

可逆性を有するファイルサイズ不変な画像処理技術の開発

研究代表者 今 泉 祥 子 千葉大学大学院情報学研究院

1 はじめに

スマートフォンやこれに付随するカメラの高性能化が進み、撮影した画像に画像処理を施し、ホームページやSNSなどのインターネットサービスを介して公開・共有する機会が急速に増えている。画像編集は容易である一方、編集を重ねることで意図しない出力結果となることも多く、このような場合、編集前の画像に戻すことが要求される。特に、医用画像や衛星画像、捜査における証拠画像などでは、しばしば明瞭性を向上する処理が求められる一方、もとの画像に完全に戻す機能も必要とされる。

しかし、一般的な画像処理は非可逆処理であり、一度処理を加え保存すると、もとの画像に戻すことは困難である。既存のアプリケーションでは、もとの画像に戻すため、処理後の画像データとは別に、編集履歴、または、原画像自身のデータを保存する。そのため、可逆性を有効とするためには処理後のファイルサイズが、処理前と比較して大きく増加するという課題が生じている。

これに対して、情報埋込み技術を利用することでファイルサイズ不変のもとで可逆性を保証する手法が研究されている。WuらはHistogram Shifting法（以降、HS法）に基づき、グレースケール画像に対する可逆なコントラスト強調手法を提案した[1]。この手法ではコントラスト強調を実現するとともに、復元のための情報を処理後の画像に埋め込むことにより、原画像への完全な復元を可能とする。一方、この手法をカラー画像に直接適用する場合、色歪みが生じる可能性がある。そこで、Wuらは、カラー画像に対して可逆なコントラスト強調を実現した[2]。しかしながら、この手法は、多くの場合で完全な可逆性は保証されない。

この問題に対して、著者らは、画像セキュリティ技術の一つである情報埋込み技術を応用し、ファイルサイズを一切増加させることなく、可逆な画像処理技術を実現する先駆的な研究を行ってきた[3-5]。Sugimotoらは、完全な可逆性を保証しつつ、コントラスト強調だけでなく、輝度向上・低下、鮮鋭化・平滑化、彩度向上の複数の処理を可能とした[3,4]。さらに、Nakayaらは、カラー画像の色相に注目し、赤み・青みに対する色調強調手法を提案した[5]。しかし、これまでの可逆画像処理手法は、画像全体を処理対象としており、画像の一部に対する局所的な処理は検討されていない。

このような背景から、本研究では以下の二つの観点から可逆画像処理技術の向上を図った。第一に、興味領域（Region of Interest, 以降 ROI）を任意に設定し、この領域に対する自然な可逆画像処理を実現した[6]。これまでの研究成果を単純に応用した場合、処理対象となるROIと、処理対象ではない非興味領域の境界に明瞭なエッジが発生してしまう。これに対して本研究では、境界を平滑化するとともに、複数のROIに対して独立した異なる処理を実現する。本研究では、選択領域間で異なる処理を施すことを想定している。また、画像処理の効果は、処理回数のパラメータにより制御する。一方、この処理の実現には、領域の位置や範囲、処理の内容など、可逆性を保証するために必要な情報（以降、復元情報）量の増大が伴う。一般的に、埋め込まれる復元情報の量が多いほど、画像に生じる歪みは大きくなる。そこで、復元情報量の削減と、埋込みによる歪みを低減するとともに高い埋込み効率をもつアルゴリズムを開発した。

第二に、高ダイナミックレンジ画像（以降、HDR画像）に対する応用を行った[7,8]。HDR画像は、一般的な標準ダイナミックレンジ画像（以降、SDR画像）と比較してビット深度が大きく、より高い色精度をもつ。本研究では、OpenEXR形式のHDR画像（以降、OpenEXR画像）に着目し、符号部、指数部、仮数部からなる構造や、浮動小数点数で表現され、より広い幅をもつ画素の扱いを検討しながら、HDR画像に対する可逆な画像処理を追求した。また、SDR画像に対する処理よりも復元情報が多くなることが見込まれる。一方で、ここでの復元情報には冗長性が含まれることが期待できる。そこで、この冗長性を利用し、圧縮による情報量削減を検討した。

2 自然な境界をもったROIに対する可逆画像処理

ここでは、さまざまな画像処理を任意のROIに対して適用可能な手法を提案する[6]。提案法の新規性は、処理の可逆性およびファイルサイズの不変性を確保しつつ、ROIとnon-ROI（以降、nROI）の間に明瞭な境

界を生じさせることなく、部分的な画像処理を実現したことである。提案法では、先行手法[3, 4]と同様に、輝度向上・低下、鮮鋭化・平滑化、コントラスト強調、および、彩度向上の処理が可能である。なお、彩度向上以外の 5 種類の処理は、いずれも輝度に対する処理となる。また、提案法では先行手法[5]に基づき、赤みおよび青みの色調の強調も可能である。

2-1 処理手順

2-1-1 ROI に対する処理

図 1 に示すように、提案法では、まず ROI を抽出する。抽出された ROI に対し、上述の 8 種類の処理のいずれか、または、複数の処理を施し、nROI と結合する。上記により生成される中間画像では、原画像を復元するための情報が含まれていない。そこで、この中間画像全体を対象として、復元情報を中間画像に埋め込み、最終的な処理画像を得る。以下では、各手順について詳しく説明する。

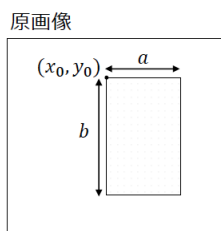
(1) ROI の抽出

提案法では、まず、ROI を抽出し、抽出された ROI に対して可逆画像処理を施す。ここで、後述するように、ROI には任意の矩形または円形での領域選択が可能である。図 1(a) に示すように、対象となる ROI が矩形の場合、その矩形領域の左上の頂点座標 (x_0, y_0) 、水平方向の長さ a 、および、垂直方向の長さ b が復元情報として保存される必要がある。一方、図 1(b) に示すように、対象となる ROI が円形の場合には、その円形領域の中心点座標 (x_0, y_0) 、水平方向の半径 a 、および、垂直方向の半径 b が復元情報となる。ROI の抽出において生じるこれらの復元情報を抽出情報と呼ぶ。また、抽出情報には、対象領域が ROI か nROI かを指定するための 1 ビット、対象領域の形状を指定するための 1 ビットも含まれる。

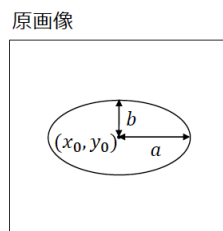
(2) ROI に対する画像処理

ここでは、抽出された ROI に対して画像処理を行う。処理対象の ROI と対象外の nROI との境界を自然に表現するため、提案法では ROI に対して段階的な処理を施す。具体的には、図 2(a) に示すように、ある一定間隔 m で処理の対象領域を順に縮小させながら、対象領域で処理を繰り返す。したがって、同図において内側の領域ほど処理回数が多くなり、画像処理の効果はより高くなる。ここで、対象領域の形状を保持するために、水平方向と垂直方向に対する m は同じ値とする。また、 m は復元情報として保存される。一方、図 2(b) に示すように、提案法では、ROI を反転して nROI に処理を施すことも可能である。

なお、いずれの領域に対する処理においても、それぞれの処理において異なる復元情報が生じる。この復元情報を処理情報と呼ぶ。

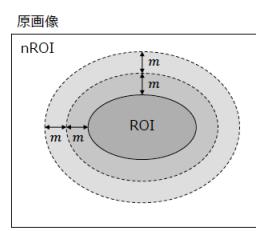


(a) 矩形領域

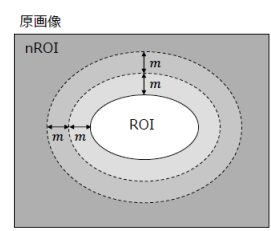


(b) 円形領域

図 1: ROI の抽出



(a) ROI の場合



(b) nROI の場合

図 2: 円形 ROI に対するグラデーション処理

2-1-2 復元情報の埋込み

処理画像から原画像の復元を可能とするために、前節で述べた抽出情報と処理情報を復元情報として、中間画像に埋め込む。この復元情報を中間画像に埋め込むことで、出力となる処理画像が生成される。

2-2 シミュレーション

ROI に対する各処理の効果について評価し、提案法の有効性を明らかにするとともに、情報埋込みが処理画像の画質に与える影響を議論する。試験画像には、Kodak Lossless True Color Image Suite[9]のカラー画像 24 枚 (512×768 または 768×512 画素) と McMaster データセット[10]の画像 18 枚 (500×500 画素) を使用した。輝度向上・低下、コントラスト強調の処理回数を 30 回、彩度向上の処理回数を 20 回、鮮鋭化・平滑化の処理回数を 2 回、間隔 m を 1 に設定した。また、赤み・青み強調の場合は、処理回数を 15、 m を 3 に設定した。

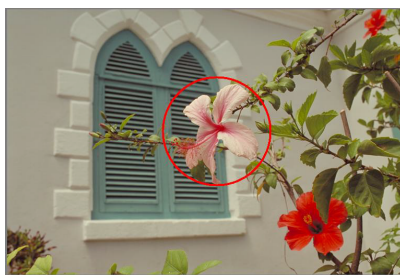
2-2-1 ROI に対する画像処理の効果

一例として、図 3(a) に示すように、kodim07 から円形 ROI を抽出した。赤枠で囲まれた領域は ROI を示し、この ROI に対して画像処理を施す。生成された処理画像を図 3(b)–(i) に示す。同図より、提案法では、設定された ROI に対してのみ各画像処理が有効に適用され、また ROI と nROI の境界が、 m による段階的な処理によって自然に表現できていることがわかる。なお、他の画像についても同様の結果が得られている。

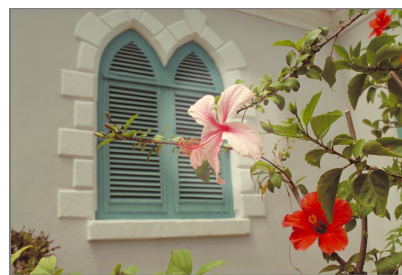
2-2-2 情報埋込みが処理画像の画質への影響

提案法では、復元に必要な情報を中間画像に埋め込むことで可逆性を保証する。そこで、情報埋込みが処理画像の画質に与える影響を確認する。表 1 に、図 3(b)–(i) に対する各処理での埋込み前後、すなわち、中間画像と処理画像間の PSNR、SSIM および CIEDE2000 をそれぞれ示す。同表より、いずれの処理においても、PSNR、SSIM はともに高い値を、CIEDE2000 の値は 0 に近い小さい値をそれぞれ示すことから、情報埋込みが画質に与える影響は小さいことがわかる。

また、試験画像 42 枚の各処理に対して、原画像と復元された画像の間の PSNR を算出し、可逆性の評価を行った。いずれの場合においても、PSNR は ∞ を示したことから、各処理において可逆性を保証することが示された。



(a) 円形 ROI の抽出例



(b) 輝度向上



(c) 輝度低下



(d) 鮮鋭化



(e) 平滑化



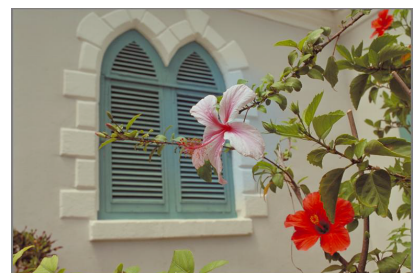
(f) コントラスト強調



(g) 彩度向上



(h) 赤み強調



(i) 青み強調

図 3: 円形 ROI に対する処理結果 (kodim07)

表 1: 情報埋込みによる画質への影響

		PSNR[dB]	SSIM	CIEDE2000
kodim07(円形)	輝度向上	64.35	0.9999	0.0188
	輝度低下	62.02	0.9999	0.0343
	鮮鋭化	63.03	0.9999	0.0255
	平滑化	56.90	0.9999	0.1030
	CE	61.58	0.9999	0.0368
	彩度向上	69.24	0.9999	0.0075
	赤み強調	68.50	0.9999	0.0435
	青み強調	67.54	0.9999	0.0322

*CE: コントラスト強調

3 OpenEXR 画像に対する応用

本章では, OpenEXR 画像に対し, 多様な画像処理を可逆に実現する手法を提案する[7, 8]. 従来の可逆画像処理手法はおもに SDR 画像を対象としており, HDR 画像への適用は十分に検討されていない. そこで本研究では, OpenEXR 形式の HDR 画像を対象として, 可逆画像処理技術の適用範囲の拡張を図る. いずれの画像処理機能を適用する場合においても, 提案法の処理は, 前処理, 画像処理, 復元情報の埋込みに大別される. 以下では, 各処理について詳しく述べる.

3-1 処理手順

3-1-1 前処理

提案法のおもな新規性は, 前処理を導入した点にある. 前処理では, 16 ビット浮動小数点数形式で表される OpenEXR 画像の画素値を整数に変換する. 量子化間隔が均一でない浮動小数点数を, 間隔が一定な整数値に変換することで, OpenEXR 画像に対して先行手法[3-5]が適用可能となる.

3-1-2 画像処理

前処理が施された画像に対して画像処理を行う. 以下では, 先行手法[3, 4]に基づいて行われる彩度および輝度に対する処理[7]と, 先行手法[5]に基づいて行われる色調に対する処理[8]に分けて説明する.

(1) 彩度または輝度に対する処理

HSV 色空間を参照し, 彩度または輝度に対する処理を施す. まず, 各画素の R, G, B 値を降順に Max , $Median$, Min へ割り当てる. 次に, 彩度に対する処理では Min を, 輝度に対する処理では Max および Min をそれぞれ操作することで, 彩度または輝度の制御を行う. その後, これらの制御に伴い生じる色相の歪みを修正するため, $Median$ を操作する. ここまでの処理により, Max' , $Median'$, Min' が得られる. 最後に, 可逆性を保証するため, Max' , $Median'$, Min' の大小関係を調整し, $\overline{Max}$, $\overline{Median}$, $\overline{Min}$ を得る.

彩度に対しては向上処理が可能であり, 輝度に対する処理では, コントラスト強調, 向上・低下, または, 鮮鋭化・平滑化の中から一つを選択できる. 彩度の向上, コントラスト強調, および, 輝度の向上・低下は, 先行手法[3, 4]と同様に Max または Min のヒストグラムをシフトさせることで実現され, シフト回数をパラメータとして設定することで, 強度を制御できる. 一方, 鮮鋭化・平滑化においては, 任意のオペレータサイズで処理ができるようアルゴリズムを拡張している. 以下では, アルゴリズムが拡張された鮮鋭化・平滑化処理について詳細に述べる.

鮮鋭化・平滑化処理においては, まず, 図 4(a)に示すように, 各画素の Max をその座標に応じてターゲット領域と参照領域に割り当てる. 次に, ターゲット領域に属する各画素に対し, 参照領域に属する画素および $k \times k$ ($k = 2m + 1, m \in \mathbb{N}$) オペレータを用いて, Max を Max' に更新する.

図 4(c), (d)に, $k = 9, m = 4$ を例として, 鮮鋭化および平滑化におけるオペレータのターゲット画素, 参照画素をそれぞれ示す. なお, ターゲット画素とは, オペレータの適用により値が更新される画素を指し,

参照画素とは、更新に用いられる参照領域内の画素を指す。

鮮鋭化では、ターゲット画素を中心とした $k \times k$ の範囲内に存在する参照領域のすべての画素が参照画素となる。ターゲット画素 $x(i, j)$ に対し、これらの参照画素を用いて、

$$x'(i, j) = \text{round} [2 \cdot x(i, j) - (x(i, j) + \text{Ref}) / (n + 1)] \quad (1)$$

により処理を行う。ここで、 $x'(i, j)$ は更新後のターゲット画素、 n は参照画素の個数であり、 Ref は参照画素の値の総和を示す。

一方、平滑化では、 $k \times k$ の範囲内に存在する参照領域のうち、図 4(d) に示す 4 画素のみが参照画素となる。ターゲット画素 $x(i, j)$ に対し、これら四つの参照画素を用いて、

$$x'(i, j) = \text{round} [(x(i, j) + \text{Ref}) / 5] \quad (2)$$

により処理を行う。

提案法では、オペレータサイズ k をパラメータとして設定可能であり、処理回数と併せて鮮鋭化・平滑化の強度を柔軟に制御できる。ただし、処理を繰り返す場合は、図 4(b) に示すように、ターゲット領域と参照領域をその都度入れ替える。なお、両処理において、 $k \times k$ オペレータを適用できないターゲット画素に対しては、例外の処理を施す。

最後に、彩度を保持するため、 Min の値を修正し、 Min' を得る。以上の処理により、鮮鋭化・平滑化が施される。

(2) 色調に対する処理

色調に対する処理では、 YD_bD_r 色空間を参照することにより、画像の青みまたは赤みを強調できる。まず、画像全体に一定の値を加算し、全画素の値を 0 以上にする。次に、RGB 色空間を YD_bD_r 色空間に変換し、 $\text{D}_b\text{-D}_r$ 平面上に参照領域を設定する。なお、参照領域の位置や範囲を調整することで、変調強度を制御できる。その後、参照領域に属する画素を用いて補正係数を算出し、B 成分および R 成分に乗算する。最後に、処理の初めに加算した値を画像全体から減算する。

ここで、加算処理について説明する。OpenEXR 画像では、画素値に負の値が定義されている。負の画素値をもつ画像においても適切な色調制御を可能とするため、提案法では色調に対する処理において加算処理を導入している。前処理後の画像における画素の最小値を $I_{\min}$ とし、 $I_{\min}$ が 0 未満である場合には、画像全体に一律で $|I_{\min}|$ を加算することにより、すべての画素値を 0 以上にシフトさせる。このように、画素値の最小値が 0 以上であることを保証した上で補正係数の算出および乗算を行うことにより、もとの画素値の正負にかかわらず選択した色味を強調できる。

3-1-3 復元情報の埋込み

前節の画像処理が施された画像に対し、画像の予測誤差ヒストグラムへ情報を埋め込む手法である、Prediction-Error Expansion with Histogram Shifting (PEE-HS) 法[11]を用いて復元情報を埋め込む。これにより、ファイルサイズを変化させることなく、原画像を復元できるようになる。復元情報の埋込み後、前処理により整数に変換されていた各画素値を浮動小数点数形式へ再変換することで、出力画像を生成する。

3-2 シミュレーション

提案法における各処理の有効性を評価するため、シミュレーションを行った。シミュレーションには、The HDR Photographic Survey[12]の 15 枚の OpenEXR 画像を用いた。図 5 に、各処理による出力画像の例を示す。同図より、各処理が有効に機能していることが視覚的に確認できる。また、各出力画像に対して復元処理を

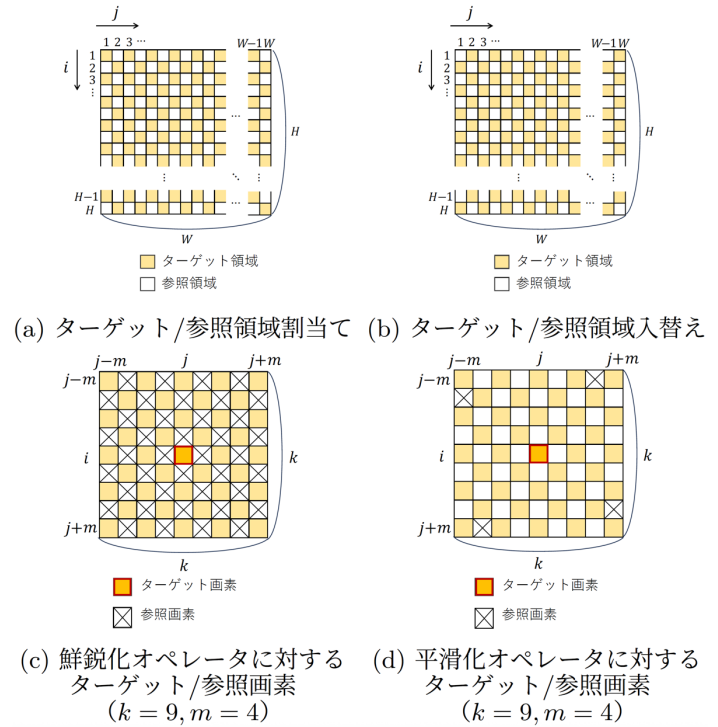


図 4: 鮮鋭化・平滑化におけるオペレータの適用

適用し、得られた画像の全画素値を原画像と比較した結果、すべて一致していた。この結果から、提案法において処理の可逆性が保証されていることが示された。



図 5: 各処理における出力画像

4 まとめ

本研究では、情報埋込み技術を利用したファイルサイズ不変な可逆画像処理技術について、先行手法では十分に検討されていなかった局所領域への適用および HDR 画像への適用に取り組んだ。その結果、それぞれに対応した可逆画像処理手法を開発し、可逆画像処理技術の実用性と適用範囲を大きく拡張した。

まず、自然な境界をもった局所的な可逆画像処理手法を提案した。シミュレーションにより、各処理が選択された ROI に対して有効であり、また、復元情報の埋込みが処理画像の画質に与える影響は極めて小さいことを確認した。今後は、重なり合う ROI や互いに近い距離にある ROI に対する対応を検討し、実装および評価を行う予定である。

さらに、これまでおもに SDR 画像を対象としていた可逆画像処理技術を OpenEXR 画像へ拡張し、HDR 画像に対してもファイルサイズを変化させることなく、彩度、輝度および色調に対する画像処理を可逆に実現する手法を提案した。提案法では、復元情報を画像のボディデータに埋め込むことで、可逆性を保証しながらファイルサイズを維持できる。シミュレーションにより、提案法に基づく各画像処理が有効に機能することを示すとともに、復元処理によって原画像が完全に再構成されることを確認した。

【参考文献】

- [1] H.-T. Wu, J.-L. Dugelay, and Y.-Q. Shi, “Reversible image data hiding with contrast enhancement,” *IEEE Sig. Process. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 81–85, 2015.
- [2] H.-T. Wu, Y. Wu, Z. Guan, and Y.-m. Cheung, “Lossless contrast enhancement of color images with reversible data hiding,” *Entropy*, vol. 21, no. 910, 2019.

- [3] Y. Sugimoto and S. Imaizumi, "An extension of reversible image enhancement processing for saturation and brightness contrast," *J. Imaging*, vol.8, no.27, 2022.
- [4] Y. Sugimoto and S. Imaizumi, "Reversible image processing for color images with flexible control," *Appl. Sci.*, vol.13, no.2297, 2023.
- [5] D. Nakaya and S. Imaizumi, "An extended method for reversible color tone control using data hiding," *Electronics*, vol.13, no.1204, 2024.
- [6] Y. Zhang and S. Imaizumi, "A partial image processing method with full reversibility for smooth boundary representation," *Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan*, vol.35, no.2, pp.9-18, 2025.
- [7] A. Yamaguchi and S. Imaizumi, "Lossless image processing for OpenEXR images with flexible functions," in *Proc. of APSIPA Annual Summit and Conference*, 2025.
- [8] 山口晏菜, 今泉祥子, "OpenEXR 画像に対するファイルサイズ不変な可逆色調制御法," 日本写真学会年次大会, no.DP-01, p.33, 2026 年.
- [9] "Kodak lossless true color image suite." Available online: <http://www.r0k.us/graphics/kodak/>. (Accessed on 7 May 2025).
- [10] L. Zhang and X. Wu, "Cdm dataset: McMaster color demosaicking dataset." Online, 2011. (Accessed on 7 May 2025).
- [11] D.M. Thodi and J.J. Rodriguez, "Expansion embedding techniques for reversible watermarking," *IEEE Trans. Image Process.*, vol.16, no.3, pp.721-730, 2007.
- [12] [Online] <http://markfairchild.org/HDRPS/HDRthumbs.html> (accessed on 19 January 2026).

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
OpenEXR 画像のための可逆画像処理に対する機能向上	電子情報通信学会高機能マルチメディア研究会	2025 年 5 月
ファイルサイズ不変な可逆画像処理技術	光技術コンタクト	2025 年 6 月
A Partial Image Processing Method with Full Reversibility for Smooth Boundary Representation	Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan	2025 年 11 月
Lossless Image Processing for OpenEXR Images with Flexible Function	APSIPA Annual Summit and Conference 2025	2025 年 12 月
OpenEXR 画像に対する可逆色調制御	電子情報通信学会音声研究会	2026 年 3 月
OpenEXR 画像に対するファイルサイズ不変な可逆色調制御法	日本写真学会年次大会	2026 年 5 月