Cb' \rightarrow 0$ となる。つまり、量子化後の係数が $L=0$ の場合には必ず $Cr'=Cb'=0$ となる。さらに $L=Cr'=Cb'=0$ の場合には、式 (4) により逆変換した r, g, b も 0 となるため、正負の符号も必要なく $L=0$ の情報のみあればよいこととなる。以上のことから $L=0$ の時には L だけを符号化し、Cr', Cb' の符号化を行わなくてもよい。このように色変換後の成分間の相関を利用することで、多くの画素が $L=0$ となる時、つまり低ビットレート時の符号化性能の改善が期待できる。ただし、高ビットレート時の符号化性能は従来の色変換を用いた場合に比べ、劣ることが予想される。これは、従来の色変換では色差成

分を間引くのに対し、提案法では成分間の関係を利用して間引き処理を行っていないことおよび従来の色変換の方がエネルギー集中度高いためである。

3. ウェーブレット変換符号化器の設計

3.1 ウェーブレット変換 図2にウェーブレット変換符号化方式で用いられる2分割フィルタバンクを用いた3階層ウェーブレット変換を示す。図2で $H_0(z)$ および $H_1(z)$ はそれぞれローパスフィルタおよびハイパスフィルタである。また、同図は3階層ウェーブレット変換を行った例であり、得られるウェーブレット変換係数は、帯域B1～B10の10分割されたものとなる。本研究では、変換基底にDaubechies 9-7フィルタを用いた。

3.2 量子化器 YCrCbおよびLCr'Cb'への色変換が復号画像の画質に及ぼす影響を調べるため色変換後の各係数に対して帯域成分毎に量子化する。一般に自然画像の低域成分の振幅値は一樣に分布しており、高域成分にはエッジ信号の他に画像ノイズと呼ばれる雑音が混入しており、この画像ノイズの振幅値は比較的小さいことが知られている。そこで、低域成分(図2の帯域B1)に対しては、図3(a)の線形量子化を用いて量子化を行う。また、高域

成分(図2の帯域B2～B10)に対してはエッジ成分は保持し、画像ノイズを除去するように図3(b)の中間ステップ量子化⁽³⁾を用いて量子化を行う。ここで中間ステップ量子化とは、図3(b)のように -2Δ 以上 2Δ 以下の入力に対しては0を出力し、それ以外の入力に対しては図3(a)の線形量子化を用いてスレッシュホールド幅 Δ で量子化を行う処理のことである。

3.3 符号化器 ウェーブレット変換係数は、図2に示すように帯域B1～B10に信号が分割されている。そこでこれらの帯域間の相関を利用して符号化するゼロツリー符号化^{(4)～(6)}を用いて符号化を行う。

3.3.1 YCrCb 従来の色変換を用いた符号化では、Y, Cr, Cbの各成分間に相関がないため、それぞれの成分毎に帯域間の相関を用いてゼロツリー符号化する。

3.3.2 LCr'Cb' 提案した色変換を用いた場合、2.2において説明したようにL, Cr', Cb'の各成分間に相関があり、さらに帯域間にも相関がある。そこで図4に示すようにまずL, Cr', Cb'の各成分毎にB1～B10の各帯域間の相関を利用してゼロツリー符号化を行い、その後L, Cr', Cb'の成分間の相関を利用して符号化を行う。このように符号化することでL成分がゼロツリーを構成した場合には、Cr', Cb'成分もゼロツリーを構成することとなり、L=0のみを符号化すれば良いこととなる。また、ゼロツリーを構成できる確率が高くなるのは、量子化幅を大きく設定した時つまり低ビットレートの時であり、低ビットレート時の符号化効率が劇的に改善されることとなる。

4. 実験結果

本研究で提案した色変換の有効性を確認するためC言語によるシミュレーションを行った。実験画像には、RGB各256階調、 512×512 [pixel], Lena, airplane, mandrill, peppers画像を用いた。原画像を図5に示す。

4.1 客観評価 提案手法の有効性を確認するためLCr'Cb'およびYCrCbでの符号化において図3(a), (b)

図2 3階層ウェーブレット変換

Fig. 2. 3-level wavelet transform.

図3 量子化器

Fig. 3. A quantizer with center dead zone.

図4 成分間の相関を利用した符号化器

Fig. 4. A coder exploited correlations between the color components.

中の Δ の値を変化させることで圧縮率を変化させビットレートとピーク SN 比の関係を調べた。実験結果を図 6 に示す。

図 6 よりどの画像を用いた場合においても約 1 [bits/pixel] 以上のビットレートでは、従来法である YCrCb の方が提案手法である LCr'Cb' のピーク SN 比より 0.5 [dB] 程度良くなっている。このことは、比較的高いビットレートでは従来法の方が輝度 (Y) 信号に情報を集約でき

図 5 実験画像

Fig. 5. Experimental images.

図 6 ピーク SN 比と bit-rate の関係

Fig. 6. PSNR v.s. bit-rate.

ており、効率良く符号化できているのに対し、提案法では、従来法に比べ色差成分により多くの情報が残っているためビットレートが低下しており、同一ビットレートで比較するとピーク SN 比が約 0.5 [dB] 低下するためである。また、ビットレートが約 1 [bits/pixel] 以下の低ビットレートでは、従来法のピーク SN 比は、急激に悪化しているのに対し提案手法のピーク SN 比の落ち込みは緩やかとなることが確認できる。これは、2・2 で説明したように低ビットレートにおいて $L=0$ となる確率が増えるため Cr' , Cb' を符号化する必要がなくなり、さらにゼロツリーにより $L=0$ のみの符号で Cr' , Cb' を表現でき、提案手法で効率良く符号化できているためである。

以上より提案手法は、客観評価において高ビットレートでは従来法に比べ 0.5 [dB] 程度ピーク SN 比が劣化するものの、低ビットレートで有効な符号化手法であることが確認された。

4・2 主観評価 提案手法の復号画像への視覚的影響を確認するためビットレートを固定した場合の復号画像の比較を行った。Lena, airplane, mandrill, peppers での復号画像をそれぞれ図 7 ~ 10 に示す。各図において (a), (b) はそれぞれ提案手法および従来法での 2.0 [bits/pixel] の場合、(c), (d) はそれぞれ提案手法および従来法での 0.5 [bits/pixel] の場合の復号画像である。

図 7 ~ 10 (a), (b) より平均ビットレートが 2.0 [bits/pixel] の場合の復号画像では、従来法のピーク SN 比が提案手法より 0.5 [dB] 程度良くなっているにもかかわらず、ほぼ同等の復号画像となっており、視覚的に良好な画像となっていることが確認できる。そもそもピーク SN 比は人間の視覚特性を考慮した評価ではなく原画像と復号画像との相対的な評価しか行えないため、このような結果となった。つまり、4・1 の実験結果で平均ビットレートが約 1.0 [bits/pixel] 以上では、提案手法のピーク SN 比が従来法に比べ 0.5 [dB] 程度劣化する結果となったが、視覚的に認知できない程度の画質劣化であり、高ビットレートにおいて提案手法は視覚的に従来法と同等な画質を再現できることを示している。

また、図 7 ~ 10 (c), (d) より平均ビットレートが 0.5 [bits/pixel] の場合の従来法における復号画像では、画像全体がぼやけており、特に Lena 画像の髪の毛や mandrill 画像の鬚の部分が再現されておらず、視覚的に劣化した復号画像となっている。それに対し提案手法では、エッジの細部まで精細に再現できており、視覚的に良好な復号画像が生成されている。これは、提案手法では低ビットレートの時にエッジ以外の部分で多くのゼロツリーを構成でき、さらに L 成分のゼロツリーのみで Cr' , Cb' 成分のゼロツリーも表現できるため、従来法に比べより多くのビットをエッジ成分に割り当てることが可能となり、効率良く符号化できているためである。

以上のことから、提案手法は高ビットレートでは視覚的に従来法とほぼ同等の画質となっている。また、低ビット

(a) Proposed method (LCr'Cb'). (2.0 [bits/pixel], 34.0 [dB])
 (b) Traditional method (YCrCb). (2.0 [bits/pixel], 34.3 [dB])

(c) Proposed method (LCr'Cb'). (0.5 [bits/pixel], 29.3 [dB])
 (d) Traditional method (YCrCb). (0.5 [bits/pixel], 26.2 [dB])

図 7 復号画像 (lena)

Fig. 7. Reconstructed images (lena).

(a) Proposed method (LCr'Cb'). (2.0 [bits/pixel], 24.2 [dB])
 (b) Traditional method (YCrCb). (2.0 [bits/pixel], 24.3 [dB])

(c) Proposed method (LCr'Cb'). (0.5 [bits/pixel], 20.3 [dB])
 (d) Traditional method (YCrCb). (0.5 [bits/pixel], 19.5 [dB])

図 9 復号画像 (mandrill)

Fig. 9. Reconstructed images (mandrill).

(a) Proposed method (LCr'Cb'). (2.0 [bits/pixel], 35.9 [dB])
 (b) Traditional method (YCrCb). (2.0 [bits/pixel], 36.4 [dB])

(c) Proposed method (LCr'Cb'). (0.5 [bits/pixel], 28.3 [dB])
 (d) Traditional method (YCrCb). (0.5 [bits/pixel], 25.7 [dB])

図 8 復号画像 (airplane)

Fig. 8. Reconstructed images (airplane).

(a) Proposed method (LCr'Cb'). (2.0 [bits/pixel], 31.7 [dB])
 (b) Traditional method (YCrCb). (2.0 [bits/pixel], 31.8 [dB])

(c) Proposed method (LCr'Cb'). (0.5 [bits/pixel], 28.0 [dB])
 (d) Traditional method (YCrCb). (0.5 [bits/pixel], 24.6 [dB])

図 10 復号画像 (peppers)

Fig. 10. Reconstructed images (peppers).

レートでは従来法で再現できない画像のエッジ部分においても精細な画像を生成できており、視覚的に良好な画像が生成されることが確認でき、画像符号化における提案手法の有効性を示した。

5. む す び

本研究では画像の圧縮効率の改善の観点から新たな色変換を提案し、提案した色変換を適用したウェーブレット変換符号化器の設計を行った。ウェーブレット変換基底には JPEG2000 でも用いられている Daubechies 9-7 フィルタを用いて 3 階層ウェーブレット変換を構成した。また、ウェーブレット変換係数の低域成分に対しては線形量子化を、高域成分に対しては中間ステップ量子化を用いて量子化した。さらに符号化器においてゼロツリー符号化を構成し、提案手法では色信号の成分間の相関を用いて符号化を行った。

その結果、高ビットレートにおいて提案手法は従来法より約 0.5 [dB] のピーク SN 比の劣化が生じたものの、それらの復号画像は視覚的に認知できない程度の画質劣化であり、ほぼ同等の復号画像であることが確認できた。また、低ビットレートにおいて従来法はピーク SN 比が急激に劣化するのに対し、提案手法は緩やかに劣化することが確認できた。さらにそれらの復号画像を比較したところ、従来法では画像のエッジ部分の劣化が特に激しく画像全体がぼやけてしまうのに対し、提案手法ではエッジ部分においても良好な画質が得られており、視覚的に良好な画像が得られることが確認でき、提案手法の有効性を示した。

ところで本論文で提案した色変換は、ウェーブレット変換係数の高域成分がゼロとなる確率が増えることに着目し、これを利用した符号化であり、画像符号化器の入力部分に変更を加えることで実現できるため、近年規格化された静止画像の国際標準規格である JPEG2000 Part 1⁽⁷⁾においても適用可能である。また、ウェーブレット変換を用いた動画像符号化である JPEG2000 Part 3⁽⁸⁾に対しても適用可能である。

そこで今後の課題として提案した色変換の JPEG2000 への適用による更なる符号化効率の改善および MotionJPEG への適用による動画像符号化への対応等が挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B) 課題番号 15760261) および財団法人日東学術振興財団の助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

(平成 14 年 12 月 27 日受付, 平成 15 年 10 月 22 日再受付)

文 献

- (1) J. Luo, C.W. Chen, K.J. Parker, and T.S. Huang: "Artifact Reduction in Low Bit Rate DCT-Based Image Compression", *IEEE Trans. on Image Process.*, Vol.5, No.9, pp.1363-1368 (Sep. 1996)

- (2) A.S. Lewis and G. Knowles: "Image Compression Using the 2-D Wavelet Transform", *IEEE Trans. on Image Process.*, Vol.1, No.2, pp.244-250 (Apr. 1992)
- (3) H. Gharavi and A. Tabatabai: "Sub-Band Coding of Monochrome and Color Images", *IEEE Trans. on Circuits and Syst.*, Vol.35, No.2, pp.207-214 (Feb. 1988)
- (4) J.M. Shapiro: "Embedded Image Coding Using Zerotrees of Wavelet Coefficients", *IEEE Trans. on Signal Process.*, Vol.41, No.12, pp.3445-3462 (Dec. 1993)
- (5) M. Ohta and S. Nogaki: "Hybrid Picture Coding with Wavelet Transform and Overlapped Motion Compensated Interframe Prediction Coding", *IEEE Trans. on Signal Process.*, Vol.41, No.12, pp.3416-3424 (Dec. 1993)
- (6) C.D. Creusere: "A New Method of Robust Image Compression Based on the Embedded Zerotree Wavelet Algorithm", *IEEE Trans. on Image Process.*, Vol.6, No.10, pp.1436-1442 (Feb. 1997)
- (7) ISO/IEC 15444-1, JPEG2000 Part1 Final Draft International Standard, (Dec. 2000)
- (8) ISO/IEC 15444-3, Motion JPEG2000 Committee Draft 1.0, (Mar. 2001)

後 藤 富 朗 (正員) 1997 年名工大・工・電気情報卒。1999 年同大学院博士前期課程了。2000 年同大電気情報助手。デジタル信号処理, 画像圧縮などの研究に従事。電子情報通信学会会員。

奥 村 剛 史 (非会員) 2001 年名工大・工・電気情報卒。2003 年同大学院博士前期過程了。同年日本特殊陶業入社。在学中, 色変換, 画像圧縮などの研究に従事。電子情報通信学会会員。

北 村 正 (非会員) 1973 年名工大・工・電気卒。1978 年東工大学院博士課程了。工博。以来, 名工大勤務。音声信号処理, マルチモーダル信号処理, バイオメトリック個人認証の研究に従事。現在, 同大教授。電子情報通信学会, 音響学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。

早 原 悦 朗 (非会員) 1962 年名工大・工・電気卒。1967 年東工大学院博士課程了。工博。以来, 名工大勤務。電子回路, 信号処理の研究に従事。2003 より中部大・工・情報教授。電子情報通信学会, IEEE 各会員。