ベンフォードの法則に基づく電子透かし埋め込み方式のカラー画像への適用に関する検討

野田　和臣 †，堀　良彰 ††，櫻井　幸一 ††

† 九州大学大学院システム情報科学府　†† 九州大学大学院システム情報科学研究院

本論文では，ベンフォードの法則に基づいた電子透かしの技法に着目した．ベンフォードの法則とは数字の最上位桁の存在確率がある法則に従うというものである．このベンフォードの法則は一般的には自然画像に適用できない．しかし，画像に離散コサイン変換（DCT）を施すことでベンフォードの法則が成立する．このベンフォードの法則を用いた電子透かしを提案している論文ではグレースケールの画像でのみ検証を行っていたので，今回はカラー画像への適用が可能であるかの検証を行った．

Examination about the application to the color image of the digital watermark based on a Benford's Law

Kazuomi Noda †　Yoshiaki Hori ††　Kouichi Sakurai ††

† Graduate School of Computer Science and Communication Enginnering, Kyushu University

†† Department of Computer Science and Communication Enginnering, Kyushu University

In this paper, We focus on the technique of digital watermark based on a Benford's Law. Benford's Law is the law about the frequency of appearance of the most significant digit. Generally, the Benford's Law can't apply to a natural image. However, the Benford's Law is formed by making DCT on an image. We verified whether Benford's Law is useful for color image, because in the paper, they are verified only gray-scale image.

1　はじめに

近年，コンピュータ，そしてインターネットの普及に伴い，画像，音楽，映像などのデータはデジタル化され，加工や複製，流通が容易となりコンテンツの自由度が増加した．しかし，このようにして加工や複製，流通が容易になったことにより，デジタルコンテンツを不正に使用する悪意のあるユーザにとっても恩恵を与える結果となってしまった．悪意のあるユーザはコンテンツを不正に複製，流通させて利益を上げ，著作権者に対して大きな損害を与えてしまう．

そこで，このような不正流通を防止する手段として「電子透かし」というものが開発された．これは配布先を特定できる情報を，コンテンツに埋め込むことで，不正コピーが行われたコンテンツから不正コピー者を特定できるという技術である．これによって利用者には心理的な抑制効果が生まれ，不正コピーを防止することができるようになる．しかし，電子透かしにも様々な問題点がありそれを解決するために，日々研究がなされている．

画像に電子透かしを埋め込む方法のひとつに，ベンフォードの法則というものを用いたものがある．ベンフォードの法則とは簡単に説明すると，自然界に存在する数字の最上位桁が 1 である確率が 30 %ほどであるという法則である．関連研究ではピクセル領域のグレースケール画像の輝度値を算出し，そこに DCT を施すことでベンフォードの法則が成立する

とある．

本研究ではベンフォードの法則を用いた電子透かしがカラー画像の場合でも導入できるかの検証を行う．また，埋め込みが行われた画像ではベンフォードの法則が成立しないのではないかという仮定の下，電子透かしを埋め込んだ場合と元画像の場合の差異についても検証する．

本論文の構成は以下の通りになっている．2 章では，電子透かしについての説明と問題点などを述べる．3 章では，本研究を進めるにあたって参考とした関連研究の紹介とそれに関連する技術の紹介を行う．4 章では，今回検討する内容についての説明を行い，5 章で結果と考察，6 章で，今後の課題について論じる．最後に，本論文のまとめを行う．

2　電子透かしについて

2.1　概要

電子透かしとはステガノグラフィの応用から開発された画像や動画，音楽などのデジタルコンテンツに情報を埋め込むデータハイディング技術のひとつである．これは，デジタルコンテンツ中に一見すると見ることのできないデータを埋め込む技術であり，埋め込む「透かし」情報としては著作権者 ID や配布先 ID，制御情報などがある.「透かし」データを埋め込まれた画像などのデータは，一見すると元のデータと変わりないように見える．しかし，専用の電子透かし検出用ソフトに読み込ませると，利用者 ID や著作権者，コピー回数などの埋め込まれた情報が表示される．また，電子透かしによりコンテンツに埋め込まれた情報を取り除くことは一般的には困難であり，埋め込み情報を取り除けたとしても，コンテンツの品質を大きく損なうことになってしまう．

2.2　利用方法

電子透かしを利用して，著作権者や利用者 ID などの情報をコンテンツに埋め込めば，不正にコンテンツが流出した場合，コンテンツから流出元を特定でき，不正を抑止することが可能となる．これによって，コンテンツの著作権保護や，コンテンツ流通のビジネスモデルの実現が可能となる．しかも，電子透かしは埋め込み時と検出時のみ専用の処理が必要となるが，コンテンツが流通する過程においては，特別な処理を必要としない．すなわち，従来の流通経路や既存の流通システムに大きな変更を加えることなく，電子透かしによる処理を付加することができる．

2.3　問題点

電子透かしを実用的な技術にするためにいくつかの条件が求められる．そのなかでも以下の 3 つは非常に重要である．

- 透かしが記録されたコンテンツの品質劣化を最小限にとどめる
- コンテンツの編集や圧縮，フォーマット変換などの各種改変に対して透かしが消えない
- 透かしの読み出しは，許可されたもの以外不可能

まず，透かしが記録されたコンテンツの品質劣化を最小限にとどめることである．電子透かしを使用したことによって，コンテンツの品質が大きく劣化してしまえば，そのコンテンツの価値を損ねる結果となってしまうのでこの条件は当然必要となる．一般的に，画像や音声などの品質は SNR によって示されることが多い．この SNR とは，画像や音声などの信号の平均電力を S とし，これに加わる雑音信号の平均電力を N とした場合，

$$SNR = 10\log_{10}\frac{S}{N}\,(\mathrm{dB})$$

により定義される値である．電子透かしにおいて記録される信号は，コンテンツからみると雑音信号であると考えられるため，電子透かしの評価においても SN 比が用いられる．

次に，コンテンツの編集や圧縮，フォーマット変換などの各種改変に対して透かしが消えないことである．デジタルコンテンツは加工や編集をしても品質がほとんど劣化しないことが大きな利点であるため，使用形態に応じて様々な加工が行われることが多くなっている．また，コンテンツに電子透かしが入っていることは一般的に知らされているので，悪意のあるユーザが簡単にそのコンテンツを改変し，電子透かしを取り除けるようなことは避けねばならない．そのため，電子透かしは

このような加工や編集などの改変操作に対してある程度の耐性を有する必要がある．

そして，透かしの読み出しは，許可されたもの以外不可能であることである．電子透かしには，透かしの読み出しに必要な鍵が設定されており，それを知っているものだけが透かしを読みだすことができるようになっている．あるコンテンツの著作権者が誰であるかを表示するような場合，そのコンテンツの使用者は誰でも透かしの読み出しが可能である必要がある．しかし，一般的には透かしの読み出しが可能であればその消去も可能であるため，前節で述べたように，電子透かしによって不正コピーなどの抑制をしている場合には問題が生じる．そのような場合，著作権者や監査機関のみが透かしを読みだすことのできる鍵を所有することになる．

これ以外にも電子透かしには解決すべき点がいくつもある．不正コピーされたコンテンツをいかにして発見するかの問題や，必要に応じて埋め込みの情報量を大きくしなければならないなどの問題である．電子透かしにおいて，埋め込み情報量やコンテンツの品質，検出率などの性能は相互にトレードオフの関係にあることが多く，単純にどれかの性能を引き上げると，他の性能が落ちることがある．そのため，現在は全体的に性能を引き上げるような技術開発がなされている．

3 関連研究

まず関連研究の説明の前にここで重要になる法則などの説明を行う．

- ベンフォードの法則

ベンフォードの法則とは 1938 年に Frank Benford によって発表された法則で，数字の最上位桁に関する法則である．これは，自然発生するデータの最上位桁 d の存在確率 $P(d)$ が以下のようになるというものである．

$$P(d) = log_{10}(1 + 1/d)(d \in 1, 2, ..., 9)$$

この法則を逆に考える．一般的に成立するはずのデータで，この法則が成立しないような場合，そのデータに人為的措置が加えられたと考えることができる．このような理由で不正データの検出などに用いられ，近年注目されている．

- 離散コサイン変換 (DCT)

ここでは離散コサイン変換 (DCT) について説明する．DCT は離散信号を周波数領域に変換する方法のひとつであり，信号圧縮に広く用いられる．DCT は主に JPEG などの画像圧縮技術や，AAC や MP3 などの音声圧縮技術において利用されている．DCT は DFT（離散フーリエ変換）に工夫を加えたものであり，変換後の信号の周波数成分が低周波数領域に集中するのが特徴となる．データ圧縮に用いる場合には，変換後の信号を量子化し符号化するが，この際に情報の集中していない領域を切り捨てたり，少ない符号化ビットを割り当てることでデータ容量を減らすことができる．

- 画像処理におけるベンフォードの法則

ここでは画像処理におけるベンフォードの法則という論文の紹介をする．J.M. Jolion らによる研究によると，このベンフォードの法則が階調画像やラプラス変換に基づく錐体分解で非常に有効であるということが示された．他のベンフォードの法則を扱う研究では，E.Acebo らが一般的な自然画像ではベンフォードの法則が成立しないという発表をした．

この論文では，一般的にはベンフォードの法則が成立しないと言われるグレースケールの画像を 8×8 のピクセルごとに分け，DCT を施す．すると，算出された DCT 係数がベンフォードの法則満たすようになる．また，ベンフォードの法則を一般化し，ベンフォードの法則に基づいた電子透かしを埋め込む方法を提案している．このベンフォードの法則を用いることで電子透かしの誤検知率を低下させるという利点がある．

4 提案

今回，前述したベンフォードの法則を用いた電子透かしをカラー画像に適用できるかどうかを検証する．また，前述したベンフォードの法則を用いた透かし埋め込み方法には透かしを抽出する方法の記載が特になかったため，

筆者はベンフォードの法則が成立する元画像に「電子透かし」という人為的操作を加えるとベンフォードの法則が成立しなくなるのではと考えた．このことについても検証を行う．

まず，用意したビットマップイメージに電子透かしの埋め込みを行う．そして，透かし埋め込み画像と元画像の輝度値を YCbCr それぞれの領域について算出し，Excel で出力する．次に，この出力された数値を 8 × 8 のブロックごとに分割し DCT を行う．そして，算出された DCT 係数の最上位桁を取り，それをもとに Excel でグラフを作成した．電子透かしにおいて埋め込みの際には輝度値を上下させることによって埋め込みを行う．よって，今回は Y（輝度値）領域にのみ着目した．

今回検証した画像は 80 × 80 ピクセルのカラー画像で，以下の Fig.1 を用いた．左が元画像，右が透かしを埋め込んだ画像である．

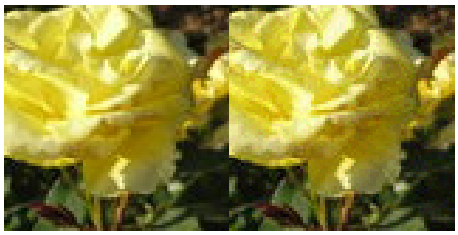

Fig. 1　画像 1

このように透かしを埋め込んだ画像と元画像とでは一見違いがないように見えるが右の画像には実際に透かしが埋め込まれている．埋め込んだ透かし画像は Fig.2 である．

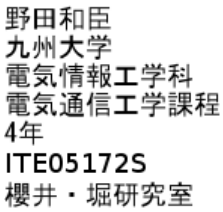

Fig. 2　埋め込み透かし画像

5　結果と考察

5.1　結果

今回検証した画像の透かし埋め込み時と元画像のグラフは Fig.3 のようになった．

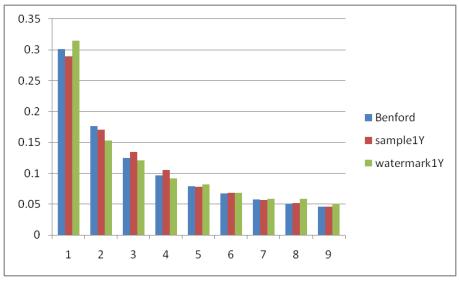

Fig. 3　画像 3

はじめにグラフの見方について説明する．

青色の Benford というグラフはベンフォードの法則での最上位桁の 1 から 9 までの存在確率を示している．そして，赤色の sample というグラフは元画像における DCT 係数の最上位桁の 1 から 9 までの存在確率を，緑色の watermark というグラフは電子透かしを埋め込んだ画像における DCT 係数の最上位桁の 1 から 9 までの存在確率を示している．

5.2　考察

このように元画像，透かし埋め込み画像ともにベンフォードの法則に類似していることがわかる．また，元画像と透かし画像の差異についてだが，目に見えた違いが出るとの予想のもと実験を進めたが，あまり違いがないという結果になった．これにより，筆者の考えていた透かしを埋め込んだ場合にベンフォードの法則に準じなくなるのではという仮説は証明できなかった．このため，どのくらいずれたら透かしが埋め込まれていると判断するのかの，閾値の検討が重要となってくると思われる．また，今回は一枚の画像だけでの検証となってしまったので，検証画像の枚数を増やし，さらに検討を行う必要があると思われる．

6　今後の課題

電子透かしは今後デジタルコンテンツのセキュリティを考えるにあたって非常に重要な技術である．セキュリティ上の観点からみると，

やはり最も重要であるのは電子透かしの画像編集処理などに対する耐性ということになる．

今後の課題としては，埋め込みに用いる閾値の考察と，検討用の画像を増やしていくこと，また，さまざまな埋め込み方法についても検討していくことが重要であると思われる．

7　まとめ

近年，コンピュータやネットワークの普及に伴い，コンテンツがデジタル化されてきた．それに伴い，コンテンツの加工，複製，流通が容易になった反面，そのコンテンツの不正な利用も増加してきた．そのような不正を防止するために電子透かしという，コンテンツに利用者 ID や著作権者 ID などを埋め込む技法が開発された．

本論文では，ベンフォードの法則に基づいた電子透かしに注目し，その手法のカラー画像への適用について考察を行った．そして，埋め込み後はベンフォードの法則が成立しないのではないかという仮説を立て，その検証も行った．実験の結果，多少の変化はあったものの，ベンフォードの法則が成立しない程の大きな変化はなかった．

今後の課題としては埋め込みに用いられる閾値の解析とさまざまな埋め込み方法によって検証を行い，最終的にはベンフォードの法則に基づいた電子透かしをカラー画像に適用したものを設計したい．そして，それを用いて透かしを埋め込み，既存の手法との耐性などの比較，評価を行いたい．

参考文献

1) Fernando Perez-Gonzalez, “BENFORD ’S LAW IN IMAGE PROCESSING”, *2007 IEEE International Conference on Image Processing*

2) 電子透かし技術の評価手法の標準化に関する調査研究報告書
`http://www.dcaj.org/report/sukashi/sukashi.pdf`

3) Jean-Michel Jolion, “Images and Benford ’s Law”, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, pp73-81