

1. 研究の背景と目的

近年、文書や動画、音声など様々なデータがデジタル化され、デジタルコンテンツとして処理されるようになった。これに伴い、各種権利の含まれるデザインや写真データなどが不正コピーされ、ネット上に拡散されるという著作権の侵害が問題視されている。この問題に対処するための技術として、電子透かしという技術がある。電子透かしは、人間の目では知覚できないように、デジタルコンテンツに著作者名や利用許諾者名などの透かし情報を埋め込む技術である[1]。これにより、デジタルコンテンツが不正コピーされたとしても、その著作権を主張することができる[2]。電子透かしは、コンテンツの品質と埋め込み情報量にトレードオフの関係がある。画像の場合は、多くの情報を埋め込むと画質が落ちてしまう。本論文では、画質の劣化を抑え、従来手法よりも大容量の埋め込みを実現する手法の検討を行った。

2. 電子透かしの原理

電子透かしには様々な方式があり、代表的なものに差分拡大法[3]という方式がある。これは、隣接する画素の差分値を 2 倍することで、透かし情報を埋め込む空間を作り出す手法である。差分拡大法では、図 1 に示すように、縦 h 画素×横 w 画素の画像を、縦 a 画素×横 b 画素のブロックに分ける。そのブロックの同じ色成分のうち、 N 画素の画素値をベクトル $\mathbf{u} = (u_0, u_1, \dots, u_{N-1})$ とする。続いて、以下の変換式を用いてベクトル \mathbf{u} をベクトル \mathbf{v} ($\mathbf{v} =$

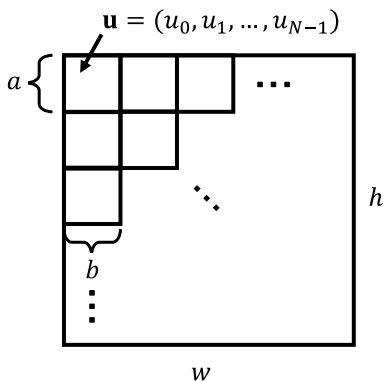


図 1 : 画像内におけるベクトル \mathbf{u}

$(v_0, v_1, \dots, v_{N-1})$) に変換する。

$$\begin{aligned} v_0 &= \left\lfloor \frac{\sum_{i=0}^{N-1} a_i u_i}{\sum_{i=0}^{N-1} a_i} \right\rfloor \\ v_1 &= u_1 - u_0 \\ &\vdots \\ v_{N-1} &= u_{N-1} - u_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 a_i は整数の定数である。ベクトル \mathbf{v} が求まると、 $v_1 \sim v_{N-1}$ に対して情報を埋め込む。埋め込む 1 ビットの情報を $b_1, b_2, \dots, b_{N-1} \in \{0, 1\}$ とすると、情報埋め込み後のベクトル $\tilde{\mathbf{v}}$ ($\tilde{\mathbf{v}} = (v_0, \tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_{N-1})$) は以下の通りになる。

$$\begin{aligned} v_0 &= \left\lfloor \frac{\sum_{i=0}^{N-1} a_i u_i}{\sum_{i=0}^{N-1} a_i} \right\rfloor \\ \tilde{v}_1 &= 2 \times v_1 + b_1 \\ &\vdots \\ \tilde{v}_{N-1} &= 2 \times v_{N-1} + b_{N-1} \end{aligned} \quad (2)$$

その後、以下に示す(1)式の逆変換によって情報埋め込み後の画素値 $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_{N-1})$ を求める。ただし、得られた画素値にオーバーフロー、アンダーフローが生じた場合は情報を埋め込むことはできない。

$$\begin{aligned} \tilde{u}_0 &= v_0 - \left\lfloor \frac{\sum_{i=0}^{N-1} a_i \tilde{v}_i}{\sum_{i=0}^{N-1} a_i} \right\rfloor \\ \tilde{u}_1 &= \tilde{v}_1 + \tilde{u}_0 \\ &\vdots \\ \tilde{u}_{N-1} &= \tilde{v}_{N-1} + \tilde{u}_0 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 従来の整数型 DCT を用いた差分拡大法による埋め込み

先行研究として、画素値に対して整数型離散コサイン変換(DCT : Discrete cosine transform)を行い、得られた係数に差分拡大法を適用して情報を埋め込む手法が提案されている。DCT は、離散信号を様々な周波数・振幅を持つ余弦関数の組み合わせに変換する手法であり、画像や音声データなどの圧縮に多用されている[4]。この手法では、画素値そのものに差分拡大法を適用して情報を埋め込む方式よりも、埋め込み情報量や PSNR などの性能が高くなる。図

2に従来手法の概要を示す。まず、画像をブロックに分割してDCTを行う。ここでは、4画素×4画素のブロックに分割してDCTを行った場合を考える。DCT後の係数は、左上の係数が直流成分で、右下に行くほど高周波成分となる。自然界の画像はなだらかで変化が少ないので、高周波成分はあまり含まれていない。そのため、高周波成分のLSBが1ビット変化しただけでは画質にほとんど影響しない。そこで、高周波成分の係数に対して差分拡大法を適用する。ここでは、赤線で囲んだ4箇所の係数に対して差分拡大法を適用し、3ビットの透かし情報 $\{b_1, b_2, b_3\} = \{1, 0, 1\}$ を埋め込む場合を考える。 $\mathbf{u} = (-1, -1, 0, 0)$ を、(1)式の $a_i = 1$ としてベクトル \mathbf{v} に変換すると、 $\mathbf{v} = (-1, 0, 1, 1)$ となる。(2)式より、透かし情報埋め込み後のベクトル $\tilde{\mathbf{v}}$ は、 $\tilde{\mathbf{v}} = (-1, 1, 2, 3)$ となる。(3)式より、 $\tilde{\mathbf{v}}$ を $\tilde{\mathbf{u}}$ に変換すると、 $\tilde{\mathbf{u}} = (-2, -1, 0, 1)$ となり、逆DCTを行うことで情報埋め込み後の画素値が求まる。

4. 係数 v_0 を変更した際の評価

従来手法では、一般化差分拡大法を適用する際に情報埋め込み後の係数を算出する(3)式で使用される係数 v_0 はベクトル \mathbf{u} の加重平均であるとしていた。

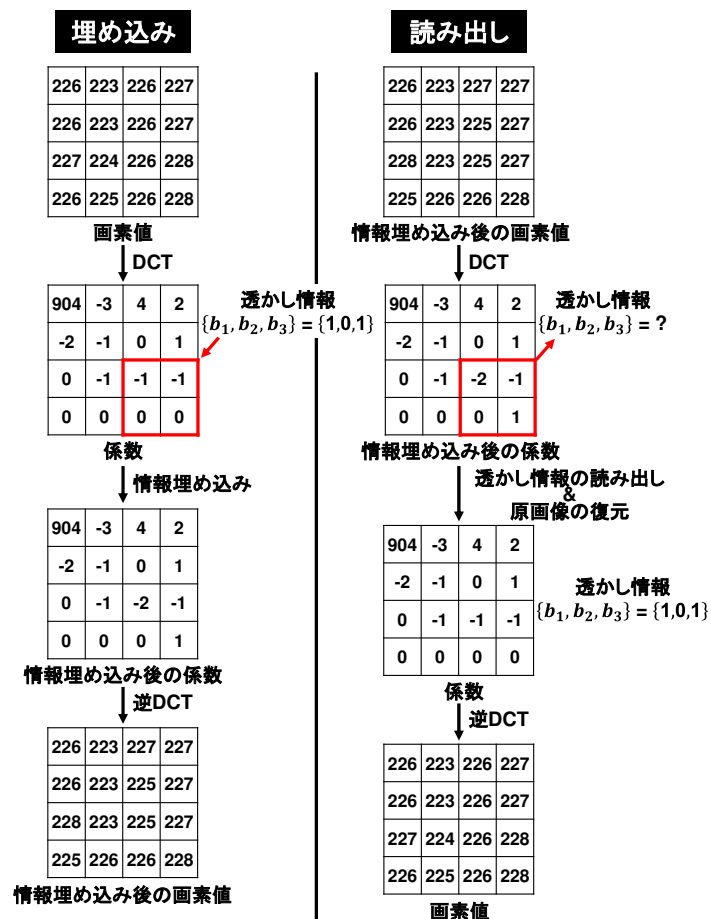


図2：従来手法の概要

(3)式より、情報埋め込み後の係数 $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_{N-1})$ は、 v_0 の値により変化するので、係数 v_0 の値が変われば最終的な埋め込み結果も変わるはずである。本研究では、基準となる係数 v_0 の値をベクトル \mathbf{u} の平均値(従来手法)と、ベクトル \mathbf{u} の中間値、最小値、最大値の3つで比較し、埋め込み情報量やPSNRなどの性能評価を行った。なお、本実験での平均値とは、係数 v_0 の加重平均の重みを加えない($a_i = 1$)もとの同等の意味である。図3に v_0 の値変更のイメージを示す。

本研究では入力画像にLennaとMandrillを用い、DCTによって得られた16個の係数のうち、4箇所、6箇所、8箇所、10箇所、12箇所に対して差分拡大法による情報の埋め込みを行ったが、ここでは4箇所の結果のみを示す。図4、図5に、埋め込み情報量に対するPSNR及びSSIMの結果を示す。また、表1に4箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量とそのときのPSNRを示す。入力画像がLennaとMandrillどちらの場合も、 v_0 はベクトル \mathbf{u} の平均値の 때가一番

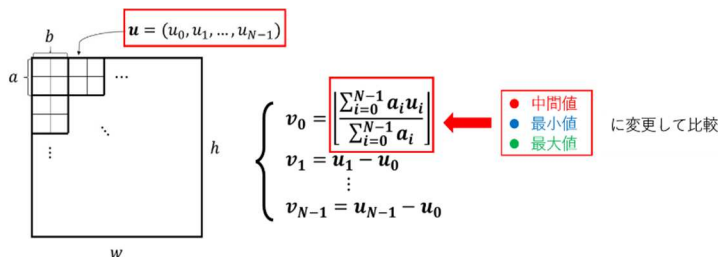


図3： v_0 の値変更のイメージ

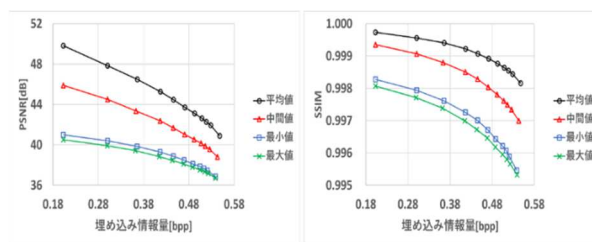


図4：Lennaにおける4箇所埋め込みの際の(a)PSNRと(b)SSIM

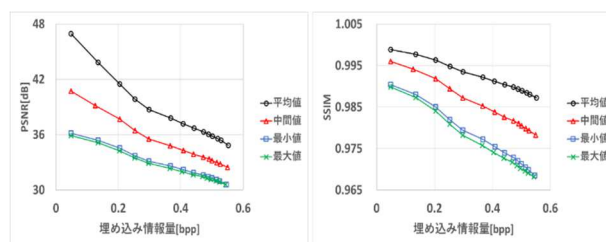


図5：Mandrillにおける4箇所埋め込みの際の(a)PSNRと(b)SSIM

良い埋め込みができることが確認できた。この理由としては、 v_0 の値をベクトル \mathbf{u} の中間値、最小値、最大値と設定した場合、平均値で設定した場合よりも情報埋め込み後のそれぞれの係数 $\tilde{\mathbf{u}} = (\tilde{u}_0, \tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_{N-1})$ の値の振れ幅が増大してしまい、係数を画素値に戻したときにオーバーフローやアンダーフローが起りやすくなり、埋め込み情報量の低下や画質の悪化につながるのではないかと考えられる。

5. Haar 変換(整数型離散ウェーブレット変換)を用いた差分拡大法による埋め込み

従来手法で差分拡大法と組み合わせた整数型離散コサイン変換は、画像圧縮方式の代表である JPEG で採用されているが、この手法よりも更に「情報埋め込み量の増加と画質劣化の抑制の両立」を目指し、JPEG より圧縮効率の良い画像圧縮方式である JPEG2000 で利用されている整数型離散ウェーブレット変換の代表格である Haar 変換を差分拡大法と組み合わせて提案した。

情報埋め込みイメージを図 6 に示す。ここでは、例として 4 箇所埋め込みの場合について考える。従来手法では画素値を整数型離散コサイン変換で係数にし、差分拡大法を行うことで情報埋め込みをしていたのに対し、提案手法では、画素値を Haar 変換(整数型離散ウェーブレット変換)で係数にし、差分拡大法を行うことで情報埋め込みを行った。

具体的には、従来手法と同じく、画像全体を 4×4 の画素値のブロックに分け、そこに対し Haar 変換を行い、4 つのサブバンド(低周波数成分 LL1 と三つの高周波数成分 LH1, HL1, HH1)に分け、HH1 成分に情報埋め込みを行った。情報埋め込みイメージを図 6 に示す。本研究では、4 箇所、6 箇所、8 箇所、10 箇所埋め込みの場合において、従来手法と提案手法の比較を行った。

6. 実験結果

図 7、図 8 に、4 箇所埋め込みの際の埋め込み情報量に対する PSNR 及び SSIM の結果を示し、図 9、

表 1 4 箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量とそのときの PSNR

	lenna		mandrill	
	情報量[bit]	PSNR[dB]	情報量[bit]	PSNR[dB]
平均値	35,899	40.882161	36,205	34.848787
中間値	35,584	38.820840	36,009	32.437000
最小値	35,305	36.871873	35,790	30.602995
最大値	35,321	36.724561	35,610	30.605691

図 10 に、10 箇所埋め込みの際の埋め込み情報量に対する PSNR 及び SSIM の結果を示す。図 11 に、原画像と 10 箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量の DCT と Haar の画像の比較を示す。表 2 に 4 箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量とそのときの PSNR を示し、表 3 に 10 箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量とそのときの PSNR を示す。本研究では、6 箇所、8 箇所埋め込みの実験も行ったが、ここでは省略する。PSNR が同じ値のときの埋め込み情報量を比較すると、Lenna、Mandrill の両方において閾値を設けた場合は、従来手法の DCTの方が埋め込み情報量の増加と PSNR の維持の両立ができるという結果がわかる。しかし、埋め込み箇所が多くなるにつれ、DCT の性能に追いつくようになるということも分かった。さらに、閾値を設けない場合、つまり最大の埋め込み情報量の場合

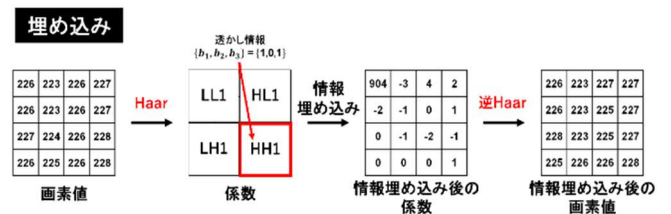


図 6 : 提案手法における情報埋め込みイメージ

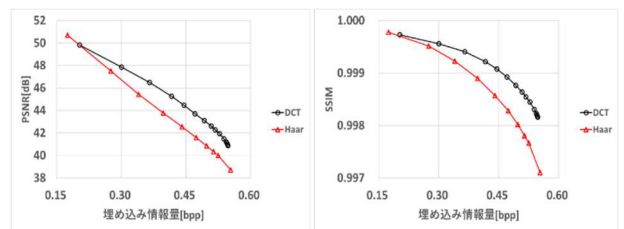


図 7 : Lenna における 4 箇所埋め込みの際の(a)PSNR と(b)SSIM

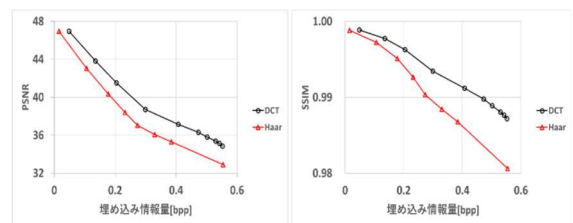


図 8 : Mandrill における 4 箇所埋め込みの際の(a)PSNR と(b)SSIM

表 2 4 箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量とそのときの PSNR

	lenna		mandrill	
	情報量[bit]	PSNR[dB]	情報量[bit]	PSNR[dB]
DCT	35,899	40.882161	36,205	34.848787
Haar	36,297	38.725580	36,297	32.920584

は、PSNRは少々下がるが、提案手法の方が埋め込み情報量を増加させることができた。一番多く埋め込み情報量を増加できたのはLennaもMandrillも10箇所埋め込みのときで、Lennaは6092[bit]、Mandrillは9170[bit]増加できた。また、一般的に、PSNRの値は30~50[dB]あると性能が良いとされており、40[dB]以上であれば人間の目では元の画像と区別がつかないとされているが、図11からも分かる通り、肉眼で原画像とDCTとHaarで埋め込んだ画像を見比べてみても、肉眼では判別を付けにくいことが分かる。このことから、少量の情報を埋め込みたい場合や細かい画質の劣化があってはならない場面ではDCTが有効で、多少の画像の劣化よりも、なるべく多くの情報を埋め込むことを優先する場合は、Haarが有効であると考えられる。

7. まとめと今後の展望

整数型DCTの代わりにHaar変換(整数型離散ウェーブレット変換)を用いた差分拡大法による埋め込み手法を提案した。Lenna、Mandrill両方とも、閾値を設けた場合はDCTの性能の方が良いと分かったが、埋め込み箇所が多くなるにつれ、DCTの性能に追いつくようになるということも分かった。さらに、閾値を設けない場合、つまり最大の埋め込み情

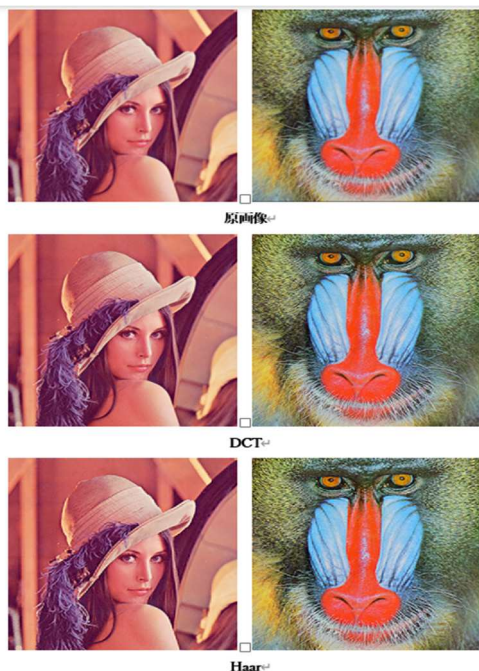


図11：原画像と10箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量のDCTとHaarの画像

報量の場合は、PSNRは少々下がるが、提案手法の方が埋め込み情報量を増加させることができることも分かった。肉眼で原画像とDCTとHaarで埋め込んだ画像を見比べてみても、肉眼では判別を付けにくいことが分かることから、少量の情報を埋め込みたい場合や細かい画質の劣化があってはならない場面ではDCTが有効で、多少の画像の劣化よりも、なるべく多くの情報を埋め込むことを優先する場合は、Haarが有効であると考えられる。今後は、本実験でのプログラム内容を見直し、性能を上げていきたい。また、他の整数変換で透かし情報の埋め込みを試すことで、より情報量の増加と画像劣化の抑制の両立ができる可能性がある。

参考文献

- [1] J. Seitz, "Digital Watermarking for Digital Media," Information Science Publishing, 2005.
- [2] S. Katzenbeisser, "Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Water-Marking," Artech House, 2000.
- [3] Adnan M. Alattar, "Reversible Watermark Using the Difference Expansion of a Generalized Integer Transform," *IEEE Trans. Image Processing*, Jul. 2004, vol. 13, no. 8, pp. 1147-1156.
- [4] K. R. Rao *et al.*, "Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages, Applications," Academic Press, 1990.

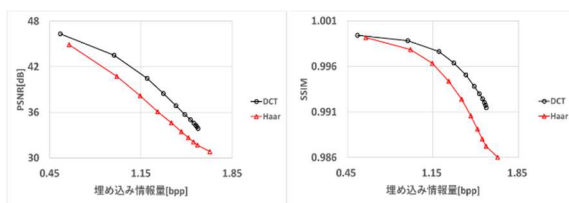


図9：Lennaにおける10箇所埋め込みの際の(a)PSNRと(b)SSIM

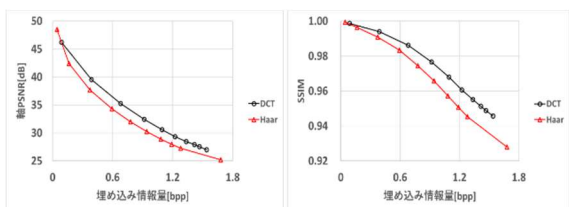


図10：Mandrillにおける10箇所埋め込みの際の(a)PSNRと(b)SSIM

表3 10箇所埋め込みにおける最大の埋め込み情報量とそのときのPSNR

	lenna		mandrill	
	情報量[bit]	PSNR[dB]	情報量[bit]	PSNR[dB]
DCT	103,996	33.886580	100,855	26.993023
Haar	110,025	30.816365	110,025	25.187284