

カラー成分間の相関を利用したSPIHTアルゴリズムによる静止画像圧縮 Still Image Compression by the SPIHT Algorithm based on the Relationship between Color Components

金田 海渡* 細谷 剛* 平澤 茂一*
Kaito KANEDA Gou HOSOYA Shigeichi HIRASAWA

Abstract—Recently, many still image coding algorithms have been studied. The SPIHT, one of the well-known still image coding algorithms, has shown its significant advantage for coding efficiency. The SPIHT is not only coding algorithm for grayscale image but also the one for color image. In this paper, we propose a new SPIHT algorithm by using the relationship between color components. We show by simulation results that the proposed algorithm has high compression performance.

Keywords—SPIHT, Color Image Compression, Relationship between Color Components

1 はじめに

近年、デジタルカメラなどの普及によりデジタル化された画像データを保存・伝送する機会が増加し、静止画像は非常に身近なものとなっている。一般に静止画像データは容量が大きなものとなるため、伝送や保存の際に圧縮して取り扱うことが多い。

静止画像圧縮の国際標準規格であるJPEG (Joint Photographic Experts Group) [1] では周波数変換にDCT (Discrete Cosine Transform: 離散コサイン変換) が用いられる。しかし、JPEG [1] におけるDCTは8×8画素のブロック単位で処理するため、低ビットレートにおいてブロック歪みが発生しやすいという問題点が存在する。

そこで、周波数変換にDCTではなくDWT (Discrete Wavelet Transform: 離散ウェーブレット変換) [2] を用いたJPEG2000 [3] が新たに国際標準規格として提案されている。またDWTを用いた静止画像圧縮アルゴリズムの中でゼロツリーと呼ばれる木構造の概念を効果的に用いたJ. M. ShapiroのEZW (Embedded Zerotree Wavelet) [4] がある。さらにEZWを拡張、改良した手法でA. SaidとW. A. PerlmanによるSPIHT (Set Partitioning In Hierarchical Trees) [5] を元とした画像圧縮アルゴリズムが近年盛んに研究されている。この手法の特徴として、(1) ビットストリームの途中までを取り出しても復号可能であるエンベデッド性を備え、また(2) ZTR (Zero Tree Root) 条件と呼ばれる複数の画素の情報を一度に出力可能な条件を発生させることにより符号化効率の改善を図っている。

また近年エンベデッド性を備えたままSPIHT [5] をカ

ラー画像へ適用するための研究が行われている。[6] では、輝度成分と色差成分間に仮想の親子関係を考え2つの色差成分の有意性を同時に判定することにより効率的な符号化を実現している。しかしこの手法は、輝度成分と色差成分には相関があるにも関わらず色差成分の2成分を同時に出力しているだけである。

そこで本研究では、輝度成分・色差成分の3成分の有意性を同時に判定し出力する手法を提案する。また標準画像 [7] を用いた検証実験により提案手法の有効性を示す。

2 準備

2.1 DWT (離散ウェーブレット変換) [2]

図1のように、原画像の各画素を水平方向に走査し低周波数成分と高周波数成分に周波数分解する手法である。次にその出力信号を垂直方向に走査し水平方向と同様の処理を行う。ここで、低周波数成分を1LL、水平方向の高周波数成分を1HL、垂直方向の高周波数成分を1LH、対角方向の高周波数成分を1HHとする。さらにウェーブレット変換を行う場合には低周波数成分1LLに対して同様の変換を行い、それぞれ2LL, 2HL, 2LH, 2HHとする。本研究では画素値を輝度成分と色差成分に変換した各係数に対してそれぞれウェーブレット変換を行う。

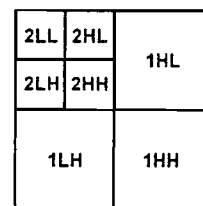


図1: DWT (離散ウェーブレット変換) の概念図

2.2 ゼロツリー [4]

ゼロツリーとはEZW [4] において新たに導入された概念である。DWTを行った後の変換係数に対してゼロツリーを構成することでより効率的な圧縮が可能となる。ゼロツリーとは同一周波数方向、同一空間にある係数を木構造として構成したものである。

一般にゼロツリーの根となる要素が、ある閾値に対して有意 (ある閾値より大きな値) でない場合、ゼロツリーに含まれる要素も同様に有意でないことが多いため、ゼロツリー全体を符号化対象とすることで複数の係数の情報を一度に出力することが可能となる。SPIHT [5] にお

* 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学理工学部経営システム工学科, School of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555 Japan.
E-mail: kaneda@hirasa.mgmt.waseda.ac.jp

ける木構造では最低解像度における成分を図2に示すように2×2単位で扱う。

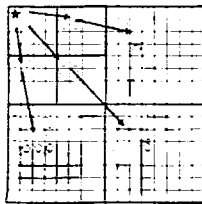


図2: SPIHTの木構造概念図

*は子孫を持たない。

3 従来手法

3.1 SPIHT アルゴリズムの概要 [5]

エンベデッド符号¹を考えた場合、画質に大きな影響を与える有意な係数を持つ座標を先に出力することができれば符号化効率の向上につながると考えられる。

EZW [4] では $xLL \rightarrow xHL \rightarrow xLH \rightarrow xHH \rightarrow \dots \rightarrow 1HL \rightarrow$

$1LH \rightarrow 1HH$ (x はウェーブレット変換回数) という走査順序 (以下、この走査順序を横型探索という) に完全に従い、係数の有意性を判定していくことにより xHL などのような低解像度の座標の係数を先に、 $1HL$ などのような高解像度の座標の係数は後に出力する。そのため、高解像度に有意な係数を持つ座標が存在する場合、その情報を後に出力してしまうことが問題点として挙げられる。

そこで、Saidらは横型探索を基本として、高解像度に存在する有意な係数を持つ座標を先に出力することが可能な (以下これを縦型探索という) SPIHT [5] と呼ばれる手法を提案した。SPIHT [5] では、有意でない係数を持つ座標集合リスト LIS (List of Insignificant Sets), 有意でない係数を持つ座標リスト LIP (List of Insignificant Pixels), 有意な係数を持つ座標リスト LSP (List of Significant Pixels) と呼ばれる3つのリストを用いて走査されるべき係数を追跡する。

3.2 SPIHT の定義

子集合 $O(i, j)$ を座標 (i, j) を根としたときのゼロツリーの1階層下の座標集合、子孫集合 $D(i, j)$ を座標 (i, j) を根としたときのゼロツリーの下全階層の座標集合とし、 $L(i, j)$ を以下の式で表す。

$$L(i, j) = D(i, j) \setminus O(i, j) \quad (1)$$

また H を最低解像度の座標集合とする。LIS において座標 (i, j) に対して子集合 $O(i, j)$ が含まれる場合にはリスト内ではタイプ A, 含まれない場合 (すなわち $L(i, j)$ のみ含まれる) にはタイプ B として格納される。

定義 [判別関数 $S_n(\Gamma)$]

$$S_n(\Gamma) = \begin{cases} 1 & (\text{if } |C_{i,j}| \geq 2^n, (i, j) \in \Gamma) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

¹ 圧縮されたデータのビットストリームの先頭から途中までを取り出しても復号可能な符号化法

- Γ は DWT 係数集合
- $C_{i,j}$ は座標 (i, j) における DWT 係数

□

式 (2) は n ビット目のビットプレーンにおける値の有意を判別する関数と考えることができる。

[SPIHT のアルゴリズム]

S1. Initialization

- (a) $n = \lfloor \log_2(\max_{(i,j) \in Y} |C_{i,j}|) \rfloor$ を求め、初期閾値 $T = 2^n$ とする。 $\lfloor x \rfloor$ は x を越えない最大の整数を示す。
- (b) $LIP = \{(i, j) \in H\}$ を格納する。
- (c) $LSP = \emptyset$ とする。
- (d) LIS には図2において H から * 成分を除いた集合をタイプ A として格納する。

S2. Sorting Pass

- (a) LIP の有意性判定
 - i $S_n(i, j)$ を出力
 - ii $S_n(i, j) = 1$ ならば (i, j) を LSP に移動し符号情報を出力する。
- (b) LIS の有意性判定
 - i タイプ A の場合
 - $S_n(D(i, j))$ を出力する。
 - 1 を出力した場合
 - * $(k, l) \in O(i, j)$ に対して $S_n(k, l)$ を出力する。
 - * 1 を出力したならば (k, l) を LSP に追加し符号情報を出力する。
 - * 0 を出力したならば (k, l) を LIP に追加する。
 - * $L(i, j) \neq \emptyset$ ならば (i, j) をタイプ B に変更して LIS の最後に追加し、 $L(i, j) = \emptyset$ ならば (i, j) を LIS から除去する。
 - ii タイプ B の場合
 - $S_n(L(i, j))$ を出力
 - 1 を出力した場合
 - * $(k, l) \in O(i, j)$ を LIS の末尾にタイプ A として追加する。
 - * (i, j) を LIS から除去する。

S3. Refinement Pass

現在の n での走査で追加された要素以外の LSP の (i, j) に対して n 番目のビットを出力する。

S4. Quantization Step $n := n - 1$ とし閾値を更新し、S2へ戻る。

□

3.3 カラー SPIHT [6] の定義

輝度成分に関しては SPIHT と同様の $O(i, j)$, $D(i, j)$, $L(i, j)$, H の集合を用いて同様のアルゴリズムである。さらに $O_c(i, j)$ を Cb, Cr の各色差成分における座標 (i, j) の集合, $D_c(i, j)$ を 2 つの色差成分において座標 (i, j) の子孫集合 (座標 (i, j) を含む) とする。このとき, $L_c(i, j)$ を以下の式で表す。

$$L_c(i, j) = D_c(i, j) \setminus O_c(i, j) \quad (3)$$

[カラー SPIHT のアルゴリズム]

S1. Initialization

- (a) $n = \lfloor \log_2(\max_{(i,j) \in Y, Cb, Cr} |C_{i,j}|) \rfloor$,
 $nc = \lfloor \log_2(\max_{(i,j) \in Cb, Cr} |C_{i,j}|) \rfloor$ を求め、初期閾値 $T = 2^n$ とする。
- (b) $LIP = \{(i, j) \in H\}$ を輝度シンボル Y と共に格納する。
- (c) $LSP = \emptyset$ とする。
- (d) LIS には図 2 において H から $*$ 成分を除いた集合をタイプ A として輝度シンボル l と共に格納する。また $(i, j) \in H$ をタイプ A として色差シンボル c と共に格納する。

S2. Sorting Pass

- (a) LIP の有意性判定
 LIP の各要素に対して $S_n(i, j)$ を出力し、
 $S_n(i, j) = 1$ ならば (i, j) をカラー成分シンボルと共に LSP に移動し符号情報を出力する。
- (b) LIS の有意性判定
 - (i, j) が輝度シンボル l と共に格納されていれば SPIHT と同様。
 - (i, j) が色差シンボル c と共に格納されていて $nc \geq n$ であれば $O_c(i, j)$, $D_c(i, j)$, $L_c(i, j)$ の概念を用いて図 3 のように 2 つの楕円内の係数をまとめて判定し SPIHT アルゴリズムを適用する。

S3, S4 に関しては SPIHT と同様。 □

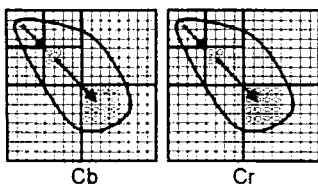


図 3: 従来手法の概念図

4 提案手法

4.1 従来手法の問題点

従来手法では、図 3 のように木構造として色差成分の最低解像度の成分を含めてゼロツリーの判定を行っているが、最低解像度の DWT 係数とその子孫集合の DWT 係数との間には直接的な関係はないので、同じ木構造として扱うのは妥当ではないと考えられる。

4.2 提案手法の着眼点

従来手法では 2 つの色差成分のゼロツリーを 1 つのシンボルとして出力することが可能である。しかし、輝度成分と色差成分間には相関があるため、3 成分を同時にゼロツリーの判定することを考える。また、図 4 に示すように最低解像度とその他の解像度の木構造を別々に扱うことにより、効率的な符号化が可能になると考えた。
[提案手法のアルゴリズム]

P1. Initialization

- (a) $n = \lfloor \log_2(\max_{(i,j) \in Y, Cb, Cr} |C_{i,j}|) \rfloor$,
 $nc = \lfloor \log_2(\max_{(i,j) \in Cb, Cr} |C_{i,j}|) \rfloor$ を求め、初期閾値 $T = 2^n$ とする。
- (b) LIP には Y , Cb, Cr それぞれの最低解像度の座標を各シンボルと共に格納する。
- (c) $LSP = \emptyset$ とする。
- (d) LIS には図 2 において H から $*$ 成分を除いた集合を Y , Cb, Cr それぞれタイプ A としてカラー成分シンボルと共に格納する。

P2. Sorting Pass

- (a) LIP の有意性判定
従来と同様。
- (b) LIS の有意性判定
 $nc \geq n$ ならば LIS の要素に同じ座標があるか (輝度・色差の各成分がそれぞれ格納されているか) 調べ、3 成分が存在すれば全ての要素の有意性を判定し、有意な係数が 1 つでも存在すれば各成分ごとに判定を行う。
 - タイプ A で格納されている場合
 - (i) LIS 内に 3 成分が同じ木構造である場合
 - * 図 4 において 3 つの楕円内全ての座標の係数が有意でなければ 0 を出力する。
 - * 1 つでも有意な係数があれば 1 を出力し、現在の (i, j) に対して単一色の SPIHT を適用。
 - (ii) LIS 内に同じ木構造がない場合
 - * 単一色 SPIHT と同様に、各成分単位の出力をする。
 - タイプ B で格納されている場合
 - (i) LIS 内に 3 成分が同じ木構造である場合
 - * 全て有意でなければ 0 を出力する。
 - * 1 つでも有意な係数があれば 1 を出力し、現在の (i, j) に対して単一色の SPIHT を適用。
 - (ii) LIS 内に同じ木構造がない場合

* 単一色 SPIHT と同様に、各成分単位の出力をする。

S3, S4 に関しては SPIHT と同様。 □

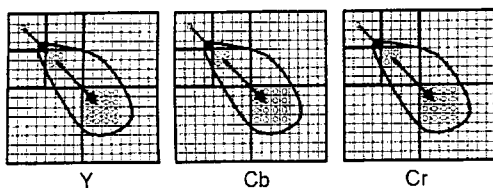


図 4: 提案手法の概念図

5 検証実験

5.1 実験条件

512×512 画素, 256 階調のカラー SIDBA(Standard Image Data-BAsE) 標準試験画像 [7] を用いて, 従来手法と提案手法の性能を調べた。またウェーブレット変換回数は 5 回とし, 出力系列に対して算術符号化などは行っていない。以下に Lena 画像の結果を示す。

5.2 実験結果

表 1 において Lena 画像に対する 1 画素あたりのビット数を表すビットレートと原画像に対する圧縮画像の歪みの度合いを示す指標である PSNR の関係を示す。図 5, 図 6 においてビットレートを約 0.05 [bits/pixel] としたときの従来手法と提案手法の復号画像を示す。

表 1: Lena 画像におけるビットレートと PSNR

bpp	従来手法	提案手法
0.03125	24.54[dB]	24.53[dB]
0.05	26.61[dB]	27.71[dB]
0.0625	27.97[dB]	28.24[dB]
0.125	28.85[dB]	28.85[dB]



図 5: 従来 (26.61[dB]) 図 6: 提案 (27.71[dB])

6 結果の考察

表 1, 図 5, 図 6 より従来手法に比べ, 同一ビットレートにおける画質が改善されていることがわかる。以下で考察を述べる。

- (1) 表 1 より, 客観評価における PSNR は同一ビットレートにおいて上回っているか, またはほぼ同等である。これは, 提案手法では 3 成分同時に出力したか否かの判別ビットが必要となるが, 従来手法では色差成分を輝度成分の子孫という木構造を

仮定することにより, 1 階層多い木構造となっており総出力ビット数に大差ないが提案手法の方がより効率的に符号化できたためと考えられる。

- (2) 時間計算量に関して, 提案手法では LIS の走査時に他の成分の同じ木構造がリスト内に存在するか否かを検索するため, 従来手法と比べて計算量が増加した。
- (3) 主観評価として, エッジの再現性に関してはほぼ同等であったが, 色合いの点で提案手法のほうがより鮮明に色合いを再現していることを確認した。これは 3 成分を同時に出力したことにより出力ビットを省略でき, 重要な色成分をビットストリームの先方に出力できたためと考えられる。
- (4) 他の画像に関しても有意性に差はあるものの, 従来手法よりも上回っているかほぼ同等である結果が得られた。

7 まとめと今後の課題

SPIHT アルゴリズムのカラー画像への適用において, 輝度・色差間の相関を考慮し 3 成分のゼロツリーを同時に出力可能なアルゴリズムを提案し, エンベデッド性を備えたまま符号化効率の改善を図った。その結果, 高圧縮時に有効な結果を示した。また, 提案手法はカラーの 3 成分を同時に出力するため, 色合いの再現性で優れていることは特筆すべきであろう。

今後の課題としては, 3 成分を同時に出力するためにかかる計算量を削減するための効率のよいアルゴリズムへの改良, さらに動画画像への適用などが挙げられる。

8 謝辞

著者の一人である金田は, 本研究を行うにあたり数多くのご助言, ご支援を賜りました早稲田大学平澤研究室の各氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] G. K. Wallace, "The JPEG still picture compression standard," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 38, pp. 18-34, Feb. 1992.
- [2] 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫, ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版株式会社, 1999.
- [3] ISO/TEC JTC1/SC29 WG1, "JPEG2000 Part 1 Final Committee Draft Version 1.0," *ISO/IEC FCD15444-1*, March. 2000.
- [4] J. M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, pp. 3445-3463, Dec. 1993.
- [5] A. Said and W. A. Pearlman, "A new, fast, and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees," *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, pp. 243-250, June 1996.
- [6] A. Bouridane, F. Khelifi, A. Amira, F. Kurugollu and S. Boussakta. "A very low bit-rate embedded color image coding with SPIHT," *IEEE International Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing (ISASSP2004)* pp. 689-692. 2004.
- [7] The USC-SIPI Image Database: <http://sipi.usc.edu/database/>