

博士論文

画像の統計的性質と
サブバンド間の相関性を利用した
可逆電子透かしに関する研究

2014年9月

山登 一輝

宇都宮大学大学院 工学研究科

システム創成工学専攻

内容梗概

近年のデジタル技術の発展に伴い、静止画像をはじめとするデジタルコンテンツを扱う機会が増加傾向にある。デジタルコンテンツは、コピーや編集が容易であるなどの利点があるが、その一方で、著作者に無断でコピーをすることによる著作権侵害や、痕跡の残らない改ざんが可能であるという問題がある。このような問題の対策として、電子透かしが提案されている。電子透かしとは、人間には知覚できない程度のわずかな改変をコンテンツに加えることで、コンテンツ自身に情報を埋め込むデータハイディングの一種である。電子透かしの応用分野は、著作権保護や改ざん検知などのデジタルコンテンツの保護を目的とするものや、ステガノグラフィや画像修復などのデジタルコンテンツに付加価値を与える分野など、様々である。

前述したように、電子透かしは、画像データを直接変更するため、透かし埋め込み画像には必ず歪みが発生する。商用のデジタルカメラや携帯端末のように、ある程度の画質劣化を許容できるならば、電子透かしの利用に支障はない。しかし、医用画像や科学捜査で利用される画像など画質劣化を一切許容できない画像に対しては、劣化を伴う電子透かしを適用することは必ずしも好ましいとはいえない。このような問題に対して、可逆電子透かしが提案されている。可逆電子透かしは、非可逆な電子透かしと同様に、画像をわずかに改変することで透かし情報を埋め込むため、透かし埋め込み画像には画質劣化が生じるが、透かし埋め込み画像から透かし情報を抽出し、かつ、透かし埋め込み画像を原画像に復元することができる。

可逆電子透かしの評価尺度として、透かし埋め込み画像の画質が良好であることと埋め込み可能な情報量が多いことが挙げられる。両者はトレードオフの関係にあり、どちらを重視するかは目的に応じて変化する。そのため、応用分野に応じて異なる透かし埋め込み手法が使用されているのが現状である。そこで本論文では、求められる要件に応じて、透かし埋め込み画像の画質と埋め込み容量とを単一の手法で容易に変更可能な可逆電子透かし手法を提案する。本論文では、代表的な可逆電子透かしアルゴリズムであるヒストグラム変更型の手法に着目する。その一種である、高周波サブバンドのウェーブレット変換係数を利用した手法は、画像の冗長性を有効活用して、効率的な透かし埋め込みが可能であるが、サブバンド間の相関性は考慮されていない。サブバンド間の相関性を考慮することで、より効率的な透かし埋め込み処理が実現できると考えられる。そこで、複数のサブバンドから作成したヒストグラムを操作することで情報を埋め込む手法を提案する。提案手法では、複数のサブバンドを用いることにより、多次元ヒストグラムを構成し、これを用いた埋め込み規則を導入すること

で埋め込み処理に大きな自由度を与えることができる。以上の考えに基づき、本論文では、可逆電子透かしの評価尺度に着目した2つの検討を行う。

まず、埋め込み容量を増加させる方法について検討を行う。多くの電子透かし手法において、埋め込まれる透かし情報は2値情報であり、埋め込み先に1ビットずつ埋め込まれる。しかし、複数の透かしビットをまとめて多値情報として扱い、埋め込み先候補も複数用意して、両者の対応付けを行うことで、埋め込み容量を増やすことが可能である。この考え方を応用することで、提案手法は埋め込み容量の増大を図る。シミュレーションの結果、提案した可逆電子透かし手法は、従来手法を上回る埋め込み容量が得られることを確認した。

次に、透かし埋め込み画像に発生する画質劣化を抑制するための検討を行う。透かし埋め込み画像の画質劣化の原因は、透かし埋め込み処理による画像の改変である。一般に、埋め込む透かし情報が少なくなれば、画質劣化は小さくなるが、埋め込む必要のある透かし情報全てを埋め込むことができなければ、そもそも透かし情報を埋め込む意味がない。それゆえ、画質劣化と埋め込み容量のバランスが重要である。本論文では、透かし情報を埋め込むために必要な埋め込み容量に対して、透かし埋め込み画像の画質劣化が最小となるような透かし埋め込み規則について検討した。また、埋め込み容量の増減に影響しない変換係数の変更を防ぐため、透かし埋め込み処理に用いる変換係数を制限するためのしきい値処理を提案し、さらなる画質劣化の抑制を図る。シミュレーションの結果、透かし埋め込み画像の画質、埋め込み容量の両方の向上を確認した。

最後に、以上の2つの検討に基づいた提案手法の応用分野の一例として、可逆電子透かしを利用した改ざん検知について検討を行う。筆者らは、先行研究において、類似領域情報を電子透かしとして埋め込むことで、透かし埋め込み画像の伝送中に伝送誤りが発生した際に、受信側にて埋め込んだ透かし情報を利用して、破損した領域を修復する手法を提案した。この手法では、自然画像は画素間の相関が高いという性質を利用している。しかしながら、この手法では、伝送誤りにより破損領域に関する情報は、ネットワークの下位層の通信プロトコルから与えられることを想定しており、画像修復手法自身には、誤りの検知機能はない。そのため、悪意ある第三者によって画像が改ざんされた場合、受けた改ざんを検知できない可能性がある。この問題に対して、画像修復のために埋め込まれている類似領域情報を用いて、改ざん検知を行う手法について検討を行う。提案する改ざん検知手法は、一定サイズのブロックごとに、類似領域とその位置情報、埋め込まれている領域の状態から、改ざん検知を行う。本論文は、これらの検討結果や提案手法をまとめたものである。

本論文は全6章から構成される。各章の概要を以下に述べる。第1章では、本研究の背景と、研究の位置付けおよび本研究の概要について述べる。

第2章では、電子透かしの概要について述べ、電子透かしに求められる要件や電子透かしの分類、応用分野について説明する。さらに、本論文で着目する可逆電子透かしについて説明する。

第3章では、ウェーブレット変換係数の多次元ヒストグラムを利用した透かし埋め込み規則を提案する。また、埋め込み可能な情報量を増加させるため、1つの変換係数あたりに埋め込む情報を多値化した手法について検討する。

第4章では、透かし埋め込み画像の画質劣化の抑制に関する検討を行う。まず、画質劣化の原因を明らかにし、その解決策を考慮した透かし埋め込み規則を提案する。画質劣化の主な原因は、透かし埋め込み処理による変換係数の改変であり、改変の影響と埋め込み容量の関係から、透かし埋め込み規則を提案する。

第5章では、本論文で提案した可逆電子透かしの応用として、可逆電子透かしによる改ざん検知について述べる。本章では、先行研究である類似領域情報を利用した画像修復手法の問題点として、画像データの改ざん箇所を特定することができない点を指摘し、その問題を解決するために、類似領域情報を利用した改ざん検知手法を提案する。

第6章は本論文の結論であり、本論文で提案した可逆電子透かし手法についてまとめ、今後の課題について述べる。

Study on Reversible Watermarking Based on Statistical Property of Image and Correlation between Subbands

Kazuki Yamato

Abstract

Digital contents such as still images, are used in many situations because of the progress of digital technology. Digital contents have useful properties such as perfect copying and easy editing. However, there are some problems as follows: the copyright violation which is to copy the digital contents without allowed by the copyright holder, and tampering with no evidence. For solving these problems, the digital watermark technology is proposed. The digital watermark is a kind of the data hiding which the information is embedded in the contents by making a slight change in the contents without the perceptual degradation. The watermark uses the security applications such as copyright protection, tamper detection, and copy control as well as non-security applications such as steganography and image restoration.

As mentioned above, the watermarked image is degraded because of changing the image data directly. An application which allows some image degradation such as the digital camera and the mobile device, has no problem if it uses the digital watermarking. On the other hands, it is not desirable to use the watermark for an application which does not allows any image degradation such as the medical image, the military image, and the forensics image. For these problems, the reversible watermarking is proposed. The reversible watermarking embeds the information into the image by slightly modifying its pixel values, and the embedded information as well as the original image should be completely recovered from the watermarked image.

The evaluation criteria of the reversible watermarking are the payload capacity and the watermarked image quality. The both criteria have the trade off relation and the important one changes depending on the purpose. That is, the different

reversible watermarking method is used depending on the purpose. In this thesis, we proposed the reversible watermarking method which can easily change the relation between the watermarked image quality and the payload capacity by the single method. We focus on the histogram-based reversible watermarking methods. As a kind of these methods, there is the reversible watermarking method using the wavelet coefficients. This method can embed the watermark effectively because of utilizing the image redundancy. However, the correlation between the subbands is not considered. Therefore, if the correlation between the subbands is considered, the effectiveness of the watermarking method will be improved. In the proposed method, the multi-dimension histogram is made from some subbands, and the watermark information is embedded by expanding this histogram. In addition, by using the multi-dimensional histogram, the large degree of freedom can be given for the watermarking process. Therefore, there are two studies on the evaluation of the reversible watermarking.

First, we study the method increasing the payload capacity. In many watermarking method, the watermarking information is binary. On the other hand, by considering the watermarking information as the multilevel data, it is possible to increase the embedding capacity. Using this idea, the proposed method increases the payload capacity. In the experimental results, the proposed method have more payload capacities than the conventional method.

Second, we study the method which decreases the image degradation of the watermarked image. The image degradation of the watermarked image causes the image modification by the watermarking process. Generally speaking, the image degradation is small when the payload capacity is small. However, if all of information to be embedded cannot be embedded, it makes no sense to embed the watermark information. That is, the balance between the image quality and the payload capacity is important. In the proposed method, we studied the watermarking rule that the image degradation is minimum for the payload capacity of the watermark information to be embedded. In addition, in order to prevent coefficients non-related to the payload capacity from modifying, the thresholding process is proposed, which restricts the coefficients using the watermarking process. In the experimental results, the both of the watermarked image quality and payload capacity is improved.

As one of application of the proposed method based on above two studies, the

tamper detection method using the reversible watermarking is proposed. In our former study, the image restoration method has been proposed, which the similar region information is embedded in the image and the corrupted region is restored by using the embedded information when the transmission error occurred during transmitting the image. This method utilizes the property which the natural image has the high correlation between pixels. However, this method assumes that the positions of the corrupted regions are detected by using error control coding techniques. Therefore, the image restoration method does not have the tamper detecting ability. If the image is tampered by the malicious user, this tamper might not be detected. For this problem, we proposed the tamper detection method using the similar region information embedded for image restoration. The proposed method detects the tamper from the similar region, its location information, and the situation of the embedded region. In the experimental results, the proposed method can detect the tampering by using the similar region information.

目次

第1章	はじめに	1
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	従来の研究と本研究の位置付け	2
1.3	本研究の概要	4
1.4	本論文の構成	6
第2章	電子透かし	7
2.1	電子透かしの概要	7
2.2	電子透かしに求められる要件	8
2.3	電子透かしの応用分野	11
2.4	透かし埋め込みアルゴリズム	12
2.5	可逆電子透かし	14
2.5.1	可逆電子透かしの概要	14
2.5.2	可逆電子透かしアルゴリズム	15
第3章	埋め込み容量の増加を考慮した可逆電子透かし手法	19
3.1	ウェーブレット変換を利用した可逆電子透かし	19
3.1.1	ウェーブレット変換	19
3.1.2	Jinna らの手法	22
3.2	多値埋め込みが可能な可逆電子透かし	25
3.3	多次元ヒストグラムを用いた可逆電子透かし	28
3.3.1	多次元ヒストグラム	28
3.3.2	多次元ヒストグラムに対するヒストグラムシフト	31

3.3.3	多次元ヒストグラムへの GHS-RDH	35
3.4	シミュレーション	37
3.4.1	シミュレーション条件	37
3.4.2	シミュレーション結果	39
3.5	まとめ	41
第 4 章	画質劣化を抑制する可逆電子透かし	47
4.1	知覚的な画質劣化を考慮した電子透かし	47
4.2	画質劣化の原因	49
4.3	埋め込みビンの拡大に基づいた埋め込み規則	51
4.3.1	埋め込みビンの拡大	51
4.3.2	シミュレーション	53
4.4	ヒストグラムビンの制限	61
4.4.1	ヒストグラムビンの移動距離を制限	61
4.4.2	透かし埋め込みに利用する変換係数の制限	62
4.4.3	シミュレーション	66
4.5	まとめ	76
第 5 章	可逆電子透かし手法を用いた改ざん検知	78
5.1	類似領域情報を利用した画像修復	78
5.1.1	概要	78
5.1.2	画像修復アルゴリズム	80
5.1.3	提案手法の画像修復効果	85
5.2	類似領域情報を利用した改ざん検知	86
5.2.1	画像修復手法の問題点	86
5.2.2	提案手法を用いた改ざん検知手法	87
5.3	シミュレーション	90
5.3.1	シミュレーション条件	90

5.3.2 シミュレーション結果	91
5.4 まとめ	95
第6章 おわりに	98
謝辞	102
参考文献	103

第1章 はじめに

1.1 本研究の背景と目的

近年のデジタル技術の発展に伴い、静止画像や動画像、音楽などのデジタルコンテンツを扱う機会が非常に多くなっている。デジタルコンテンツの利点として、コピーや編集が容易である点が挙げられるが、その一方で、デジタルコンテンツの著作者に無断でコピーすることによる著作権侵害や、痕跡の残らない改ざんが可能であるという問題がある。このような問題に対する対策として、電子透かしが提案されている [1-7]。電子透かしとは、デジタルコンテンツに人間が知覚できない微小な改変を加えることで、コンテンツそのものに情報を埋め込むデータハイディングの一種である。データハイディングは、電子透かし [1-6] とステガノグラフィ [7-9] に大別できる。デジタルコンテンツに関する情報を埋め込み、コンテンツの保護を目的とした手法を電子透かしと呼び、コンテンツとは特に関係ない情報を埋め込み、コンテンツを偽として情報を埋め込んでいることを第三者に悟られないように伝送する目的で用いられる手法をステガノグラフィと呼ぶ。本論文では、静止画像に対する電子透かしに着目する。電子透かしの応用分野としては、著作権保護、改ざん検知、コピーコントロールなど、さまざまなものが考えられている。

一般に、静止画像の電子透かしは、画像データを直接変更するため、透かし埋め込み後の画像には必ず歪みが発生する。商用のデジタルカメラや携帯端末のように、ある程度の画質劣化を許容できる応用分野においては、電子透かしを利用し、透かし入り画像をそのまま保存・配布しても支障がない。しかしながら、医用画像や科学捜査で利用される画像など画質劣化を一切許容できない応用分野においては、電子透かしの埋め込むことにより生じる画質劣化も許さ

れないため、非可逆な電子透かしの利用は必ずしも好ましいとはいえない。このような問題の解決策として、可逆電子透かしが提案されている [2, 4]。可逆電子透かしは、非可逆な電子透かしと同様に、画像をわずかに改変することで透かし情報を埋め込むため、透かし埋め込み画像には画質劣化が生じる。しかし、透かし埋め込み画像から透かし情報を抽出することで、透かし埋め込み画像を原画像に復元できるという特性を持つ。

可逆電子透かしの評価尺度として透かし埋め込み画像の画質と埋め込み可能な情報量が挙げられる。両者はトレードオフの関係にあり、どちらを重視するかは目的に応じて変化する。例えば、可逆電子透かしで改ざん検知を実現することを考えると、画像に透かし情報が埋め込まれていることを第三者に気付かれないことが望ましい。したがって、埋め込み可能な情報量よりも透かし埋め込み画像の画質が重要である。一方で、可逆電子透かしをステガノグラフィや、遠隔医療での利用を考えて医用画像に患者のカルテ情報を透かし情報として埋め込む場合、画像にできるだけ多くの情報を埋め込めることが望ましい。このように応用分野に応じて、求められる要件が異なり、その要件に応じて異なる透かし埋め込み手法が使用されていることが現状である。そこで本論文では、求められる要件に応じて、透かし埋め込み画像の画質と埋め込み容量とを単一の手法で容易に変更可能な可逆電子透かし手法を提案する。

1.2 従来の研究と本研究の位置付け

可逆電子透かしに関する研究は、様々な研究が行われており、多種多様な手法が提案されている [2, 4, 16, 20, 21, 34, 37]。可逆電子透かし手法は、埋め込み手法によって4種類に大別できる。まず、1つ目は、画像圧縮手法を応用した手法である。この手法は、原画像の一部を可逆符号化を用いて圧縮し、圧縮したデータと透かし情報を、原画像の圧縮した部分に置き換えることで、可逆な透かし埋め込みを実現している [17, 34–38]。2つ目は、画素ヒストグラムを変更することで、情報を埋め込む手法である [18, 39, 40]。この画素ヒストグラム

を利用した手法は、代表的な可逆電子透かしアルゴリズムであり、以下で述べる2種類の手法は、画素ヒストグラムを利用した手法を発展させたものである。3つ目は、隣接する画素間の差分を算出し、差分値からヒストグラムを作成する手法である。自然画像の画素間には高い相関があることが知られており、隣接する画素の差分値は、0に近い値となる可能性が高い。すなわち、差分値から作成したヒストグラムは、差分値0を中心としたラプラス分布状となる。これを利用することで、埋め込み容量の増加と透かし埋め込み画像の画質劣化抑制を両立した手法である。4つ目の手法は、画素値の予測誤差からヒストグラムを作成し、利用する手法である [46–54, 56–61, 74]。3つ目で説明した差分ヒストグラムを利用した手法では、隣接する2つの画素を1組として考えるため、2画素に1 bit の情報を埋め込む。一方、この手法では、1画素に対して、1つの予測値が存在し、それらの誤差からヒストグラムを作成するため、1画素につき1 bit の情報を埋め込むことが可能である。また、予測誤差のヒストグラムも差分ヒストグラムと同様に、ラプラス分布状となるため、透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制した埋め込みが可能である。予測誤差ヒストグラムを利用した手法は、現在、最も研究の盛んな手法である。また、厳密には差分ヒストグラム・予測誤差ヒストグラムではないが、ヒストグラムを利用した手法として、原画像に直交変換を施し、得られた変換係数値から作成したヒストグラムを利用する手法も提案されている [24, 25, 30, 35]。変換係数のヒストグラムもラプラス分布状になるため、埋め込み容量と透かし埋め込み画像の画質を考慮することができる。

可逆電子透かしの評価尺度の1つである埋め込み容量を増加させるために、2値情報ではなく、多値情報を埋め込む手法として、Generalized Histogram Shifting-based Reversible Data Hiding (GHS-RDH) と呼ばれる手法が提案されている [26–31, 33, 70]。一般に、電子透かしで埋め込みに用いられる情報は‘0’と‘1’で表される2値情報系列である。一方、2値情報を埋め込むところに多値情報を埋め込むことができれば、1回の埋め込みにつき、1 bit 以上の埋め

込みが可能となる。結果として、埋め込み容量の増加を図ることができる。

また、近年、ヒストグラムを利用した可逆電子透かし手法に関する新たなアプローチとして、複数のデータをベクトルとして扱い、それらから多次元ヒストグラムを構成する手法が研究されている [22, 23]。差分ヒストグラムや予測誤差ヒストグラムを利用した手法は、ヒストグラムの分布がラプラス分布状になる。これにより、画像データの局所的な相関性を単純化することができるが、画像の冗長性は有効活用されていないため、多次元ヒストグラムの利用が提案されている。多次元ヒストグラムを利用する手法の特徴として、1次元ヒストグラムに比べて、透かし埋め込み処理に大きな自由度が得られることが挙げられる。

次に、本研究の位置付けについて述べる。本論文で提案する可逆電子透かし手法は、画像にウェーブレット変換を施すことで得られる複数のウェーブレットサブバンドから、多次元ヒストグラムを作成する。この多次元ヒストグラムを基準としてウェーブレット変換係数値を変更することで、透かし情報を埋め込む。提案手法における多次元ヒストグラムは、複数のウェーブレットサブバンドから作成されるため、サブバンド間の相関性を考慮した透かし埋め込みが可能である。また提案手法では、埋め込み容量を増加させるために、透かし情報を多値情報として扱う GHS-RDH を、多次元ヒストグラムに対して適用した手法について検討する。

1.3 本研究の概要

本論文の目的は、求められる応用分野に応じて、埋め込み容量と透かし埋め込み画像の画質を容易に変更可能な手法の提案である。本論文では、目的達成のため、可逆電子透かしの評価尺度に基づいた2つの検討を行う。

まず、埋め込み容量を増加させる方法について検討を行う。多くの電子透かし手法において、埋め込まれる透かし情報は2値情報であり、埋め込み先に1ビットずつ埋め込まれる。しかし、透かし情報を多値情報として扱い、埋め込

み先候補も複数用意して対応付けを行うことで、埋め込み容量を増やすことが可能となる。提案手法では、この考え方を応用することで、埋め込み容量の増加を図る。

次に、透かし埋め込み画像に発生する画質劣化を抑制するための検討を行う。透かし埋め込み画像の画質劣化の原因は、透かし埋め込み処理による画像の改変である。一般に、埋め込む透かし情報が少なくなれば画質劣化は小さくなるが、埋め込む必要のある透かし情報全てを埋め込むことができなければ、透かし情報を埋め込む意味がない。それゆえ、画質劣化と埋め込み容量のバランスが重要である。本論文では、透かし情報を埋め込むために必要な埋め込み容量に対して、透かし埋め込み画像の画質劣化が最小となるような透かし埋め込み規則について検討した。また、埋め込み容量に影響しない変換係数の変更を削減するため、透かし埋め込み処理に用いる変換係数を限定するためのしきい値処理を提案し、さらなる画質劣化の抑制を図る。

また本論文では、提案手法を用いたアプリケーションの一例として、可逆電子透かしを用いた改ざん検知手法について検討を行った。筆者らは先行研究として、類似領域情報を用いた画像修復手法 [68] を提案した。この手法は、伝送誤りによる画像データの破損への対策として、破損した領域を画像内の破損していない領域を利用して修復することを目的としている。しかしながら、この手法では、画像データの破損箇所に関する情報は既知であることが前提であり、画像修復手法自身には、破損箇所を特定する機能はない。画像データが破損した原因が伝送誤りであれば、ネットワークの下位層の通信プロトコルから破損位置の特定が考えられるが、悪意ある第三者により画像データが改ざんされた場合を考えると、画像データに埋め込んだ透かし情報を用いて改ざんと特定することが望ましい。この画像修復手法では、透かし情報として、ブロックごとに類似領域の位置情報を埋め込んでいる。本論文では、この類似領域の位置情報を用いた改ざん検知手法について検討を行う。

1.4 本論文の構成

本論文は、全6章から構成されている。各章の概要を以下にまとめる。

第1章では、本研究の背景と、研究の位置付けおよび本論文の構成について述べる。

第2章では、電子透かしの概要について述べ、電子透かしに求められる要件や電子透かしの分類、応用分野について説明する。さらに、本論文で着目する可逆電子透かしについて説明する。

第3章では、本研究におけるウェーブレット変換係数の多次元ヒストグラムの作成手法について説明し、これを基にした透かし埋め込み規則を提案する。本章では、埋め込み可能な情報量の増加に重点を置き、1つの変換係数あたりに埋め込む情報を多値化することで、埋め込み容量の増加を図る。

第4章では、透かし埋め込み画像の画質劣化の抑制に関する検討を行う。まず、画質劣化の原因を明らかにし、その解決策を考慮した透かし埋め込み規則を提案する。画質劣化の主な原因は、透かし埋め込み処理による変換係数の改変であり、改変の影響と埋め込み容量の関係から、透かし埋め込み規則を導出する。また、使用するビンを限定した手法を提案し、より効率的な埋め込みが可能となることを明らかにした。

第5章では、本論文で提案した可逆電子透かしの応用として、可逆電子透かしによる改ざん検知について述べる。本章では、先行研究である類似領域情報を利用した画像修復手法の問題点として、画像データの改ざん箇所を特定することができない点を指摘し、その問題を解決するために、類似領域情報を利用した改ざん検知手法を提案する。

第6章は本論文の結論であり、本研究の総括を行い、今後の課題について言及する。

第2章 電子透かし

本章では、まずはじめに、電子透かし技術の概要について述べる。次に、電子透かしに求められる要件、電子透かしの応用分野、そして、透かし埋め込みアルゴリズムについて説明する。最後に、本論文で着目する可逆電子透かしについて述べる。

2.1 電子透かしの概要

「透かし」は、紙幣の真正性を証明するための技術である。透かしとは、紙幣を光に透かすと浮き出る模様を指し、紙幣の捏造を困難にするとともに、紙幣の真正性を確認することができる。紙幣の場合、透かしが入れられていることに加えて、色合いやインク、紙質などを確認することにより、透かし以外の手段によっても正当性を証明することが可能である。

一方、静止画像や動画などのデジタルコンテンツは複製が容易であり、しかも複製データとオリジナルデータは完全に同一であるため区別することができない。そのため、購入した画像を複製して、不特定多数の第三者に配布することが技術的に可能である。また、Web サイト上に公開されている画像を第三者がコピーし、無断で配布することも容易である。仮に作者の権利を守るために画像の隅に作者独自の署名を施したとしても、デジタルコンテンツでは署名部分を削除、あるいは改変することができるため、コンテンツの不正コピーを防止することは困難である。

近年、不正コピー等の行為を防止あるいは抑止するための技術として、電子透かしが注目されている。電子透かし技術は、コンテンツ自体を人間には変化が知覚できない程度に改変することで、コンテンツ中に著作者の署名やID番

号などを埋め込む技術であり，これまで数多くの電子透かし手法が提案されている [1-5, 7]. この技術を用いることで，コンテンツが不正利用された場合でも，そのコンテンツ中に埋め込まれた所有者固有の透かし情報を抽出し検証することで，正当な所有者を明確にすることができる．さらに，電子透かし技術の応用分野は幅広く，改ざん検知，複製抑止，秘匿通信などへの利用が考えられている．

2.2 電子透かしに求められる要件

電子透かしは前節で説明したように，様々な用途が考えられている．それぞれの用途に応じて，電子透かしに必要とされる要件も様々である．本節では，電子透かしに求められる主な要件について説明を行う [1-5, 7].

コンテンツの品質 電子透かしでは，コンテンツ自身に透かしを埋め込むため，必然的にコンテンツの品質は劣化する．著作権の保護が主目的であるとしても，透かしを埋め込むことでコンテンツの品質が著しく変化してしまえば，電子透かしを埋め込む意味がない．したがって，透かしを埋め込むことによる品質劣化をできるだけ抑えることが望ましい．高品質な透かし入りコンテンツを実現するための手法としては，画像であればエッジ部，音声であれば非可聴領域のような，人間の知覚では変化を認識しにくい領域に透かしを埋め込む手法が考えられる．また，透かしを埋め込んだ後の画像から透かしを取り除き，原画像に戻すことのできる可逆電子透かしの研究も行われている．可逆電子透かしについては，2.5節で扱う．

ロバスト性 電子透かしを用いて，コンテンツの著作権を保護する場合，コンテンツ流通過程において，編集処理や非可逆なデータ圧縮が施されることにより，埋め込んだ透かし情報が消失してしまう可能性がある．特にデータ圧縮は，データの蓄積，伝送の際に必要な不可欠であるため，

データ圧縮に対して耐性のある電子透かし手法が望まれており、データ圧縮に対応した手法も研究されてきている。一方で、改ざん検知のための電子透かしでは、埋め込まれた透かし情報が破壊されていることを検出することで、改ざんを検知する。それゆえ、画像処理により壊れやすい電子透かし手法が求められる。

埋め込み容量 コンテンツに透かしを埋め込む場合、用途に応じて、適切な情報を埋め込む必要がある。より多くの用途に対応するためには、埋め込むことのできる情報量が多いことが理想である。埋め込むことのできる埋め込み容量はコンテンツの大きさ、および冗長性に依存する。また、一般的にデータを多く埋め込むほどコンテンツの品質は劣化する。そのため、より多くのデータを埋め込む必要のあるコンテンツは品質の劣化が激しくなり、また、品質を重視する場合には必然的に埋め込める情報は少なくなる。それゆえ、埋め込み容量は、求められる品質や応用分野に応じて設定することが必要である。

コンテンツ自身への埋め込み 透かし情報は、ファイルのヘッダ部への付加や、特定の領域に集中せず、コンテンツ全域にわたり分散して埋め込まれることが望まれる。このようにすることで、透かし情報の改ざんや消去を困難にすることができる。

参照情報の必要性 コンテンツから透かし情報を抽出する際に、特別な情報（参照情報）を必要とする場合 [10] としない場合 [11] がある。参照情報とは、主に、原コンテンツや透かし抽出パラメータなどが挙げられる。参照情報として原コンテンツが必要な手法では、原コンテンツを必要としない手法に比べ、品質やロバスト性の面で優れている。また、原コンテンツを秘密鍵の一つとすることで、リバースエンジニアリングなどの攻撃に対して強い耐性を持つ。透かし抽出パラメータが必要な手法では、原コンテンツから作成される情報や透かし埋め込み処理

で用いたパラメータなどが参照情報として利用される。一方で、透かし抽出を行うユーザに参照情報を伝送するには、安全なネットワークの使用が不可欠である。仮に、安全なネットワークの利用が明確でない場合、参照情報を第三者に知られる恐れがあるため、参照情報の伝送は望ましくない。このような問題に対して、透かし情報の抽出に参照情報を必要としない手法が提案されている。このような手法では、あらかじめ使用している電子透かしアルゴリズムが既知である必要がある。

可視性 多くの電子透かし手法では、コンテンツの利用者に透かしの認識されないように、不可視の埋め込み方式が用いられる。しかし、不可視の電子透かしはコンテンツ中から透かし情報を抽出することで著作権を主張するため、著作権保護の立場では消極的な方法といえる。このため、利用者に著作権の所在などを積極的にアピールする目的で、認識できる状態で透かしの埋め込み方式も検討されている。これは、コンテンツ上にロゴマークなどの著作権情報を明示的に付加するものである。

上記で述べた要件の中で、コンテンツの品質とロバスト性、埋め込み容量は相反する性質を持つ。つまり、透かし埋め込みによる品質劣化を小さく抑えると、ロバスト性は低く、あるいは、埋め込み容量が小さくなる。反対に、ロバスト性を高く設定した場合、コンテンツに著しい影響を与えてしまう。また、最尤判定を行うために同じ透かし情報を複数回埋め込む場合、透かしの抽出精度は向上するが、埋め込み容量は小さくなる。このように、それぞれの要件は互いにトレードオフの関係になることが多く、電子透かしの利用用途に合わせて、適切な要件を設定することが重要である。

2.3 電子透かしの応用分野

電子透かしは、コンテンツ自身に密かに情報を埋め込むことが目的であり、様々な応用が考えられる。以下に、電子透かしの応用分野について述べる [1-4, 7].

著作権の主張 デジタルコンテンツはコピーや編集が容易であり、著作者に許可を取らない不正コピーや編集などの著作権侵害が問題となっている。このような問題に対処するため、コンテンツに、著作者のIDなどを透かし情報として埋め込んでおく。コンテンツを配布後、不正に複製されたコンテンツを発見した場合には、コンテンツに埋め込まれている透かし情報を抽出することで、コンテンツの著作権を主張することができる。コンテンツは圧縮やフィルタリングなどの処理が施される可能性があるため、著作権を主張するためには、このような画像処理攻撃に耐性のある電子透かし手法が利用される。

改ざん検知 不可視かつ低耐性の電子透かしの性質を有効に利用したものが改ざん検知用の電子透かしである。対象となる画像に電子透か시를埋め込んでおき、データを利用する直前に透か시를抽出する。この際、抽出した情報とあらかじめ埋め込んだ情報を比較することで画像に改変が加えられたかどうかを知ることができる。この技術を利用することでデータに対する不正な改変の有無を判別することができる。電子透かしを用いて画像の改ざん検知を行うためには、わずかな画像処理が行われた場合にも透かしが破壊される必要がある。画像処理に耐性のある電子透かしは、弱い画像処理が行われた場合には透かしが破壊されないため、改ざん検知に用いることはできない。このため、画像処理耐性の点で著作権主張の応用とは相反する立場をとっている。想定される応用分野としては、写真で損害額の査定を行う損害保険業務、レントゲン写真など病院で保管される医用画像などが挙げられる。ま

た、2.5節で述べる可逆電子透かしにおける応用分野の一つである。

コピーコントロール デジタルコンテンツは、劣化なく何回でもコピーを生成することが可能である。このコピーの不正な使用を阻止するために、電子透かしを利用することができる。その例として、DVDに格納された映画などの動画像に、透かし情報としてコピーの回数制限をすための制御情報を埋め込む技術が挙げられる。DVD装置で透かしの検出を行い、録画処理の停止などの制御を行ったり、録画の制御以外にも、透かしの種類と媒体の種類の整合性に基づいて、不正コピーされた海賊版であるかどうかを判別し、再生停止などの制御を行ったりすることができる。

秘匿通信 秘匿通信 (steganography) とは、第三者に気づかれることなく、秘密情報を別のデータに埋め込んで保存したり、他人に気づかれずにそれを特定の相手に伝える技術である。ランダム情報を利用して内容の秘匿化を実現する暗号技術に比べ、秘匿通信では情報そのものの存在を発見されないことが重要である。この手法では、コンテンツよりも価値のある情報を透かし情報として埋め込み、コンテンツを囮として利用する。秘匿通信では、情報を埋め込んであることが第三者に気づかれないために、品質劣化を極力抑える必要があり、かつ、埋め込み容量の大きい手法が求められる。

2.4 透かし埋め込みアルゴリズム

静止画像を対象とした電子透かし方式を透かしの埋め込み方式で分類すると、画素空間利用型の埋め込み方式と周波数領域利用型の埋め込み方式とに大別できる。本節では、これらの方式の概要およびその特徴について説明する。

画素空間利用型 画素空間利用型電子透かしは、画像データの画素値を直接改変することで透かし情報を埋め込む手法である。最も簡単な例とし

て、ビットプレーンを用いた方法がある [6]。これは、画素値をビットプレーン分解し、ある階層のビットプレーンをそのままバイナリの透かし情報と置き換える方法である。埋め込むビットプレーンを最下位ビットに設定した場合、画質劣化は非常に小さく、人間の目に知覚されることはない。なぜならば、画素の最下位ビットの情報は冗長度が高く、変更されても視覚的にはほとんど影響を及ぼさないからである。また、このような方式では、画像処理に対するロバストが低く、改ざん検知のための電子透かしとしては望ましい特徴を有しているといえる。また、第4章で述べるクラス間分散を利用した電子透かし手法は、この画素空間利用型の一種である [12]。

周波数領域利用型 DCT (Discrete Cosine Transform) やアダマール変換などの直交変換を用いると、画像を周波数領域に変換することができる。周波数領域利用型の電子透かしは、直交変換を行って得られた変換係数を、透かし情報に応じて異なる規則で変更する方法である。変更後、逆変換を行うと画像全体に変更の影響が分散し、人間の目に知覚されにくくなる。また、JPEG [13]をはじめとする圧縮ファイルフォーマットは、符号化モデル部にDCTを利用している。したがって、DCTを利用した電子透かし方式 [14]は、このような圧縮フォーマットと組み合わせることが容易であり、人間の視覚特性を利用した埋め込みが行いやすいという利点もある。周波数領域利用型電子透かしは、DCTを用いた方式以外にも、JPEGの後継フォーマットとして規格化されたJPEG 2000 [15]の符号化モデル部として採用されたウェーブレット変換を利用した手法が提案されている。また、本論文で提案する可逆電子透かしは、ウェーブレット変換係数のヒストグラムを利用した手法である。

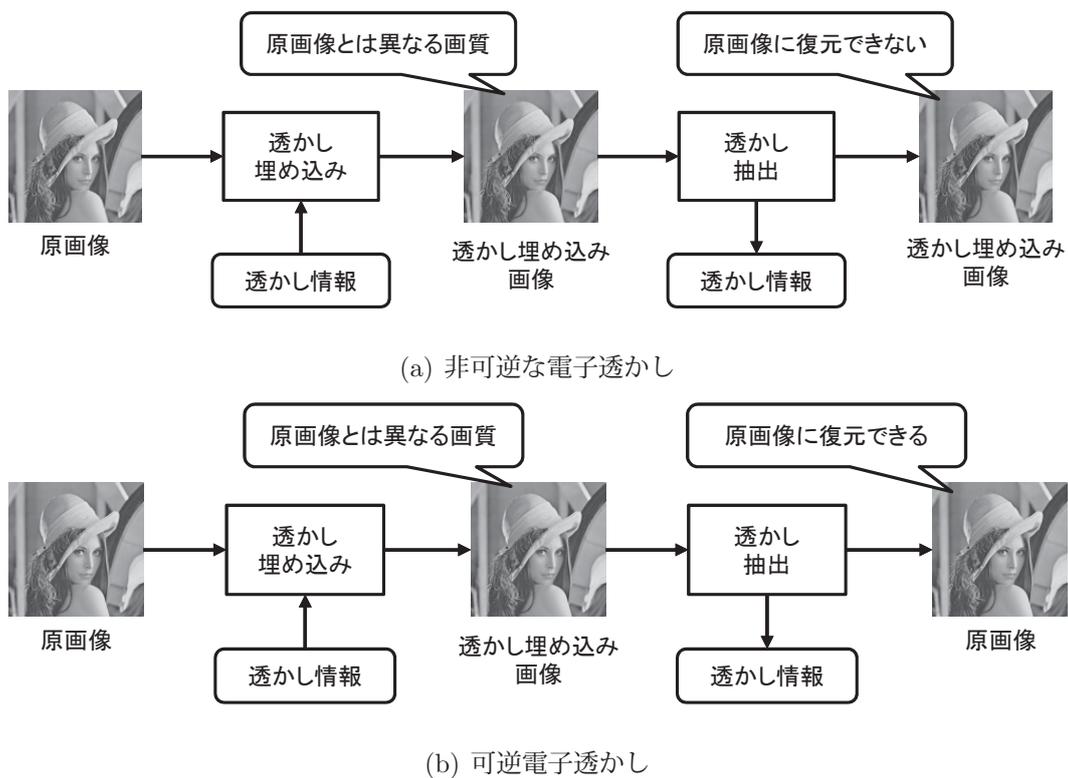


図 2.1 可逆電子透かしと非可逆な電子透かしの比較

2.5 可逆電子透かし

本節では、本論文で着目する可逆電子透かしについて述べる。2.5.1 節では、可逆電子透かしの概要として、求められる要件や応用分野について説明する。2.5.2 節では、これまで提案されてきた様々な可逆電子透かしアルゴリズムについて説明する。

2.5.1 可逆電子透かしの概要

図 2.1 に可逆電子透かし [2, 4, 16] と非可逆な電子透かしの比較図を示す。これまで説明してきた電子透かしは、基本的に非可逆 [10–12, 14] である。つまり、原画像へ透かし情報を埋め込むことで透かし埋め込み画像が得られ、透かし埋め込み画像から透かし情報を抽出することができる。しかし、図 2.2(a) に示すように、透かし埋め込み画像から埋め込まれている透かし情報を除去した

後に、原画像を復元することは、一般的に不可能である。これに対して、可逆電子透かしでは、図2.2(b)に示すように、非可逆な電子透かしと同様に、透かし埋め込み画像の画質は劣化するが、透かし埋め込み画像が改ざんされていない限り、透かし情報を抽出後に、原画像を完全に復元することが可能である。可逆電子透かしは、透かし抽出処理後に原画像を復元できるという特性から、医用画像や科学捜査で用いられる画像、芸術作品などのわずかな画質劣化も許容できない画像への透かし埋め込みなど画像認証や改ざん検知への応用が考えられている [20, 21, 34, 37].

次に、可逆電子透かしにおける求められる要件について説明する。可逆電子透かしでは、透かし埋め込み画像の画質と埋め込み容量が必要要件として挙げられる。理想的には、透かし埋め込み画像の画質劣化をできるだけ小さくし、埋め込み容量を可能な限り大きく設定したい。しかしながら、これらの要件はトレードオフの関係にあるため、一般的に不可能である。そのため、使用目的に応じて、透かし埋め込み画像の画質と埋め込み容量を適切に設定することが重要である。

2.5.2 可逆電子透かしアルゴリズム

これまで、様々な可逆電子透かし手法が提案されてきた。本節では、4種類の代表的な可逆電子透かしアルゴリズムについて説明する。

圧縮型 圧縮型の可逆電子透かしとは、原画像の一部を可逆符号化を用いて圧縮し、圧縮したデータと透かし情報を、原画像の一部に置き換えることで、可逆な透かし埋め込みを実現している [17, 34–38]. 圧縮型の一例として、濃淡画像のあるビットプレーンに着目して、2値画像と見なし、その2値画像をJBIG (Joint Bi-Level Image Experts Group) 圧縮し、得られた圧縮データと透かし情報とを着目したビットプレーンに置き換える手法が提案されている。なお、圧縮型の手法における埋め込み容量は、利用される符号化手法の圧縮効率に依存する。

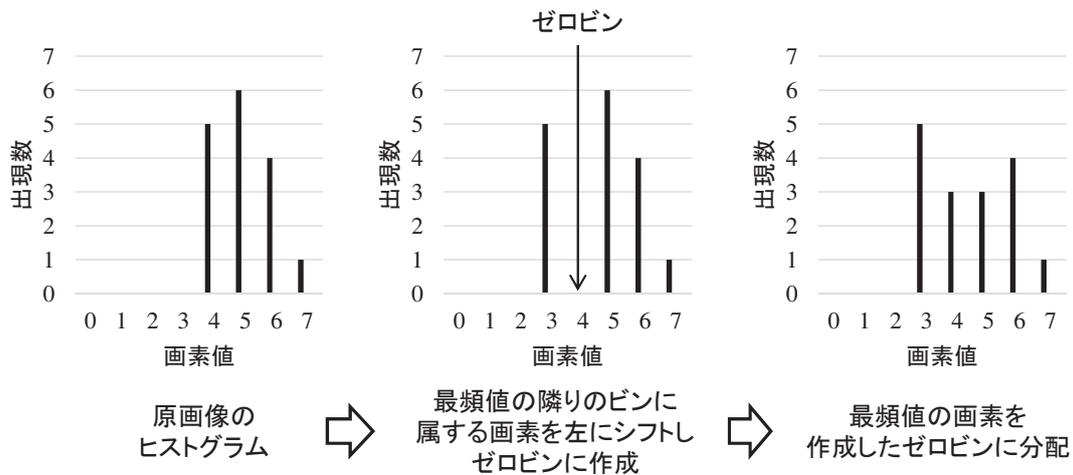


図 2.2 ヒストグラム変更型の可逆電子透かし

ヒストグラム変更型 ヒストグラム変更型の可逆電子透かしは、画像の画素ヒストグラムを基に画素値を操作することで、透かし情報の埋め込みを行う [18, 39, 40]. 図 2.2 にヒストグラム変更型可逆電子透かしの例を示す. 図 2.2 では、3bit 画像を例としている. まず、原画像のヒストグラムを作成する. ここで、画素値の出現頻度を記録する領域をビンと呼ぶことにする. すなわち、画素値ごとにビンは 1 つずつ存在する. また、出現数が 0 のビンをゼロビンと呼ぶことにする. 次に、ゼロビンと最頻値のビンの間に存在する全てのビンを、1 だけシフトする. ここで、シフトするとは、該当するビンの画素値に 1 を加算する、あるいは減算する処理を意味する. その結果、図 2.2 のように、最頻値のビンの隣りにゼロビンが生成される. その後、埋め込む透かし情報に応じて、最頻値の画素値を最頻値のビンに残す、または、隣りのゼロビンに移動することで、情報を埋め込むことになる. それゆえ、この手法の埋め込み容量は、画素ヒストグラムの最頻値の画素数に限られる. また、以下で述べる差分拡張型の手法と予測誤差拡張型の手法は、ヒストグラム変更型の手法を発展させた手法である.

差分拡張型 差分拡張型の可逆電子透かしは、隣接する画素を 1 組として考

え, その差分値を算出する. そして, 差分値のヒストグラムを基に, 差分値を操作することで, 透かし埋め込みを行う手法である [20, 41–45]. 差分拡張型の一例として, Lee らの手法 [20] を説明する. 隣接する 2 画素を $I(2i, j)$, $I(2i + 1, j)$ とすると, この 2 画素の差分値は

$$D(i, j) = I(2i + 1, j) - I(2i, j) \quad (2.1)$$

となる. ここで, D は画像 I の隣接する 2 画素から作成した差分画像である. この隣接する 2 画素を画素ペアと呼称する. Lee らの手法では, 差分値を $+1$, または -1 だけ変化させる. なお, 実際に変化を加えるのは, 画素 $I(2i + 1, j)$ であり, 式 (2.2) に示す.

$$I^m(2i + 1, j) = \begin{cases} I(2i + 1, j), & \text{if } D(i, j) = 0 \\ I(2i + 1, j) + b, & \text{if } D(i, j) = 1 \\ I(2i + 1, j) - b, & \text{if } D(i, j) = -1 \\ I(2i + 1, j) + 1, & \text{if } D(i, j) \geq 2 \\ I(2i + 1, j) - 1, & \text{if } D(i, j) \leq -2 \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで, $I^m(2i + 1, j)$ は, 透かし埋め込み後の画素値を示し, $b \in \{0, 1\}$ は透かし情報を示す. 式 (2.2) より, 差分値が ± 1 の画素ペアに対して透かし埋め込み処理を行い, 差分値の絶対値が 2 以上の画素ペアに対しては, 差分絶対値が 3 以上になるようにシフト処理を行っている.

予測誤差拡張型 予測誤差拡張型の可逆電子透かしは, 差分拡張型の手法と同様に差分値を利用する. ただし, 利用する差分値は, ある画素 x_i とその予測値 \hat{x}_i の差分値, すなわち, 予測誤差を利用する [46–54, 56–61, 74]. 例として, Li らの手法について説明する. この手法は 3 つの手順で行われる. まず, 各画素の予測誤差を求める. 次に, 得られた予測誤差から予測誤差ヒストグラムを作成する. 一般に, 予測誤差ヒストグラムは, 0 付近を中心としたラプラス分布に近い分布となる. そして, 予測誤差ヒストグラムを操作することで, 透かし情報の埋め込みを行う.

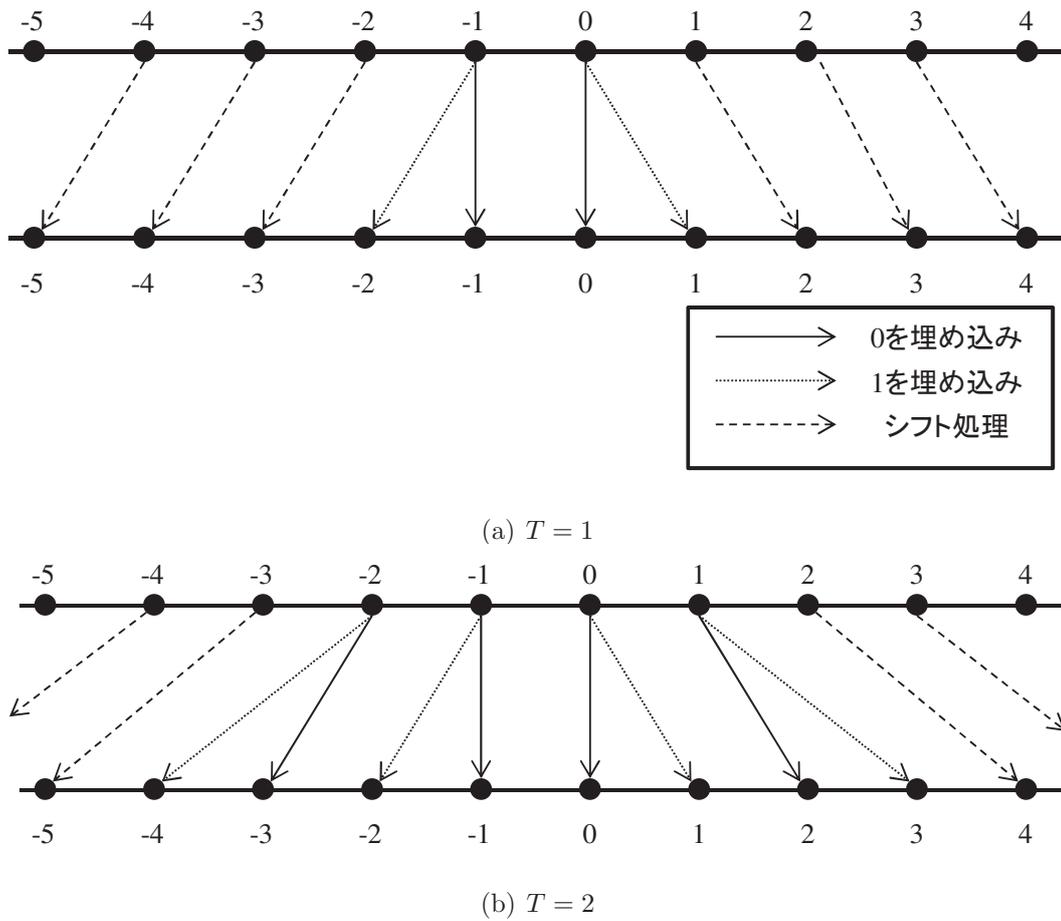


図 2.3 Li らの透かし埋め込み手法

図 2.3 に、Li らの手法における予測誤差拡張規則を示す。ここで、 T は、埋め込み容量を調節する整数値である。図 2.3 のように、 T が大きくなると、埋め込み容量は増加するが、予測誤差の変更量も大きくなり、その結果、透かし埋め込み画像の画質劣化も大きくなる。

第3章 埋め込み容量の増加を考慮した可逆電子透かし手法

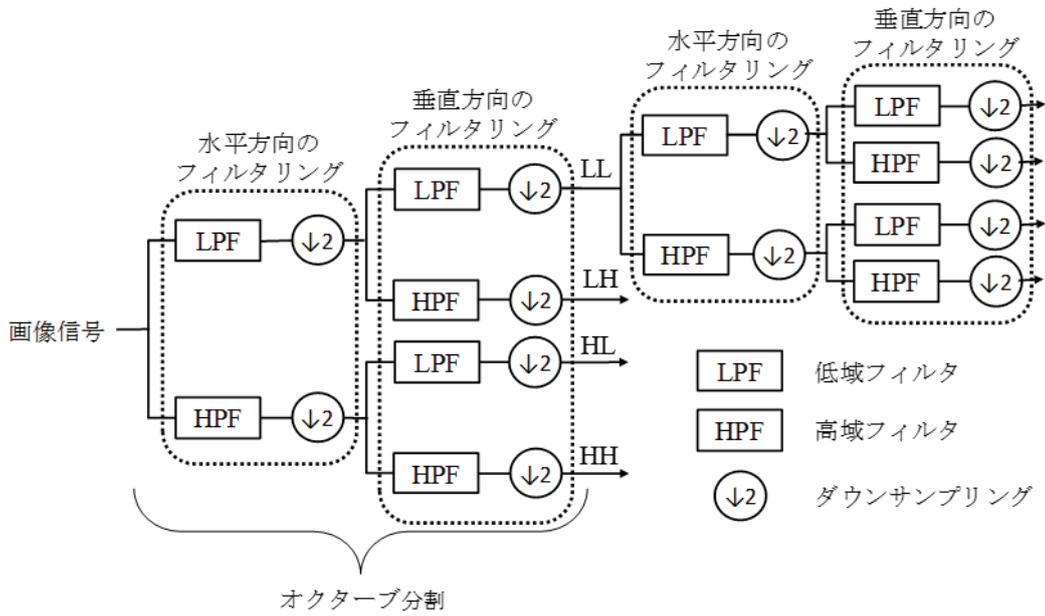
本論文では，求められる要件に応じて，透かし埋め込み画像の画質と埋め込み可能な情報量を容易に変更できる可逆電子透かし手法を提案する．提案手法では，埋め込み容量の増加に関するアプローチと，画質劣化を抑制するアプローチを行う．本章では，まず前者の埋め込み容量を増加させるためのアプローチについて述べる．

3.1 ウェーブレット変換を利用した可逆電子透かし

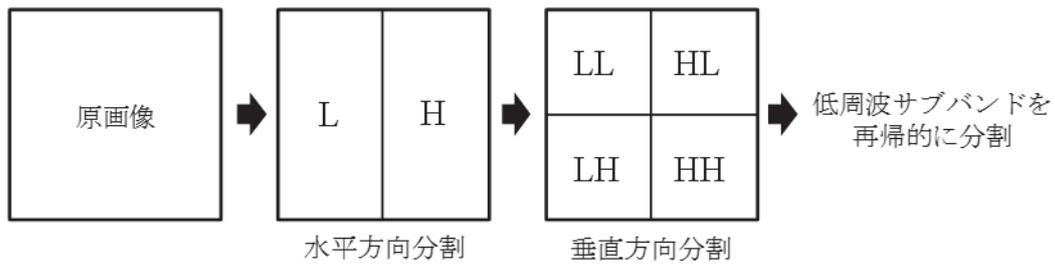
本節では，提案手法について述べる前に，ウェーブレット変換を利用した可逆電子透かし手法について説明する．まず，3.1.1節では，ウェーブレット変換について説明し，ウェーブレット変換を可逆電子透かしに適用する場合の問題点とその解決手法について述べる．3.1.2節では，ウェーブレット変換を利用した可逆電子透かし手法として，Jinna らの手法 [24] について説明する．

3.1.1 ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は，信号の持つ冗長性に着目した周波数変換法の一手法であり，低域および高域通過フィルタを利用したフィルタリングにより画像信号を低周波成分と高周波成分のサブバンドに分割する．さらに低周波成分に対して再帰的分割を行えば多重解像度解析も可能となる [62]．空間領域で解像度を変換する処理を繰り返すことによって多種類の空間解像度画像を容易に生成できる解像度スケーラビリティを有することが特徴である．



(a) ウェーブレット変換の構成



(b) オクターブ分割

図 3.1 ウェーブレット変換の構成とオクターブ分割

図 3.1 にウェーブレット変換の構成とオクターブ分割を示す。2次元信号の画像でウェーブレット変換による多重解像度解析を行う場合、まず、水平方向にフィルタリングおよびダウンサンプリングを行い、低周波サブバンド L と高周波サブバンド H に分割する。次に、垂直方向に対しても同様にフィルタリングおよびダウンサンプリングを行うことで低周波サブバンド LL と高周波サブバンド HL, LH および HH に分割する。この分割処理が1回のオクターブ分割である。さらにオクターブ分割を行う場合は、低周波サブバンド LL を再帰的に分割する。本論文では、ウェーブレット変換によって得られたサブバンドを、図 3.2 に示すように呼ぶこととする。

LL ₂	HL ₂	HL ₁
LH ₂	HH ₂	
LH ₁		HH ₁

図3.2 オクターブ分割2回の場合の各サブバンドの名称

しかしながら，上記のウェーブレット変換は，可逆性が保証されていない。すなわち，画像にウェーブレット変換を適用して得られた変換係数を，逆ウェーブレット変換を適用して画像に戻したとき，原画像と逆変換した画像は一致しない。これは，画素値が整数値であるのに対して，ウェーブレット変換係数が実数値として出力されるためであり，実数値のウェーブレット変換係数から，画素値を逆変換によって求める際に，切り捨て処理や丸め処理が必要となり，誤差が発生することは避けられない。したがって，可逆電子透かし手法を用いてウェーブレット変換係数に透かし情報を埋め込んだとしても，逆ウェーブレット変換で元の画像へ戻すことによって可逆性が失われる。

この問題に対する解決策として，リフティング手法による可逆な整数ウェーブレット変換 (Integer-to-Integer Wavelet Transform: I2I-WT) [25,63–65] の利用が考えられる。この手法は，完全再構成を容易に実現でき，JPEG 2000 [15] でも採用されている。例として，式 (3.1)，(3.2) にリフティング手法を利用した可逆 Haar 変換を示す。

$$d_{1,n} = s_{0,2n+1} - s_{0,2n} \tag{3.1}$$

$$s_{1,n} = s_{0,2n} + \left\lfloor \frac{1}{2}d_{1,n} \right\rfloor \tag{3.2}$$

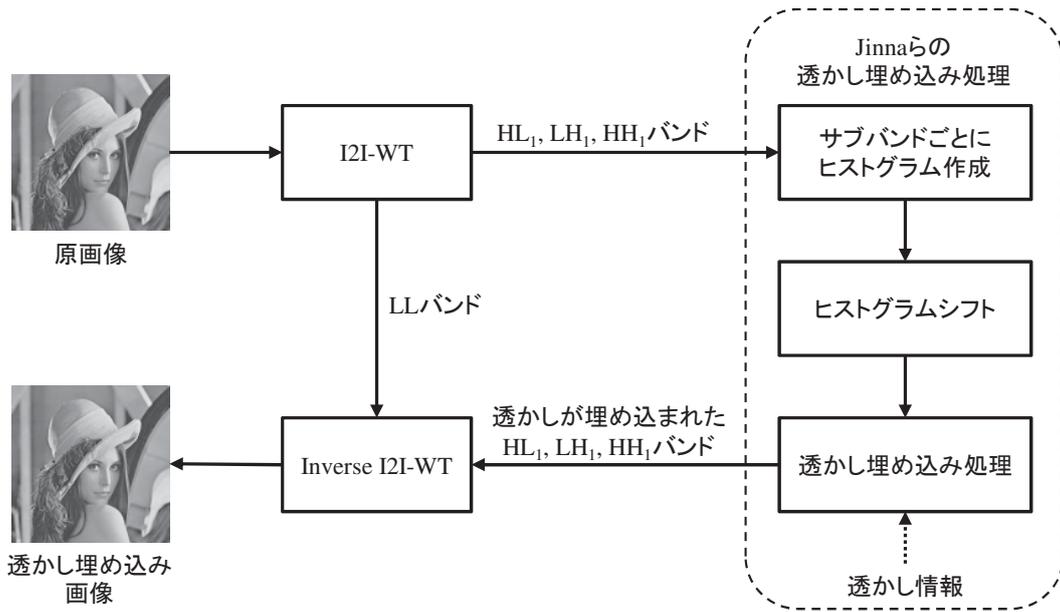


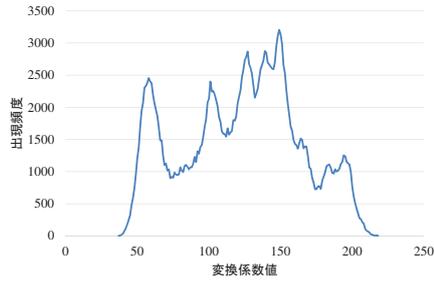
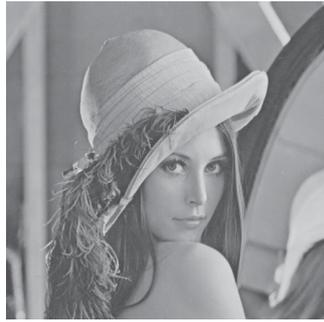
図 3.3 Jinna らの透かし埋め込み手法の概要

ここで、 $s_{j,n}$, $d_{j,n}$ は、オクターブ分割 j 回における n 番目の低周波サブバンドのウェーブレット変換係数と高周波サブバンドのウェーブレット変換係数をそれぞれ表す。なお、 $j = 0$ のとき、 $s_{0,k}$ は原画像の k 番目の画素を示し、 $[x]$ は、床関数を示す。

3.1.2 Jinna らの手法

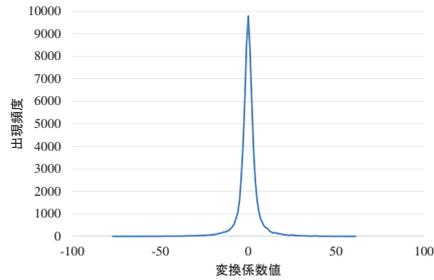
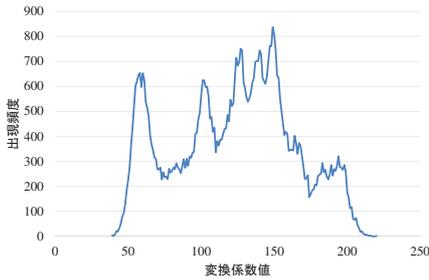
ウェーブレット変換を利用した可逆電子透かし手法として、Jinna らによって提案された手法 [24] を説明する。Jinna らの手法は、画像にウェーブレット変換を施し、高周波サブバンド変換係数からヒストグラムを作成し、作成したヒストグラムを変更することで透かし情報を埋め込む。図 3.3 に、Jinna らの透かし埋め込み手法の概要を示す。

まず、原画像に対して、3.1.1 節で述べた可逆ウェーブレット変換を施す。次に、高周波サブバンド $\mathbf{s} = \{s(x, y)\}$ から、変換係数のヒストグラム $\mathbf{h}_s = \{h_s(c)\}$ を作成する。ここで、 $h_s(c)$ は変換係数値 c の出現頻度を表し、 $s(x, y)$ はサブバンド \mathbf{s} における座標 (x, y) に位置する変換係数を表す。ヒストグラムが作成され



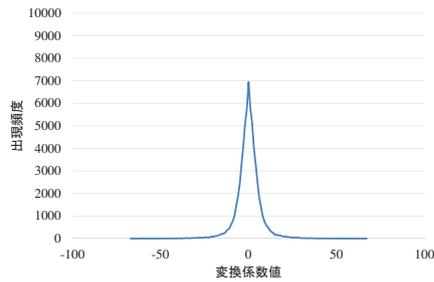
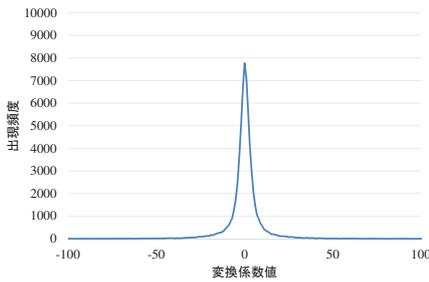
(a) 原画像

(b) 原画像のヒストグラム



(c) LL₁ バンド

(d) HL₁ バンド



(e) LH₁ バンド

(f) HH₁ バンド

図3.4 ウェーブレット変換係数のヒストグラム

たら，サブバンド s の出現頻度が最大となる変換係数値 $c_{s_{\text{peak}}}$ を求める． $c_{s_{\text{peak}}}$ は，式 (3.3) のように表せる．

$$c_{s_{\text{peak}}} = \arg \max_c h_s(c). \quad (3.3)$$

ウェーブレット変換係数のヒストグラムは，0を中心としたラプラス分布になる傾向があるため， $c_{s_{\text{peak}}}$ は，0，もしくは0に近い値となる．図3.4に，ウェーブレット変換後の各サブバンドのヒストグラムを示す．図3.4(d)，図3.4(e)，図3.4(f)にあるように，高周波サブバンドでは， $c_{s_{\text{peak}}}$ が0であることがわかる．

次に, Jinna らの透かし埋め込み処理について説明する. まず, サブバンド s に対して, $P_+ = c_{s_{\text{peak}}}$, $P_- = c_{s_{\text{peak}}} - 1$ を設定する. Jinna らの手法では, P_+ と P_- の変換係数値に透かし情報を埋め込むため, 変換係数値が $(P_+ + 1)$ と $(P_- - 1)$ の出現頻度が 0 となるようにヒストグラムシフトを行う. ヒストグラムシフトは, 式 (3.4) のように表せる.

$$\hat{s}(x, y) = \begin{cases} s(x, y) + 1, & \text{if } s(x, y) \geq P_+ + 1 \\ s(x, y) - 1, & \text{if } s(x, y) \leq P_- - 1 \\ s(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで, $\hat{s}(x, y)$ は, ヒストグラムシフト適用後の変換係数である. ヒストグラムシフトの適用後, 変換係数値が $(P_+ + 1)$ と $(P_- - 1)$ である変換係数に透かし情報を埋め込む. 式 (3.5) に, Jinna らの埋め込み規則を示す.

$$\tilde{s}(x, y) = \begin{cases} \hat{s}(x, y) + w, & \text{if } \hat{s}(x, y) = P_+ + 1 \\ \hat{s}(x, y) - w, & \text{if } \hat{s}(x, y) = P_- - 1 \\ \hat{s}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.5)$$

ここで, $w \in \{0, 1\}$ は 2 値の透かし情報を表し, $\tilde{s}(x, y)$ は透かし埋め込み処理後の変換係数を表している.

ヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理が終了したら, 同じ P_+ , P_- を用いて, 別の高周波サブバンドでヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理を実行する. 全てのサブバンドで透かし埋め込み処理を終了し, なおかつ, 埋め込む透かし情報が残っている場合には, P_+ を $P_+ + 2$ に, P_- を $P_- - 2$ に, それぞれ更新して, 各サブバンドでヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理を実行する. 以上の処理を, 透かし情報を全て埋め込むまで繰り返す. 図 3.5 に Jinna らの透かし埋め込み手法の例を示す. この例では, 10 bit の透かし情報 ‘0101000011’ を埋め込んでいる. 図 3.5 において, 橙色のブロックはヒストグラムシフトが行われた変換係数を, 黄色のブロックは透かしビットが埋め込まれた変換係数を, それぞれ表す.

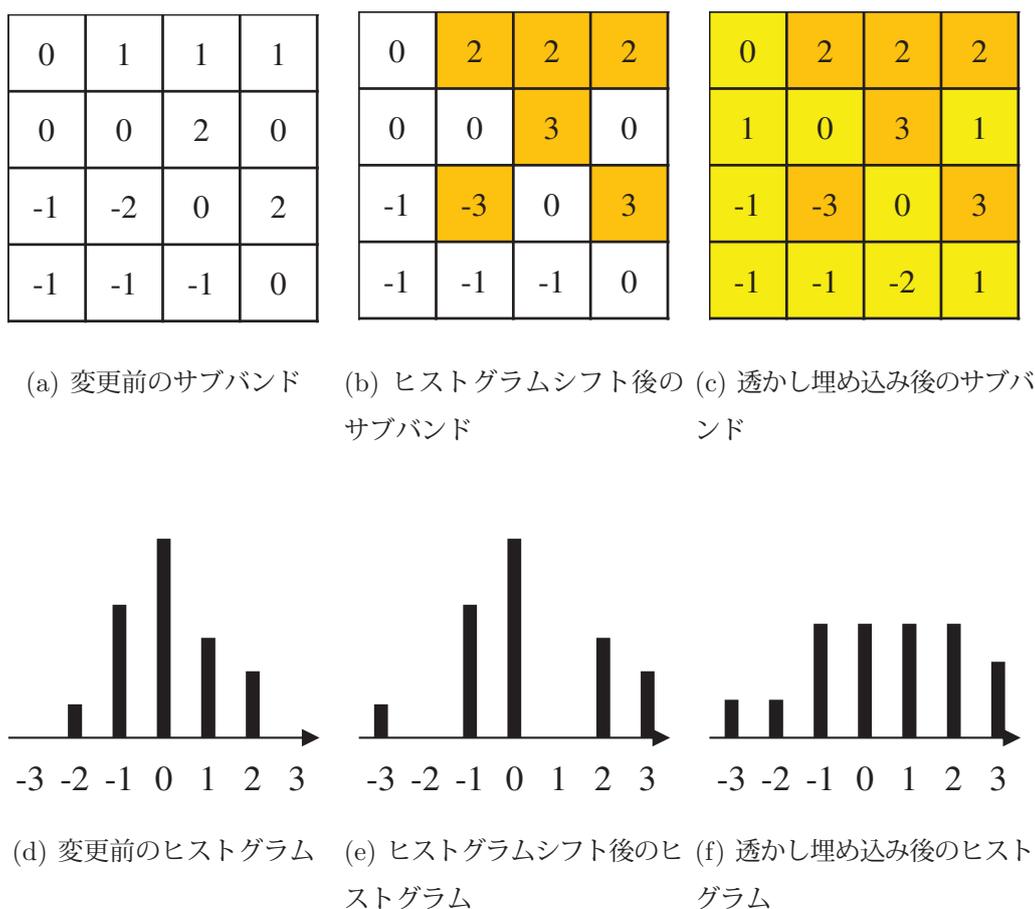


図 3.5 Jinna らの手法のヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理

3.2 多値埋め込みが可能な可逆電子透かし

これまで提案されてきた電子透かし手法の大半は、透かし情報を 2 値情報の系列として扱っている。これに対して、透かし情報を 2 値以上の情報として扱う Generalized Histogram Shifting-based Reversible Data Hiding (GHS-RDH) と呼ばれる手法が提案されている [26-31, 33, 70]。この手法は、1 bit の透かし情報を埋め込むところに多値シンボルを埋め込むことができるため、埋め込み容量を増加させることができる。本節では、画素ヒストグラムを利用した GHS-RDH について説明を行う [26-29]。

まず、画像 $\mathbf{I} = \{I(x, y)\}$ のヒストグラム $\mathbf{h} = \{h(v)\}$ を作成する。ここで、 $I(x, y)$ は、画像内の座標 (x, y) に位置する画素値であり、 $h(v)$ は、画素値 v の

画素の出現頻度を表している。次に、最頻値 v_{peak} を式 (3.6) を用いて求め、式 (3.7) のように、ヒストグラム内で最も長くゼロビンが続いている画素値の範囲を探索し、その範囲を、 $[v_{0_{\text{max}}}, v_{0_{\text{min}}}]$ とする。

$$v_{\text{peak}} = \arg \max_v h(v). \quad (3.6)$$

$$h(\omega) = 0, \forall \omega : v_{0_{\text{min}}} \leq \omega \leq v_{0_{\text{max}}}, \quad (3.7)$$

ここで、 $0 \leq v_{0_{\text{min}}} \leq v_{0_{\text{max}}} < v_{\text{peak}}$ と仮定する。つまり、図 3.7(a) のような関係になる。なお、図 3.6 は、16 値画像を仮定している。

この手法では、画素値が v_{peak} の画素に多値シンボルを埋め込む。そのため、ヒストグラムにおいて v_{peak} の隣りに連続している $(v_{\text{peak}} - 1)$ から $(v_{0_{\text{max}}} + 1)$ の範囲のビンをシフトし、ゼロビンを作成する必要がある。これは、画素値が $(v_{\text{peak}} - 1)$ から $(v_{0_{\text{max}}} + 1)$ の範囲である画素の画素値から、 q_m を引くことで実現できる。ここで、 q_m は、式 (3.8) で定義される..

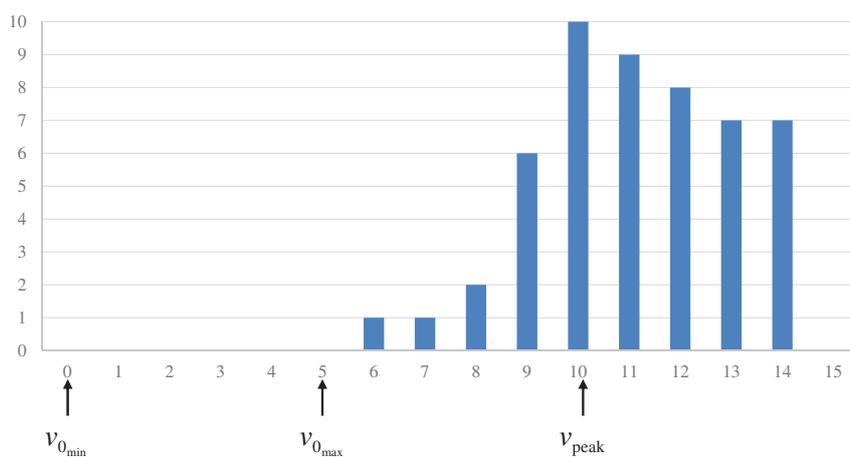
$$q_m = q - 1, \quad (3.8)$$

$$q = |v_{0_{\text{max}}} - v_{0_{\text{min}}}| + 2. \quad (3.9)$$

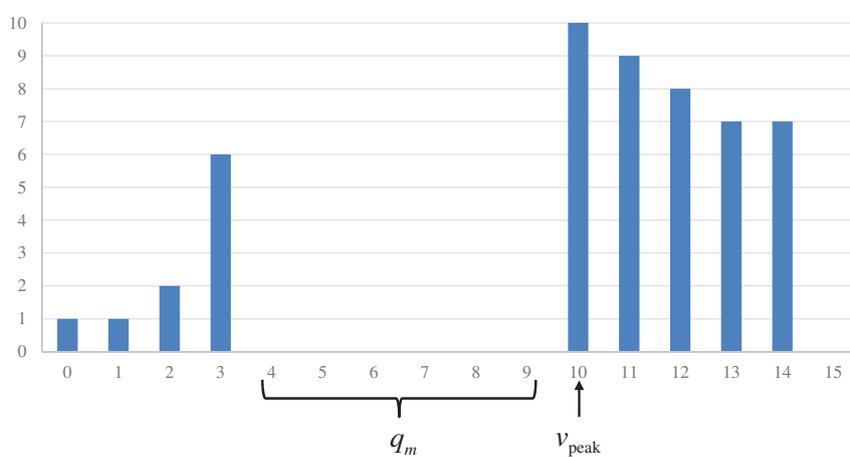
また、式 (3.9) から $q \geq 2$ である。ヒストグラムシフト適用後のヒストグラムを図 3.6(b) に示す。図 3.6(b) のように、ヒストグラムシフトを適用することで、 $(v_{\text{peak}} - 1)$ から $(v_{\text{peak}} - q_m)$ のヒストグラムビンがゼロビンとなる。画素値が v_{peak} である画素を、作成した q_m 個のゼロビンのいずれかに変更することで、透かし情報を埋め込むことを考えると、画素値を変更しないことを含めて、 q 値情報を埋め込むことができる。図 3.6(c) に、透かし埋め込み処理を適用したヒストグラムを示す。

以上を踏まえて、GHS-RDH によるヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理は、式 (3.10) で表現できる。

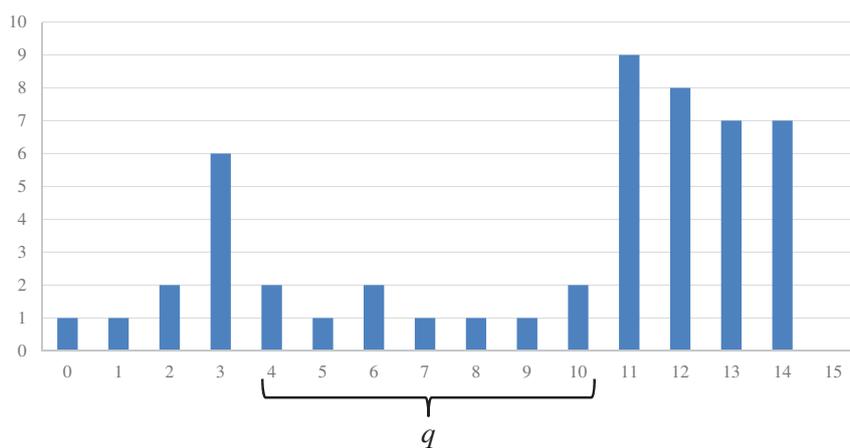
$$\tilde{I}(x, y) = \begin{cases} I(x, y) - w, & \text{if } I(x, y) = v_{\text{peak}} \\ I(x, y) - q_m, & \text{if } v_{0_{\text{max}}} < I(x, y) < v_{\text{peak}} \\ I(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.10)$$



(a) 原画像のヒストグラム



(b) ヒストグラムシフトの適用



(c) 透かし埋め込み処理を行ったヒストグラム

図 3.6 GHS-RDH によるヒストグラムの変化

ここで、 $\tilde{\mathbf{I}} = \{\tilde{I}(x, y)\}$ は透かし埋め込み画像を示し、 $w \in \{0, \dots, q_m\}$ は、 q 値の透かし情報を表す。説明した GHS-RDH の埋め込み容量は、 $h(v_{\text{peak}}) \log_2 q$ bit である。なお、図 3.6(c) の例では、 $10 \times \log_2 7 \approx 28$ bit が埋め込まれている。

3.3 多次元ヒストグラムを用いた可逆電子透かし

本節では、提案手法について述べる。3.2 節で説明した、Jinna らのウェーブレット変換を利用した可逆電子透かし手法 [24] は、高周波サブバンドのウェーブレット変換係数に透かし情報を埋め込む。図 3.4 に示すように、高周波サブバンドのヒストグラムは、0 を中心としたラプラス分布に近い分布となる傾向がある。それゆえ、原画像のヒストグラムや低周波サブバンドのヒストグラムを利用する場合よりも、効率的な透かし埋め込み処理を行うことができる。これは、自然画像の冗長性を利用できるためである。一方で、各高周波サブバンドへの透かし埋め込み処理は、それぞれ独立に行われており、サブバンド間の相関は考慮していない。それゆえ、サブバンド間の相関関係を考慮することで、より効率的な透かし埋め込み処理が実現できると考えられる。そこで、複数のサブバンドからヒストグラムを作成し、そのヒストグラムを基にサブバンドの変換係数に改変を加える可逆電子透かし手法を提案する。また、前節で述べた GHS-RDH の考え方を応用することで、埋め込み容量の増加についても検討を行った。

3.3.1 多次元ヒストグラム

本節では、まず、提案手法における複数のサブバンドから作成されるヒストグラム（多次元ヒストグラム）を定義する。次に、多次元ヒストグラムの特徴について説明する。以下では、説明を簡単にするために、2 つのサブバンドを利用する 2 次元ヒストグラムに限定して説明する。

ヒストグラムの作成に利用する 2 つのサブバンドを、それぞれ $\mathbf{s}_a = \{s_a(x, y)\}$, $\mathbf{s}_b = \{s_b(x, y)\}$ とする。ここで、 $s_a(x, y)$ は、サブバンド \mathbf{s}_a における座標 (x, y)

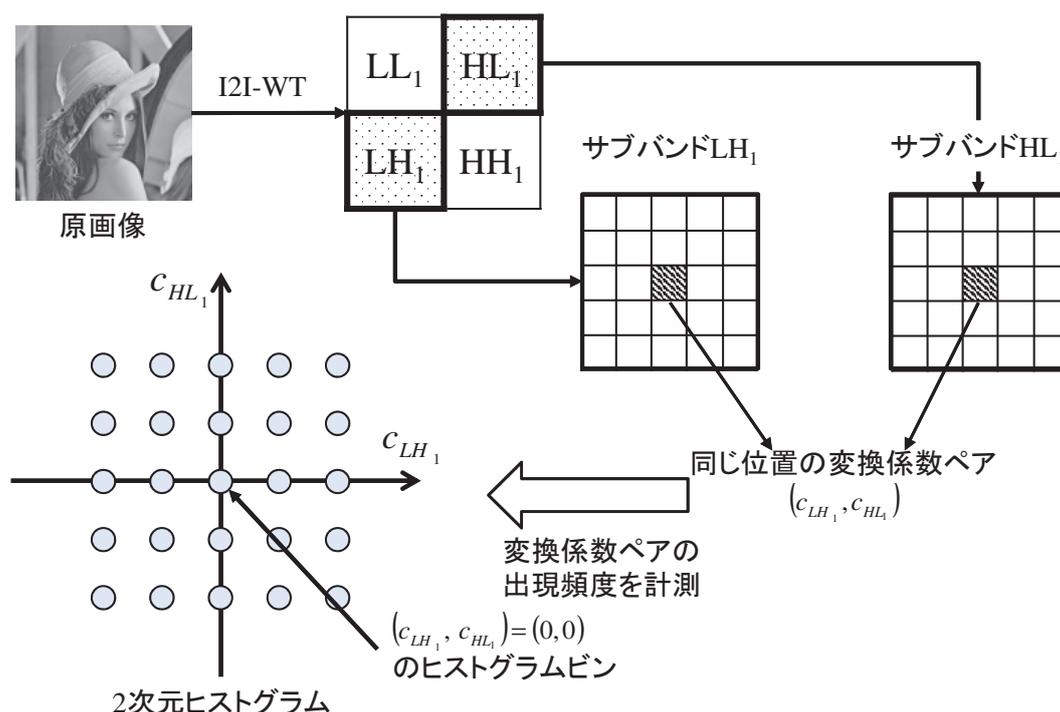


図3.7 2次元ヒストグラムの作成

に位置する変換係数であり、 $s_b(x, y)$ は、サブバンド s_b における座標 (x, y) に位置する変換係数である。これら2つのサブバンド s_a, s_b から作成される2次元ヒストグラム $\mathbf{h}_{2D} = \{h_{2D}(c_{s_a}, c_{s_b})\}$ は、2つのサブバンドにおける同じ位置の変換係数を一組として考え、各変換係数ペアの出現頻度を計測したものである。ここで c_{s_a}, c_{s_b} は、式 (3.11) で表せる。

$$\begin{aligned} c_{s_a} &= s_a(x, y) \\ c_{s_b} &= s_b(x, y) \end{aligned} \tag{3.11}$$

また、 $h_{2D}(c_{s_a}, c_{s_b})$ は、変換係数ペア (c_{s_a}, c_{s_b}) の出現頻度を表し、本論文では、 $h_{2D}(c_{s_a}, c_{s_b})$ をヒストグラムビンと呼ぶ。図3.7は、例として HL_1 サブバンドと LH_1 サブバンドで2次元ヒストグラムを作成する流れを表している。図3.7に示す2次元ヒストグラムは、ヒストグラムビンをドットとして表現することで、2次的に表現しているが、実際には、図3.8のように3次的に表現される。

次に、多次元ヒストグラムの特徴について説明する。まず、複数のサブバン

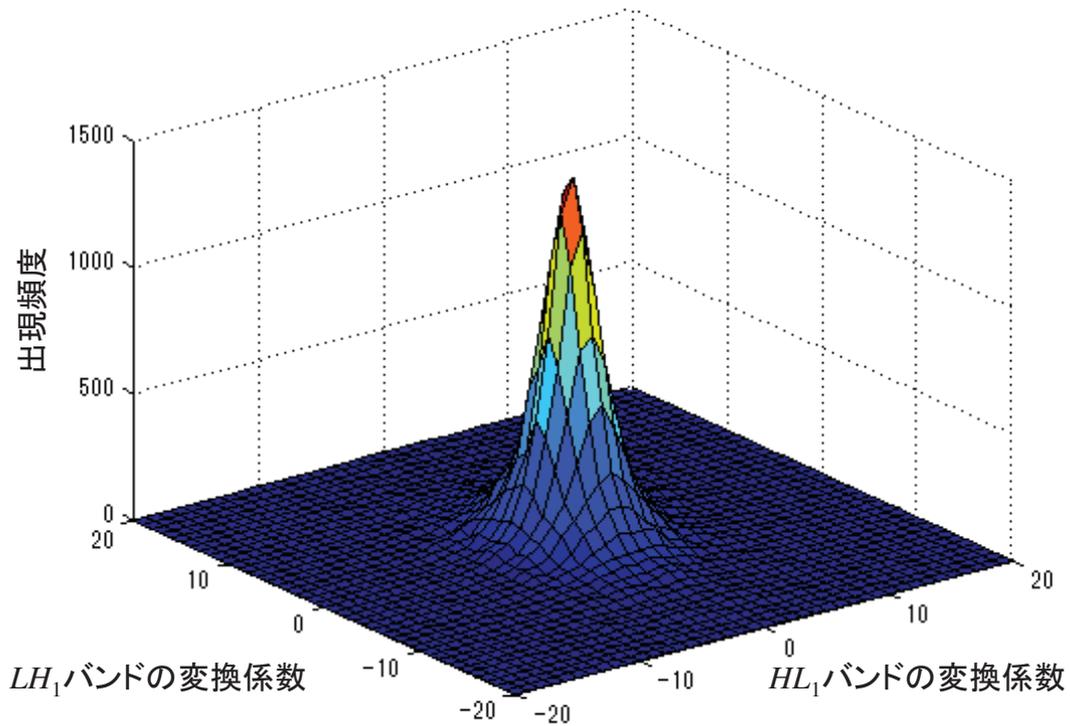


図3.8 2次元ヒストグラムの場合

ドから作成することで、サブバンド間の相関関係を考慮することができる。また、従来の1次元ヒストグラムと比較すると、ヒストグラムビンのシフトする方向を、ある程度選択することができる。図3.9に1次元ヒストグラムと2次元ヒストグラムのヒストグラムシフト方向を示す。図3.10(a)の1次元ヒストグラムに対して、最頻値のビンをシフトすることを考えると、右方向(正方向)か左方向(負方向)の2方向が考えられる。一方、図3.10(b)の2次元ヒストグラムに対して、 $(c_{sa}, c_{sb}) = (0, 0)$ のビンをシフトする方向は、上下左右に加え、斜め方向も利用できるため、少なくとも8方向が考えられる。多次元ヒストグラムの次元数が大きくなれば、シフト方向も増加する。それゆえ、様々な透かし埋め込み規則を構築することができると考えられる。

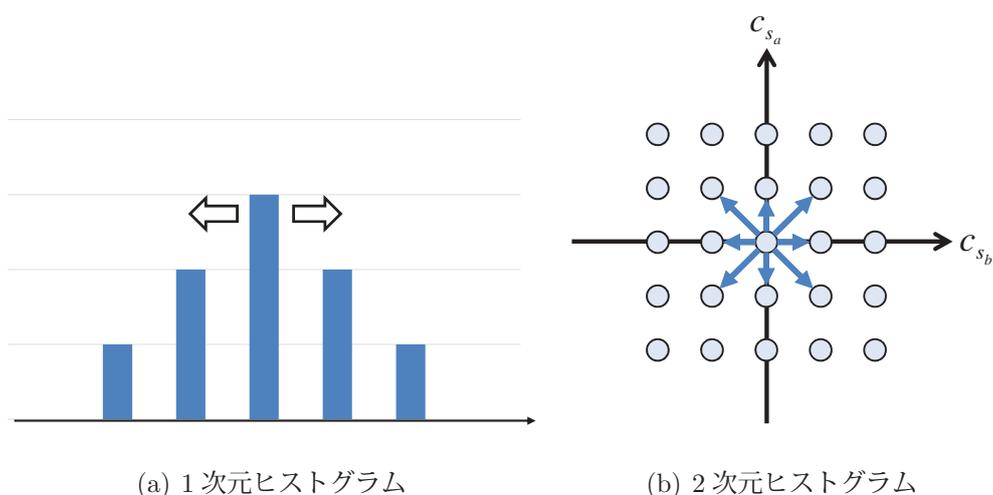


図 3.9 1次元ヒストグラムおよび2次元ヒストグラムにおけるヒストグラムシフト方向

3.3.2 多次元ヒストグラムに対するヒストグラムシフト

提案手法は、図 3.10 に示すように、複数のサブバンドからヒストグラムを作成し、そのヒストグラムを操作することで、透かし埋め込みを行う。図 3.10 は、 HL_1 バンドと LH_1 バンドから 2次元ヒストグラムを作成し、透かし埋め込み処理を行う例である。まず、原画像に対して、3.1.1 節で説明した I2I-WT を施し、ウェーブレット変換係数を取得する。次に、複数のサブバンドから多次元ヒストグラムを作成し、得られた多次元ヒストグラムに対して透かし情報を埋め込む。提案手法における透かし埋め込み処理では、ヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理に大別できる。本節では、提案する多次元ヒストグラムを利用した可逆電子透かし手法のヒストグラムシフトについて述べる。以下では、説明を簡単にするために、2次元ヒストグラムに限定して説明を行う。さらに、図 3.11 のように、2次元ヒストグラムの 4 象限を定義し、第 1 象限についてのみ説明する。なお、ほかの象限についての処理も、第 1 象限と同様の考え方で行うことができる。

提案手法のヒストグラムシフトについて説明する。まず、透かし情報を埋め込むビンを決定し、埋め込みビンと呼ぶことにする。提案手法では、式 (3.12)

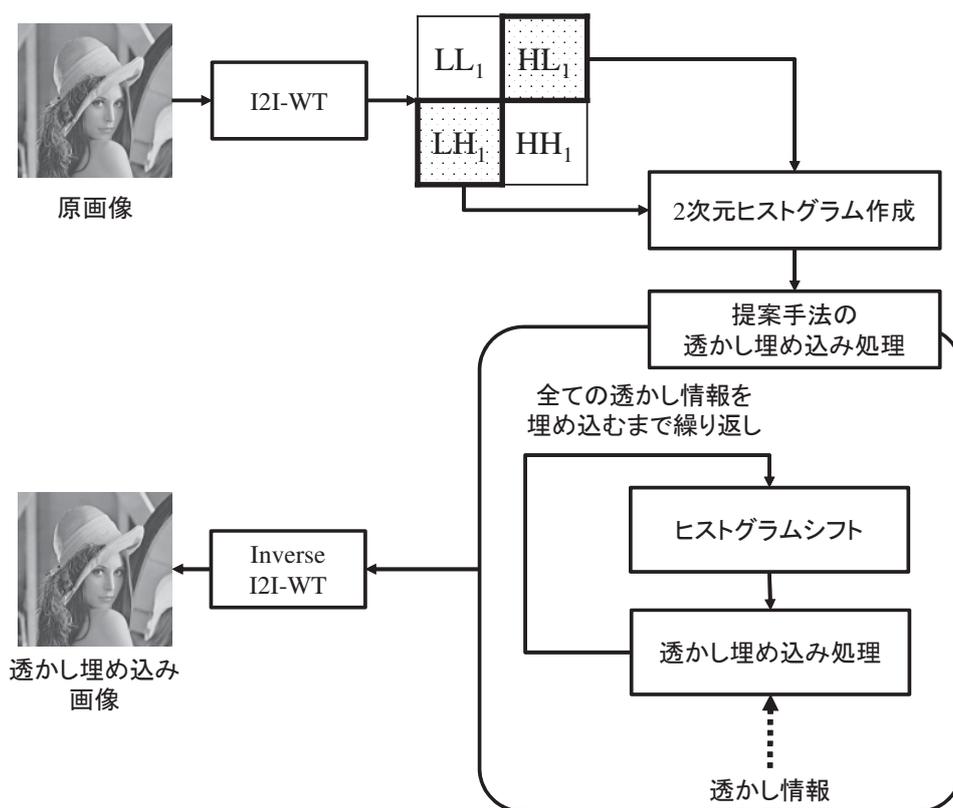


図 3.10 提案手法の概要

の条件を満たすビン $h_{2D}(c_{s_a}, c_{s_b})$ を埋め込みビンとして選択する。

$$c_{s_b} = -c_{s_a} + k \quad (3.12)$$

ここで、 k は式 (3.12) が表す直線の切片である。 k の初期値は、図 3.13(a) に示すように、 $k = 0$ である。図 3.13(a) において、式 (3.12) の条件を示す破線上の赤い点が、埋め込みビンである。埋め込みビンが決定したら、埋め込みビン以外のビンをシフトする。シフトする方向は、図 3.13(a) の青矢印であり、変換係数ペアは式 (3.13) のように変化する。

$$(\hat{c}_{s_a}, \hat{c}_{s_b}) = \begin{cases} (c_{s_a} + 1, c_{s_b} + 1), & \text{if } c_{s_b} > -c_{s_a} + k \\ (c_{s_a}, c_{s_b}), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.13)$$

ここで、 $(\hat{c}_{s_a}, \hat{c}_{s_b})$ は、ヒストグラムシフト後の変換係数ペアであり、図 3.13(a) にヒストグラムシフトを適用したヒストグラムは、図 3.13(b) である。図 3.13(b)

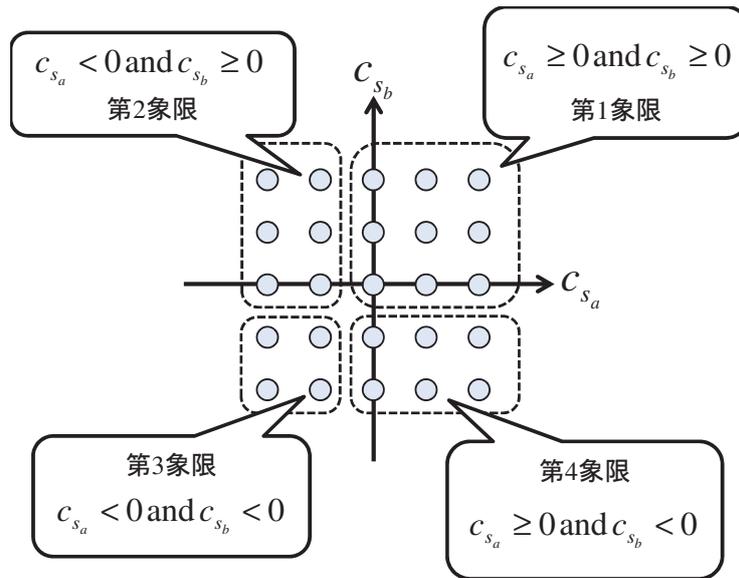


図 3.11 2次元ヒストグラムの4象限の定義

において，黄色の点は，ヒストグラムシフトによって作られた出現頻度が0のビン（ゼロビン）であり，埋め込みビンの水平方向と垂直方向に連続して存在していることがわかる．提案手法では，埋め込みビン（赤い点）のデータをゼロビン（黄色の点）に振り分けることで透かし情報を埋め込む．また，ゼロビンは複数個作られるので，GHS-RDHを適用することができる．

2.5.2節で説明したヒストグラム変更型，差分拡張型，予測誤差拡張型の可逆電子透かし手法 [18, 20, 26–31, 33, 39–54, 56–61, 70, 74] は，一般に，ヒストグラムシフト処理でゼロビンを作成し，埋め込みビンにあるデータをゼロビンに分配することで，透かし情報を埋め込む．これらの手法の大半は，1次元ヒストグラムを利用しているため，一回のヒストグラムシフトで作られるゼロビンは，通常は1つである．GHS-RDH [26–31, 33, 70] のように，複数のゼロビンを作成することも考えられるが，そのためには，ヒストグラムを大きく改変する必要があり，透かし埋め込み画像の画質劣化が大きくなる．これに対して，2次元ヒストグラムを利用することで，わずかなヒストグラムシフトで複数のゼロビンを利用することができる．これは，2次元ヒストグラムの利点と言える．さらに，複数のゼロビンを利用することで，GHS-RDHも適用可能である．

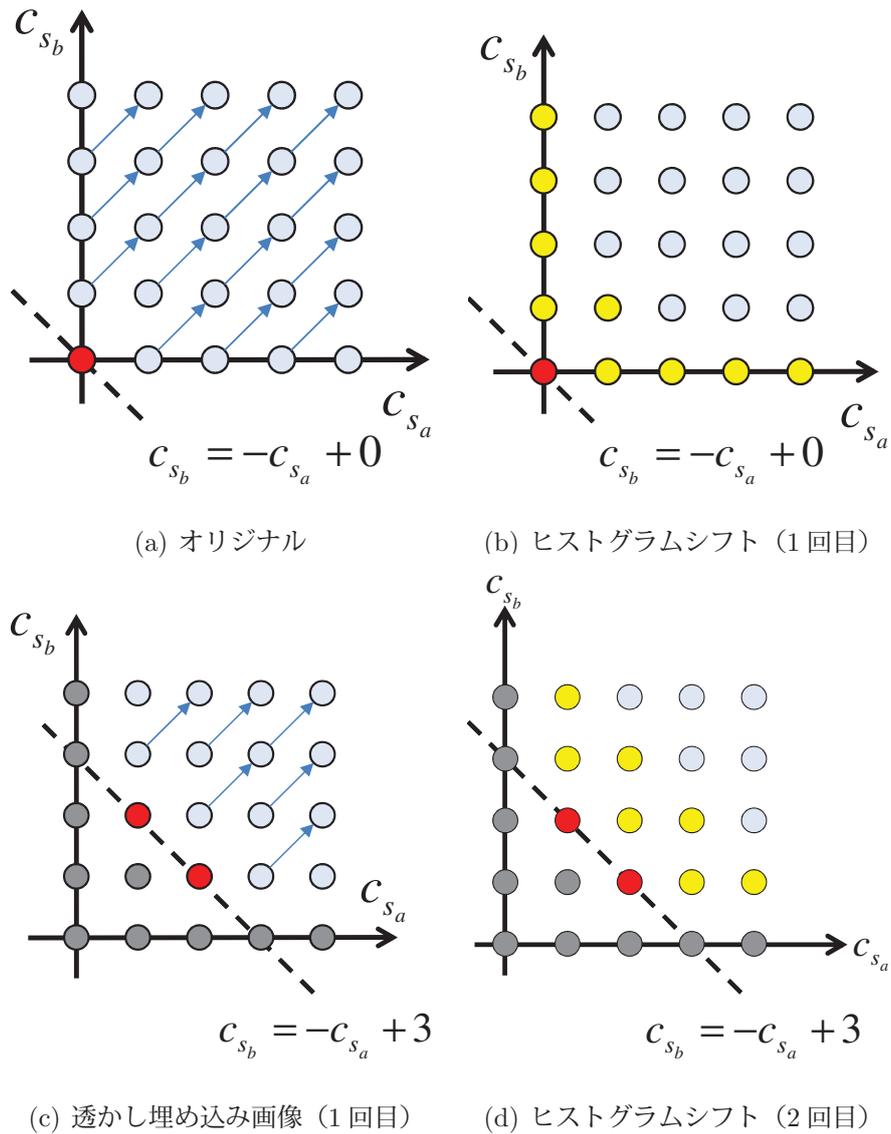


図 3.12 透かし埋め込み処理による2次元ヒストグラムの変化

なお、GHS-RDHを用いた埋め込み処理は、3.3.3節で述べる。

透かし埋め込み処理後、埋め込む透かし情報が残っていれば、次の埋め込みビンを選択し、ヒストグラムシフトを行う。次の埋め込みビンを選択するためには、式(3.12)の k を $k+3$ に更新する。図3.13(c)に、図3.13(b)のゼロビンに透かし埋め込みを行ったヒストグラムを示す。ここで、すでに透かし情報が埋め込まれたビンは、ヒストグラムシフトの対象外とする。以上の処理を繰り返すことで、ヒストグラムシフトを行っている。

以上の説明は、第1象限についての処理である。他の象限については、 k の

表 3.1 各象限のパラメータの対応

	式 (3.12)	k	シフト方向
第1象限	$c_{s_b} = -c_{s_a} + k$	0	$(c_{s_a} + 1, c_{s_b} + 1)$
第2象限	$c_{s_b} = c_{s_a} + k$	1	$(c_{s_a} - 1, c_{s_b} + 1)$
第3象限	$c_{s_b} = -c_{s_a} + k$	-2	$(c_{s_a} - 1, c_{s_b} - 1)$
第4象限	$c_{s_b} = c_{s_a} + k$	-1	$(c_{s_a} + 1, c_{s_b} - 1)$

初期値, シフト方向が異なるだけで, 同様のアルゴリズムで実行できる. 各象限におけるパラメータを表 3.1 に示す.

3.3.3 多次元ヒストグラムへの GHS-RDH

本節では, 前節で説明したヒストグラムシフトにより作られた複数のゼロビンに対して, GHS-RDH による透かし埋め込み処理について説明する. 提案手法では, 埋め込みビンの個数とヒストグラムシフト回数が等しい. すなわち, 1回目のヒストグラムシフトでは埋め込みビンは1つ, 2回目のヒストグラムシフトでは埋め込みビンは2つ, i 回目のヒストグラムシフトでは埋め込みビンは i 個存在することになる. 今, i 個の埋め込みビンを $e_{i,1}, \dots, e_{i,i}$ とする. ここで, $e_{i,j}$ は, i 回目のヒストグラムシフトにおける j 番目の埋め込みビンを目指す. なお, 埋め込みビンのインデックスは, 図 3.13 に示すように, c_{s_a} の絶対値が小さい順である. また, 図 3.13 は, 3回目のヒストグラムシフトを行った2次元ヒストグラムである. これらを踏まえて, 埋め込みビンとゼロビンの割り当てを行う.

まず, 各埋め込みビンの埋め込み可能な多値シンボルを決定する. 図 3.13 を例に説明する. 3つの埋め込みビンの中で, $e_{3,2}$ は青の直線矢印で示す隣り合う2つのゼロビンを利用できる. ゆえに, $e_{3,2}$ は, 変更しない場合を含めて, 3値シンボルの埋め込みが可能である. ヒストグラムシフトが i 回目実行された

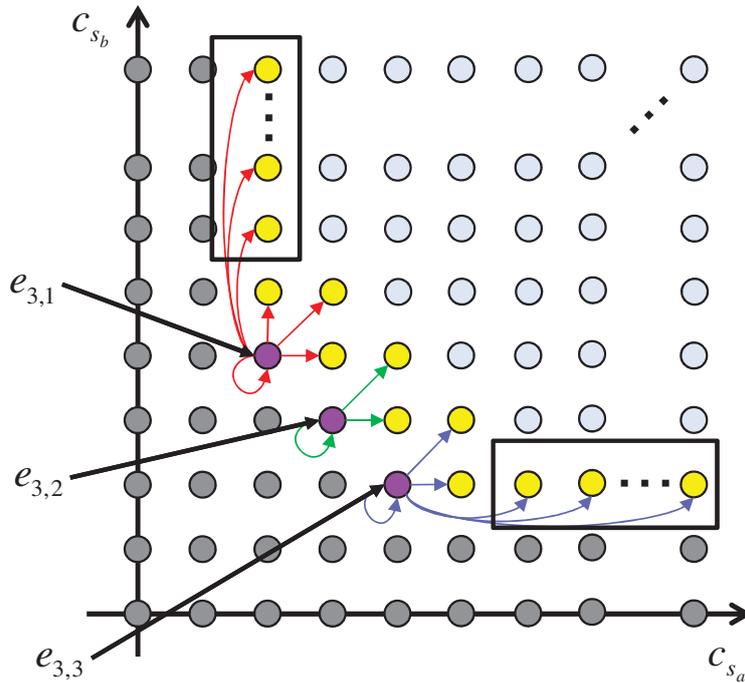


図 3.13 埋め込みビンのインデックスと埋め込みビンの割り当て対応

ことを考えると、埋め込みビン $e_{i,2}, \dots, e_{i,i-1}$ 、つまり、インデックスが2から $i-1$ までの埋め込みビンは、 $e_{3,2}$ と同様に、3 値シンボルの埋め込みが可能である。次に、最初の埋め込みビン $e_{i,1}$ と最後の $e_{i,i}$ について考える。図 3.13 に示す $e_{3,1}$ の近傍には、3つのゼロビンが存在するため、4 値シンボルの埋め込みが可能である。同様に、最後の埋め込みビンは $e_{3,3}$ は、3 値シンボルを埋め込むことができる。さらに、 $e_{3,1}$ は垂直方向、 $e_{3,3}$ は水平方向に、図 3.13 において黒枠で囲っている多数のゼロビンが存在しており、これらも利用可能である。提案手法では、利用するゼロビンをパラメータ θ で制御する。パラメータ θ は、利用するゼロビンの個数を表しており、埋め込み容量を大きくしたい場合は、 θ を大きく、透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制したい場合は、 θ を小さくする。パラメータ θ の導入を踏まえると、 $e_{3,1}$ は $\theta + 4$ 値シンボル、 $e_{3,3}$ は $\theta + 3$ 値シンボルの埋め込みが可能である。以上をまとめると、任意の埋め込みビン $e_{i,t}, t \in \{1, \dots, i\}$ に埋め込み可能な $q_{i,t}$ 値シンボルは、式 (3.14) で表

現することができる.

$$q_{i,t} = \begin{cases} \theta + 4, & \text{if } t = 1 \\ 3, & \text{if } 1 < t < i \\ \theta + 3, & \text{if } t = i. \end{cases} \quad (3.14)$$

なお, 例外として, $i = 1$ のとき, すなわち, 1 回目のヒストグラムシフトの場合, 埋め込みビン $e_{1,1}$ のみである. 図 3.13(b) から, $e_{1,1}$ の近傍に存在するゼロビンは 3 つであるため, 4 値シンボルの埋め込みが可能である. さらに, $e_{1,1}$ の水平方向と垂直方向に多数のゼロビンが存在し, 利用可能であるため, $q_{1,1} = 2\theta + 4$ となる.

3.4 シミュレーション

本節では, 提案手法である 2 次元ヒストグラムを利用した可逆電子透かし手法の性能評価を行うため, 3.1.2 節で述べた Jinna らの手法 [24] との比較実験を行い, その結果について考察する.

3.4.1 シミュレーション条件

まず, シミュレーション条件について述べる. シミュレーションには, 図 3.14 に示す 5 枚のグレースケール画像を用いた. 5 枚の画像のうち, 画像 airplane, 画像 baboon, 画像 lake, 画像 lana の 4 枚の画像サイズは, 512×512 pixel であり, 画像 barbara は 512×480 pixel である. また, 使用画像の階調数は, 全て 8 bpp である. 提案手法, Jinna らの手法の両方で, 透かし埋め込み対象画像に可逆ウェーブレット変換を施すが, シミュレーションでは, 式 (3.1), (3.2) で示した可逆 Haar 変換を用いた.

また, 提案手法は多次元ヒストグラムを基に変換係数値を変更するが, シミュレーションでは, 2 次元ヒストグラムを対象とし, オクターブ分割 1 回で得られる HL₁ バンドと LH₁ バンドから 2 次元ヒストグラムを作成する. Jinna らの手法でも同様に, HL₁ バンドと LH₁ バンドを透かし情報の埋め込み対象と

する。提案手法における利用するゼロビンの個数を設定するパラメータ θ は、10 から 30 まで 5 刻みで変化させた。提案手法と Jinna らの手法の両方において、埋め込み容量が大きくなるほど変換係数値の変更量も大きくなり、透かし埋め込み処理後に逆ウェーブレット変換を施して得られる透かし埋め込み画像は原画像と異なる画質となり、場合によっては、一部の画素値でオーバーフロー、またはアンダーフローが発生する可能性がある。ここで、オーバーフロー、アンダーフローとは、透かし埋め込み処理により画素値が本来とり得る範囲外に変化することを指す。例として、8 bpp 画像の画素値は、最小値が 0、最大値が 255 の 256 階調であり、透かし埋め込み処理により画素値が 0 未満となればアンダーフロー、256 以上となればオーバーフローである。一般に、オーバーフロー、アンダーフローが発生した場合には、丸め処理が施される。すなわち、アンダーフローが発生した画素は 0 に、オーバーフローが発生した画素は 255 となる。これらが発生すると、画像に可逆ウェーブレット順変換を適用して得られる変換係数へ可逆電子透かしアルゴリズムを用いて透かし情報を埋め込み、透かしが埋め込まれた変換係数を可逆ウェーブレット逆変換で画像に戻したとしても、一部の情報が失われるため、再び可逆ウェーブレット変換を施し、変換係数に対して透かし抽出処理を行ったとしても、透かし埋め込み画像を原画像に戻すことができない。それゆえ、シミュレーションでは、オーバーフロー・アンダーフローの発生が確認されるまで、透かし埋め込み処理を行い、オーバーフロー、アンダーフローが発生しない範囲の結果を比較する。また、埋め込む透かし情報は、一様分布の 2 値のランダム系列とし、各パラメータに対して、異なる乱数により発生させた透かし情報を用いて、埋め込み処理を 10 回行った平均値を最終的な結果とした。

可逆電子透かしの評価尺度は、埋め込み容量と透かし埋め込み画質である。シミュレーションでは、透かし埋め込み画像の画質評価として、式 (3.15) に示す Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) を用いた。

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{x_{\max}^2}{MSE} \quad [\text{dB}] \quad (3.15)$$

$$MSE = \frac{1}{XY} \sum_{j=1}^Y \sum_{i=1}^X (x_{i,j} - y_{i,j})^2 \quad (3.16)$$

ここで、 x_{\max} は、とり得る画素値の最大値であり、 X および Y は画像のサイズ、 $x_{i,j}$ 、 $y_{i,j}$ はそれぞれ原画像と透かし埋め込み画像の画素位置 (i, j) の画素値である。シミュレーションでは、埋め込み容量と PSNR の関係を表すレート歪み (RD) 曲線により、各手法の性能評価を行う。

3.4.2 シミュレーション結果

本節では、前節に示したシミュレーション条件で、提案手法と Jinna らの手法を比較した結果を示す。図 3.15～図 3.19 に、シミュレーション結果として RD 曲線を示す。

まず、提案手法のパラメータ θ の影響について評価する。図 3.15～図 3.19 において、 θ が大きいほど、PSNR は小さくなるが、埋め込み容量は大きくなっている。また、図 3.16 に示す画像 baboon 以外の RD 曲線では、埋め込み容量がある程度大きくなると、埋め込み効率が急激に下がり、同じ埋め込み容量ならば、 θ をより大きくした方が PSNR が大きくなることが確認できる。 θ を大きくすることによって、1つの変換係数に埋め込まれる情報量が増加する。同じ変換係数への埋め込みを行うことを考えた場合、 θ を大きくした方が埋め込み容量は大きくなる。しかし、 θ を大きくすることで、変換係数の変更量は大きくなるため、PSNR は小さくなる。それゆえ、埋め込み容量が小さい場合、 θ が小さいほうが良好な埋め込み効率となったと考えられる。

次に、埋め込み容量がある程度大きくなったときに、埋め込み効率が急激に下がる原因について考える。提案手法は、2次元ヒストグラムにおいて、 $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 0)$ のビンヒストグラムの中心とすると、中心のビンからヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理を繰り返して行う。ウェーブレット変換係数のヒストグラムは、図 3.8 のようにラプラス分布状になるため、中心のビンの出現頻度が最も大きく、中心のビンから外側のビンにかけて出現頻度は小さくなる。

ヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理を繰り返していくうちに、埋め込みビンに含まれる要素数は少なくなっていくため、1回のヒストグラムシフトと透かし埋め込み処理で埋め込むことのできる情報量は減少する。その反面、ヒストグラムシフトによる変換係数の移動誤差は、ヒストグラムシフトを繰り返すほど大きくなる。それゆえ、埋め込み効率が急激に低下したと考えられる。

次に、提案手法と Jinna らの手法を比較する。図 3.15～図 3.19 において、埋め込み容量が小さい場合、提案手法は Jinna らの手法よりも PSNR が小さくなり、埋め込み効率は劣っている。一方で、埋め込み容量が大きくなるほど、提案手法の埋め込み効率は、図 3.16 を除いて、Jinna らの手法を上回ることが確認できる。特に、図 3.15 と図 3.19 において顕著である。Jinna らの手法は、各サブバンドごとに独立して透かし埋め込み処理を行い、透かし情報は 2 値情報を埋め込む。提案手法は、GHS-RDH を利用して多値情報を埋め込んでおり、パラメータ θ で埋め込む多値情報を調節できる。多値情報の埋め込みは、1つの変換係数ペアに埋め込む情報量を増加させることができるが、変換係数の変更量も大きくなり、PSNR が低下しやすい。そのため、埋め込み容量が小さい場合では、2 値情報を埋め込む Jinna らの手法よりも埋め込み効率が低下するが、埋め込み容量が大きい場合では、Jinna らの手法を上回ることができたと考えられる。

図 3.16 に示す画像 baboon の埋め込み効率は、他の画像と異なり、常に Jinna らの手法よりも劣っている。この原因について考察する。図 3.20 に画像 baboon の 2 次元ヒストグラムを、図 3.21 に画像 airplane の 2 次元ヒストグラムを示す。図 3.20 からわかるように、画像 baboon は、他の 4 枚の画像と比較して、テクスチャ成分が多く含まれるため、高周波サブバンドにエネルギーの大きい変換係数が多く存在する。また、出現頻度が最大となる変換係数値は他の画像と同様に $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 0)$ ではあるが、その出現頻度は画像 airplane に比べて少ない。また、図 3.20 から、エネルギーの大きい変換係数の出現頻度も画像 airplane と比べて大きいことが確認できる。前述した通り、提案手法は、エネ

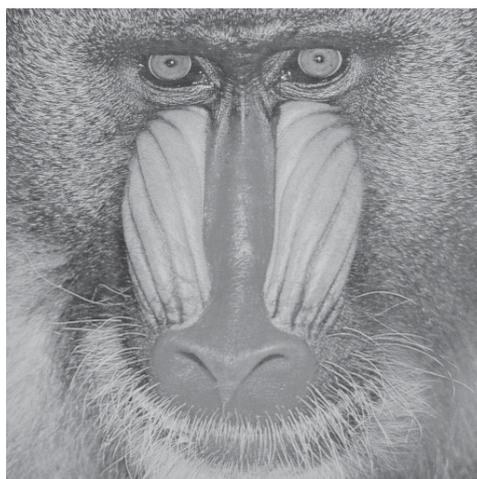
ルギーの小さい変換係数のビンから順番に透かし埋め込みに利用していく。そのため、エネルギーの大きい変換係数の頻度が高い場合、そのビンに透かし情報を埋め込む前に、複数回ヒストグラムシフトが行われるため、そのビンに属する変換係数には、透かし埋め込み処理による変更量だけでなく、ヒストグラムシフトによる変更量も加わり、埋め込み容量に対する PSNR は低下する。そのため、提案手法では、良好な埋め込み効率を得られなかったと考えられる。

3.5 まとめ

本章では、ウェーブレット変換によって得られるサブバンド間の相関を考慮するために、複数のサブバンドから作成する多次元ヒストグラムを利用した可逆電子透かし手法を提案した。また、本論文では、可逆電子透かしの評価尺度である透かし埋め込み画像の画質と透かし情報の埋め込み容量に関する検討を行っており、本章では、埋め込み容量の増加させるための検討を行ってきた。提案手法では、1つの変換係数ペアに埋め込む透かし情報を多値情報として扱うことにより、埋め込み容量の増加を図る GHS-RDH を利用した。その結果、埋め込み容量が小さい場合では、従来手法よりも埋め込み効率が劣るが、埋め込み容量が大きい場合には、従来手法を上回る性能を得ることを確認した。一方で、図 3.15(b) のように、エッジやテクスチャ領域などの高周波成分を多く含む画像に対しては、良好な埋め込み効率を得ることはできなかった。そのため、高周波成分を多く含む画像に対しても、良好な埋め込み効率を得られる手法について検討が必要である。また、提案手法は、埋め込み容量が大きい場合は、従来手法以上の埋め込み効率を達成できたが、埋め込み容量が小さい場合には、良好な埋め込み効率を得られていない。次章では、埋め込み容量が小さい場合に良好な埋め込み効率を得られるように、透かし埋め込み画像の画質劣化抑制について検討を行う。



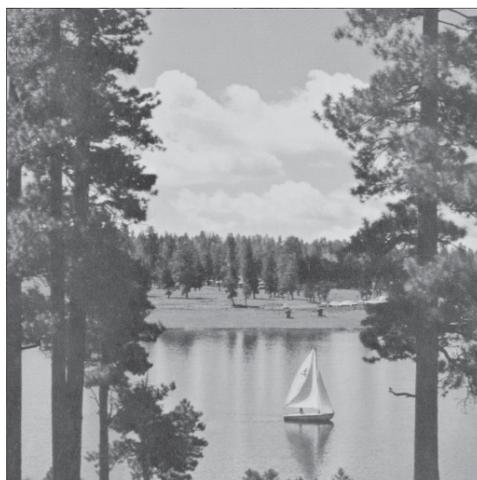
(a) 画像 airplane



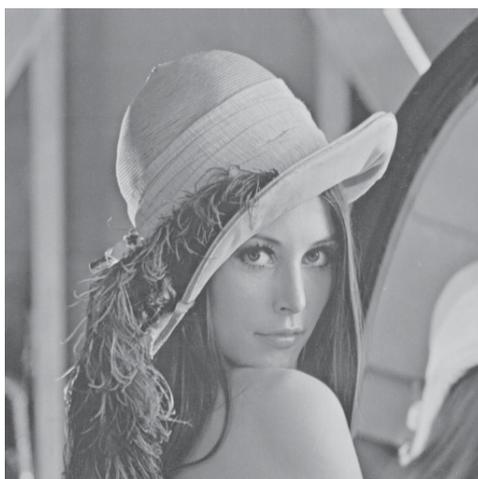
(b) 画像 baboon



(c) 画像 barbara



(d) 画像 lake



(e) 画像 lena

図 3.14 使用画像

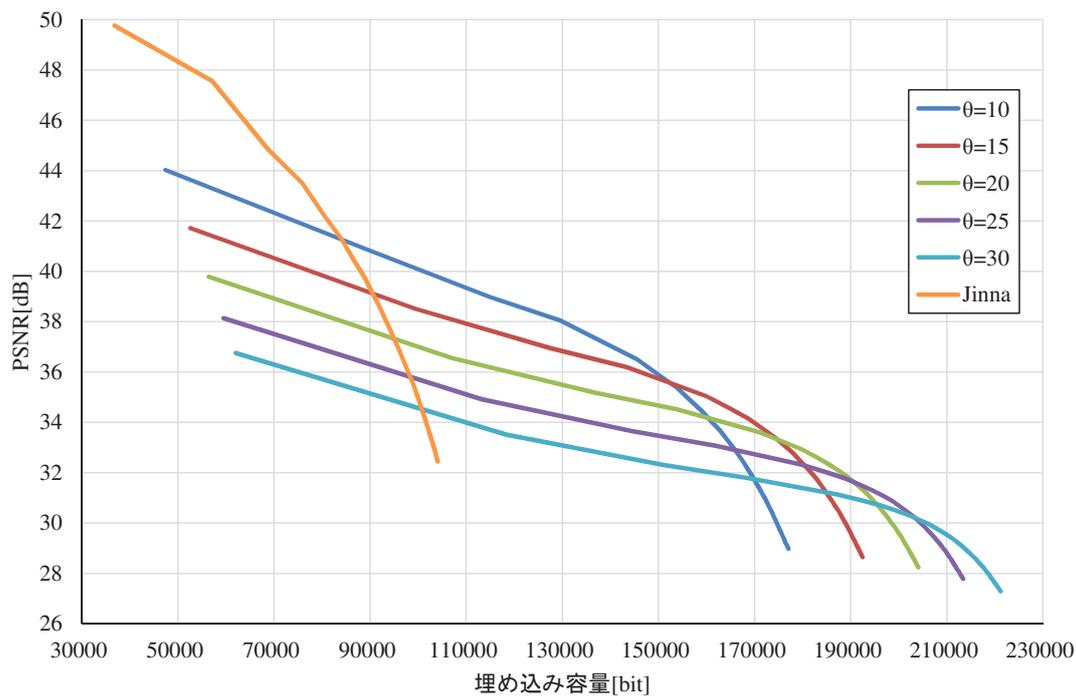


図 3.15 RD 曲線 (画像 airplane)

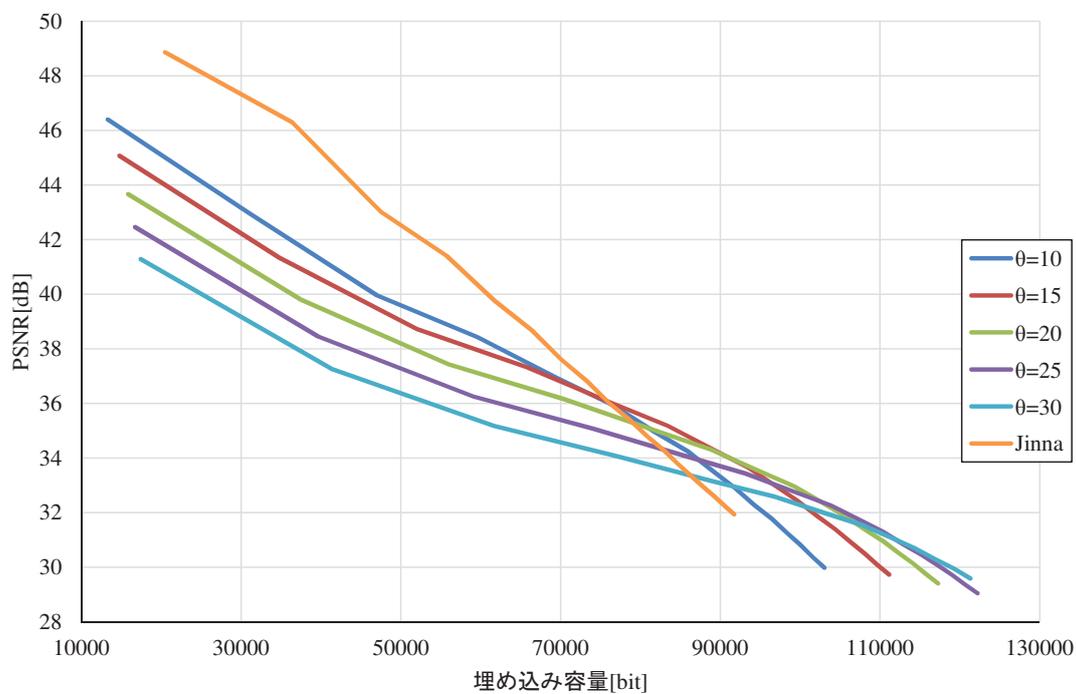


図 3.16 RD 曲線 (画像 baboon)

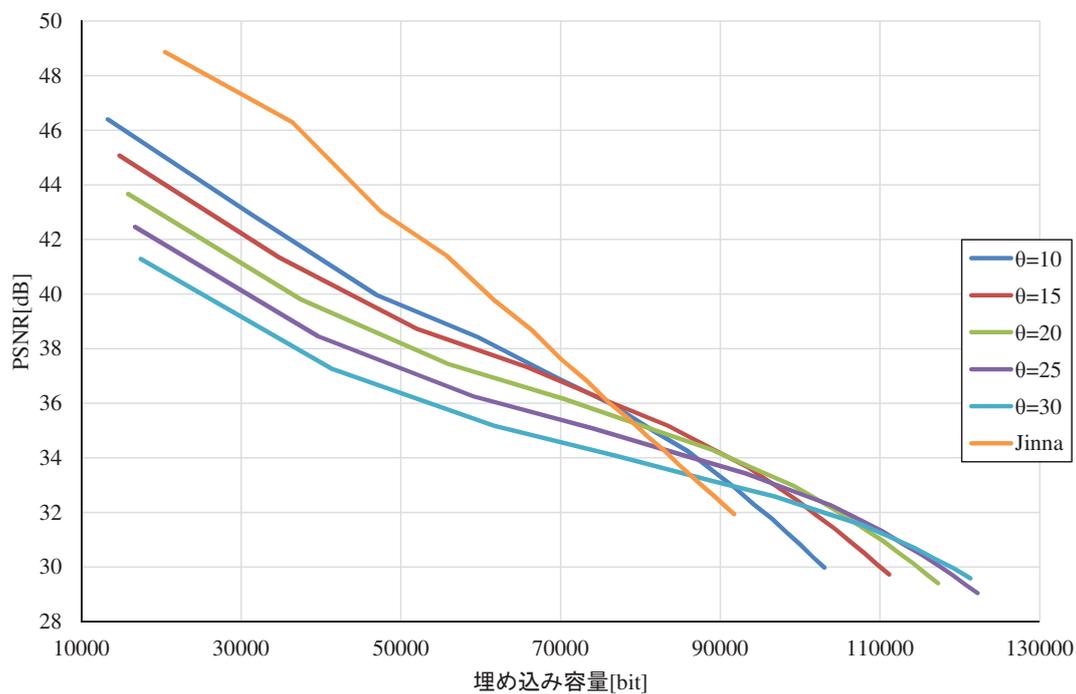


図 3.17 RD 曲線 (画像 barbara)

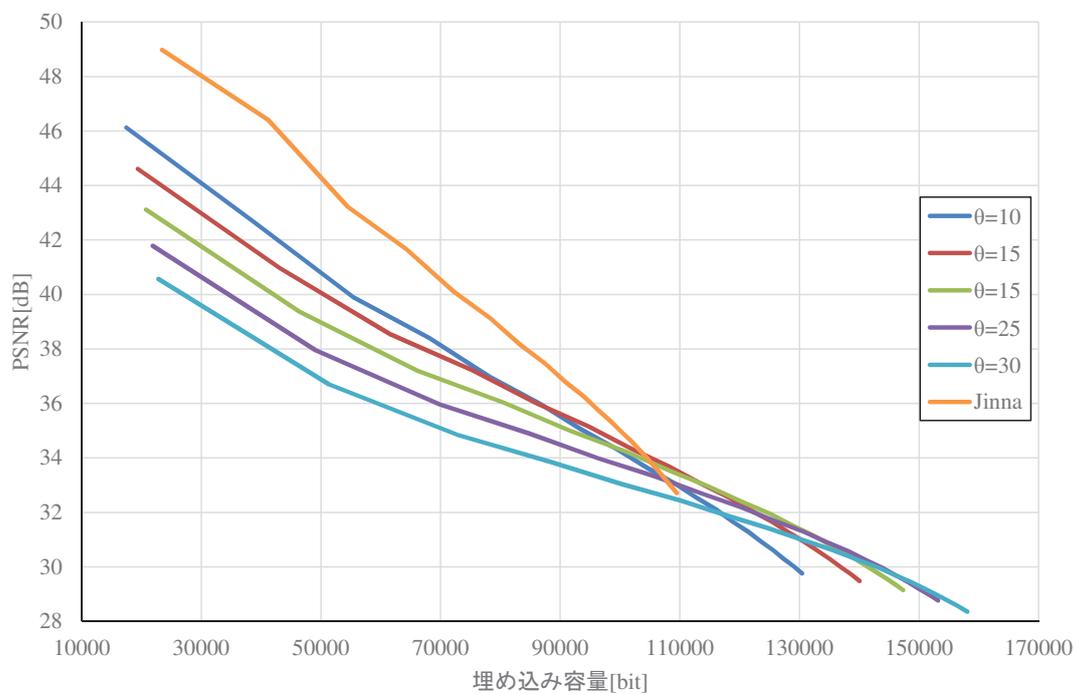


図 3.18 RD 曲線 (画像 lake)

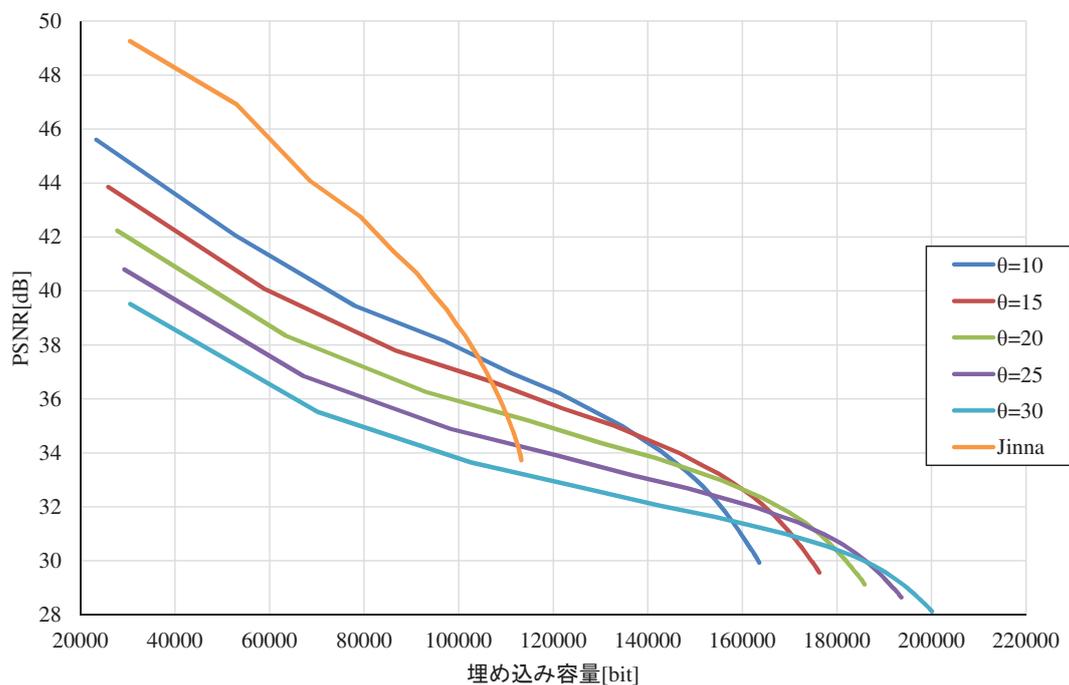


図 3.19 RD 曲線 (画像 lena)

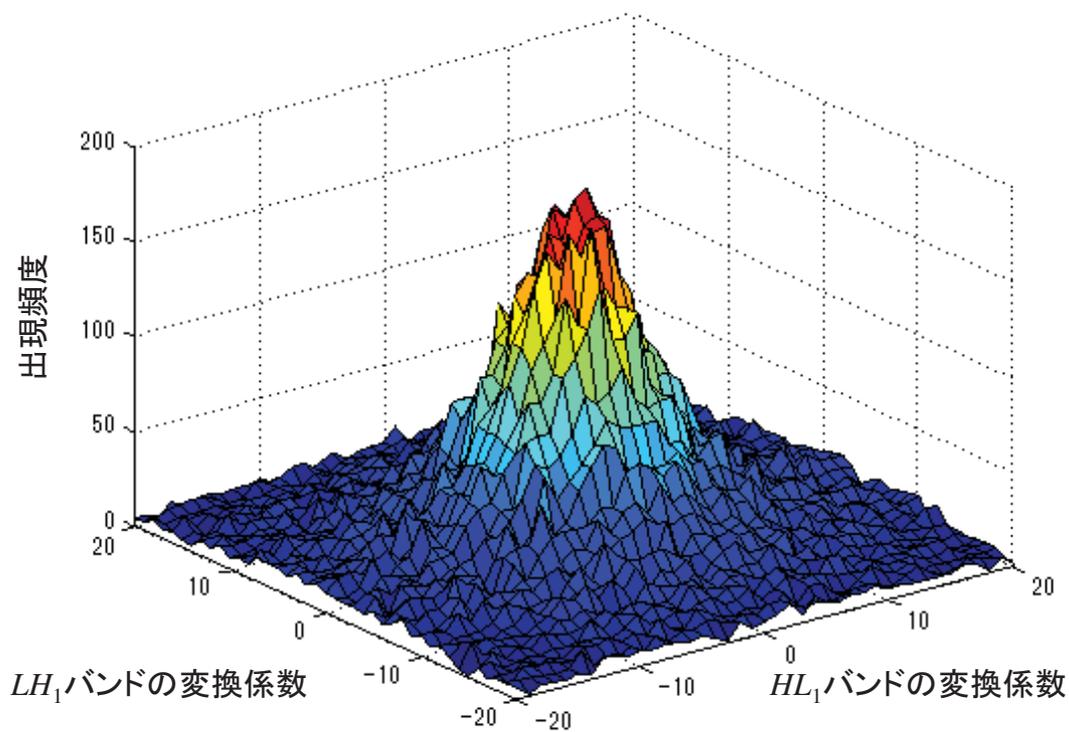


図 3.20 画像 baboon の 2 次元ヒストグラム

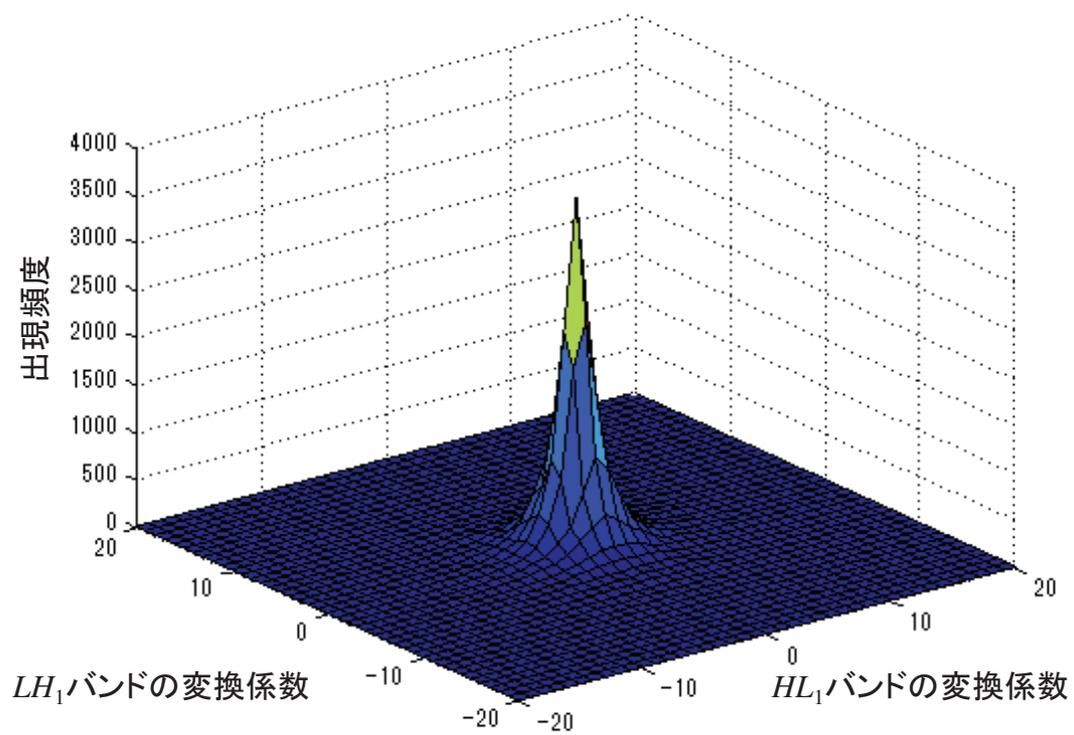


図 3.21 画像 airplane の 2 次元ヒストグラム

第4章 画質劣化を抑制する可逆電子透かし

本節では、提案手法の2つ目の検討である画質劣化の抑制について述べる。まず、4.1節で、画質劣化の抑制手法の一つとして、知覚的な画質劣化を考慮した手法について述べる。次に、4.2節で、提案する多次元ヒストグラムを利用する上で、画質劣化が顕著となる要因について考察し、4.3節で、画質劣化を抑制するための基礎検討を行う。また、4.4節では、利用するヒストグラムビンを制限することで、透かし埋め込み処理のさらなる効率化を図る。以上の内容を4.5節でまとめる。

4.1 知覚的な画質劣化を考慮した電子透かし

本節では、画質劣化を抑制する手法の一つとして、クラス間分散を利用した電子透かし手法 [12] を説明する。この手法は、画素値変更型の電子透かし手法であり、透かし埋め込み処理による画質劣化の視認しにくい部分を利用する。クラス間分散を利用した手法の概要を図4.1に示す。

まず、画像を一定サイズのブロックに分割し、各ブロックに判別分析法 [66] を適用する。

判別分析法は、画像2値化のためのしきい値自動決定法の一つであり、画像の輝度ヒストグラムから統計的な意味で最適なしきい値を決定する。図4.2に示すように、ある画像の輝度ヒストグラムをある輝度値 t を境界として2つのクラスに分割することを考える。輝度値が小さい方のクラスを C_0 、大きい方のクラスを C_1 とすると、この2つのクラスの分布の分離度を最大にする t が求めるしきい値である。判別分析法における分離度は、式(4.1)に示すクラス

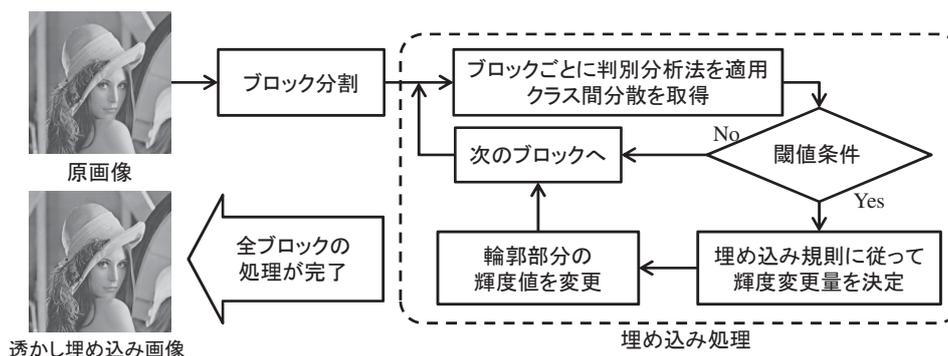


図 4.1 クラス間分散を利用した透かし埋め込み手法の概要

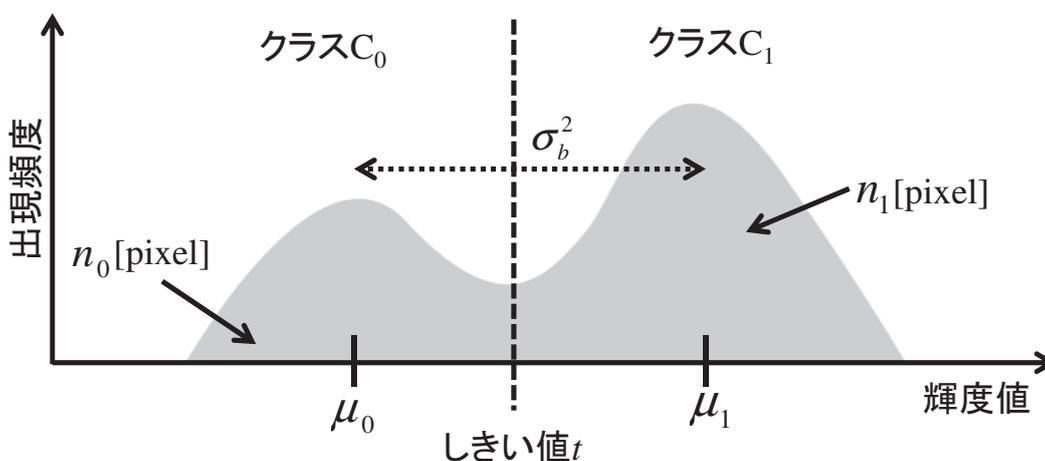


図 4.2 判別分析法

間分散 σ_b^2 により表現される。

$$\sigma_b^2 = \frac{n_0 n_1 (\mu_0 - \mu_1)^2}{n_{total}^2} \quad (4.1)$$

ここで、 n_0 、 n_1 はそれぞれ C_0 と C_1 に属する画素数であり、画像全体の画素数 $n_{total} = n_0 + n_1$ である。 μ_0 、 μ_1 は C_0 と C_1 の平均輝度値を表している。

クラス間分散を利用した透かし埋め込み手法では、各ブロックに対してクラス間分散最大値を求める。ブロック内に輪郭部が含まれる場合、そのブロックの輝度分布は双峰性となり、クラス間分散は大きい値を示す。この手法では、しきい値条件を設けることで、クラス間分散がしきい値よりも大きければ、そのブロックには輪郭部が含まれていると判断する。また、人間の視覚には、輝

度値の変化が小さい平坦な領域内に孤立点状に発生した輝度変化には鋭敏であるが、一方で、輪郭部のような輝度変化が大きい部分の変化には気づきにくいという性質がある [67]. この手法では、主観的画質が良好な透かし埋め込み画像を得るため、この性質に着目し、輪郭部を含むブロックのみを埋め込みの対象とする. この方式では、1ブロックあたりの埋め込み透かし情報量は 1bit となる. 透かし埋め込み処理は、透かし埋め込み規則に従ってクラス間分散を操作することで行う. また、クラス間分散の操作は、各クラスの画素の輝度値を変化させることで行う.

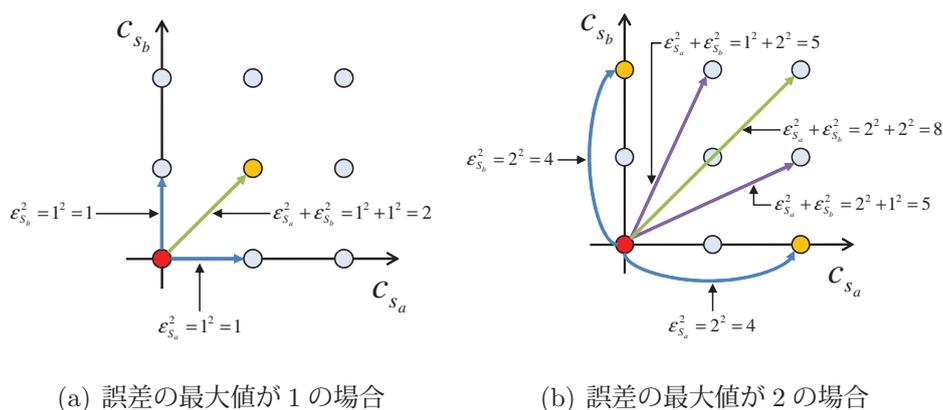
上記で説明したクラス間分散を利用した電子透かし手法を用いることで、知覚的な画質劣化を抑制することができる. さらに、JPEG 圧縮や平滑化などの画像処理攻撃に対するロバスト性も有する. しかしながら、クラス間分散は実数値であり、輝度値は整数値であるため、3.1.1 で述べた実数型ウェーブレット変換のように、可逆電子透かしとして利用することは難しい.

4.2 画質劣化の原因

本節では、提案する多次元ヒストグラムの操作による可逆電子透かし手法において、透かし埋め込み画像の主な画質劣化要因について考察する.

提案手法では、画質評価に PSNR を用いているため、透かし埋め込み処理により変換係数値を変更した影響は、変更前の変換係数値と変更後の変換係数値の二乗誤差となる. 図 4.3 は、赤いビンの変換係数値を各矢印が示すビンに変更した際の二乗誤差を表す. 図 4.3 の ε_{S_a} , ε_{S_b} は、サブバンド S_a の変換係数値を変更した場合の誤差とサブバンド S_b の変換係数値を変更した場合の誤差を、それぞれ表す.

まず、1つのサブバンドのみを変更する場合について考えると、図 4.3(a) において、誤差が 1 である場合には二乗誤差も 1 であるが、図 4.3(b) のように、誤差が 2 の二乗誤差は 4 となる. すなわち、変換係数値の変更が画質に与える影響は、変換係数値の誤差の二乗に比例する. 次に、複数のサブバンドを変更



(a) 誤差の最大値が1の場合 (b) 誤差の最大値が2の場合

図 4.3 変換係数値の変更とその二乗誤差

する場合について考える. 例として, 図 4.3(a) のオレンジ色のビンへ変更する場合と, 図 4.3(b) のオレンジ色のビンへ変更する場合を比較する. これらは, いずれも変更による誤差の和が 2 である. 図 4.3(a) のオレンジ色のビンへ変更した際の二乗誤差は 2 であり, 複数のサブバンドを変更した場合の画質に与える影響は, 各サブバンドの二乗誤差の和であることがわかる. しかしながら, 図 4.3(b) のオレンジ色のビンへ変更した際の二乗誤差は 4 となり, 複数のサブバンドを変更した場合よりも画質への影響が大きいことが分かる. このことから, 複数のサブバンドを有効活用することで, 透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制できると考えられる.

また, 提案手法において, 多次元ヒストグラムのビンには, 大きく 2 種類のヒストグラムビンが存在する. 1 つは埋め込みビンであり, 透かし情報を埋め込むためにゼロビンへ分配される変換係数が分配される前に属していたビンである. もう一つはシフトビンであり, ゼロビンを作るため移動させるビンである. 前章の図 3.13(a) においては, 赤いビンが埋め込みビンであり, 埋め込みビン以外はシフトビンである. ここで, 埋め込み容量に影響を与えるビンは埋め込みビンのみである. すなわち, シフトビンの変更によって画質劣化は大きくなるが, 埋め込み容量が増加することはない. それゆえ, シフトビンの変更による誤差を小さくできる, もしくは, シフトビンの数を減らすことができれば, 埋め込み容量を維持したまま, 画質劣化の抑制ができると考えられる.

これまで説明したように、本章では、以下の3点を考慮することで画質劣化の抑制を図る。

1. 複数のサブバンドの有効活用
2. 変換係数の変更誤差を制限
3. シフトビンの数を削減

以下では、これらの画質劣化抑制に対する検討について述べる。1点目については、4.3節で検討を行い、2点目、3点目については、4.4節で検討を行う。

4.3 埋め込みビンの拡大に基づいた埋め込み規則

本節では、埋め込みビン拡大するシフト規則を提案する。詳細については、4.3.1節で述べる。また、本節で提案した埋め込み規則を用いたシミュレーションを4.3.2節で行い、シミュレーション結果の説明と考察を行う。

4.3.1 埋め込みビンの拡大

本節では、多次元ヒストグラムの変更規則として、透かし情報の埋め込みに使用する埋め込みビン拡大することに基づいたシフト規則を提案する。本節では、説明を簡単にするため、対象を2次元ヒストグラムに限定し、図4.4に示す2次元ヒストグラムの第1象限について説明を行う。また、図4.4に示すように、本節で提案する規則では、 $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 0)$ のヒストグラムビンは利用しない。

図4.5に、本節で提案する手法の概要を示す。提案手法では、必要な埋め込み容量に応じて、あらかじめ埋め込みに利用するヒストグラムビン（埋め込みビン）を、図4.6(c)のように決定する。ここで、赤いビンが埋め込みビンである。提案手法では、各象限に含まれるビンの中で $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 0)$ との距離が小さいビンを基準に、 $T_e \times T_e = T_e^2$ 個のビンを埋め込みビンとする。第1象限の場合は、 $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 1)$ が基準である。

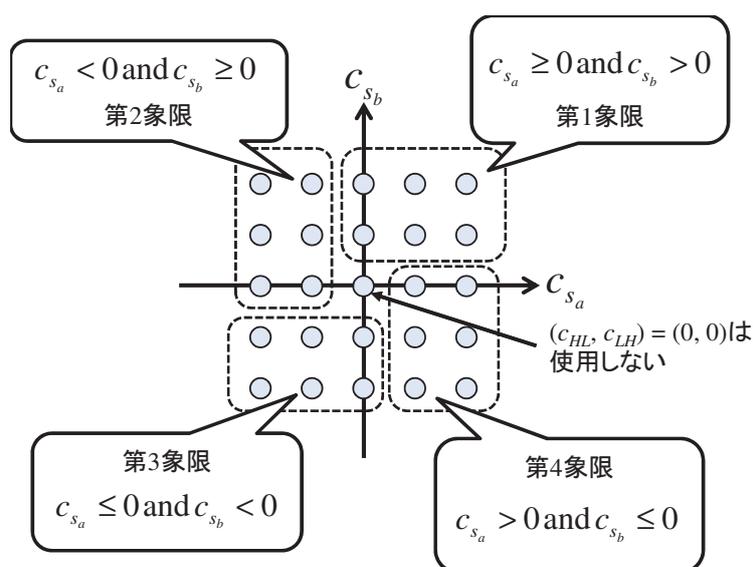


図4.4 2次元ヒストグラムの4象限

次に、透かし埋め込みに必要なゼロビンを作るため、ヒストグラムシフトを行う。ヒストグラムシフトは、透かしが埋め込まれる埋め込みビンと透かしが埋め込まれないシフトビンで異なる。まず、埋め込みビンのヒストグラムシフトは、埋め込みビンの変換係数値を整数倍することで行う。このとき、変換係数値の拡大倍率を大きくすることで、一つの埋め込みビンに埋め込むことのできる情報量は増加する。一方で、シフトビンは変更する必要があるが、透かし埋め込み画像の画質を考えると、変更量は小さいことが望ましい。そのため、シフトビンのヒストグラムシフトは、埋め込みビンの拡大に対応して変更する。図4.7に、ヒストグラムシフトによる2次元ヒストグラムの変化を表す。なお、図4.7は、埋め込みビンをも2倍に拡大した場合であり、緑の矢印はシフトビンの変更を方向を表し、赤い矢印は埋め込みビンの変更を表している。また、図4.7では、シフトビンの変更は2つのサブバンドのうち、どちらか一方のみに施しており、その結果、ヒストグラムシフトが不要となる領域があることが確認できる。また、黄色のビンはゼロビンを意味しており、1つの埋め込みビンに対して、3つのゼロビン割り当てることが可能である。それゆえ、埋め込みビンの2倍の拡大では、図4.8に示すような4値埋め込みが可能である。こ

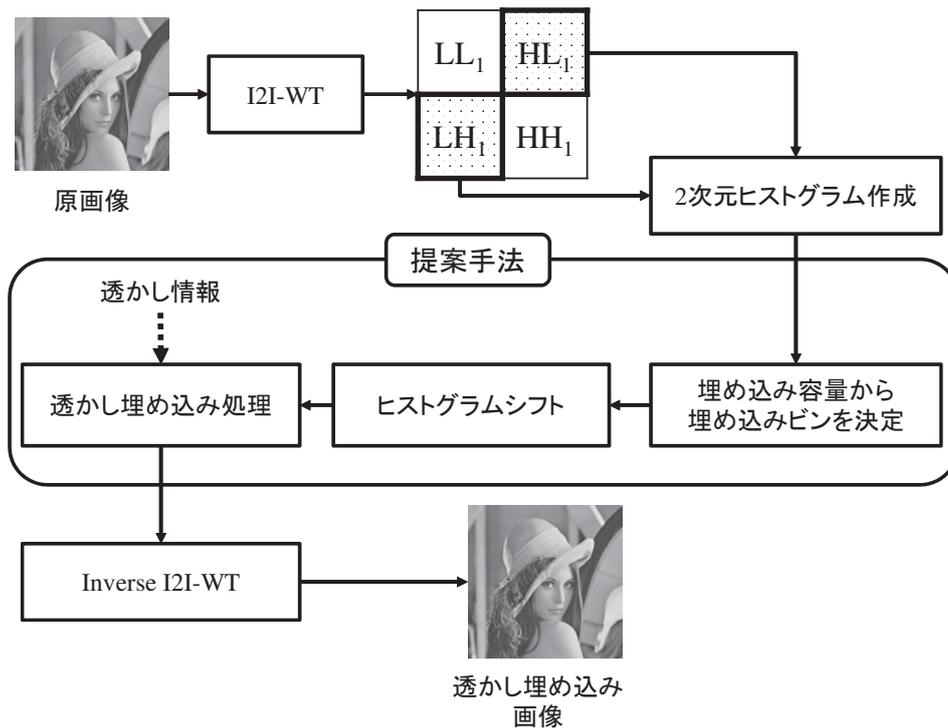


図 4.5 提案手法による透かし埋め込み処理の概要

のことから、埋め込みビンの拡大倍率を n とすると、1つのビンに埋め込み可能な多値情報は、 n^2 値情報となる。

4.3.2 シミュレーション

前節で説明した提案手法を評価するシミュレーションを行った。使用画像は、図 3.14 に示す前章のシミュレーションで扱った画像を用い、原画像に施す可逆ウェーブレット変換は、式 (3.1), (3.2) で示した可逆 Haar 変換を用いた。本シミュレーションでは、オクターブ分割 1 回で得られる高周波サブバンドである HL_1 バンド、 LH_1 バンド、 HH_1 バンドから、2つのサブバンドを選択し、提案手法による埋め込み処理を行った上で、埋め込み効率が最も良好となった2つのサブバンドを、埋め込み対象サブバンドとした。提案手法において、埋め込みビンの拡大倍率 n は 2, 3, 4, 5 とした。比較対象手法としては、Jinna らの手法と前章で提案した手法 (手法 A) とし、手法 A のパラメータ θ は 10 から 30

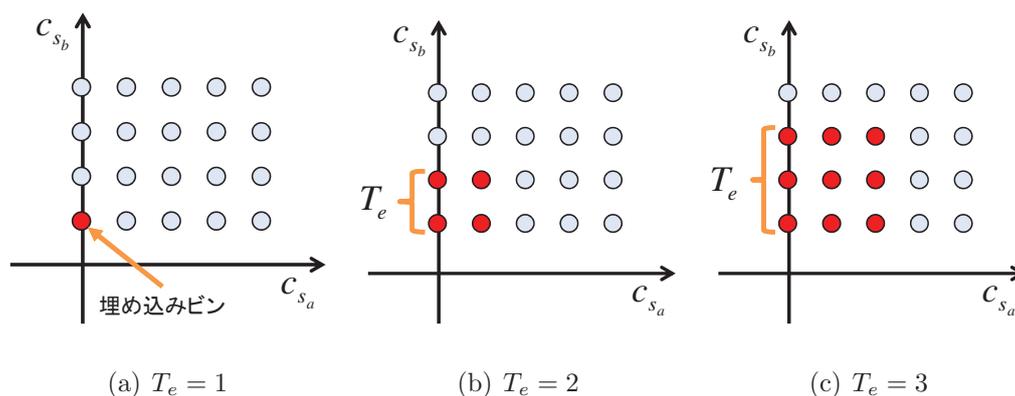
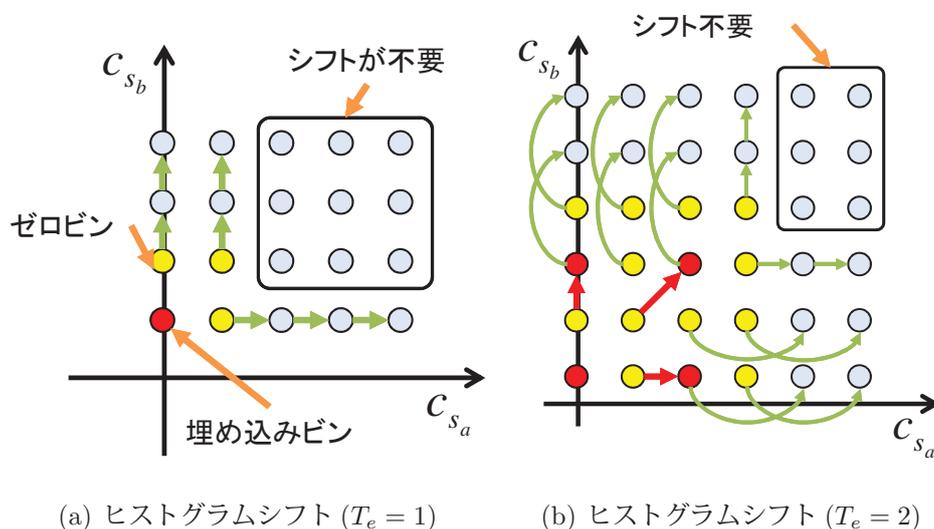


図 4.6 埋め込みビンの決定



(a) ヒストグラムシフト ($T_e = 1$) (b) ヒストグラムシフト ($T_e = 2$)

図 4.7 ヒストグラムシフト

まで 10 刻みで変化させた。また、透かし埋め込み画像にオーバーフロー、アンダーフローが発生していない範囲で、RD 曲線を作成し、各手法の比較を行う。埋め込む透かし情報は、一様分布のランダム系列とし、各パラメータに対して、透かし情報を変更して埋め込み処理を 10 回行った平均値を最終的な結果とした。

図 4.9～図 4.18 に、シミュレーション結果として、各埋め込み手法の RD 曲線を示す。まず、提案手法と Jinna らの手法を比較する。図 4.11 に示す画像 baboon の結果を除いて、提案手法の埋め込みビンを 2 倍に拡大して透かし情報を埋め込んだ結果は、Jinna らの手法と同等か、上回る性能であることを確

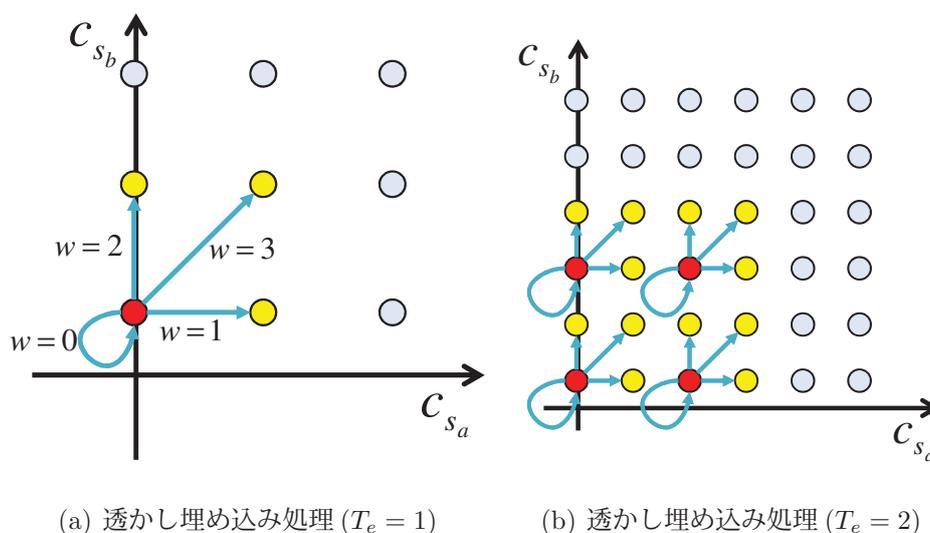


図 4.8 透かし埋め込み処理

認した. 提案手法では, 埋め込みビンのヒストグラムシフトは整数倍の拡大を行っており, シフトビンに対しては, 必要最低限のヒストグラムシフトを行っている. それゆえ, 多次元ヒストグラム上で, ヒストグラムシフトが行う必要のないビンが存在する. 一方で, Jinna らの手法は 1 次元ヒストグラムを基にヒストグラムシフトを行っており, 全ての変換係数を変更する必要がある, 透かし埋め込み画像の画質に影響を与えたと考えられる. また, 埋め込みビンを 3 倍, 4 倍, 5 倍に拡大した場合は, 埋め込み容量が小さい場合には, Jinna らの手法に劣るが, 埋め込み容量が大きい場合には, 埋め込み容量, PSNR ともに Jinna らの手法よりも良好な結果であった. このことから, 埋め込みビンの拡大倍率の変更は, 埋め込み容量を増加させるという観点から有効であると考えられる. 一方で, 画像 baboon を用いた結果では, 前章と同様に, Jinna らの手法に劣る結果となった. 画像 baboon は, 使用画像 5 枚の中で, エッジやテクスチャといった高周波成分を多く含む画像であり, 提案手法は, 高周波サブバンドのエネルギーの低い部分を優先的に埋め込みに利用しているため, 画像 baboon への透かし埋め込みには有効ではなかったと考えられる.

次に, 提案手法と手法 A の埋め込み効率を比較すると, 5 枚の使用画像において, 提案手法の埋め込み効率は手法 A を上回るという結果となった. なおか

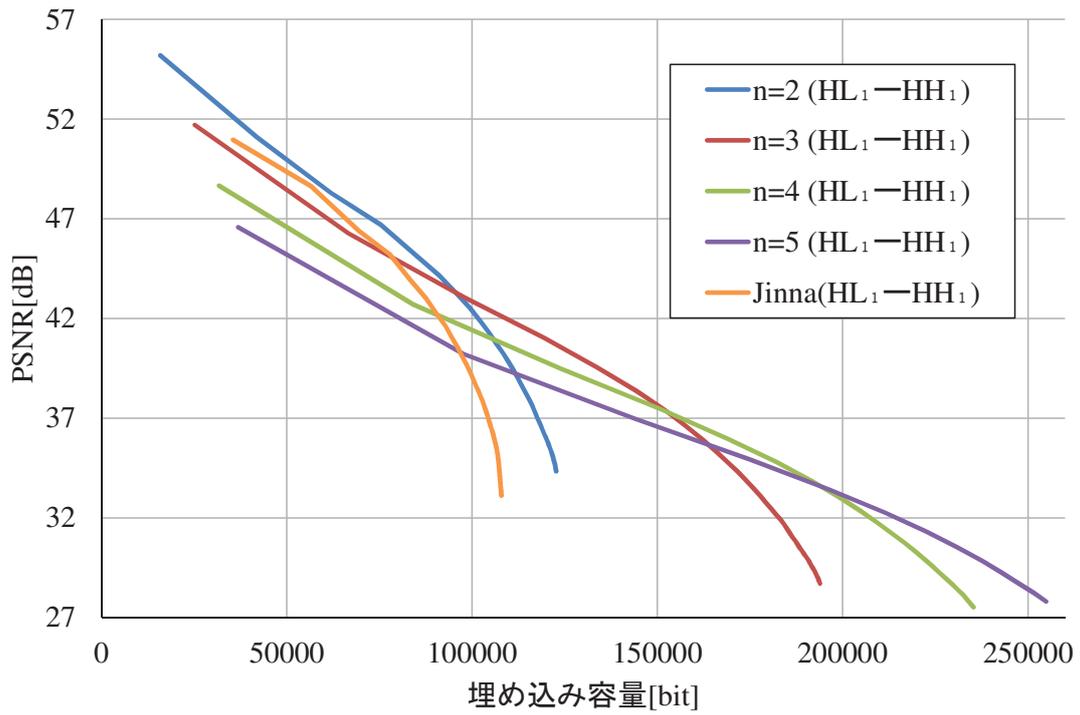


図 4.9 提案手法と Jinna らの手法の RD 曲線 (画像 airplane)

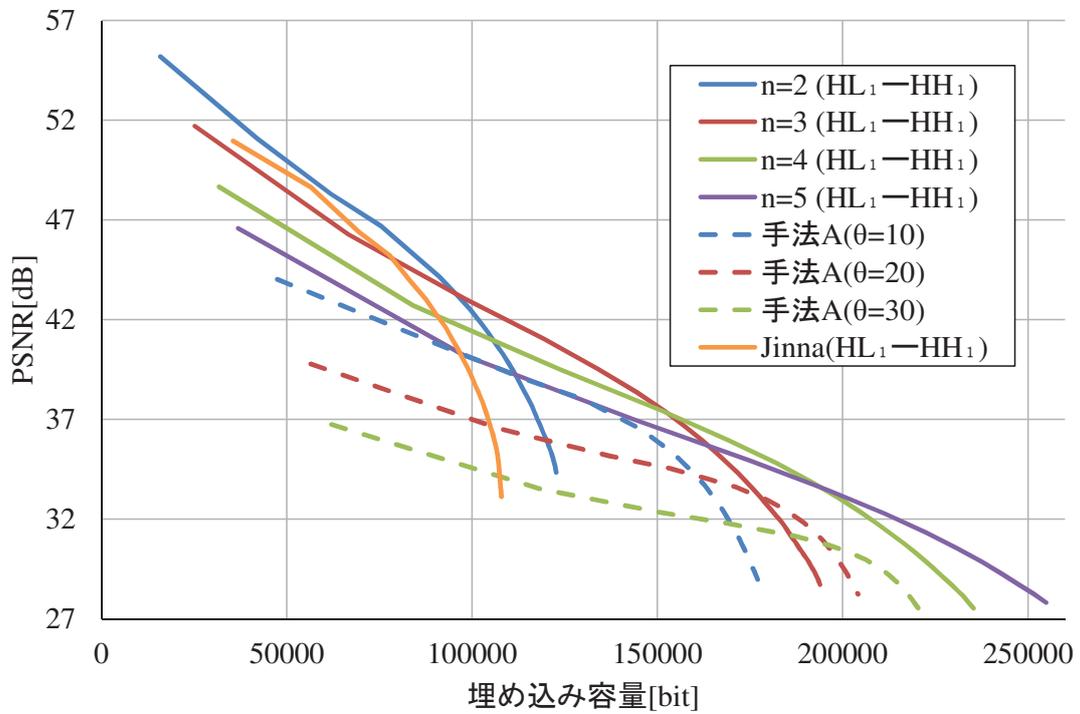


図 4.10 提案手法と Jinna らの手法, 手法 A の RD 曲線 (画像 airplane)

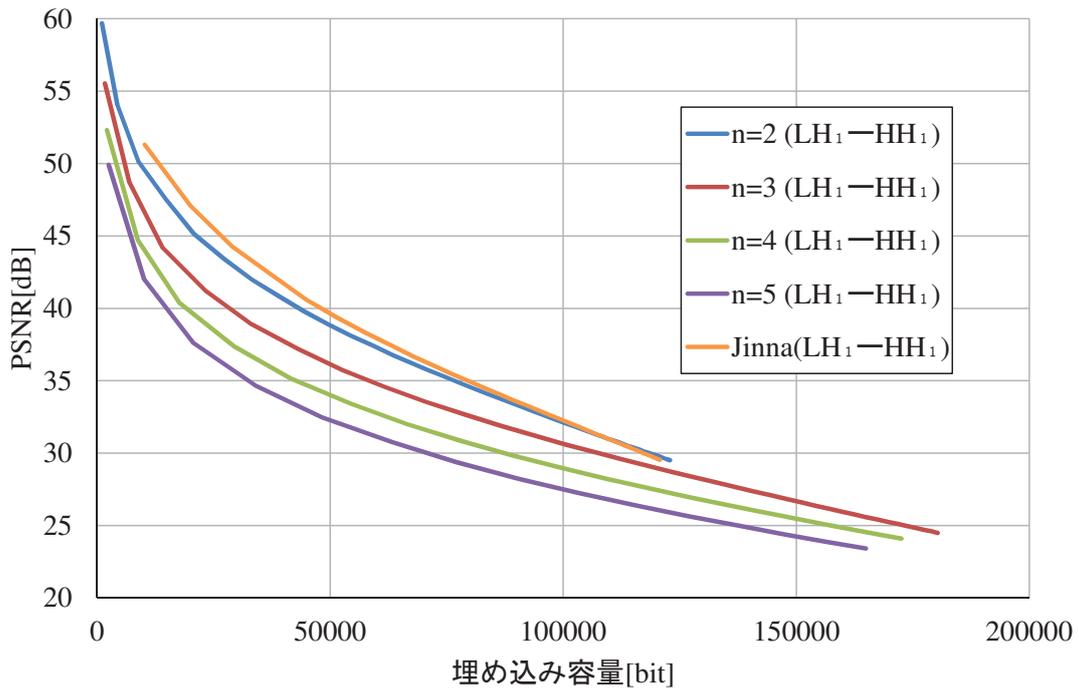


図 4.11 提案手法と Jinna らの手法の RD 曲線 (画像 baboon)

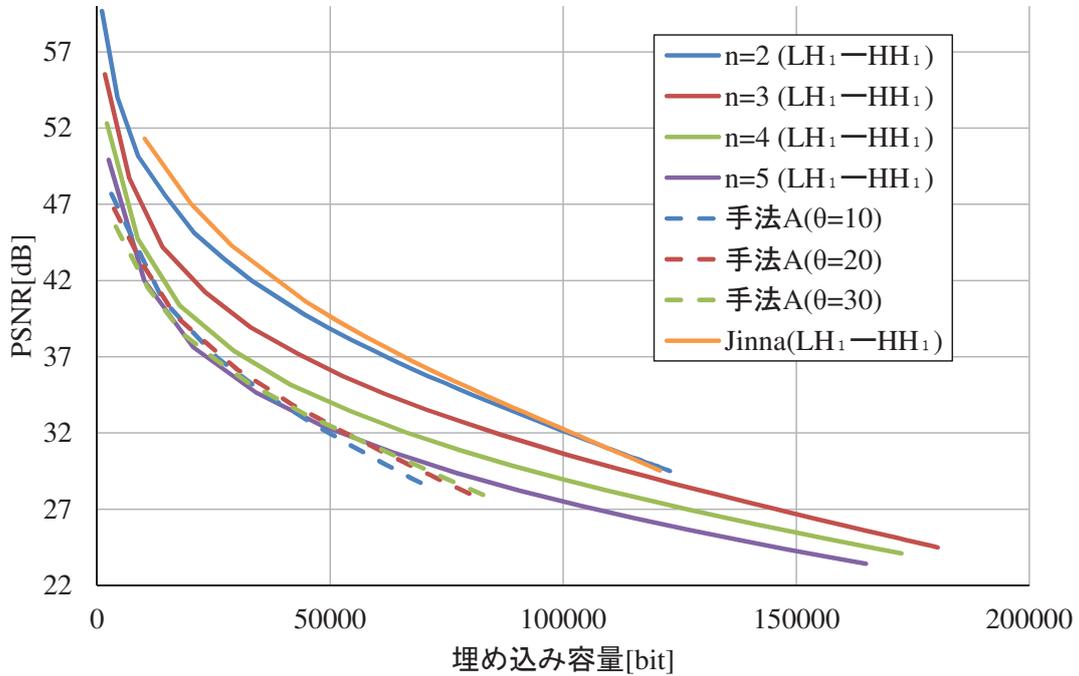


図 4.12 提案手法と Jinna らの手法, 手法 A の RD 曲線 (画像 baboon)

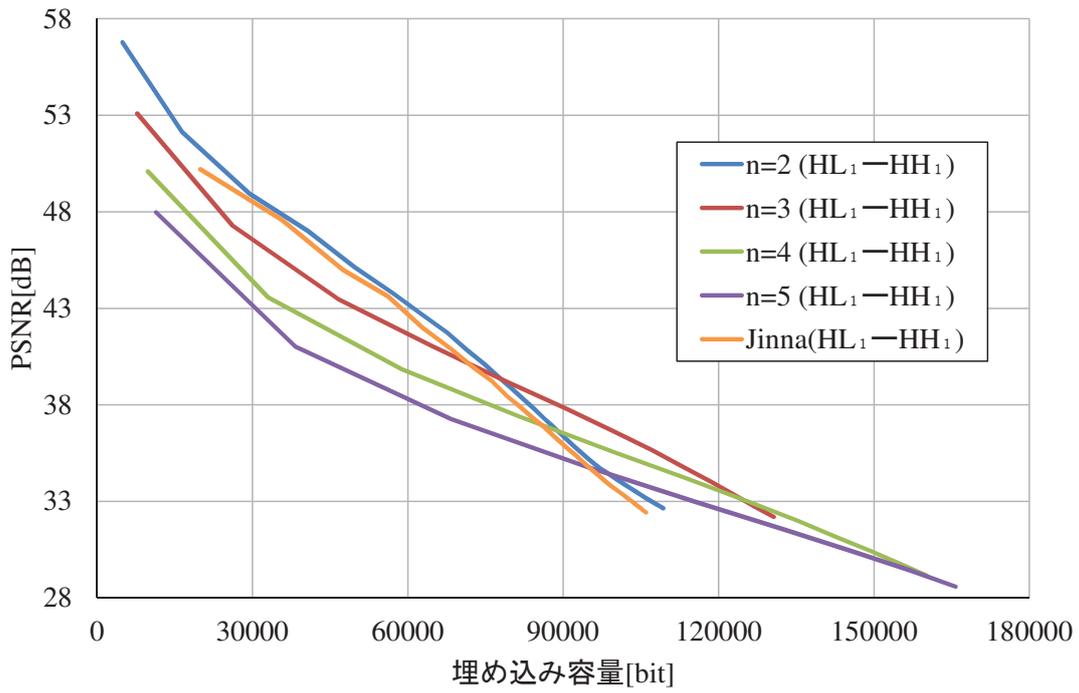


図 4.13 提案手法と Jinna らの手法の RD 曲線 (画像 barbara)

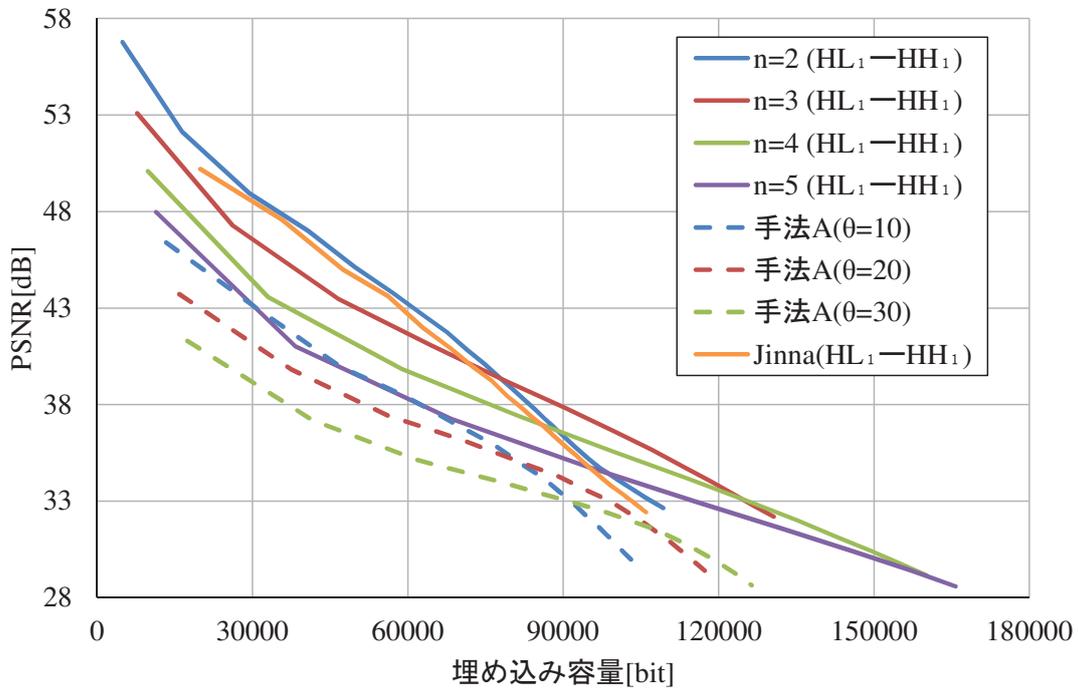


図 4.14 提案手法と Jinna らの手法, 手法 A の RD 曲線 (画像 barbara)

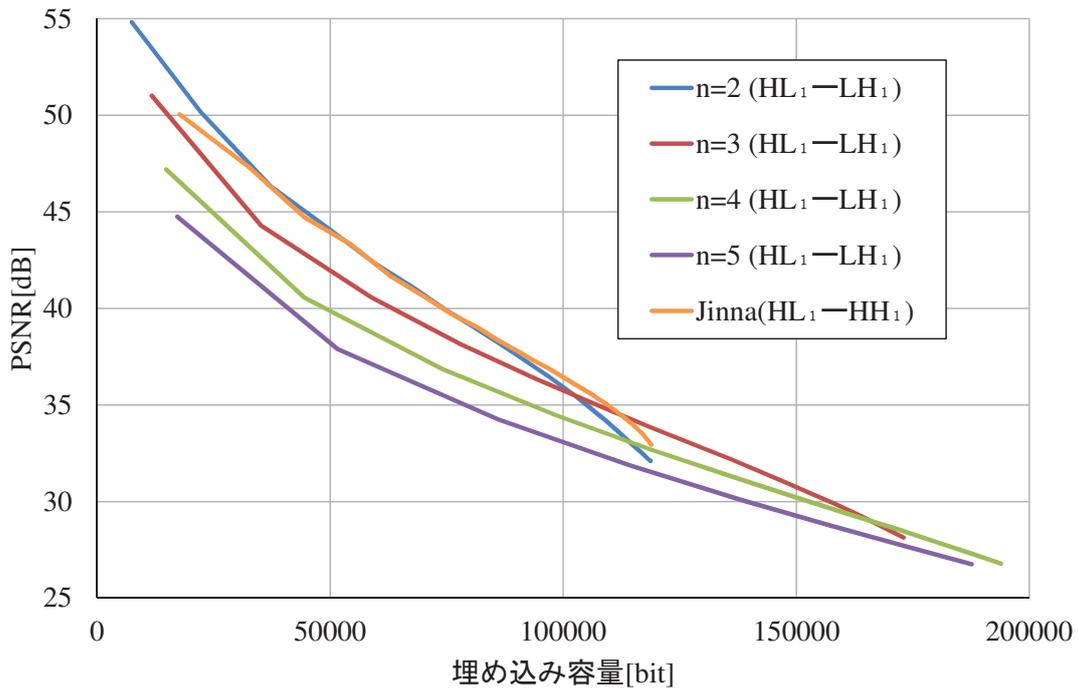


図 4.15 提案手法と Jinna らの手法の RD 曲線 (画像 lake)

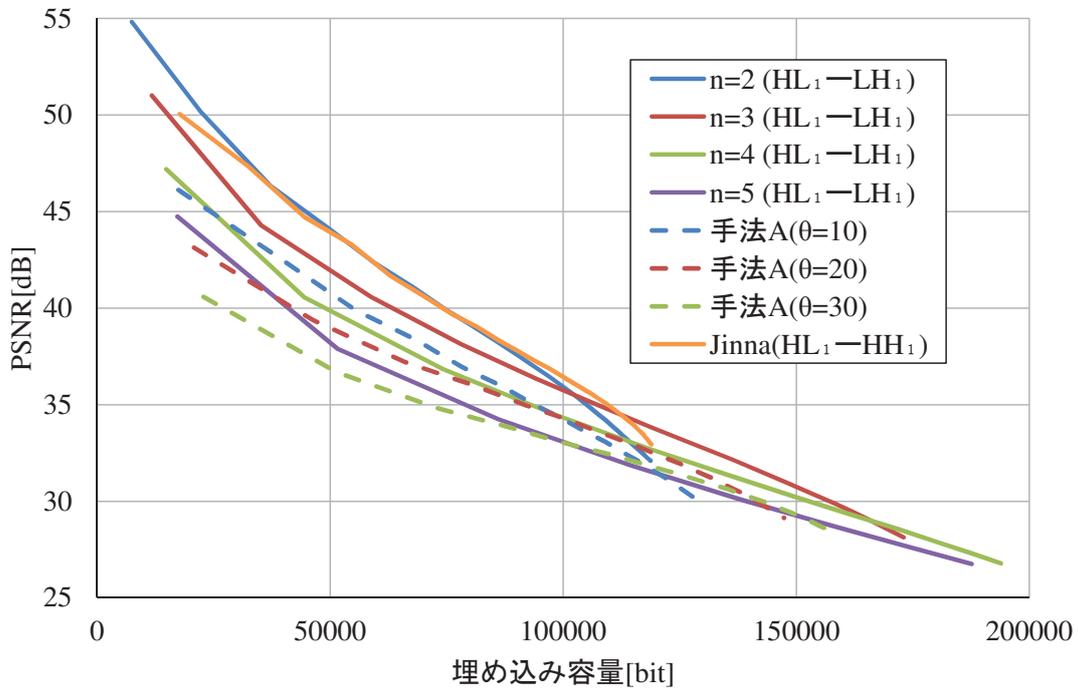


図 4.16 提案手法と Jinna らの手法, 手法 A の RD 曲線 (画像 lake)

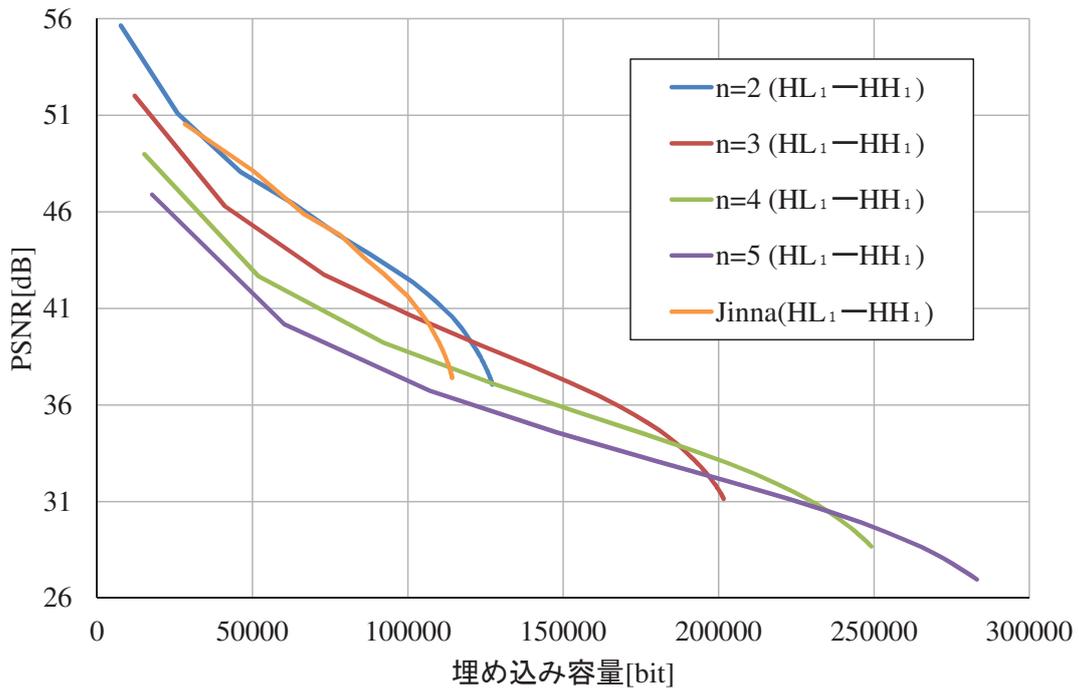


図 4.17 提案手法と Jinna らの手法の RD 曲線 (画像 lena)

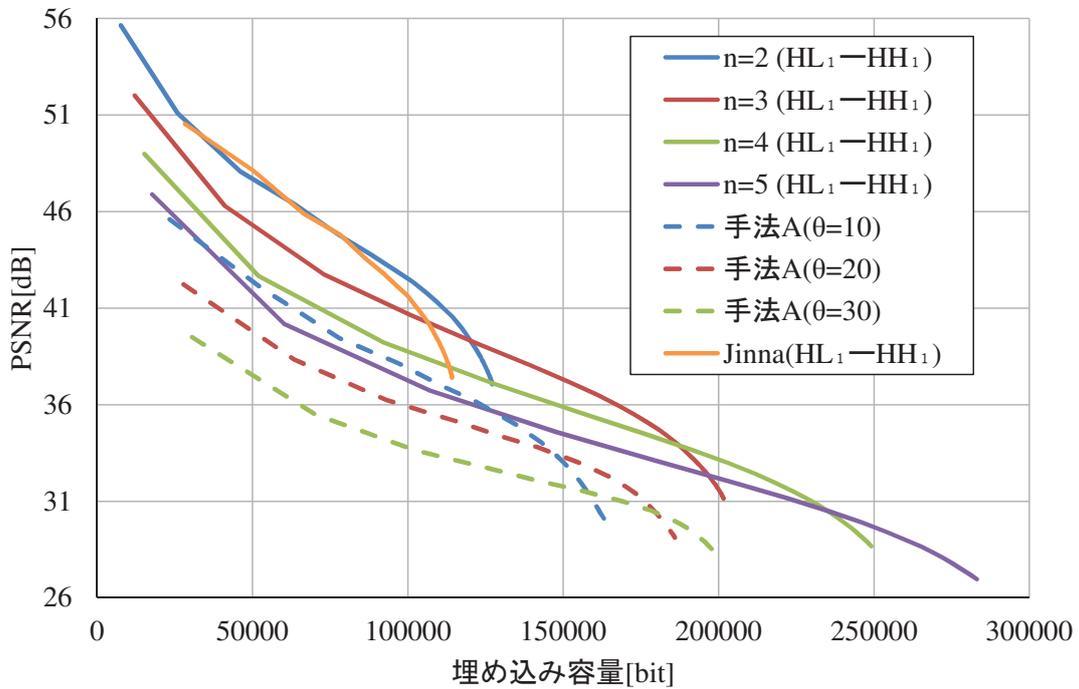


図 4.18 提案手法と Jinna らの手法, 手法 A の RD 曲線 (画像 lena)

つ、最大埋め込み容量の増大も確認できた。手法 A は GHS-RDH [26–31, 33, 70] に基づいた手法であり、パラメータ θ を用いて、埋め込む多値情報を設定することができる。また、ヒストグラムシフトの回数と埋め込みビンの個数が同じという特徴もある。しかし、パラメータ θ は全ての埋め込みビンに反映されるのではなく、ヒストグラムシフトが i 回実行されたとしたときの i 個の埋め込みビンの中で、インデックスが最初の埋め込みビン $e_{i,1}$ と最後の埋め込みビン $e_{i,i}$ のみに反映される。一方、提案手法では、1つの変換係数ペアに埋め込まれる情報量は一定であるため、変換係数によって埋め込み容量にムラなく埋め込むことができるため、手法 A よりも埋め込み容量を増加させることができたと考えられる。

4.4 ヒストグラムビンの制限

本節では、透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制するために、ヒストグラムビンに加える制限について述べる。4.4.1 節では、ヒストグラムビンの移動距離を制限した透かし埋め込み規則を提案する。4.4.2 節では、透かし埋め込み処理に利用される変換係数の個数を制限する手法について述べる。そして、これらの手法を用いたシミュレーションを 4.4.3 節で述べる。

4.4.1 ヒストグラムビンの移動距離を制限

ヒストグラムシフトを利用した可逆電子透かし手法において、透かし埋め込み画像の画質劣化の原因の1つに、透かし埋め込み処理やヒストグラムシフト処理によるヒストグラムビンの移動距離が大きくなることが考えられる。本節では、この問題に着目して、ヒストグラムビンの移動距離を制限した規則を提案する。提案する透かし埋め込み規則を図 4.19 に示す。

図 4.19 は 2次元ヒストグラムにおいて、赤いビンが埋め込みビン、水色のビンはシフトビンを表し、青の矢印は埋め込みビンの割り当て先を、緑の矢印はシフトビンのシフト先を表す。図 4.19 に示す透かし埋め込み規則では、埋め

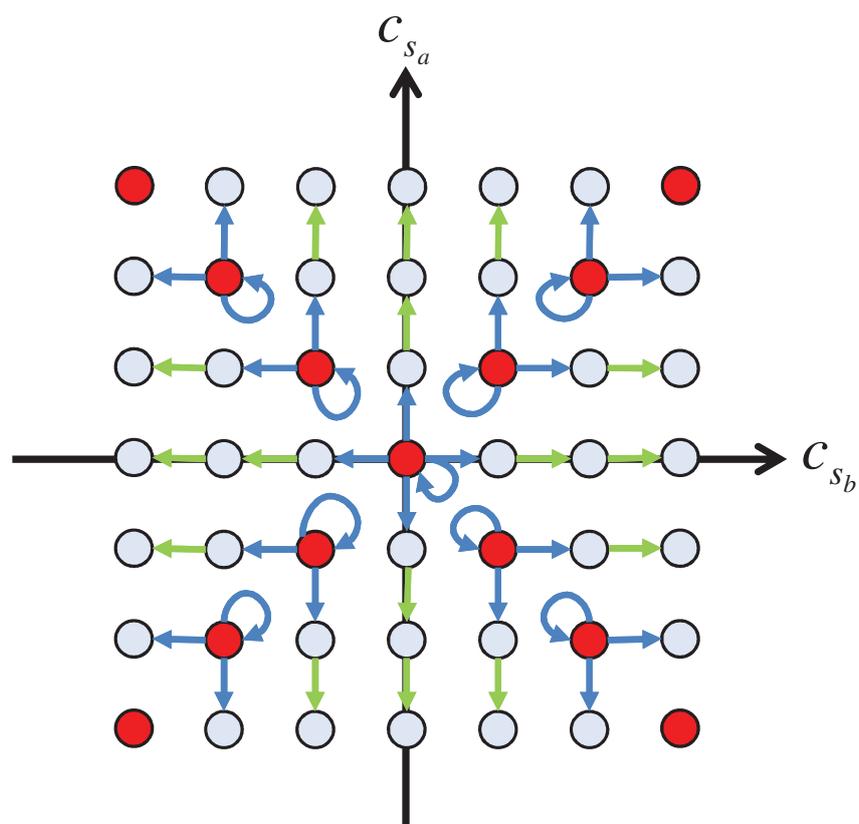


図 4.19 ヒストグラムビンの移動距離を制限した埋め込み規則

込み bin を $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 0)$ のヒストグラム bin と、対角方向の bin, すなわち, $c_{s_a} = c_{s_b}$ を満たすヒストグラム bin に限定している. これによって, ヒストグラム bin の移動距離を 1 以下に抑えることができるため, 透かし埋め込み画像の画質劣化を抑えることができると考えられる. また, $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 0)$ のヒストグラム bin は 5 値情報の埋め込みが可能であり, 対角方向の bin は 3 値情報を埋め込むことができる.

4.4.2 透かし埋め込みに利用する変換係数の制限

前節では, ヒストグラム bin の移動距離を制限することにより, 透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制する埋め込み規則を提案した. 本節では, 透かし埋め込みに利用する変換係数の個数を制限することで, 透かし埋め込み画像の画質劣化の抑制を図る方法について述べる.

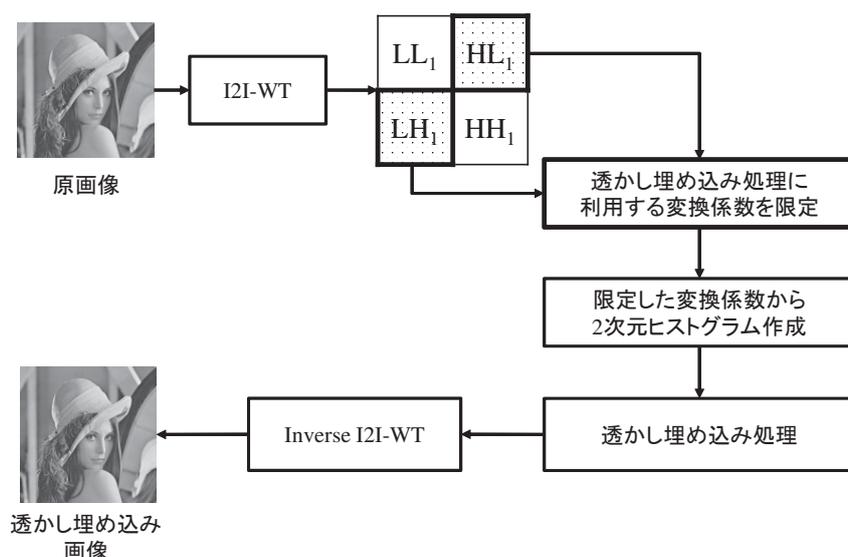


図 4.20 変換係数を限定する手法の概要

提案手法の概要を図 4.20 に示す。提案手法では、原画像に可逆ウェーブレット変換を施し、得られるウェーブレット変換係数から透かし埋め込みに利用する変換係数を選択し、選択された変換係数のみから多次元ヒストグラムを作成する。説明を簡単にするため、2次元ヒストグラムの場合について説明する。本節で提案する手法では、透かし埋め込み処理に利用する変換係数を選択する条件を式 (4.2) のように設ける。

$$(c_{s_a}, c_{s_b}) = (s_a(x, y), s_b(x, y)), \text{ if } (|s_a(x, y)| \leq T) \wedge (|s_b(x, y)| \leq T) \quad (4.2)$$

ここで、 c_{s_a} 、 c_{s_b} はそれぞれ2次元ヒストグラムを構成する2つのサブバンド、 s_a 、 s_b の変換係数値であり、 $s_a(x, y)$ 、 $s_b(x, y)$ は、各サブバンドの座標 (x, y) に位置する変換係数をそれぞれ表す。また、 T は、透かし埋め込みに利用する変換係数を選択するしきい値パラメータである。提案手法では、求められる埋め込み容量に応じて、埋め込みビンを十分に利用できるように T を設定することで、埋め込みビン以外のビンの変更を最小限に抑えることができる。その結果、透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制することができる。

一方で、変換係数を限定してヒストグラムを作成し、そのヒストグラムを基に透かし埋め込みを行った場合、透かし情報を抽出する際に、限定された変換



図 4.21 ロケーションマップの例

係数に関する情報（以下，ロケーションマップと呼ぶ）が必要となる．ロケーションマップの例を図 4.21 に示す．図 4.21 は，画像 lena の HL_1 バンドと LH_1 バンドに対して， $T = 3$ とした場合のロケーションマップであり，白の領域が透かし埋め込み処理に利用する変換係数の位置を，黒の領域が透かし埋め込み処理に利用しない変換係数の位置を表している．透かし抽出処理でロケーションマップが必要となる場合，ロケーションマップは，透かし埋め込み画像のヘッダーへの付加や，埋め込み画像とは別に伝送すること，そして，透かし情報の一部として画像への埋め込みが考えられる．また，ロケーションマップは 2 値データであり，圧縮することで情報量を削減できる．

しかしながら，ロケーションマップの 1 と 0 の割合がほぼ同じになる可能性があり，その場合，圧縮による情報量削減の効果は見込めない．このような理由から，抽出処理でロケーションマップを必要としない，利用する変換係数の限定が可能な手法を提案する．図 4.22 に提案手法の原理を示す．まず，原画像に 2 回のウェーブレット変換を施し，透かし情報を埋め込む 2 つのサブバンドを s_a , s_b としたとき， s_a , s_b と同じ位置に位置する低域のサブバンド s_{a2} , s_{b2}

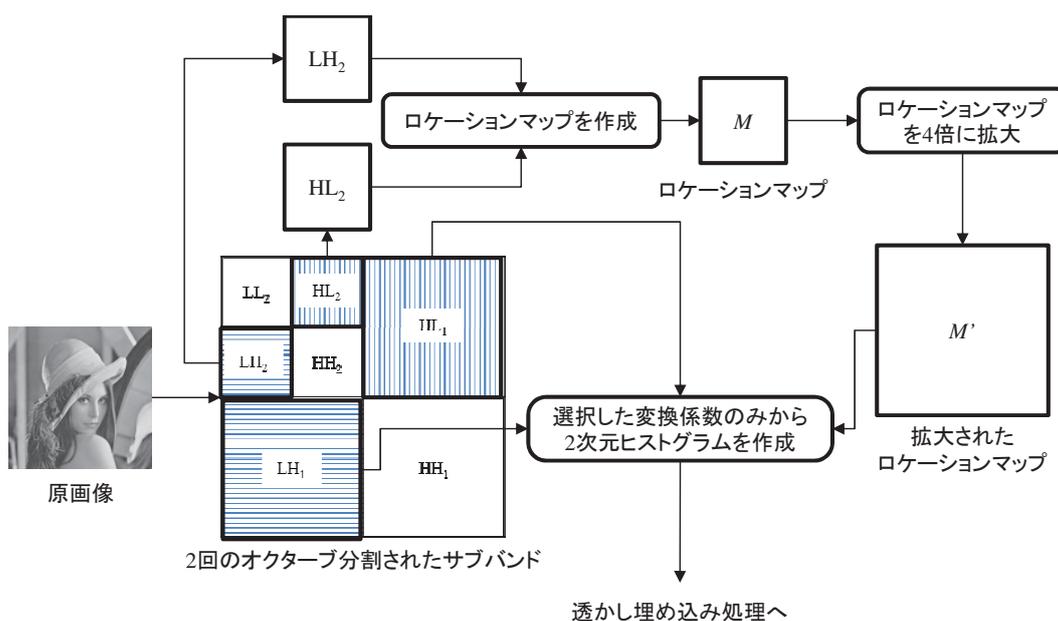


図 4.22 提案するロケーションマップの作成手法

からロケーションマップ M を作成する. これは, s_a と s_{a2} , s_b と s_{b2} には相関があると考えられるためである. ロケーションマップ M の大きさは s_{a2} , s_{b2} と同じ大きさであるため, 埋め込み対象のサブバンドサイズに拡大する. ここで, 拡大する際の補間法にはニアレストネイバー法を用いる. これは, ロケーションマップが2値情報であるためである. こうして作成されたロケーションマップ M' と透かし埋め込み対象のサブバンド s_a , s_b から, 2次元ヒストグラムを作成する.

図 4.22 で示したロケーションマップ作成手法の最大の特徴は, 作成したロケーションマップを透かし抽出処理のために保存し, ヘッダーファイルに付加したり, 透かし情報として埋め込む必要がない点である. ロケーションマップは低域成分である LL_1 バンドをウェーブレット変換することで得られるサブバンドを用いているため, ロケーションマップの作成アルゴリズムを知っていれば, 透かし抽出処理時に作成可能である. 図 4.23 に提案手法を用いたロケーションマップを示す. 図 4.23 は, 図 4.21 と同じパラメータで作成したマップであり, 両者を比較すると, 図 4.23 は, 図 4.21 ほど詳細でないため, 埋め込



(a) ロケーションマップ M



(b) ロケーションマップ M'

図 4.23 提案手法を利用したロケーションマップ

み対象サブバンドから作成したマップよりも透かし埋め込み処理に利用する変換係数を限定する効果は小さいと考えられる。

4.4.3 シミュレーション

本節では、4.4.1 節で述べたヒストグラムビンの移動距離を制限した手法（手法 B）と、4.4.2 節で述べた透かし埋め込みに利用する変換係数の個数を限定する手法（手法 C）の性能評価のためのシミュレーションを行った。使用画像

は、図 3.14 に示す 5 枚のグレースケール画像であり、原画像に施す可逆ウェーブレット変換は、式 (3.1), (3.2) で示した可逆 Haar 変換を用いた。また、オクターブ分割 1 回で得られる高周波サブバンドである HL_1 バンド, LH_1 バンド, HH_1 バンドから、2 つのサブバンドを選択し、提案手法による埋め込み処理を行った上で、埋め込み効率が最も良好となった 2 つのサブバンドを、埋め込み対象サブバンドとした。

まず、手法 B の評価を行う。比較手法として、Jinna らの手法と前節で述べた埋め込みビンを 2 倍に拡大する手法 ($n = 2$) を用いた。図 4.24~図 4.28 にシミュレーション結果として RD 曲線を示す。全ての RD 曲線において、手法 B は、埋め込み容量が小さい場合に、高い PSNR が得られていることがわかる。手法 B が、図 4.19 に示したヒストグラムビンの最大移動距離が 1 となる埋め込み規則を用いることで、透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制している。また、ヒストグラムビンの移動距離の制限により、利用できる埋め込みビンを限定されている。その結果、埋め込み容量が小さく、透かし埋め込み画質劣化の小さい要求に対応できると考えられる。一方で、図 4.25 に示すように、画像 baboon は、他の画像ほどの効果が得られなかった。そのため、画像 baboon のようなエッジやテクスチャ領域の占める割合の大きい画像に対しては、何らかの対策が必要である。

次に手法 C について評価する。手法 C は、透かし埋め込みに利用する変換係数を制限する手法であるため、透かし埋め込み規則には、特に制約がない。シミュレーションでは、手法 C で選択された変換係数のみから 2 次元ヒストグラムを作成し、そのヒストグラムに対して、4.3 節で提案した埋め込みビンの拡大手法による透かし埋め込みを行った。比較手法として、Jinna らの手法、4.3 節で提案した埋め込みビンの拡大手法を用いた。また、手法 C として、埋め込み対象のサブバンドと相関のあるサブバンドからロケーションマップを作成した場合 (手法 C1) と、埋め込み対象のサブバンドからロケーションマップを作成した場合 (手法 C2) を用いた。ここで、手法 C2 では、透かし抽出処理の

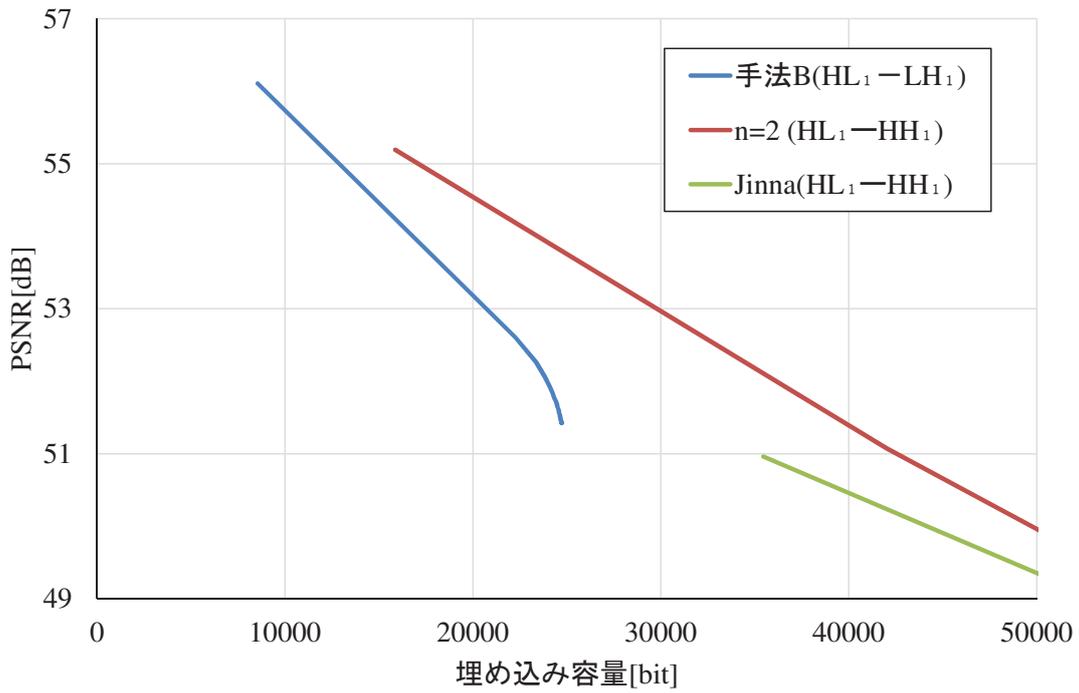


図 4.24 手法 B の RD 曲線 (画像 airplane)

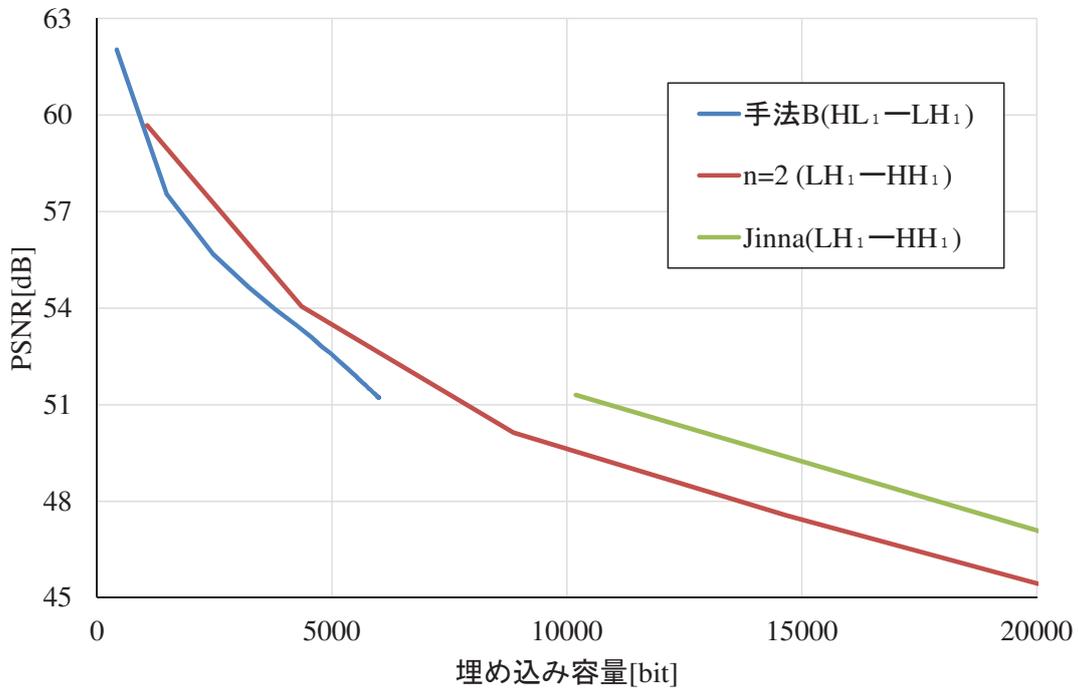


図 4.25 手法 B の RD 曲線 (画像 baboon)

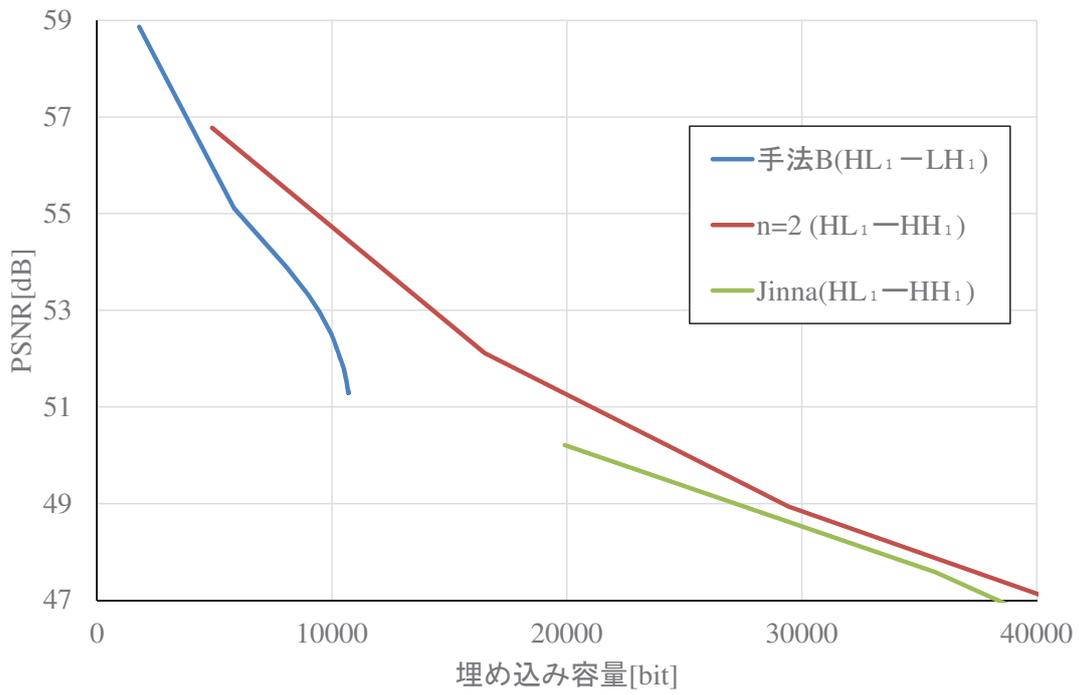


図 4.26 手法 B の RD 曲線 (画像 barbara)

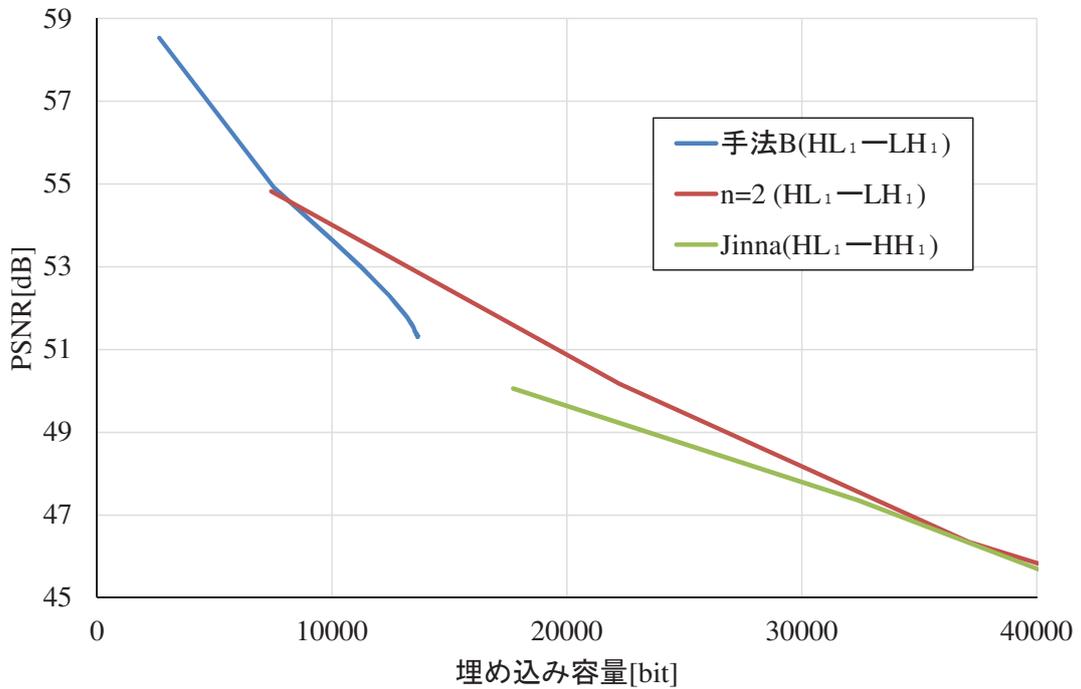


図 4.27 手法 B の RD 曲線 (画像 lake)

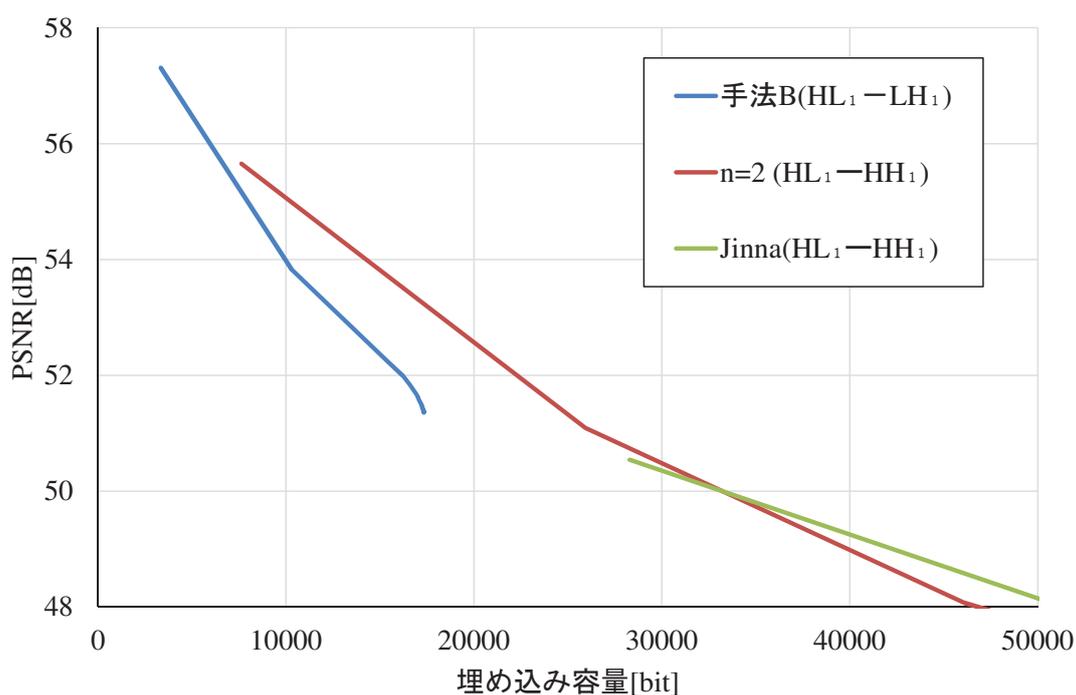


図 4.28 手法 B の RD 曲線 (画像 lena)

際に、透かし埋め込み処理で利用した変換係数の位置を示すロケーションマップが参照情報として必要である。また、埋め込みビンの拡大倍率は、 $n = 2$ と $n = 3$ を用いた。以上の条件でシミュレーションを行った結果を、図 4.29～図 4.38 に示す。

まず、手法 C を用いた場合と用いない場合について考察する。全ての画像において、手法 C の結果は、手法 C を用いない場合を上回る結果となった。これは、手法 C を用いることによって、埋め込み容量に直接関係ないが、ゼロビンを作成するために変更する必要があるシフトビンを削減することができたため、埋め込み容量に対する変換係数の変更量が減少し、それゆえ、埋め込み効率が向上したと考えられる。以上の理由から、手法 C は有効であるといえる。

次に、手法 C1 と手法 C2 について考察する。図 4.29～図 4.38 の結果から、全ての画像において、参照情報のある場合のほうが、埋め込み効率が良好であるが、埋め込み容量が比較的小さい場合には、参照情報がない場合のほうが埋め込み効率が良好であった。また、画像 baboon においては、参照情報が必要で

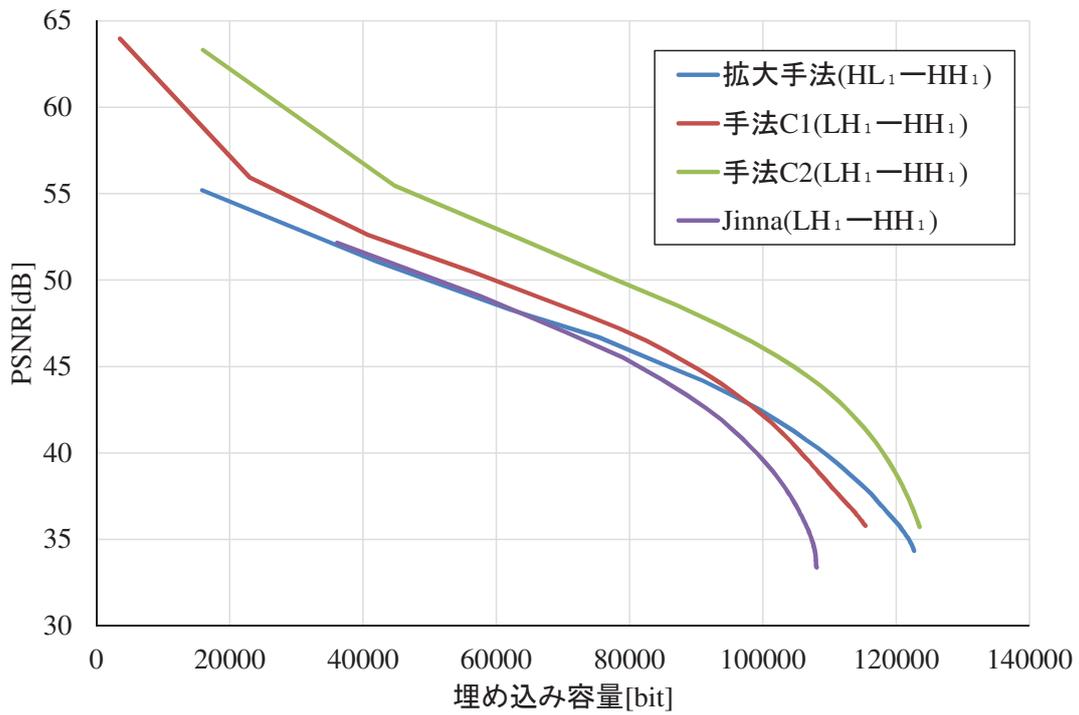


図 4.29 手法 C の RD 曲線 (画像 airplane, $n = 2$)

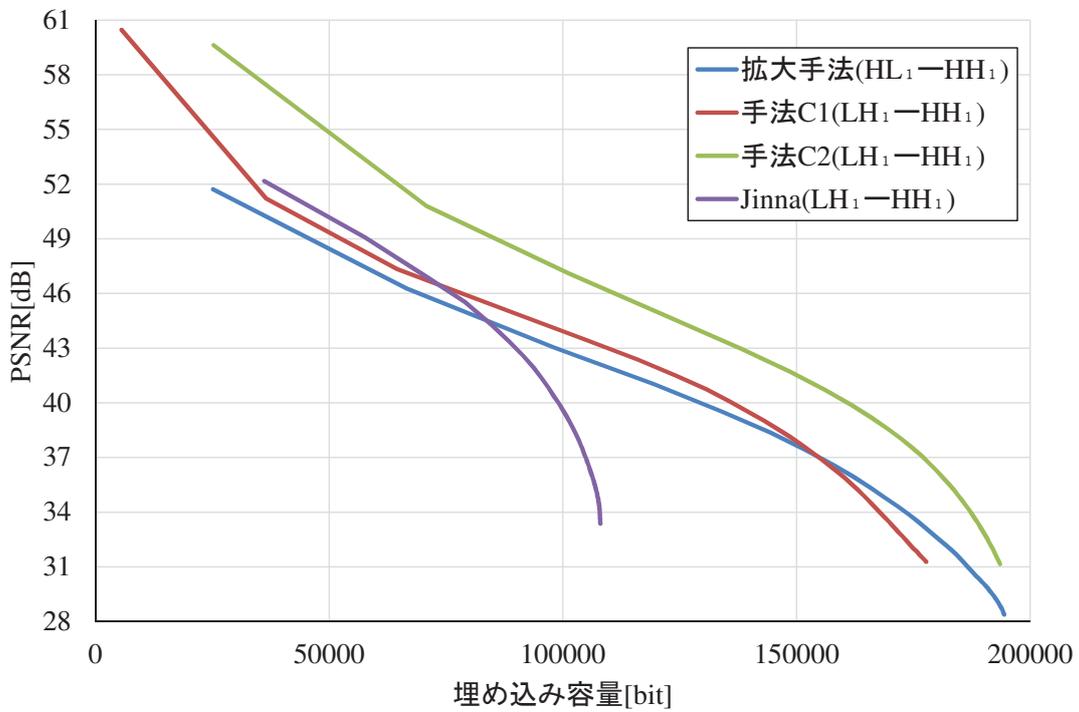


図 4.30 手法 C の RD 曲線 (画像 airplane, $n = 3$)

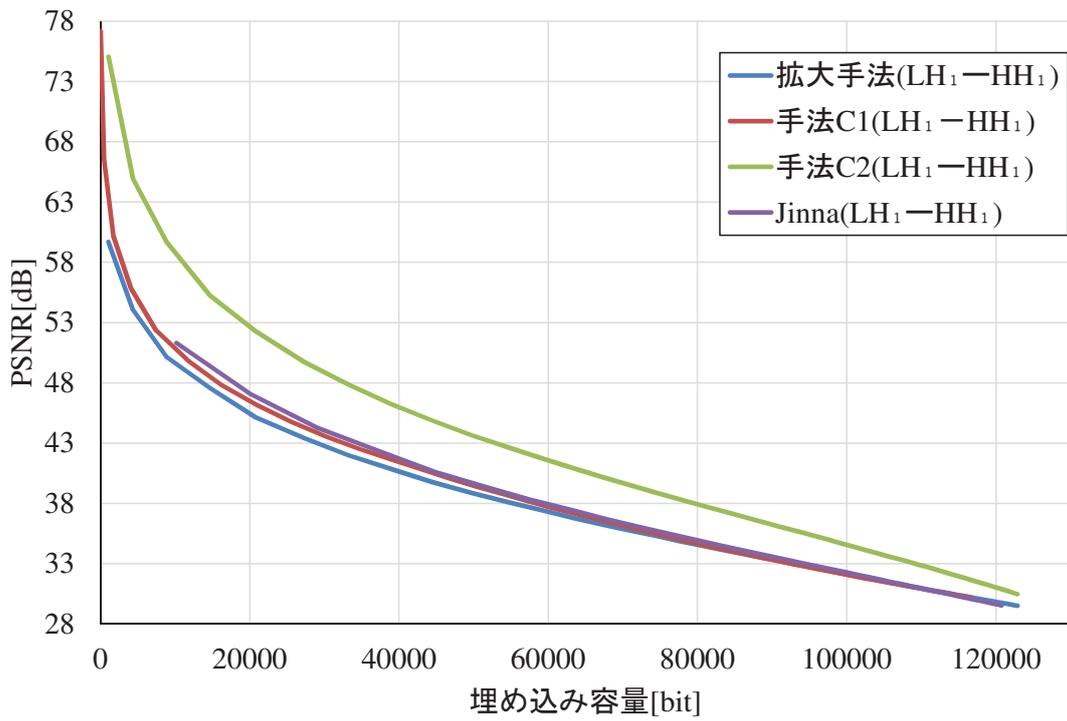


図 4.31 手法 C の RD 曲線 (画像 baboon, $n = 2$)

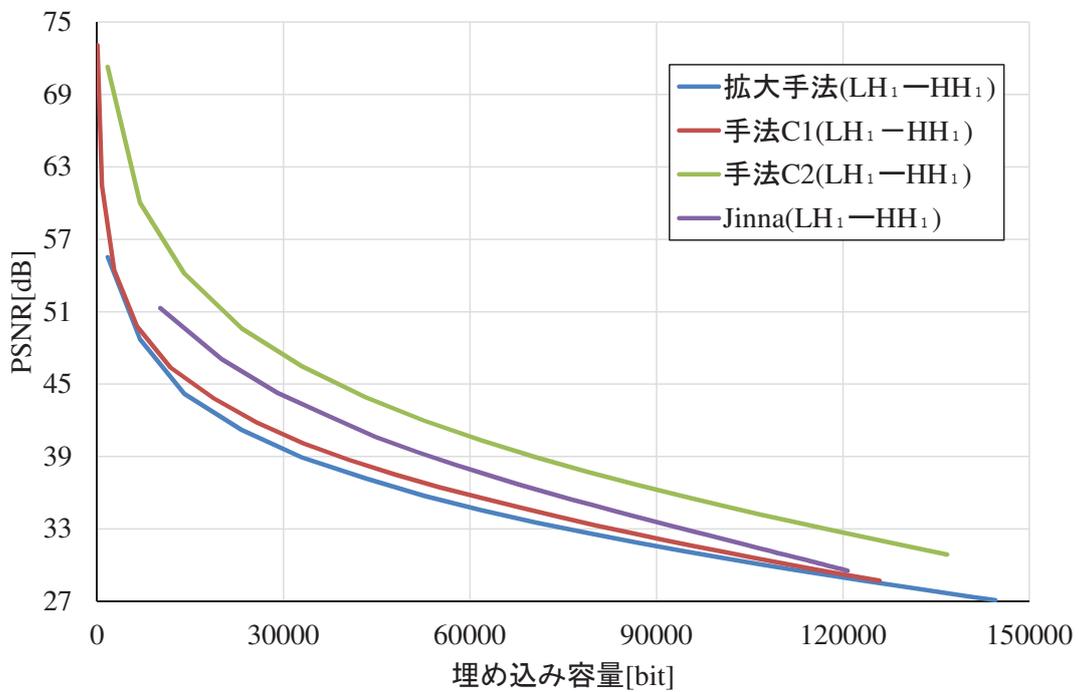


図 4.32 手法 C の RD 曲線 (画像 baboon, $n = 3$)

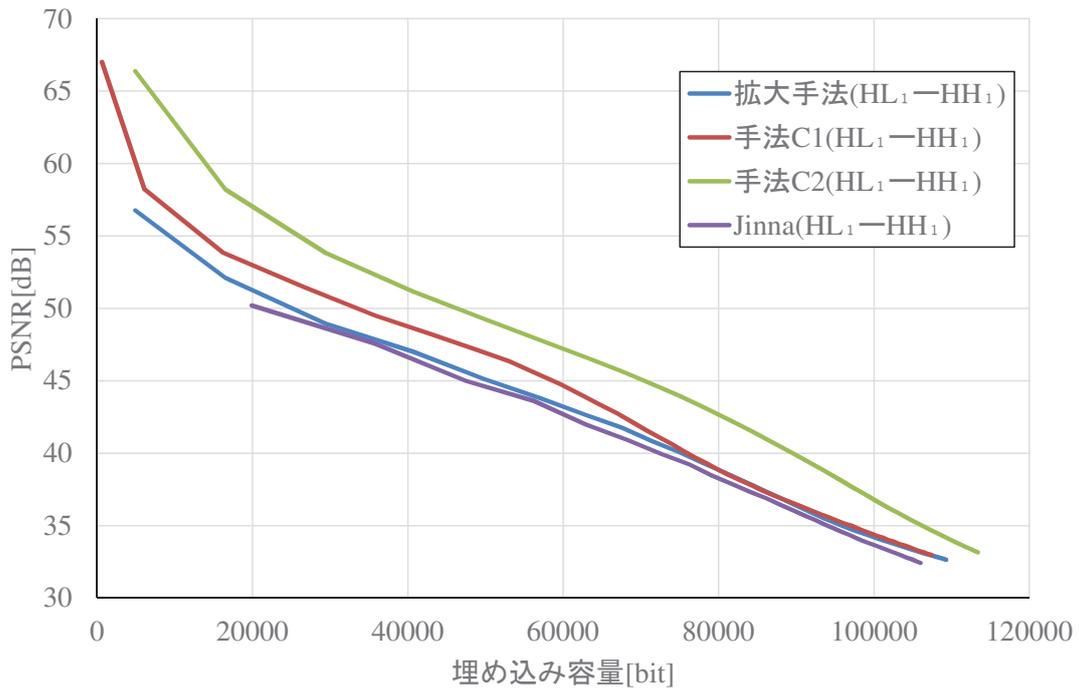


図 4.33 手法 C の RD 曲線 (画像 barbara, $n = 2$)

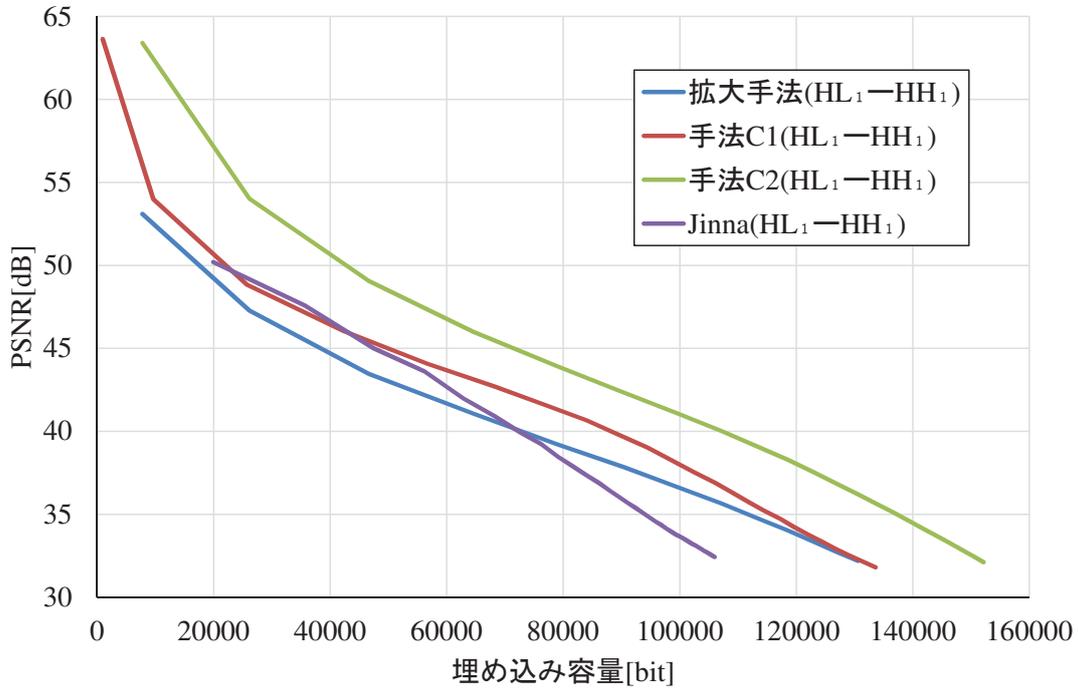


図 4.34 手法 C の RD 曲線 (画像 barbara, $n = 3$)

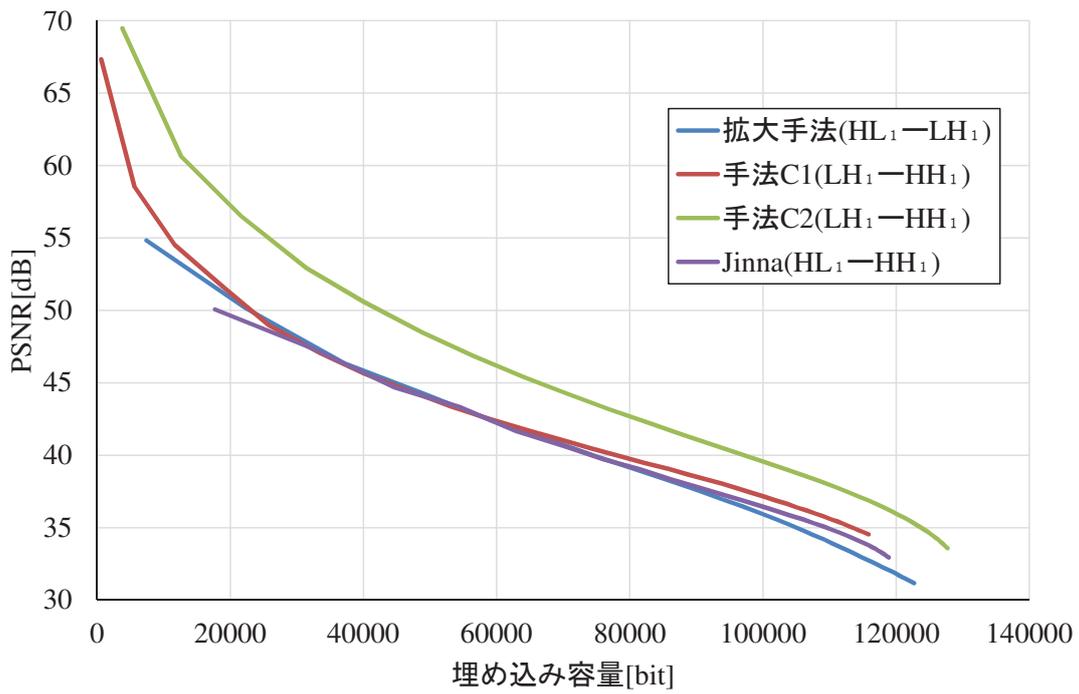


図 4.35 手法 C の RD 曲線 (画像 lake, $n = 2$)

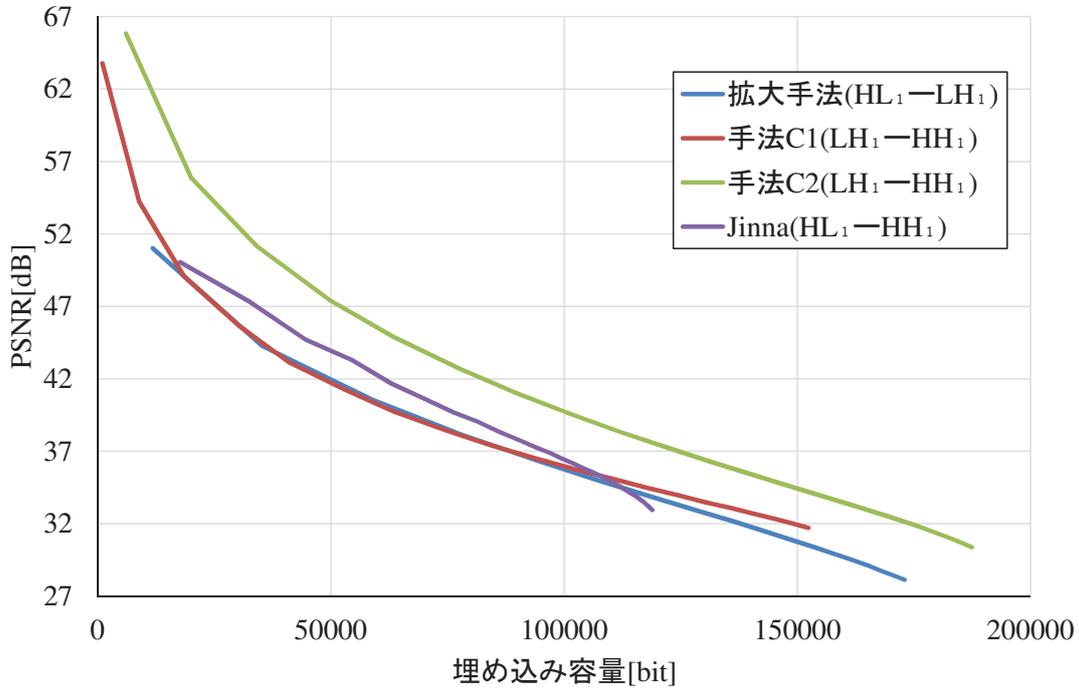


図 4.36 手法 C の RD 曲線 (画像 lake, $n = 3$)

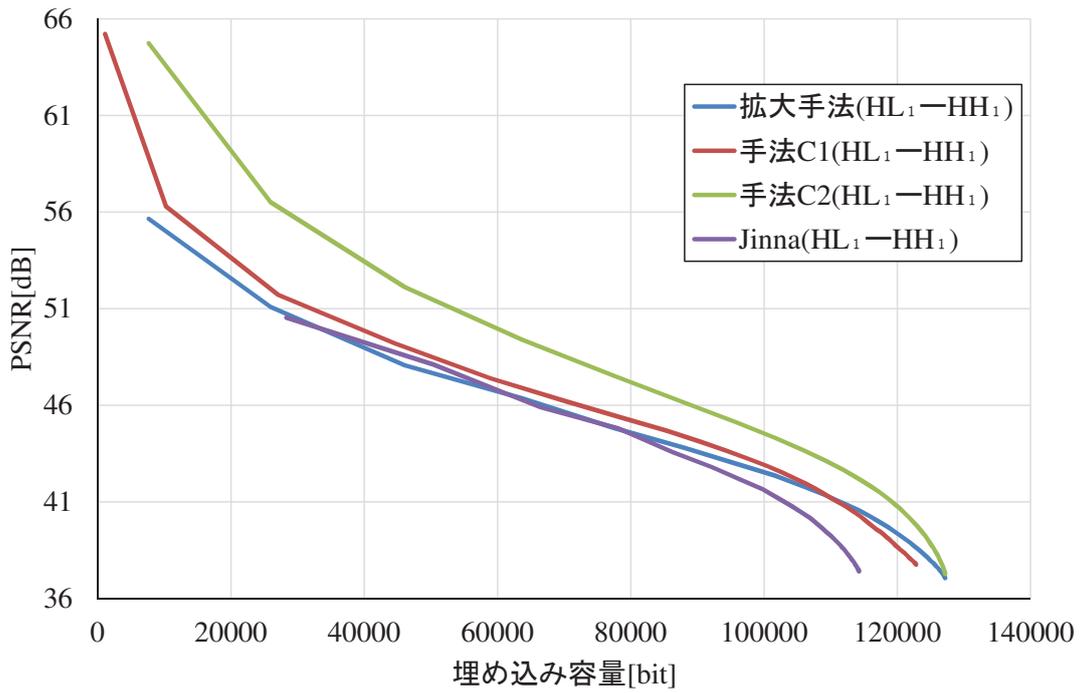


図 4.37 手法 C の RD 曲線 (画像 lena, $n = 2$)

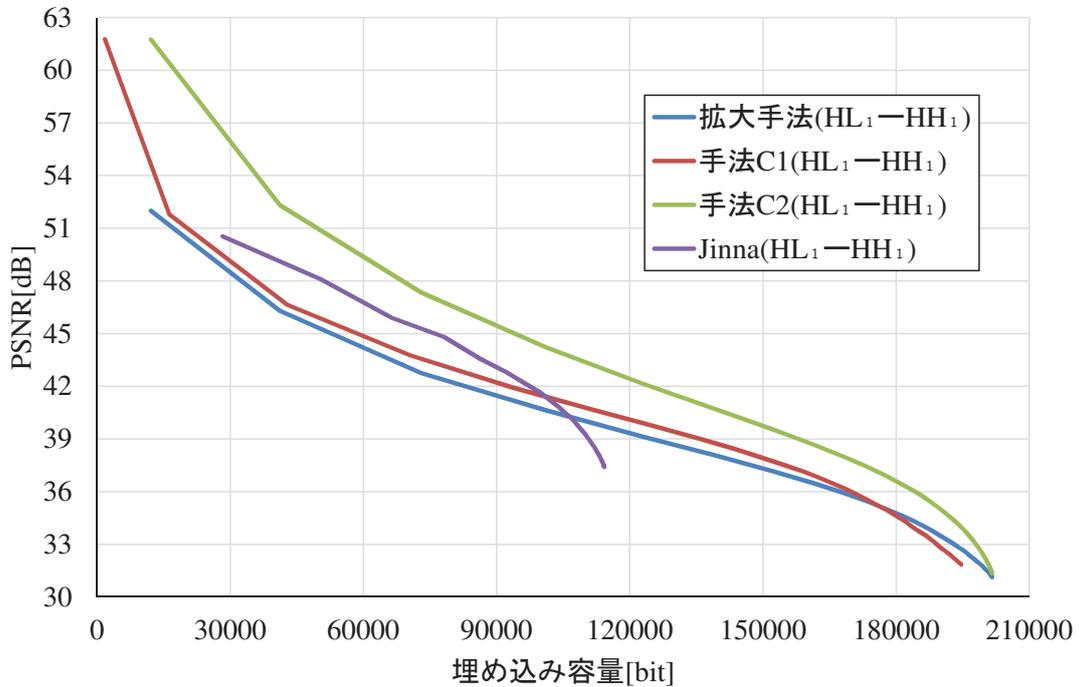


図 4.38 手法 C の RD 曲線 (画像 lena, $n = 3$)

ある手法 C2 を用いることで、唯一 Jinna らの手法を上回ることができた。それゆえ、エッジやテクスチャ領域を多く含む画像に対して有効である。手法 C において必要とする参照情報を透かし情報の一部として扱うことを考えると、埋め込み容量の一部が参照情報となり、埋め込み可能な透かし情報は減少する。ゆえに、参照情報を透かし情報の一部として扱う場合には、情報量の削減が必要である。

また、手法 C の利用の有無にかかわらず、埋め込みビンの拡大による埋め込み手法では、埋め込み容量の小さい場合には、拡大倍率を小さくした方が、埋め込み効率は良好であり、埋め込み容量が大きい場合には、拡大倍率を大きくした方が、埋め込み効率は良好である。すなわち、RD 曲線上では、埋め込み倍率の異なる 2 本の曲線が交差する。そこで、2 本の曲線が交差する点で、埋め込み倍率を変更することで、良好な透かし埋め込み処理が可能であると考えられる。それゆえ、2 本の RD 曲線の交点で、パラメータを変更可能な手法の提案が今後の課題として挙げられる。

4.5 まとめ

本章では、透かし埋め込み画像の画質劣化を抑制するための検討を行った。まず、知覚的な画質劣化を抑える手法として、クラス間分散を利用した電子透かしについて説明を行った。次に、提案している多次元ヒストグラムを利用した可逆電子透かし手法において、画質劣化の原因について考察を行い、その結果、複数のサブバンドを有効活用すること、変換係数の変更誤差を制限すること、そして、シフトビンの数を削減することに着目し、その対策を行った。

まず、複数のサブバンドの有効活用のために、埋め込みビン拡大する手法を提案した。シミュレーション結果から、拡大倍率を変更することで、Jinna らの手法を上回る埋め込み効率と、前章で提案した手法以上の埋め込み容量を達成した。

次に、変換係数の変更誤差を制限するため、ヒストグラムビンの最大移動距

離を1に制限した透かし埋め込み規則を提案した。この規則では、ヒストグラムビンを1より大きく変更しないことを考えると、埋め込みに利用できる領域が限られる。提案手法では、 $(c_{s_a}, c_{s_b}) = (0, 0)$ のヒストグラムビンと、対角方向のヒストグラムビンを利用した。シミュレーション結果から、埋め込み容量が小さい場合に、埋め込み効率の向上を確認した。また、この手法のRD曲線は、埋め込みビンを2倍に拡大する手法を埋め込み容量の小さい場合に延長したような曲線であり、これら2つの手法を組み合わせることができれば、より良好な埋め込み効率を得られると考えられる。

最後に、シフトビンの個数を削減することを目的とした、透かし埋め込み処理に利用する変換係数を限定し、選択された変換係数のみでヒストグラムを作成する手法について検討を行った。ここでは、ロケーションマップを利用した2つの手法を提案した。ここで、ロケーションマップは、利用する変換係数の場所を表した情報である。まず、第1の手法は、透かし抽出処理の際に参照情報としてロケーションマップを必要とする手法である。第2は、ロケーションマップは抽出側で抽出処理時に作成することが可能な手法である。前者は、透かし埋め込み対象のサブバンドからロケーションマップを作成し、後者は、透かし埋め込み対象のサブバンドと相関のあるサブバンドから作成する。それゆえ、前者の方がより正確なロケーションマップを利用できるが、ロケーションマップをどのようにして抽出側へ渡すかが問題である。シミュレーションの結果、参照情報を必要としない手法でも、変換係数の限定を行わない手法を上回る効果があったが、参照情報を必要とする手法には劣っていた。このことから、更なる埋め込み効率のために、第1の手法に対しては、抽出側へ渡すロケーションマップの情報量削減が課題であり、第2の手法に関しては、より正確なロケーションマップの作成が課題である。

第5章 可逆電子透かし手法を用いた改ざん検知

3章と4章では、本論文で提案する多次元ヒストグラムを用いた可逆電子透かし手法について、可逆電子透かしの評価要素である埋め込み容量に関するアプローチと、透かし埋め込み画像の画質に関するアプローチを、それぞれ行ってきた。本章では、提案した手法の応用例の一つとして、類似領域情報を利用した画像修復法への適用を考える。また、この手法の問題点を取り上げ、その改善法にも言及する。

5.1 類似領域情報を利用した画像修復

5.1.1 概要

まず、類似領域情報を利用した画像修復手法の概要について述べる。

ネットワークを介して画像データを利用する場合、画像データの情報は膨大であるため、ネットワークの効率的な利用には、画像データの情報の削減が必要不可欠である。それゆえ、これまで様々な画像符号化方式が提案され、標準化が行われてきた [13, 15, 82]。一般に、自然画像の画素間には高い相関関係があり、画像符号化方式の多くは、この性質を利用して画像データの冗長性を削減している。

しかし、画像符号化を施した画像データを伝送する際、伝送中に通信路障害などの伝送誤りが発生すると、その画像データは大きな影響を受ける可能性がある。これは、画像符号化により冗長性が削減されているため、発生した誤りがわずかであっても、広範囲に復号誤りが生じるためである。この解決策として、誤り検出符号を用いた伝送エラーの検出と画像データの再送や、誤り訂正

符号の利用が考えられる。しかしながら、信頼性の低い通信路では、再送されたデータにも誤りが発生する可能性が高い。

上記の問題に対する別のアプローチとして、データの再送に頼るのではなく、受信済みのデータをもとに誤り隠蔽処理を行い、画像を修復する手法が各種提案されている [68–79]。誤り隠蔽は、破損した画像を主観的に許容できる画質にするために、破損した領域を覆い隠すことを目的としている。多くの画像修復手法では、自然画像において画素間の相関は高いという性質に着目し、画像内の誤りが発生していない領域から、修復対象領域に類似した領域を選択し、修復に利用する。画像修復手法で利用される画像領域内の類似性は、集中型類似性と分散型類似性の2種類に大別できる。集中型類似性は、画像のごく限られた領域における局所的な類似性であり、画像修復手法の多くは、この類似性を利用しており [73–79]、これらは破損領域の周辺のみを修復に利用する。集中型類似性を利用した手法の問題点として、伝送誤りによるパケット損失率が高い場合、画像中における非破損領域の割合が小さくなるため、修復効果は大きく低下することが挙げられる。

一方で、分散型類似性は、画像内に類似領域が散在している状態を指し、破損した領域と高い相関を有する領域が画像内に散在するならば、破損領域の模様やオブジェクトの形状を保持して修復することができる。分散型類似性を用いた画像修復手法 [68–72] では、電子透かしを利用することにより、符号化側で画像に分散型類似性を考慮した情報を透かし情報として埋め込む。伝送誤りにより画像の一部領域が破損した場合、破損していない領域から透かし情報を取り出し、それらを用いて破損領域の修復を行う。

分散型類似性を利用した画像修復方式の1つとして、BaroumandらはWDBM (Watermark driven Decentralized Best Matching) [69] を提案している。WDBMではJPEG圧縮を施した画像を、パケット損失率の高い通信路で伝送する際に発生した破損を修復することを目的としている。WDBMは、電子透かし [14,80] を利用することで、伝送誤りによる破損が発生した画像をJPEGの符号化単

位である 8×8 pixel のブロック単位で修復を行う。WDBM では、重複しないブロックごとに画像中から類似領域を探索し、類似領域の位置情報を透かし情報としてブロックへ埋め込む。これにより、画像の伝送中に破損が発生した場合でも、画像内の非破損領域を破損した領域へ貼り付けることで修復することができる。しかしながら、WDBM は類似領域の位置情報をブロック自身に埋め込むため、破損したブロック内の画素全体を修復できる可能性が低いという問題がある。

この問題を解決するために、著者らは、WDBM を改善した画像修復法を提案した [68]。提案手法は、破損したブロック全体を類似領域で置き換えることが可能である。提案手法は Patra らの手法 [81] のように、類似領域の位置情報を着目ブロックではなく、別のブロックに埋め込むことで、埋め込みブロックが破損していない限り、破損ブロックの類似領域を破損ブロックの修復処理に利用できる。その結果、破損したブロック全体の修復が可能となり、破損領域の修復率の向上が期待できる。さらに、提案手法は WDBM の画像修復アルゴリズムを併用することで、さらなる修復率の向上を図っている。

5.1.2 画像修復アルゴリズム

本節では、提案手法の画像修復アルゴリズムについて述べる。図 5.1 に提案手法の全体の流れを示す。提案手法は、WDBM の修復能力を発展させた手法であり、JPEG 画像を修復対象としている。そのため、JPEG 符号化を考慮した手法となっている。

まず、符号化側の処理について説明する。符号化側では、まず原画像を重複しない 8×8 pixel のブロックに分割する。分割されたブロックを基本ブロックとし、基本ブロックごとに画像内から類似領域を探索する。ここで、式 (3.16) に示す基本ブロックとの平均二乗誤差 (Mean Squared Error : MSE) が最小となる画像内の 8×8 pixel の領域を類似領域とする。なお、類似領域は、最大で 4 つの基本ブロックにまたがって存在する可能性がある。このとき、探索す

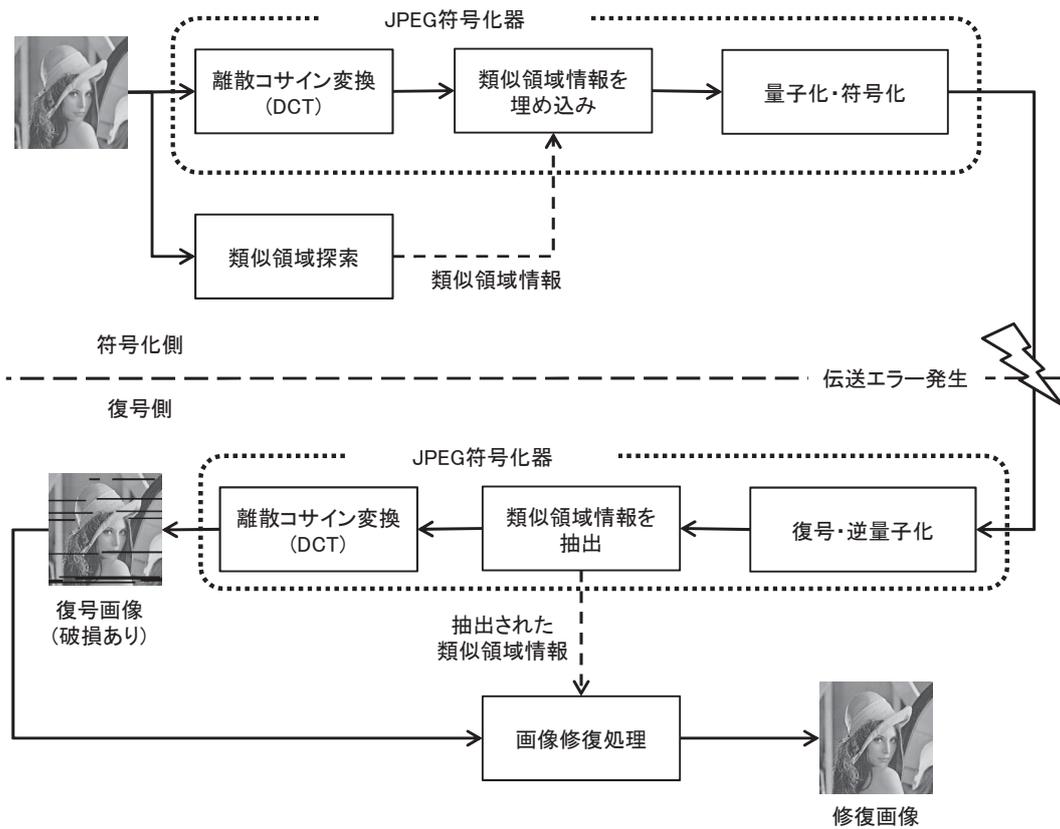


図 5.1 画像修復手法の流れ

る類似領域は、着目した基本ブロックと重複領域がないものを選択する。

類似領域の探索後、各基本ブロックに対応する類似領域の位置情報を、透かし情報として埋め込む。実際に類似領域の位置情報として埋め込まれる情報は、類似領域の左上に位置する画素の座標である。提案手法では、画像修復能力を向上させるため、着目している基本ブロックから一定間隔離れた別の基本ブロックに類似領域の位置情報を埋め込む。図 5.2 に、提案方式における位置情報の埋め込み例を示す。図 5.2 において、基本ブロック B_b の類似領域を R_b とすると、WDBM では R_b の位置情報を B_b へ埋め込むことに対して、提案手法は、 B_b から一定間隔離れた基本ブロックを B_{b_emb} とし、 B_{b_emb} を R_b の位置情報の埋め込み先ブロックとする。これにより、破損したブロックを修復する際に、破損ブロックの類似領域を利用できる可能性がある。つまり、破損ブロックを類似領域で置き換えることが可能となり、破損ブロック内の全ての画素

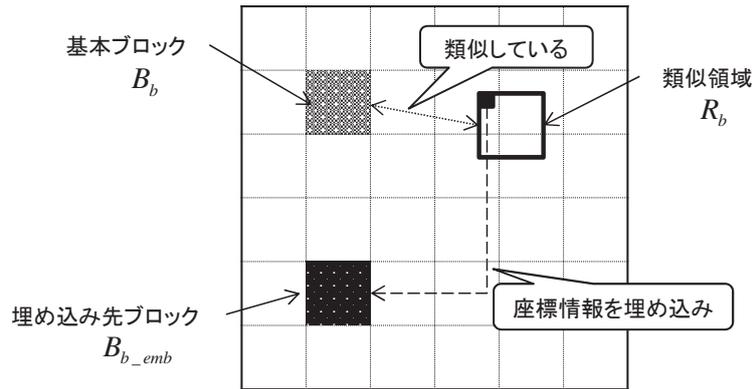


図 5.2 提案手法の埋め込み例

を修復できる可能性が向上する。また、提案手法では WDBM と同様に JPEG による量子化処理を考慮して、QIM (Quantization Index Modulation) [14] を利用して、1つの DCT 係数につき 1 bit の透かし情報を埋め込む。式 (5.1) に QIM による透かし埋め込み処理を示す。

$$P'_l = q_l \times \left\{ b_k + 2 \times \text{round} \left(\frac{P_l - b_k}{2 \times q_l} \right) \right\} \quad (5.1)$$

式 (5.1) において、 P_l は、任意の基本ブロックに 8×8 の 2 次元 DCT を適用し、得られた DCT 係数を低域からジグザグスキャン順に並べた場合の l 番目の DCT 係数値 ($0 \leq l \leq 63$) である。 q_l は P_l に対する量子化ステップ幅を示し、JPEG の量子化処理で用いられるものと同様である。 $b_1 b_2 \dots b_L \{ b_k \in (0, 1), k = 1, 2, \dots, L \}$ は、透かし情報の 2 進表現を表している。なお、 L は $b_1 b_2 \dots b_L$ の系列長であり、 P'_l は b_k を埋め込んだ DCT 係数値を、 $\text{round}(\cdot)$ は四捨五入操作を表している。式 (5.1) により、変更された DCT 係数の量子化後の値は、埋め込みビットの “0”, “1” に応じてそれぞれ偶数, 奇数となる。透かし埋め込みに用いられる DCT 係数は、DC 成分を除く低域の係数から順番に選択される。つまり、 $P_1, P_2, \dots, P_L (L \leq 63)$ が透かし埋め込み処理に使用される。

基本ブロックに埋め込まれる $b_1 b_2 \dots b_L$ の系列長 L は、類似領域の探索範囲に依存する。類似領域の探索範囲を $M \times N$ pixel とした場合、類似領域の位置情報として左上画素の x 座標と y 座標のみを表現できれば良いので、1つの基

本ブロックに埋め込まれる情報量は、 $L = \lceil \log_2 M \rceil + \lceil \log_2 N \rceil$ bit である。

提案手法、WDBMの両方で、JPEGによる符号化を考慮してQIMによる透かし埋め込みを行っているが、基本ブロック単位に情報を埋め込むことのできる手法であれば他の手法も適用可能である。

次に、復号側の処理について述べる。復号側では、符号化側で埋め込まれた類似領域の位置情報を、非破損領域から抽出し、その情報を用いて破損領域を修復する。ここで、破損した基本ブロックに関する情報は、ネットワークの下位層の通信プロトコルから与えられることを想定している [83]。

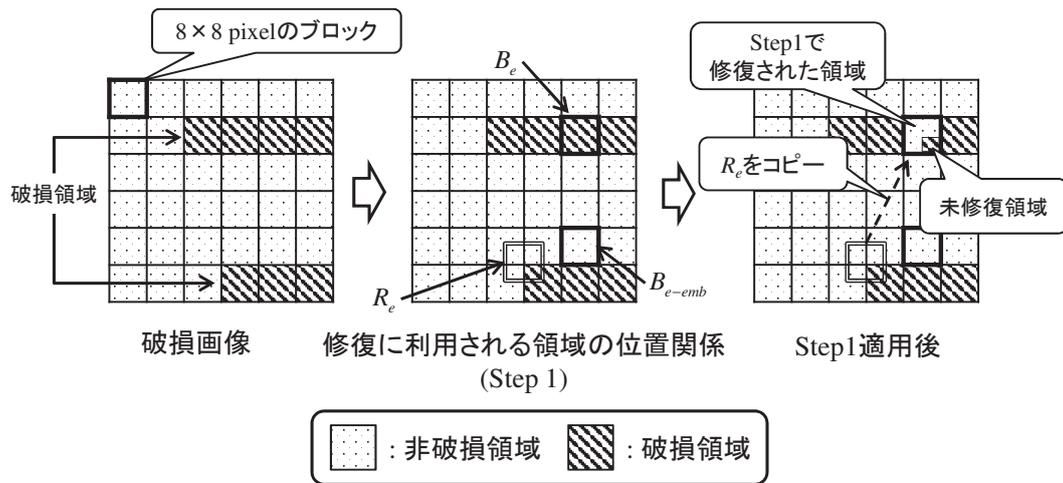
提案手法による画像修復処理について説明する。図5.1に示すように、復号側では、まず、JPEG復号器により伝送された画像データの復号を行う。このとき、JPEG復号器における逆量子化処理後に、破損していない基本ブロックから式(5.2)を用いて、類似領域の位置情報を抽出する。

$$b_k = \frac{P'_l}{q_l} \bmod 2 \quad (5.2)$$

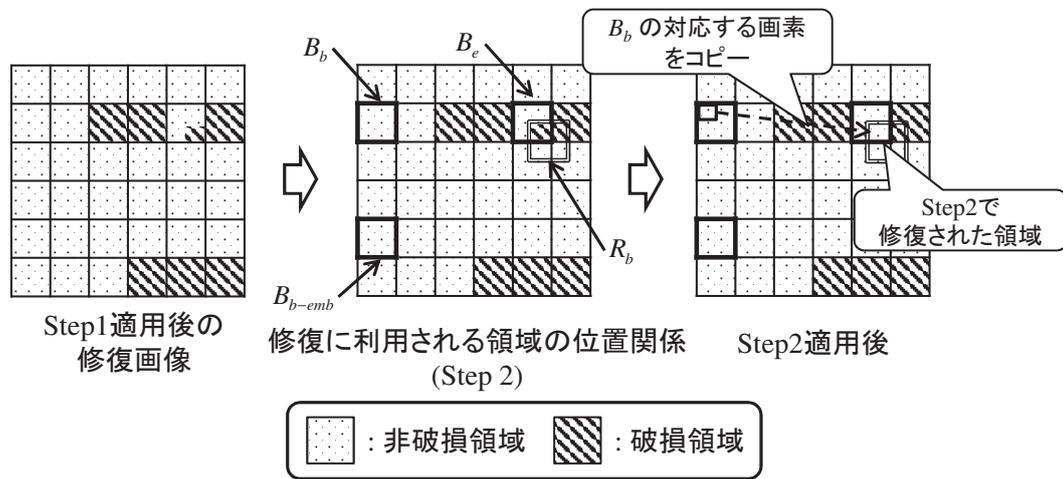
式(5.2)において、 P'_l 、 q_l 、 b_k はそれぞれ、DCT係数、量子化ステップ幅、抽出されるビットを表している。ここで、抽出された類似領域の位置情報は、抽出された位置から一定間隔離れた基本ブロックの類似領域の情報である。

抽出された位置情報は、復号画像の破損領域を修復するために利用される。提案手法では、図5.3に示すように、2段階の修復処理を行うことにより、修復効果の向上を図る。以下に示す提案手法の修復ステップでは、図5.3の破損ブロック B_e を修復する場合について説明する。

Step 1 破損ブロック B_e の類似領域を R_e としたとき、 R_e の位置情報は B_e から一定間隔離れた基本ブロック B_{e_emb} に埋め込まれている。そのため、 B_{e_emb} が破損していなければ、 R_e の位置情報の抽出が可能となる。 B_{e_emb} が破損していないとすると、 R_e の破損していない領域を複製して B_e へ貼り付けることにより修復を行う。さらに、 B_{e_emb} と R_e がどちらも全く破損していない場合、 B_e 内の全ての画素を修復可能である。なお、このような修復はWDBMでは不可能である。



(a) Step 1



(b) Step 2

図 5.3 提案手法の画像修復例

Step 2 B_{e_emb} が破損している場合、**Step 1** による修復処理を行うことができない。また、図 5.4(a) のように、 R_e が一部破損している場合、 B_e 内の全ての画素を修復することができず、未修復領域が残ってしまう。この場合、WDBM に基づいた修復処理を、 B_e の破損した領域に対して適用する。まず、図 5.4(b) のように、 B_e と共通領域を持つ類似領域 R_b の位置情報が埋め込まれている B_{b_emb} を探索する。 B_{b_emb} が破損していないならば、 R_b は B_b の類似領域となり、 B_b から B_e と R_e の共通部分に対応する領域を B_e へ貼り付けることで修復する。

表 5.1 WDBM と提案方式の修復効果

基本ブロックの状態			B_e の修復結果			
B_b	B_{b_emb}	B_{e_emb}	WDBM	提案手法		
				case 1	case 2	case 3
○	○	○	△	○	△	△
○	○	×	△	△	△	△
○	×	○	△	○	△	×
○	×	×	△	×	×	×
×	○	○	×	○	△	×
×	○	×	×	×	×	×
×	×	○	×	○	△	×
×	×	×	×	×	×	×

提案手法では、まず、全ての破損ブロックに対して **Step 1** が適用される。その後、**Step 1** では修復できなかった破損領域に対して、**Step 2** が実行される。また、以上の修復処理を用いても修復できない領域に対しては、集中型類似性を利用した画像修復手法である SBRM [73] による修復が行われる。

5.1.3 提案手法の画像修復効果

5.1.2節で述べた提案手法の画像修復効果について考察する。表5.1は、WDBM と提案手法の修復効果に関する比較を示しており、図5.3で用いた修復に利用する基本ブロック B_b , B_{b_emb} および B_{e_emb} の状態に対する B_e の修復の可否を表している。表5.1の「基本ブロックの状態」の○と×は、それぞれ、対応する基本ブロックが破損していない場合と破損している場合を表している。「 B_e の修復結果」の○, △, ×は、それぞれ、誤りブロック B_e の修復が可能、一部可能、不可能であることを表す。また、「提案手法」の欄の case 1, case 2,

case 3は、それぞれ、 R_e が破損していない場合、 R_e が一部破損している場合、 R_e が完全に破損している場合の修復効果を表している。

表5.1からわかるように、WDBMの修復結果は、 B_b が破損しているかどうか依存している。つまり、 B_b が破損していないならば、 B_e を一部修復することができる。しかし、 B_e 全体を類似領域で置き換えることは難しい。一方、提案方式は、case 3では B_e の修復が不可能になる場合が多いが、case 1とcase 2の場合では、 B_b が○、 B_{b_emb} が×、 B_{e_emb} が×となる場合(上から4行目)を除いて、提案方式の修復効果はWDBM以上であることがわかる。提案方式による修復処理では、WDBMよりも多くの基本ブロックや類似領域を利用しているため、WDBM以上の修復効果を得ることができると考えられる。加えて、 R_e が破損していなければ、 B_e 全体を修復できる可能性もある。以上から、提案方式は、伝送誤りが比較的小さい状況において、WDBMよりも高い画像修復効果を持つと考えられる。

5.2 類似領域情報を利用した改ざん検知

5.2.1 画像修復手法の問題点

本節では、5.1.2節で述べた、類似領域情報を利用した画像修復手法の問題点について述べる。この手法は、画像データの伝送中に通信路障害などによって伝送誤りが生じたことにより、画像データの一部が破損したことを想定し、破損した画像データの修復が目的である。そのため、この手法は伝送誤りに対する破損を対象としており、誤りはブロック単位に発生するとし、ブロックが破損しているか否かは、ネットワークの下位層の通信プロトコルから与えられることを想定している。したがって、画像修復手法自身は、発生した誤りを検出する能力を持たないため、画像データが悪意のある第三者によって改ざんを受けたとしても、検出することができない。そのため、画像修復手法に改ざん検知機能を付加することが必要である。この問題に対して、本論文では、画像修復手法で利用される類似領域情報を改ざん検知にも利用するための検討を

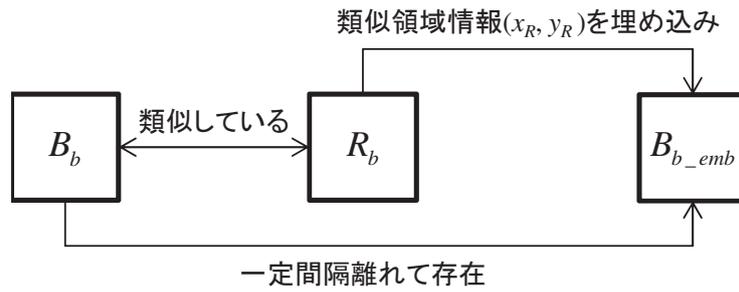


図 5.4 基本ブロック間の関係

行う。

5.2.2 提案手法を用いた改ざん検知手法

本節では、画像修復処理で利用している類似領域情報を用いて改ざん検知を行う手法について述べる。まず、各基本ブロック間の関係を図 5.4 にまとめる。図 5.4 に示すように、基本ブロック B_b に対して最も類似している領域を R_b とすると、 R_b の位置を表す情報 (x_R, y_R) を透かし情報として B_b から一定間隔離れた基本ブロック B_{b_emb} へ埋め込んでいる。本節で提案する手法では、これら 3 つの領域を利用して、改ざん検知を試みる。

図 5.5 に、類似領域情報を用いた改ざん検知の流れを示す。提案手法では、3 段階で基本ブロックごとに改ざんの有無を調べる。第 1 段階は、類似領域情報 (x_R, y_R) を改ざん検知に利用する。類似領域の探索範囲を水平方向、垂直方向共に $[a, b]$ とする。ここで、 x_R は類似領域の左上画素の x 座標、 y_R は類似領域の左上画素の y 座標であり、透かし情報として埋め込んだ時点では、 $a \leq x_R \leq b$ 、かつ、 $a \leq y_R \leq b$ である。 (x_R, y_R) が、透かし埋め込み画像から取り出した際に、 $x_R < a$ 、 $b < x_R$ 、または、 $y_R < a$ 、 $b < y_R$ となっていれば、改ざんによって埋め込んだ透かし情報が破壊されたと判断できる。したがって、第 1 段階では類似領域情報 (x_R, y_R) の埋め込み先ブロック B_{b_emb} に対する改ざん検知を行うことができる。

第 1 段階では改ざんが検知されなかった基本ブロックを対象に、第 2 段階の

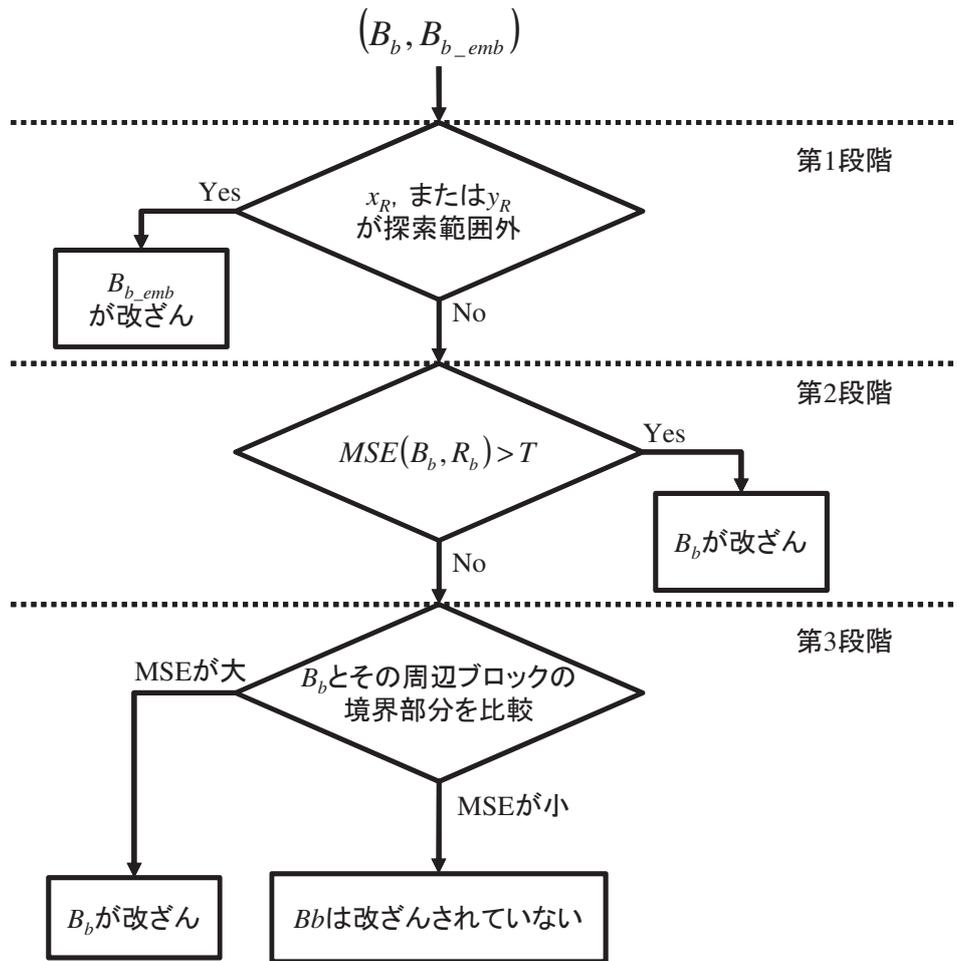


図 5.5 類似領域情報を利用した改ざん検知の流れ

改ざん検知として、基本ブロック B_b とその類似領域 R_b を比較する。 R_b は、 B_b との MSE が最小の領域が選択されるため、改ざんが含まれない場合は、MSE は小さくなる。そこで、 B_b と R_b の MSB がしきい値 T より大きい場合、 B_b が改ざんされていると判断する。ここで R_b は、複数のブロックにまたがった位置に存在する可能性があり、 R_b の一部が改ざんされている場合も考えられる。そこで、第1段階で改ざんと判定された基本ブロックと共通部分を持つ R_b に対しては、その部分は除いて MSE を求めることにする。また、 B_b の改ざん検知をする際に、第1段階で B_b の類似領域情報の埋め込み先ブロック B_{b_emb} が改ざんされていると判定された場合、 B_{b_emb} に埋め込まれている類似領域情報を利用することができない。そのため、このような B_b の改ざん検知は、第3

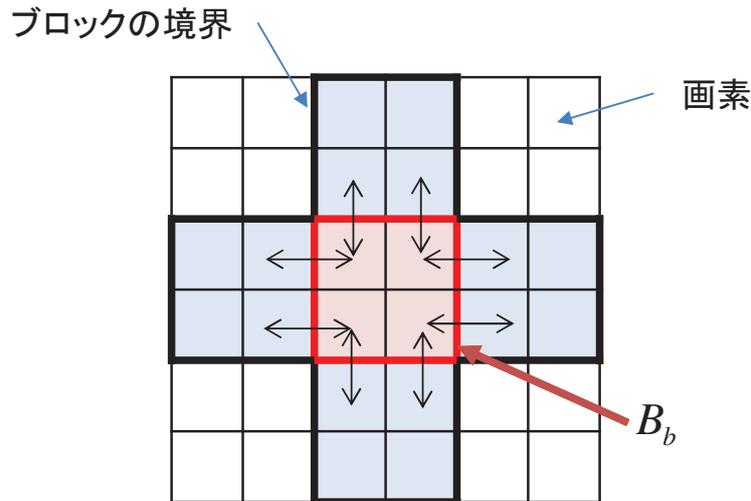


図 5.6 集中型類似性を利用した改ざん検知

段階で行う。

第2段階で改ざんと判定されなかったブロックと、第2段階で改ざん検知を行えなかったブロックに対して、第3段階による改ざん検知を行う。第3段階では、基本ブロック B_b とその周辺ブロックの境界部分の MSE から判断する。図 5.6 に、第3段階の改ざん検知の概念図を示す。図 5.6 では、矩形1つ1つが画素を、太い線がブロック境界を表しており、 2×2 pixel のブロックを想定している。赤い太線で囲まれたブロックが改ざん検知の対象となる基本ブロック B_b である。第3段階では、誤り隠蔽技術で用いられる類似性の一つである、集中型類似性を利用し、 B_b の境界画素と、 B_b に隣接する4つの基本ブロックの境界画素との MSE から、改ざんの有無を判定する。図 5.6 において、 B_b の境界画素と隣接する基本ブロックの境界画素間にまたがる両方向矢印は、差分を求める2つの画素を表している。また、 B_b に隣接する4つの基本ブロックの中に、第1、第2段階で改ざんされていると判定されたブロックが含まれる場合は、そのブロックは除いて、MSE を求める。そして、求めた MSE がしきい値 T より大きい場合、その基本ブロックは改ざんされていると判定し、MSE がしきい値以下ならば、改ざんされていないと判定する。

以上が、本節で提案する改ざん検知手法である。なお、提案手法において透

透かし埋め込み処理は、本論文で提案した可逆電子透かしを用い、サブバンドをブロック分割して、透かし情報の埋め込みを行った。また、類似領域の探索は、原画像にウェーブレット変換を施すことで得られる LL バンドから探索し、透かし情報として埋め込む類似領域に位置情報は、LL バンドにおける座標とした。

5.3 シミュレーション

5.3.1 シミュレーション条件

本節では、5.2 で提案した類似領域情報を利用した改ざん検知手法を用いたシミュレーションについて述べる。使用画像は、図 3.15(a) の画像 airplane と図 3.15(e) の画像 lena を用いた。提案手法では、まず、原画像に可逆ウェーブレット変換を施し、サブバンドに分割する。ここで、使用したフィルタは、式 (3.1), (3.2) に示す Haar 変換を用いた。次に、低周波領域である LL バンドに対して、パターンマッチングを行い、ブロックごとに類似領域を探索する。ここで、ブロックサイズは 8×8 pixel とし、探索領域は LL バンド全域とした。類似領域の探索が終了したら、類似領域の位置情報を透かし情報として埋め込む。シミュレーションでは、4 章で提案した埋め込みビンの拡大を利用した可逆電子透かし手法を用いて、透かし情報を埋め込んだ。なお、埋め込み対象サブバンドは HL バンドと LH バンドとし、埋め込みビンの拡大倍率は 2 倍とした。また、透かし埋め込み処理は、サブバンドを LL バンドと同じようにブロック分割を行い、類似領域の位置情報を基本ブロック B_b から一定間隔離れた基本ブロック B_{b_emb} を埋め込み先とした。なお、実際に透かし情報を埋め込むのは、LL バンドにおいて存在する基本ブロック B_{b_emb} と同じ座標の HL バンド、LH バンドの領域である。

本節におけるシミュレーションでは、改ざんが矩形状に発生すると仮定し、改ざん発生率は 1~10% として、改ざん領域の個数と大きさはランダムに発生させた。

また、探索範囲はLLバンド全域である 256×256 pixel であるため、座標情報を表すために必要な情報量は、水平方向に 8 bit、垂直方向に 8bit の 16bit である。提案手法では、図 5.5 に示す改ざん検知の第 1 段階の精度を高めるため、1つのブロックに対して、水平方向に 2 bit、垂直方向に 2 bit を加えた、合計 20 bit を透かし情報として埋め込んだ。また、改ざん検知の第 2 段階と第 3 段階で用いるしきい値 T は、類似領域の探索を行ったときの MSE の最大値とした。

5.3.2 シミュレーション結果

本節では、前節の条件下でシミュレーションを行った結果を示す。表 5.2、表 5.3 に、各改ざん発生率に対する提案手法における改ざん検知の各段階の処理によって、改ざんを含むと検知されたブロックの個数を示す。ここで、改ざん発生率とは、改ざんされた画素の割合を示す。提案手法における改ざん検知の第 1 段階では、抽出された透かし情報として埋め込まれている類似領域の位置情報によって判定を行う。具体的には、抽出された類似領域の位置情報が示す座標が、類似領域の探索範囲外となっていれば、情報を埋め込まれていたブロックは改ざんされていたと判定する。第 2 段階は、第 1 段階で改ざんされたと判定されていないブロックを対象に、透かし情報が指し示す類似領域との MSE を算出し、MSE がしきい値 T 以上ならば、改ざんされたと判定する。第 3 段階は、第 1 段階、第 2 段階ともに改ざんされていないと判定されたブロックに対して、判定の対象となるブロックの上下左右に隣接するブロックとの境界画素同士で MSE を算出し、第 2 段階と同様に、MSE がしきい値 T 以上ならば、改ざんされたと判定する。表 5.2、表 5.3 から示す結果から、改ざんブロックと判定されたブロックの大多数は、第 1 段階による改ざん検知で判定されていることがわかる。特に、画像 airplane で顕著である。一方で、画像 airplane、画像 lena の両画像において、改ざん検知の第 2 段階で改ざんブロックと判定されたブロックは 1 つも存在しなかった。この理由として、シミュレーション

表5.2 改ざんと判定されたブロックの個数 (画像 airplane)

改ざん発生率 [%]	第1段階	第2段階	第3段階	改ざんブロック の合計
1	17	0	4	21
2	38	0	6	44
3	42	0	5	47
4	54	0	13	67
5	86	0	13	99
6	93	0	10	103
7	101	0	20	121
8	122	0	13	135
9	134	0	14	148
10	146	0	20	166

では改ざん検知の判定基準であるしきい値 T を，類似領域の探索を行ったときの，MSE の最大値としており，類似領域の探索段階で，もともと MSE が小さかったブロックが改ざんによってわずかに変化したとしても，しきい値 T よりも小さくなり，検知することができなかったと考える．このことから，しきい値 T の設定について検討を行う必要がある．また，改ざん検知の第3段階においては，画像 airplane では，第1段階で検出された改ざんブロックの約90%が検出され，画像 lena では，第1段階と同等かそれ以上の数の改ざんブロックがあると検出した．

また，表5.4，表5.5に，提案手法による改ざん検知結果の判定精度を表す．表5.4，表5.5において，正しい判定とは，提案手法による改ざん検知により，改ざんされているブロックを改ざんブロックとして判定し，改ざんされていない

表 5.3 改ざんと判定されたブロックの個数 (画像 lena)

改ざん発生率 [%]	第1段階	第2段階	第3段階	改ざんブロック の合計
1	16	0	32	48
2	34	0	44	78
3	49	0	57	106
4	64	0	75	139
5	74	0	82	156
6	98	0	85	183
7	129	0	92	221
8	129	0	91	220
9	156	0	95	251
10	141	0	124	265

いブロックは非改ざんブロックとして正しく判定することのできた割合を示している。また、誤判定1とは、改ざんされていないブロックに対して、改ざんブロックとして判定された割合を示し、誤判定2とは、改ざんされたブロックにも関わらず、非改ざんブロックとして判定された割合を示している。画像 airplane では、改ざん発生率が9%以下の場合に、8割以上のブロックで正確な判定を行うことができている。一方で、画像 lena では、8割以上のブロックで正確な判定を行うことができるのは、改ざん発生率が5%以下となっている。また、誤判定となったブロックでは、誤判定2となるブロックよりも誤判定1となるブロックのほうが多く存在することが確認できる。これらの原因として、判定基準である MSE のしきい値の設定が考えられる。前述した通り、MSE のしきい値は、類似領域の探索処理での MSE の最大値でを用いている。画像の

表 5.4 改ざん検知の判定精度 [%] (画像 airplane)

改ざん発生率	正しい判定	誤判定 1	誤判定 2
1	96.88	1.95	1.17
2	93.75	4.20	2.05
3	92.09	4.49	3.42
4	90.82	5.86	3.32
5	86.04	8.89	5.08
6	85.84	8.69	5.47
7	83.20	10.74	6.05
8	81.35	11.43	7.23
9	80.18	12.01	7.81
10	79.00	13.28	7.71

局所的な MSE にはばらつきがあると考えられるため、MSE の最大値と最小値の範囲は大きくなると考えられる。それゆえ、MSE のしきい値の検討は重要な課題である。

また、図 5.7、図 5.8 に、改ざんされた画像と提案手法による改ざん検知結果、および正しく改ざん検知を行った場合の結果を示す。図 5.7、図 5.8 において、判定結果画像の黒い領域は、非改ざんブロックと判定されていることを示し、白い領域は、改ざんブロックと判定されていることを示している。図 5.7 と図 5.8 において、提案手法による判定結果と正しい判定結果を比較すると、提案手法では、非改ざんブロックを改ざんブロックとして判定している部分が多数存在している。このことから、表 5.4、表 5.5 の誤判定 1 に対する対策を行っていく必要がある。

表5.5 改ざん検知の判定精度 [%] (画像 lena)

改ざん発生率	正しい判定	誤判定 1	誤判定 2
1	95.61	4.00	0.39
2	91.31	7.03	1.66
3	89.84	8.59	1.56
4	87.70	10.74	1.56
5	86.91	11.43	1.66
6	78.32	16.21	5.47
7	75.10	19.04	5.86
8	73.54	19.04	7.42
9	71.19	21.09	7.71
10	77.44	18.75	3.81

5.4 まとめ

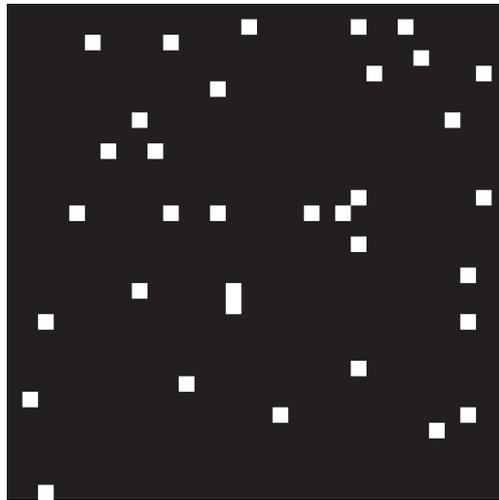
本章では、本論文で提案した多次元ヒストグラムを利用した可逆電子透かし手法の応用例として、提案手法の改ざん検知への適用について検討した。本章では、まず、先行研究である画像の類似領域を利用した画像修復法について説明を行い、画像修復法の問題点の解決のため、類似領域情報を用いた改ざん検知を提案した。提案した改ざん検知手法では、先行研究である画像修復手法で用いた類似領域情報に対して、3つの改ざん検出処理を順番に行うことで、改ざん検知精度の向上を図っている。シミュレーションを行った結果、提案手法により、平均83%の高い割合で改ざんブロックの検出を行えることを確認した。しかしながら、提案手法には誤判定する要因が少なからず存在するため、今後の課題として、誤判定の改善が必要不可欠である。その中の1つとして、改ざん検知の第2段階、第3段階で用いているしきい値 T の設定方法が挙げら



(a) 改ざん画像



(b) 提案手法による判定結果



(c) 正しい判定結果

図5.7 提案手法による改ざん検知結果（画像 airplane, 改ざん発生率: 1%）

れる。



(a) 改ざん画像

(b) 提案手法による判定結果



(c) 正しい判定結果

図 5.8 提案手法による改ざん検知結果 (画像 lena, 改ざん発生率: 1%)

第6章 おわりに

本論文では、求められる応用分野に応じて、埋め込み容量と透かし埋め込み画像の画質を容易に変更可能な可逆電子透かし手法を提案した。本論文では、提案する可逆電子透かしを実現するため、可逆電子透かしの代表的なアルゴリズムであるヒストグラム利用型の手法に着目した。その中でも、差分ヒストグラムを利用する手法や予測誤差を利用する手法、直交変換の変換係数を利用する手法では、ヒストグラムが0を中心としたラプラス分布状に分布するため、画素ヒストグラムと比較して、効率的な透かし埋め込みが可能である。そこで提案手法では、ウェーブレット変換係数を利用した手法を用いた。しかしながら、従来のウェーブレット変換を用いた手法では、サブバンドごとに独立して透かし埋め込みを行っており、サブバンド間の相関を考慮していない。本論文では、サブバンド間の相関を考慮するため、複数のサブバンドからヒストグラムを作成する多次元ヒストグラムを用いた可逆電子透かし手法を提案した。これにより、サブバンド間の相関を考慮することができ、より効率的な透かし埋め込み処理を行うことができる。また、本論文では、提案する多次元ウェーブレット変換係数ヒストグラムを利用した可逆電子透かし手法について、可逆電子透かしの評価要素に着目した2つの検討を行った。

まず、埋め込み容量に着目した検討として、GHS-RDHの考えを応用し、透かし情報を多値情報として扱うことにより、埋め込み容量の増加を図った。GHS-RDHは、多値情報を埋め込むために、埋め込み対象ビンの割当先であるゼロビンを複数用意する必要がある。従来のGHS-RDHは1次元ヒストグラムを対象としており、複数のゼロビンを用意するため、割当先として使用したいビンにある要素を大きくシフトする必要がある。ヒストグラムビンの移動量が

大きくなると、必然的に画質劣化も大きくなる。一方、多次元ヒストグラムの場合、ヒストグラムビンのシフトに対してある程度の自由度を持たせることが可能であり、わずかなヒストグラムシフトでも、多数のゼロビンを作成することができる。それゆえ、1次元ヒストグラムのGHS-RDHほど透かし埋め込み画像の画質を劣化させずに、多値埋め込みが可能である。シミュレーションを行った結果、従来のウェーブレット変換を用いた手法と比較して、埋め込み容量が小さい場合では従来手法に劣るが、埋め込み容量が大きいほど、従来手法よりも提案手法の埋め込み効率が良好となることを確認した。

次に、透かし埋め込み画像の画質劣化の抑制に関する検討を行った。はじめに、先行研究として、透かし埋め込み画像の視覚的な画質劣化を抑える手法として、画像のエッジやテクスチャなどの輝度変化の大きい部分を利用した手法について説明を行った。その後、提案手法について画質劣化の原因を考察した。その結果、提案手法では、複数のサブバンドを有効活用した埋め込み規則の提案と、ヒストグラムビンに対して一定の制限を設けることによって、透かし埋め込み画像の画質劣化抑制を図った。まず、複数のサブバンドを有効活用するため、埋め込みビンの拡大に基づいた透かし埋め込み規則を提案した。ここで、埋め込みビンの拡大とは、埋め込みビンの変換係数値を整数倍することを意味する。また、この手法では、シフトビンの移動を埋め込みビンの拡大に合わせることで、一部変更する必要のない領域が得られる。その結果、従来手法より画質劣化を抑えられていることが確認できた。また、埋め込みビンの拡大率を変更することで、埋め込み容量の増加も図ることも可能であり、埋め込み容量が大きい場合には、埋め込み容量の増加に関する検討で提案した手法以上の埋め込み効率を達成することができた。次に、ヒストグラムビンの制限として、移動量の制限と、利用するビンの制限について検討を行った。前者については、ヒストグラムビンの移動量を最大で1に制限した埋め込み規則を提案した。この規則は、移動量を制限したことにより、埋め込みビンの数も制限される。その結果、埋め込み容量は小さくなるが、透かし埋め込み画像の画質劣

化を抑えることに成功した。後者については、利用する埋め込みビンを制限する。提案手法に限らず、ヒストグラム利用型の手法では、透かし埋め込みに利用されるビンである埋め込みビンとゼロビンを作成するために移動されるシフトビンが存在する。シフトビンは、透かし埋め込みには利用されないが、ゼロビンを作成するためには、移動する必要があるため、埋め込み容量に対して、透かし埋め込み画像の画質が低下する原因となる。すなわち、シフトビンを減らすことによって、埋め込み容量に対する透かし埋め込み画像の画質を向上させることができると考えられる。この考えに基づいて、提案手法では、あらかじめ利用する変換係数を限定し、選択された変換係数のみからヒストグラムを作成することで、シフトビンの削減に成功している。このとき、埋め込み対象サブバンドから利用する変換係数を選択した場合、正確な選択が可能だが、透かし抽出時に、選択した変換係数の位置を示すロケーションマップが必要となる。これに対して、提案手法では、埋め込み対象サブバンドと相関の高いサブバンドから利用する変換係数を選択することで、抽出時にロケーションマップを必要としない手法を提案した。利用するヒストグラムビンの制限による効果は、制限しない場合と比較して、埋め込み効率が大きく向上したことを確認した。また、埋め込み対象サブバンドから選択した場合と比較して、埋め込み効率がわずかに劣るものの、ロケーションマップが必要な点を考慮すると、提案手法は有効であると考えられる。

さらに、提案手法を用いたアプリケーションの一例として、可逆電子透かしを利用した改ざん検知手法について検討を行った。先行研究として、類似領域情報を利用した画像修復手法を提案しており、ブロックごとに類似領域を探索し、類似領域の位置情報を透かし情報として、埋め込む手法である。この手法は、画像データの伝送中に伝送誤りの発生によって、画像データに破損したことを想定し、受信側で破損していない部分から類似領域情報を取り出し、破損していない領域を破損した領域に貼り付けることによって、画像修復を行う。しかしながら、この手法は伝送誤りを想定しているため、画像データの破損し

ている位置は既知なものとして考えており、画像修復手法自身には、破損した位置を検出する機能は持たない。この問題に対して、提案手法では、類似領域の位置情報を用いて改ざん検知を行う手法の提案を行う。提案する改ざん検知手法は、3つの段階で改ざんブロックを検出する。第1段階は、埋め込んだ類似領域の位置情報を利用して検出する。類似領域の位置情報は座標情報であるので、抽出された情報が探索範囲外の座標となっていれば、情報が埋め込まれていたブロックが破損していることになる。第2段階では、ブロックとブロックの類似領域を比較する。ブロックとその類似領域は、MSEが小さくなるように探索されているため、それらのMSEがある一定値よりも大きければ、改ざんブロックであると判断する。第3段階では、ブロックの上下左右に位置する4つのブロックとのブロック境界画素を利用する。具体的には、ブロック境界画素のMSEを算出し、MSEが一定値よりも大きいならば、改ざんを受けていると判断する。提案手法では、以上の3段階の改ざん検知により、検知精度を向上を図っている。シミュレーションを行った結果、第1段階で、改ざんブロックの多くを検出することができた。一方で、第2段階、第3段階では、MSEによる判断としてしきい値条件を設けたが、改ざん検知の判定精度は高くはなかった。そのため、適切なしきい値の設定が今後の課題である。

本論文に記載したシミュレーションでは、2つのサブバンドから作成した2次元ヒストグラムを利用した結果を示した。画像に1レベルのウェーブレット変換を施した場合、1つの低周波サブバンド（LLバンド）と3つの高周波サブバンド（HLバンド、LHバンド、HHバンド）が得られる。3つの高周波サブバンドを有効活用することで、より効果的な情報埋め込みを行うことができると考えられる。そこで、今後の課題として、3つの高周波サブバンドから3次元ヒストグラムを作成し、3次元ヒストグラムを基に情報を埋め込むことの可能な手法の提案が挙げられる。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、終始懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜りました長谷川まどか准教授、加藤茂夫教授、篠田一馬助教に厚く御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたり、懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜りました副指導教員の東海林健二教授に厚く御礼申し上げます。

阿山みよし教授、伊藤聡志教授には副専門研修でご指導頂き、また、本研究をまとめるにあたって有益なる御助言を賜りました。佐藤美恵准教授には先端情報数理特論にて懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜りました。ここに深く感謝いたします。

東京農工大学工学研究院先端情報科学部門の田中雄一准教授には、私が学部4年生から博士前期課程の間、本学に在籍され、懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜りました。心より御礼申し上げます。

大学院生の萩谷愛理沙氏、Aymen BABOURI 氏、小林智美氏、鈴木裕一郎氏、浜崎泰輔氏、武井勇樹氏、深澤郁裕氏をはじめとする加藤・篠田研究室、長谷川研究室諸氏には、研究を進めるにあたり、常日頃より御助言を頂きました。心より感謝いたします。

また、常日頃研究に御便宜を図って下さいました情報工学科技術職員の川上典男氏、月川淳氏、北本拓磨氏、細島美智子氏、ならびに技術補佐員の杉山博美氏に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 小野 東, “電子透かしとコンテンツ保護,” オーム社開発局, 2001.
- [2] K. Kondo, “Multimedia information hiding technologies and methodologies for controlling data,” Information science reference, 2012.
- [3] A. Tremeau and D. Muselet, “Recent trends in color image watermarking,” Journal of Imaging Science and Technology, vol.53, no.1, pp.1020101-1020115, Jan. 2009.
- [4] 新見 道治, “情報ハイディングの現状と展望,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J93-A, no.2, pp.52-61, Feb. 2010.
- [5] 画像電子学会編, “電子透かし技術-デジタルコンテンツのセキュリティ-,” 東京電機大学出版局, 2004.
- [6] 松井甲子雄, “電子透かしの基礎,” 森北出版株式会社, 1998.
- [7] S. Katzenbeisser and F. A. P. Petitcolas, “Information hiding techniques for steganography and digital watermarking,” Artech House, 2000.
- [8] A. Cheddad, J. Condell, K. Curran, and P. M. Kevitt, “Digital image steganography: Survey and analysis of current methods,” Signal Processing, vol.90, no.3, pp.727-752, March 2010.
- [9] A. Soni, J. Jain, and R. Roshan, “Image steganography using discrete fractional Fourier transform,” Int. Conf. Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), pp.97-100, March 2013.

-
- [10] 越前 功, 吉浦 裕, 安細 康介, 田口 順一, 黒須 豊, 佐々木 良一, 手塚 悟, “輪郭保存に基づく電子透かしの画質維持方式,” 情報処理学会論文誌, vol.41, no.6, pp.1828-1839, 2000.
- [11] M.A. Dorairangaswamy, “A robust blind image watermarking scheme in spatial domain for copyright protection,” *International Journal of Engineering and Technology*, vol.1, no.3, pp.249-255, 2009.
- [12] 山登 一輝, 長谷川 まどか, 田中 雄一, 加藤 茂夫, “クラス間分散を利用した電子透かし方式,” 画像電子学会誌, vol.41, no.5, pp.560-567, Sep. 2012.
- [13] ITU-T Rec. T.81 and ISO/IEC 10918-1:1994, “Information technology - Digital compression and coding of continuous-tone still images: requirements and guidelines,” Feb. 1994.
- [14] B. Chen and G. W. Wornell, “Quantization index modulation: a class of provably good methods for digital watermarking and information embedding,” *IEEE Transaction on Information Theory*, vol.47, no.4, pp.1423-1443, May 2004.
- [15] ITU-T Rec. T.800 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG1 15444-1, “Information technology - JPEG 2000 image coding system: core coding system,” Mar. 2001.
- [16] R. Caldelli, F. Filippini, and R. Becarelli, “Reversible watermarking techniques: an overview and a classification,” *EURASIP Journal on Information Security*, vol.2010, no.134546, Jan. 2010.
- [17] J. Fridrich, M. Goljan, and R. Du, “Lossless data embedding-new paradigm in digital watermarking,” *EURASIP Journal on Application and Signal Processing*, vol.2002, no. 2, pp.185-196, Feb. 2002.

-
- [18] Z. Ni, Y. Q. Shi, N. Ansari, and W. Su, "Reversible data hiding," *IEEE Transaction on Circuits Systems and Video Technology*, vol.16, no.3, pp.354-362, Mar. 2006.
- [19] C. C. Lin, W. L. Tai, and C. C. Chang, "Multilevel reversible data hiding based on histogram modification of difference images," *Pattern Recognition*, vol.41, no.12, pp.3582-3591, Dec. 2008.
- [20] S. K. Lee, Y. H. Suh, and Y. S. Ho, "Reversible image authentication based on watermarking," in *Proc. IEEE ICME*, pp.1321-1324, July 2006.
- [21] S. Han, M. Fujiyoshi, and H. Kiya, "A reversible image authentication method without memorization of hiding parameters," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E92-A, no.10, pp.2572-2579, Oct. 2009.
- [22] X. Li, W. Zhang, X. Gui, and B. Yang, "A novel reversible data hiding scheme based on two-dimensional difference-histogram modification," *IEEE Transaction on Information Forensics and Security*, vol.8, no.7, pp.1091-1100, July 2013.
- [23] B. Ou, X. Li, Y. Zhao, R. Ni, and Y. Q. Shi, "Pairwise prediction-error expansion for efficient reversible data hiding," *IEEE Transaction on Image Processing*, vol.22, no.12, pp.5010-5021, Dec. 2013.
- [24] S. K. Jinna and L. Ganesan, "Reversible image data hiding using lifting wavelet transform and histogram shifting," *IJCSIS*, vol.7, no.3, pp.283-289, Mar. 2010.
- [25] S. Lee, C. D. Yoo, and T. Kalker, "Reversible image watermarking based on integer-to-integer wavelet transform," *IEEE Transaction on Information Forensics and Security*, vol.2, no.3, pp.321-330, Sep. 2007.

-
- [26] M. Fujiyoshi and H. Kiya, "Reversible data hiding for sparse histogram images," in Proc. IEEK/IEICE/ECTI ITC-CSCC, pp.510-513, June 2011.
- [27] M. Arabzadeh, M. S. Helfroush, H. Danyali, and K. Kasiri, "Reversible watermarking based on generalized histogram shifting," in Proc. IEEE ICIP., pp.2797-2800, Sept. 2011.
- [28] M. Fujiyoshi and H. Kiya, "Generalized histogram shifting-based reversible data hiding with an adaptive binary-to-q-ary converter," in Proc. APSIPA ASC, Dec. 2012.
- [29] M. Fujiyoshi, "A blind lossless information embedding scheme based on generalized histogram shifting," in Proc. APSIPA ASC, Oct. 2013.
- [30] T. Yoshida, T. Suzuki, and M. Ikehara, "Adaptive reversible data hiding via integer-to-integer subband transform and adaptive generalized difference expansion method," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E97-A, no.1, pp.384-392, Jan. 2014.
- [31] S. Weng, Y. Ahao, J.S. Pan, and R. Ni, "Reversible watermarking based on invariability and adjustment on pixel pairs," IEEE Signal Process. Lett., vol.15, pp.721-724, 2008.
- [32] C. Wang, X. Li, and B. Yang, "High capacity reversible image watermarking based on integer transform," Proc. ICIP 2010, pp.217-220, Sept. 2010.
- [33] F. Peng, X. Li, and B. Yang, "Adaptive reversible data hiding scheme based on integer transform," Signal Process., vol.92, no.1, pp.54-62, Jan. 2012.
- [34] J. Fridrich, M. Goljan, and R. Du, "Invertible authentication," Proc. SPIE, vol. 4314, pp.197-208, Aug. 2001.

-
- [35] G. Xuan, J. Zhu, J. Chen, Y. Q. Shi, Z. Ni, and W. Su, "Distortionless data hiding based on integer wavelet transform," *IEE Electron. Lett.*, vol. 38, no. 25, pp.1646-1648, 2002.
- [36] M. U. Celik, G. Sharma, A. M. Tekalp, and E. Saber, "Lossless generalized-LSB data embedding," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 14, no. 2, pp.253-266, Feb. 2005.
- [37] M. U. Celik, G. Sharma, and A. M. Tekalp, "Lossless watermarking for image authentication: A new framework and an implementation," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 15, no. 4, pp.1042-1049, Apr. 2006.
- [38] M. Goljan, J. Fridrich, and R. Du, "Distortion-free data embedding for images," *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol.2137, pp.27-41, 2001.
- [39] J. Hwang, J. Kim, and J. Choi, "A reversible watermarking based on histogram shifting," in *Proc. 5th IWDW 2006*, pp. 348-361, 2006.
- [40] W. C. Kuo, D. J. Jiang, and Y. C. Huang, "Reversible data hiding based on histogram," in *Proc. ICIC*, pp.1152-1161.
- [41] J. Tian, "Reversible data embedding using a difference expansion," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 13, no. 8, pp. 890-896, Aug. 2003.
- [42] A. M. Alattar, "Reversible watermark using the difference expansion of a generalized integer transform," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 8, pp. 1147-1156, Aug. 2004.
- [43] L. Kamstra and H. J. A. M. Heijmans, "Reversible data embedding into images using wavelet techniques and sorting," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 14, no. 12, pp.2082-2090, Dec. 2005.

-
- [44] H. J. Kim, V. Sachnev, Y. Q. Shi, J. Nam, and H. G. Choo, "A novel difference expansion transform for reversible data embedding," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 4, no. 3, pp. 456-465, Sep. 2008.
- [45] W. L. Tai, C. M. Yeh, and C. C. Chang, "Reversible data hiding based on histogram modification of pixel differences," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 906-910, Jun. 2009.
- [46] D. M. Thodi and J. J. Rodriguez, "Expansion embedding techniques for reversible watermarking," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 16, no. 3, pp. 721-730, Mar. 2007.
- [47] M. Fallahpour, "Reversible image data hiding based on gradient adjusted prediction," *IEICE Electron. Exp.*, vol. 5, no. 20, pp. 870-876, Oct. 2008.
- [48] Y. Hu, H. K. Lee, and J. Li, "DE-based reversible data hiding with improved overflow location map," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 250-260, Feb. 2009.
- [49] V. Sachnev, H. J. Kim, J. Nam, S. Suresh, and Y. Q. Shi, "Reversible watermarking algorithm using sorting and prediction," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 19, no. 7, pp. 989-999, Jul. 2009.
- [50] W. Hong, T. S. Chen, and C. W. Shiu, "Reversible data hiding for high quality images using modification of prediction errors," *J. Syst. Softw.*, vol. 82, no. 11, pp. 1833-1842, Nov. 2009.
- [51] L. Luo, Z. Chen, M. Chen, X. Zeng, and Z. Xiong, "Reversible image watermarking using interpolation technique," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 5, no. 1, pp. 187-193, Mar. 2010.

-
- [52] W. Hong, "An efficient prediction-and-shifting embedding technique for high quality reversible data hiding," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2010, Feb. 2010.
- [53] G. Xuan, Y. Shi, J. Teng, X. Tong, and P. Chai, "Doublethreshold reversible data hiding," in *Proc. IEEE ISCAS*, pp. 1129-1132, Jun. 2010.
- [54] X. Gao, L. An, Y. Yuan, D. Tao, and X. Li, "Lossless data embedding using generalized statistical quantity histogram," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 21, no. 8, pp. 1061-1070, Aug. 2011.
- [55] X. Li, B. Yang, and T. Zeng, "Efficient reversible watermarking based on adaptive prediction-error expansion and pixel selection," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 12, pp. 3524-3533, Dec. 2011.
- [56] D. Coltuc, "Improved embedding for prediction-based reversible watermarking," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 6, no. 3, pp. 873-882, Sep. 2011.
- [57] C. Dragoi and D. Coltuc, "Improved rhombus interpolation for reversible watermarking by difference expansion," in *Proc. EUSIPCO*, pp. 1688-1692, 2012.
- [58] H. T. Wu and J. Huang, "Reversible image watermarking on prediction errors by efficient histogram modification," *Signal Process.*, vol. 92, no. 12, pp. 3000-3009, Dec. 2012.
- [59] C. Qin, C. C. Chang, Y. H. Huang, and L. T. Liao, "An inpaintingassisted reversible steganographic scheme using histogram shifting mechanism," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 23, no. 7, pp. 1109-1118, Jul. 2013.

-
- [60] D. Coltuc and I. C. Dragoi, "Context embedding for raster-scan rhombus based reversible watermarking," in Proc. ACM IH & MMSEC, pp. 215-220, 2013.
- [61] X. Gui, X. Li, B. Yang "A high capacity reversible data hiding scheme based on generalized prediction-error expansion and adaptive embedding." Signal Processing, vol.98, pp.370-380, May 2014.
- [62] G. Strang and T. Q. Nguyen, *Wavelets and Filter Banks*. Boston, MA: Wellesley-Cambridge, 1996.
- [63] A. R. Calderbank, I. Daubechies, W. Sweldens, and B. L. Yeo, "Wavelet transforms that map integers to integers," Appl. Comput. Harmonics Anal., vol.5, no.3, pp.332-369, 1998.
- [64] I. Daubechies and W. Sweldens, "Factoring wavelet transforms into lifting steps," J. Fourier Anal. Appl., vol.4, no.3, pp.245-267, 1998.
- [65] W. Sweldens, "The lifting scheme: a construction of second generation wavelets," SIAM J. Math. Anal., vol.29, no.2, pp.511-546, Mar. 1998.
- [66] N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, vol.SMC-9, no.1, pp.62-66, 1979.
- [67] M. Kutter and F. Petitcolas, "A fair benchmark for image watermarking systems," SPIE IS&T/SPIE's 11th Annu.Symp., Electronic Imaging '99: Security and Watermarking of Multimedia Contents, vol.3657, pp.1-14, 1999.
- [68] 山登 一輝, 長谷川 まどか, 篠田 一馬, 加藤 茂夫, 田中 雄一, "類似領域情報の画像内埋め込みに基づく画像修復法," 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J97-D, no.4, pp.857-867, Apr. 2014.

-
- [69] A. Baroumand and A. N. Avanaki, "Watermark driven decentralized best matching," Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp.1274-1277, Mar. 2010.
- [70] Z. Wang et al., "Best neighborhood matching: An information loss restoration technique for block-based coding systems," IEEE Trans. Image Processing, vol.7, no.7, pp.1056-1061, July 1998.
- [71] M. Kurosaki and H. Kiya, "Error concealment using a data hiding technique for MPEG video," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E85-A, no.4, pp.790-796, Apr. 2002.
- [72] X. Zhang et al., "Reference sharing mechanism for watermark self-embedding," IEEE Trans. Image Processing, vol.20, no.2, pp.485-495, Feb. 2011.
- [73] A. Baroumand and A. N. Avanaki, "Sequential best neighborhood matching: an error concealment technique with application in high packet loss image transmission," Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing pp.1197-1200, Apr. 2009.
- [74] X. Li and M. T. Orchard, "Novel sequential error-concealment techniques using orientation adaptive interpolation," IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology, vol.12, no.10, pp.857-864, Oct. 2002.
- [75] O. G. Guleryuz, "Nonlinear approximation based image recovery using adaptive sparse reconstructions and iterated denoising-part I: theory," IEEE Trans. Image Processing, vol.15, no.3, pp.539-554, Mar. 2006.
- [76] O. G. Guleryuz, "Nonlinear approximation based image recovery using adaptive sparse reconstructions and iterated denoising-part II: adaptive

-
- algorithms,” IEEE Trans. Image Processing, vol.15, no.3, pp.555-571, Mar. 2006.
- [77] L. D. Soares and F. Pereira, “Spatial shape error concealment for object-based image and video coding,” IEEE Trans. Image Processing, vol.13, no.4, pp.586-599, Apr. 2004.
- [78] M. Jayalakshmi et al., “Error Concealment Using Digital Watermarking,” Proc. Aisa Pacific Conf. Circuits and Systems, pp.1713-1716, Dec. 2006.
- [79] M. Ma et al., “Edge-directed error concealment,” IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., vol.20, no.3, pp.382-395, Mar. 2010.
- [80] P. H. W. Wong et al., “On improving the iterative watermark embedding technique for JPEG-to-JPEG watermarking,” Proc. Int. Symp. Circuits and Systems, vol.2, pp.161-164, May 2004.
- [81] B. Patra and J. C. Patra, “CRT-based self-recovery watermarking technique for multimedia applications,” Proc. Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, pp.1761-1764, Mar. 2012.
- [82] ITU-T Rec. H.264 and ISO/IEC 14496-10 AVC, “Advanced video coding for generic audiovisual services,” May 2003.
- [83] S. Lin and D.J. Costello, ERROR CONTROL CODING: Fundamentals and Applications, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.