2 階層電子透かしの有効性の評価

石井 真之[†] 鹿志村 浩史[†] 佐々木 良一[†]
吉浦 裕[††] 越前 功[†††] 伊藤 信治[†††]

著作権保護技術として電子透かしが注目され，様々な方式が提案されているが，各方式の特徴や，ユーザのニーズの多様性の観点から 1 つの方式に標準化することは困難である．そこで，複数の電子透かしの存在を可能にしたまま，統一的処理を行える技術として 2 階層電子透かし方式を提案した．この 2 階層電子透かし方式の有効性を評価するためには，画質，検出率，処理効率の 3 つの観点から行うことが必要である．本論文では，画質については，実際に作成した画像の主観評価から，検出率については，作成した 2 階層電子透かしによる実測から，処理効率については，順次探索による検出モデルを用いた理論的比較から 2 階層電子透かし方式の有効性を示す．

Evaluation on Two Layer Digital Watermarking System

Saneyuki Ishii,[†] Hiroshi Kashimura,[†] Ryoichi Sasaki,[†]
Hiroshi Yoshiura,[††] Isao Echizen[†††] and Shinji Ito[†††]

Digital watermarking attracts attention as protection-of-copyrights technology, and various systems are proposed now. However, it is difficult to select one standard method from a viewpoint of the diversity a user's needs. As the solution, we propose two layer digital-watermarking system as technology which can use many digital-watermarking systems proposed now, and can perform unific processing. In order to evaluate the validity of two layer digital-watermarking system, it is necessary to evaluate about three viewpoints, quality of image, the rate of detection, and processing efficiency. In this paper, validity is shown by the following three methods. One, subjectivity evaluation of the actually created picture shows quality of image. Two, the rate of detection is shown from survey by created two layer digital-watermarking system. Three, processing efficiency is shown from the theoretical comparison using the detection model by search one by one.

1. はじめに

近年，インターネットの普及にともなうディジタルコンテンツの不正コピー問題は深刻の度を増してきている．現在，この問題に対する対策として電子透かし技術が注目されており，様々な研究・開発が行われている[1)~7)]．

'電子透かし' とは，画像や音声などのディジタルコンテンツに対し，著作権者の情報などを人間に知覚されにくい形でコンテンツ自体に埋め込むことにより，著作権の保護を可能にする技術であり，コンテンツの特徴や目的により 1 つの方式に絞り込むことが困難であることが知られている[4),8)]．

電子透かしにより埋め込まれた情報を検出するためには，埋め込み時に使用した方式に対応した検出方法を用いる必要がある．そのため，複数の電子透かし方式を併用して運用した場合，透かし検出のために埋め込み時に用いた透かし方式を特定する必要がある．

埋め込み時に用いた透かし方式の特定方法として，あらゆる透かし方式を総当り的に試す（順次探索）ことにより行うことも考えられるが，効率面などから現実的ではないと考えられる．そこで，より効率的に透かし方式を特定する方法として 2 階層電子透かし方式を提案した[8)]．この方式は，実際に透かし情報を埋め込む '実透かし' と，この '実透かし' の方式を特定するための番号を埋め込むメタ透かしの組合せからなる．

2 階層電子透かし方式の有効性を評価するためには，(1) 画質，(2) 検出率，(3) 処理効率の 3 つの観点から行うことが必要である．本論文では，いくつかの電子透かしを実装し，それらの組合せにより仮想的に 2 階

† 東京電機大学
Tokyo Denki University
†† 電気通信大学
The University of Electro-Communications
††† 日立製作所
Hitachi, Ltd.

層電子透かし方式を実現し，これを用いて (1) に関しては，2 階層電子透かしの埋め込みを行った画像に対する主観評価を行い，(2) については同様に埋め込みを行った画像から検出実験を行った[10]．(3) に関しては，順次探索による方法との比較から 2 階層電子透かし方式の有効性を示すとともに，実透かしとメタ透かしの埋め込み順序による検出効率に関しても考察する．

以下，2 章で 2 階層電子透かし方式のニーズ，概要および 2 階層電子透かしのかかえる 3 つの課題について述べる．3 章では，2 階層電子透かし方式の 3 つの課題の内の画質および検出に関する評価を行う．続いて，2 階層電子透かしの残る 1 つの課題である処理効率について検討するため，まず 4 章で，2 階層電子透かし方式の検出システム構成について検討する．そして，5 章で検討したシステムの評価準備をした後，6 章で処理効率，7 章で検出率をそれぞれ評価し，最後に 8 章でまとめを述べる．

2. 2 階層電子透かし方式とは

本章では，2 階層電子透かし方式について詳しく解説を行う．まず，2.1 節において 2 階層電子透かし方式に対するニーズを明らかにし，2.2 節では，2 階層電子透かし方式の概要を示す．また，2.3 節で，2 階層電子透かしの検討課題を明確にする．さらに，2.4 節では，メタ透かしの要件を明確化する．

2.1 2 階層電子透かし方式のニーズ

著作権保護技術として ‘電子透かし’ が注目され，様々な研究・開発が行われて現在多数の方式が提案されているが，電子透かしの情報検出には埋め込み時に用いた方式に対応した方式を用いる必要があるため電子透かしを 1 方式に標準化することが望まれる．しかし，電子透かしには，コンテンツごとの異なる要求や，各電子透かし方式ごとの異なる特性があいまって，様々なニーズにより使用する電子透かし方式を使い分ける必要がある．また，標準化に向けての動きでは各電子透かしベンダ間で思惑が絡み合い，なかなか方式を統一できないという側面もある．

これらの理由から，電子透かし方式を 1 方式に標準化することは困難であるため，複数の電子透かし方式が同時に存在し続けることが容易に予想される．そのため，既存の複数の電子透かし方式を利用でき，かつ，統一的な処理ができる技術が必要である．

この統一的処理の実現方法として最も単純な解決方法は，順次探索によって埋め込み時の透かし方式を特定することである．しかし，この場合，検出時の処理時間が問題となってくる．仮に，10 の電子透かし方式を使い分けるとすると，1 つの電子透かしの検出にくらべ平均約 5 倍以上の処理時間が必要となる．また，この処理時間の対策として複数の設備を用い並列処理する方法をとると，設備や管理のコストが問題となってくる．つまり，この方法を用いる場合，使用する電子透かしの方式数の増加にともない，処理時間またはコストが増加するという問題が生じることとなる．

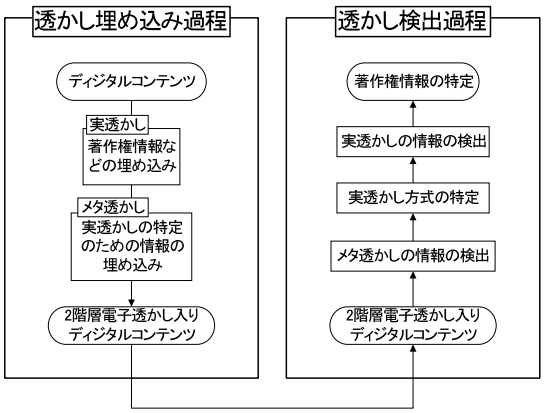


図 1 2 階層電子透かし方式の処理の流れ
Fig. 1 The flow of processing of two layer digital-watermarking system.

そこで，この問題を解決する方法として 2 階層電子透かし方式を提案した[8]．

2.2 2 階層電子透かしの概要

2 階層電子透かし方式は，著作権者などの情報を埋め込む ‘実透かし’ と，実透かしに用いた方式を特定するための情報（方式の番号など）を埋め込む ‘メタ透かし’ の 2 種類の透かしを 2 層にして埋め込み，検出の際に，‘メタ透かし’ の情報を検出することにより用いるべき透かし方式を特定する方式である．なおこの方式において，メタ透かしに関しては 1 方式に標準化されていることを前提とするが，各企業は従来の電子透かし方式が ‘実透かし’ として自由に使用することができるという点からこの前提は実現可能であるといえるだろう．

ゆえに，この方式を用いれば，電子透かし方式数が増加したとしても，‘メタ透かし’ と ‘実透かし’ の 2 つの電子透かしの検出のみで済み，大幅な処理時間の短縮が実現できる．また，並列処理のような方法も必要ないためコスト面の問題も同時に解決ができる．

図 1 に 2 階層電子透かし方式の処理の流れを，フローチャートを用いて示す．

2.3 2 階層電子透かしの検討課題

2 階層電子透かし方式の場合，著作権情報用の ‘実透かし’ と実透かし方式特定用の ‘メタ透かし’ の 2 種類

の透かしを 2 層にして埋め込むため，一般的な透かしに比べ画質の劣化および検出率の低下が懸念される．また，実透かしとメタ透かしの埋め込む順序に関する検討も必要である．これら各課題について以下に示す．

(1) 画質

2 階層電子透かしは 2 層にして電子透かしを埋め込むため，一般の透かしより画像により高いノイズを乗せることとなるため画質の劣化が大きくなることが懸念される．そのため，画質への影響の評価を行うことが必要である．

(2) 検出率

2 階層電子透かしは 2 層にして電子透かしを埋め込むため，互いの透かしに影響を及ぼし検出率の低下を招く恐れがある．そのため，検出率への影響の度合いについて評価を行うことが必要である．

(3) 埋め込み順序

2 層にして透かしの埋め込みを行うため，後に埋め込む透かしは先に埋め込まれた透かしに対し上書きをした状態となる．この場合，先に埋め込まれた透かしの強度が低下する可能性が高いため，より重要で強度の必要な情報を持つ透かしを後に埋め込む必要がある．以下に埋め込み順序による考察を行う．

a：実透かし→メタ透かし

この場合，検出の処理効率は高いが実透かしに埋め込まれた著作権情報が検出できない場合が生じる．そのため，不正なコンテンツの発見率の低下が懸念される．

b：メタ透かし→実透かし

この場合，著作権情報の検出率は高いが，メタ透かしに埋め込まれた実透かし情報が検出できない場合が生じるため，処理効率の低下が懸念される．

2.4 メタ透かしの要件

既存の電子透かし方式である実透かし方式と実透かしの種類を特定するためのメタ透かしとでは，使用目的が異なることから実装上求められる要件に違いがある．そこで，本節では実透かしとメタ透かしの相違点を中心に，メタ透かしに求められる要件を明確化していく．

(1) bit 数

メタ透かしは実透かしの種類の特定が目的であるため，実透かしに比べ埋め込み可能 bit 数が少なくてよい．

(2) 改変に対する耐性

メタ透かしと実透かしの組み合わせ方として，(a) メタ透かしが検出できなかったら透かしがないと判断し，実透かしは検出しない，(b) メタ透かしが検出できなかったら，実透かしを総当りで検出する，の 2 方式☆がありうる．(a) では，メタ透かしの耐性が実透かしより小さい場合，従来検出できていた透かしが検出できなくなる．したがって，メタ透かしの耐性は実透かしと同様以上であることが強く望まれる．(b) では，実透かしが検出できない場合の検出時間が大きいうえ，実透かしの種類数が多い場合には，平均検出時間も大きくなる．2 階層透かしは，もともと，実透かしの種類数が多い場合の対策であることを考えると，(b) の場合でも，メタ透かしの耐性は実透かしと同様以上であることが望ましい．

(3) 画質に与える影響

メタ透かしと実透かしの重畳による最終的な画質劣化が問題となる．この画質劣化が許容範囲（たとえば主観評価値 4 以上）であって，耐性も十分である場合は問題がない．画質と耐性の両立が困難である場合について，上記 (2) の (a) と (b) に分けて考察する．(a) では，メタ透かしと実透かしの両者を検出しないと透かしを埋め込む意味がない．したがって，両透かしによる画質（コンテンツ価値）と両透かしの耐性（著作権保護）のうち，どちらを優先するかを判断したうえで，実透かしおよびメタ透かしの強度を設定する必要がある．(b) では，処理時間が総当りに近づいてもよいのであれば，実透かしの耐性のみ確保し，メタ透かしは画質の許容範囲内の耐性にすることが考えられる．したがって，両透かしによる画質（コンテンツ価値）と性能（2 階層透かしによる向上）のうち，どちらを優先するかを判断したうえで，実透かしおよびメタ透かしの強度を設定する必要がある．

(4) 誤検出

False Positive（FP：透かしの埋め込まれていない画像から透かしを検出すること），False Negative（FN：透かしの埋め込まれている画像から透かしを検出しないこと），Bit Error（BE：埋め込まれた情報とは異なる情報を検出すること）について考察する．まず FP について考察する．実透かしの場合，正当なコンテンツを不正コピーと判断するなどの重大な事態につながるので，FP 発生確率はきわめて小さいことが求められる．一方，メタ透かしの場合，1 回の FP は実透かしの無駄な検出 1 回につながるだけなので，実透かしに比べると FP 発生確率が大きくてもよい．FN については，耐性が小さい場合と同様の影響になるので，上記 (2) と同様に，メタ透かしの FN 発生確率は

☆ メタ透かしと実透かしの組み合わせ方について，4.4 節で，より詳細な場合分けを行っているが，ここでは議論を明確化するために上記の 2 ケースに単純に分類した．

実透かしの FN 発生確率と同等以下であることが望ましい．BE については，①メタ透かしで BE が生じ実透かしを検出できなかった場合には透かしなしと判断する，②メタ透かしで BE が生じ実透かしを検出できなかった場合には実透かしは総当りを行う，の 2 つの場合がありうる．これらの①および②は，上記 (2) の (a) および (b) と同様の影響となることから，いずれの場合も，メタ透かしの BE 発生確率は実透かしよりも小さいことが望まれる．

3. 評価実験

本章では，実装した透かし方式を用いて 2 階層電子透かし方式における画質および検出率に関する評価をする．3.1 節で実装した各電子透かし方式について述べ，3.2 節で，画質の評価方法および結果を示し，3.3 節において，検出率の評価方法および結果を示す．

なお，本評価では電子透かしを 2 層にして埋め込む場合の画質および検出率の評価を行うことを目的とするため，メタ透かしと実透かしの区別を行わず，先に埋め込む電子透かしを “第 1 層透かし”，後に埋め込む電子透かしを “第 2 層透かし” として扱う．

3.1 2 階層電子透かしの評価のための実装

本研究では，4 種類の電子透かしを実装し，それらを組み合わせることで仮想的に 2 階層電子透かしを実現した．本節では作成した 4 つの電子透かし方式について解説するとともに，評価実験時の設定について示す．

電子透かしの方式は，周波数変換タイプと輝度標本値変換タイプに分類することができる．そこで，本論文では，これらの 2 つのタイプの実例として，多くの研究者が引用し，かつ，アルゴリズムの詳細が公開されている方式を 2 つずつ採用した．

（A 方式）周波数変更方式[3)]

画像を 8×8 ピクセルのブロックに分割し，各ブロックに離散コサイン変換（以下 DCT とする）を施す．ブロックの中の変換後の DCT 係数を $C_{h,w}(i,j)$ $(0 \leqq i \leqq 7, 0 \leqq j \leqq 7)$ とする．ここで，h と w は画像の中でのブロック位置を示し，i と j はブロックの中での DCT 係数の位置を示す．さらに，i，j のうちそれぞれ透かし情報を埋め込む対象となる DCT 係数の位置を i_0，j_0 とする．埋め込みの際は 1 [bit] に対し，1 ブロックを割り当てる．埋め込み処理は，任意の埋め込み強度 c で $C_{h,w}(i_0,j_0)$ を量子化した値 q を得て以下のように変更を加えることにより埋め込みを行う．

- 透かし情報 bit $= 0$ のとき：
  $C_{h,w}(i_0,j_0) = q + c/4$
- 透かし情報 bit $= 1$ のとき：
  $C_{h,w}(i_0,j_0) = q + 3c/4$

また，検出の際は埋め込み時と同様の処理により q を得て以下の処理により bit 判定を行う．

- $0 \leqq C_{h,w}(i_0,j_0) - q < c/2$ のとき：
  透かし情報 bit $= 0$
- $c/2 \leqq C_{h,w}(i_0,j_0) - q < c$ のとき：
  透かし情報 bit $= 1$

（B 方式）周波数変更方式[5)]

A 方式と同様にして DCT 係数 $C_{h,w}(i,j)$ $(0 \leqq i \leqq 7, 0 \leqq j \leqq 7)$ を得る．埋め込み処理は以下のように変更を加えることにより行う．

- 透かし情報 bit $= 0$ かつ $C_{h,w}(i_0,j_0) < M_{h,w}$ の場合
  $C'_{h,w}(i_0,j_0) = M_{h,w} + V_{h,w}$
- 透かし情報 bit $= 1$ かつ $C_{h,w}(i_0,j_0) > M_{h,w}$ の場合
  $C'_{h,w}(i_0,j_0) = M_{h,w} - V_{h,w}$
- 上記以外の場合変更を加えない

ここで，$M_{h,w}$ は $C_{h+m,w+n}$ (i_0,j_0) $(m,n = \pm 1)$ の平均値を示し，$V_{h,w}$ は透かし情報を埋め込む際の強度（変更量）を決める値で，次式で求められる．

- $S_{h,w} < T$ の場合：$V_{h,w} = \alpha S_{h,w} + V_{\min}$
- $S_{h,w} \geqq T$ の場合：$V_{h,w} = V_{\max}$

ここで，$S_{h,w}$ は $C_{h+m,w+n}$ (i_0,j_0) $(m,n = \pm 1)$ の標準偏差，α，$V_{\min}$，$V_{\max}$ は任意に変更が可能な，埋め込みの強さを決定するパラメータであり，閾値 T は $T = 1/\alpha\ (V_{\max} - V_{\min})$ で求められる．

また，検出の際は埋め込み時と同様にして $C_{h,w}$ (i_0,j_0) および $M_{h,w}$ を求め，以下のように比較することにより bit 判定を行う．

- $C_{h,w}$ $(i_0,j_0) > M_{h,w}$ の場合：
  透かし情報 bit $= 0$
- $C_{h,w}$ $(i_0,j_0) \leqq M_{h,w}$ の場合：
  透かし情報 bit $= 1$

（C 方式）輝度標本値変更方式[6),7)]

埋め込む 1 [bit] に対し，画像中より疑似ランダムに 2 組の画素列 $\{An\}$，$\{Bn\}$ $(n = 1, 2, \ldots, L)$ を L [pixel] ずつ取り出し，各ピクセルの輝度値に対し，任意の埋め込み強度 c で以下のように変更を加え，透かし情報の埋め込みを行う．

$$An = An + c$$
$$Bn = Bn - c$$

また，検出の際は，2 組の特徴量 $\{An\}$，$\{Bn\}$ の平均の差 D：

表 1 実装した各透かし方式の比較
Table 1 Comparison of each made watermark.

方式	A	B	C	D
最大埋め込み bit 数[bit]	1024	1350	1024	1024
埋め込み強度	c = 15	V_{max}=20 V_{min}=2 α=1.5	c=5	c=5
PSNR [dB]	47.1	45.1	44.3	44.9
平均検出エラー率 [%]	0.2	8.7	13.1	15.1

$$D = \frac{1}{L}\left(\sum_{n=1}^{L} An - \sum_{n=1}^{L} Bn\right)$$

の値により $D < 0$，$D > 0$ の 2 つの状態に分類し，bit 情報を表現するものである．本実験では L は 32 [pixel] とした．

（D 方式）輝度標本値変更方式[2)]

C 方式と同様に，埋め込む 1 [bit] に対し，2 組の画素列 $\{An\}$，$\{Bn\}(n = 1, 2, \ldots, L)$ を L [pixel] ずつ取り出し，各ピクセルの輝度値に対し，埋め込みによる画質劣化を目立ちにくくするために，任意の埋め込み強度 c で以下のように変更を加える．

$$An = An + \frac{S_i}{GS} \times c$$
$$Bn = Bn - \frac{S_i}{GS} \times c$$

ここで，Si は i 番目のピクセルの目立ちにくさの基準値であり，GS は 2 組の画素列の全 Si の総和を示す．Si は以下の式で求められる．

$$S_i = \min_{\theta} \sqrt{\sigma^2(D_{i\theta})}$$

$D_{i\theta}$ はピクセル i を中心とする傾き θ の方向線上輝度値の集合を指す．検出の方法は C 方式と同様である．

これら実装した電子透かし方式の比較を**表 1** に示す．なお，ここでいう最大埋め込み bit 数とは，256 × 256 の画像に冗長させずに埋め込める bit 数を指す．

2 階層電子透かし方式は，上記実装した 4 つの方式から任意の 2 方式をそれぞれ第 1 層透かし，第 2 層透かしとして使用することにより実現した．なお，同一方式どうしの組合せに関しては行わないこととした．

3.2 画質評価方法および結果

本節では，2 階層電子透かし画像の画質評価に対する，評価方法および評価結果を示す．

評価方法は以下のとおりである[9)]．

i. 評価に使用する画像は SIDBA の 256 × 256 の 24 bit カラー画像 a) couple，b) Lenna，c) Mandrill の 3 つとする．

ii. 評価者は 10 名とする．

iii. 評価に使用する電子透かしは，3.1 節で実装した電子透かし方式から 2 つの方式を選び，一方を第 1 層透かしとして透かし情報を埋め込み，その後に，残りの透かし方式を第 2 層透かしとして透かし情報を埋め込む．なお，埋め込む情報はランダムに生成し，情報量は，第 1 層透かし・第 2 層透かしともに選択した方式の最大埋め込み bit 数分を埋め込む．よって，選択された各透かし方式は第 1 層透かし方式に用いた場合と第 2 層透かし方式に用いた場合の違いはない．

iv. 評価は第 1 層透かしのみ埋め込まれたコンテンツに対し，第 1 層透かしと第 2 層透かしの両方を埋め込んだコンテンツの画質の変化を比較する．

v. 評価方法は画像を 2 倍に拡大し，主観によって行った．評価は（5：分からない，4：分かるが気にならない，3：少し気になる，2：気になる，1：大変気になる）の 5 段階とする．

以上の方法にて行った評価結果を**図 2** に示す．

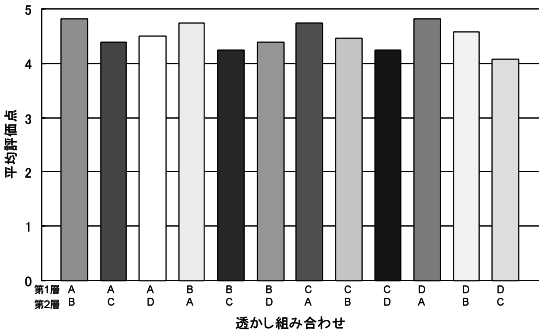


図 2 主観評価の結果
Fig. 2 Result of subjectivity evaluation.

図 2 より，2 階層電子透かし画像に対する主観評価はどの透かし方式の組合せにおいても 4〜5 の間の値にあり，画質的問題はないといえる．本実験で使用した透かし方式は，特に 2 階層にして埋め込むことを前提として提案された方式ではなく，ごく一般的な透かし方式を組合せて実現されている．したがって，基本的に単独で用いた場合に画質的問題が出ない方式であれば 2 重にして使用しても画質的問題が発生する可能性が低いことを示しているといえる．

3.3 検出率の評価方法および結果

本節では，2 階層電子透かし画像における実透かし情報およびメタ透かし情報の検出率に関する評価のための評価方法と評価結果を示す．

2 階層電子透かし方式の各電子透かしの検出率に与える影響は，各透かしの埋め込み強度，アルゴリズムの関係，埋め込む情報量や冗長度，対象となるコンテンツの容量など様々な条件が絡み合うため，一概に理論的数値を求めることが困難である．そのため，本節では 3.1 節で実装した電子透かしを組み合わせることにより 2 階層電子透かしを実現し，実際に第 1 層透かしおよび第 2 層透かしの検出率に与える影響について調査した．

評価実験の方法は以下のとおりである．

i. 評価実験に使用する画像は SIDBA の 256×256 の 24 bit カラー画像 a) couple，b) Lenna，c) Mandrill の 3 つとする．

ii. 評価に使用する電子透かしは，3.1 節で実装した電子透かし方式から 2 つの方式を選び，一方を第 1 層透かしとし，残りの透かし方式を第 2 層透かしとする．

iii. まず，第 1 層透かしとして透かし情報を埋め込み，その後に，第 2 層透かしとして透かし情報を埋め込む．なお，埋め込む情報はランダムに生成し，情報量は，第 1 層透かし・第 2 層透かしともに選択した方式の最大埋め込み bit 数分を埋め込む．よって，選択された各透かし方式は第 1 層透かし方式に用いた場合と第 2 層透かし方式に用いた場合の違いはない．

iv. ii で作成した画像から各透かし情報の検出率を測定する．検出率は以下のように求める．

$$\text{検出エラー率} = \frac{(\text{埋め込み時と異なって検出されたビット数})}{(\text{埋め込みを行ったビット数})}$$

v. 上記 iii，iv の作業を埋め込み情報を変更して 20 回行う．

表 2 に評価実験の結果を示す．表 2 の結果は各透かし方式を先に埋め込んだ場合と後に埋め込んだ場合それぞれの平均検出エラー率と，さらに単独使用時との差を上昇値として示している．つまり,「A 先」は A → B，A → C，A → D の場合の A を指し,「A 後」は B → A，C → A，D → A を指す．

表 2 より，全体的に 2 階層にしたことにより検出エラー率が飛躍的に上昇することはないといえるが，B 方式の先埋め込み時および C 方式，D 方式はやや大きな値となった．

C 方式および D 方式の上昇の原因は，C 方式と D 方式のアルゴリズムがほぼ同じであったため，互いに干渉しあったと考えられる．事実，C 方式と D 方式の組合せを外して平均検出エラー率を求めると，C 方式の先埋め込み時は 13.4 [%]（上昇値 0.3 [%]），後埋め込み時は 13.3 [%]（上昇値 0.2 [%]）であり，D 方式は先埋め込み時 15.5 [%]（上昇値 0.4 [%]），後埋め込み時 15.3 [%]（上昇値 0.2 [%]）であった．

表 2 評価実験結果
Table 2 Result of evaluation experiment.

方式	順序	単独使用時 [%]	平均検出エラー率[%]	上昇値 [%]
A	先	0.2	1.0	0.8
	後		0.6	0.4
B	先	8.7	14.1	5.4
	後		8.7	0.0
C	先	13.1	16.2	3.1
	後		15.8	2.7
D	先	15.1	22.3	7.2
	後		21.8	6.7

また，B 方式の先埋め込み時の上昇の原因は，B 方式の埋め込みアルゴリズムが周囲の DCT ブロックの平均値との比較によるものであるため，埋め込み後に他の透かしを埋め込むことによる影響を受けやすかったと考えられる．

以上の結果より次のことがいえる．

1. メタ透かしのアルゴリズムを独自方式（実透かしでは使用されていない方式）にすることにより，実透かしへの影響を抑えることができる．

2. メタ透かしを先に埋め込むことにより，実透かしへの影響を抑えることができる．

よって本研究では，メタ透かしを先に埋め込み，実透かしを後に埋め込む方式を採用することで，実透かし方式に対する検出への影響を最小限にするとともに，メタ透かしへの検出率をシステム構成で補完する方法を 4 章以降で検討する．なお 1. については，メタ透かしのアルゴリズムの独自性を確保するために，実透かしを登録するベンダに対して，メタ透かしソフトを公開することや，登録の際に使用する実透かしとメタ透かしの相性を実際にチェックしたうえで，問題がなければ登録するなどの方法をとる必要が生じる可能性もある．この点に関しては，今後さらに検討していきたい．

4. 2 階層電子透かし方式の検出システム構成の検討

本章では，2 階層電子透かし方式の検出システム構成に関して検討を行う．まず，4.1 節において，透かし検出時に起こりうる状況を示す．次に，4.2 節において評価するにあたって想定した 2 階層電子透かし方

表 3 透かし検出時に起こりうる状況
Table 3 The situation which may happen at the time of watermark detection.

電子透かし	検出の有無	検出情報の正誤	状況
あり	検出	正	正常検出
		誤	Bit Error
	未検出		False Negative
なし	検出		False Positive
	未検出		正常未検出

式の使用環境を述べ，4.3 節において，検出システムのモデル作成における前提条件を示す．そして，4.4 節で，考案した 3 種類の検出システムのモデルについて解説する．

4.1 透かし検出時に起こりうる状況

透かし検出時に起こりうる状況を**表 3** に示す．

表 3 における ‘False Positive’（以下 FP）とは，埋め込み処理の施されていないコンテンツから透かし情報を検出してしまう誤りを指す．また，‘False Negative’（以下 FN）とは埋め込み処理を施したコンテンツにもかかわらず透かし情報を検出できない誤りを指す．これに対し，‘Bit Error’（以下 BE）とは，検出した情報が誤っている状況を指す．

4.2 2 階層電子透かし方式を用いる環境

本論文では評価をするにあたり，2 階層電子透かし方式を用いた透かし情報検出が行われる環境を**図 3** のように想定した．各実透かしベンダは所有する電子透かし方式を実透かしとして透かし管理センタに登録することにより，実透かし方式の ID の発行を受ける．そして，実透かしによって著作権情報を埋め込み，メタ透かしによって与えられた実透かし ID を埋め込む．このようにして作成された 2 階層電子透かし入りのディジタルコンテンツを依頼されたコンテンツベンダに送信し，コンテンツベンダはこの透かし入りコンテンツを販売する．そして，透かし管理センタはネットウォッチャを用いて，この販売されたコンテンツが不正に Web 上に流通していないかを監視する．図 3 におけるネットウォッチャは，Web 上からディジタルコンテンツを検索し，そのコンテンツの権利の所在を電子透かしを用いて確認・監視をするところとする．

本論文では，図 3 におけるネットウォッチャでの処理に関する評価を行う．

4.3 前 提 条 件

本節では，検出システムのモデルを作成するにあたりメタ透かしの影響を明確にするために実透かしの検出処理部分を簡単化するとともに，以下の 2 つの前提条件を設定した．

① 方式の異なる実透かし方式で誤って情報を検出することはない．

② メタ透かしの影響がない場合の実透かしの検出率は 100%であるとする．

なお，前提条件①，②については，実透かしそのものの性能の問題であるため，ここでは議論しないこととする．

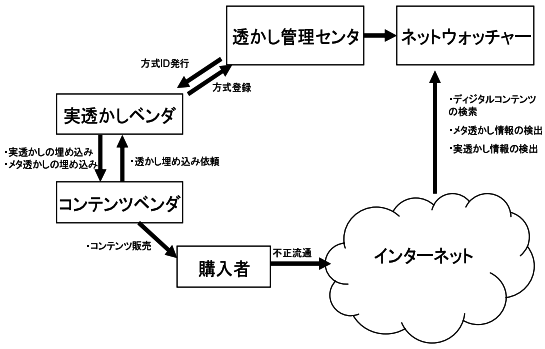


図 3 想定した環境
Fig. 3 Assumed environment.

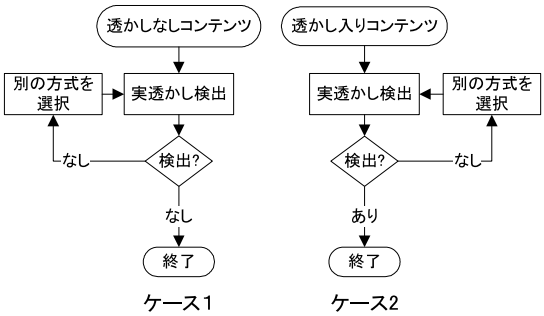


図 4 順次探索型
Fig. 4 Round robin type.

4.4 各検出システムモデルの特徴

本節では各透かし検出システムモデルの特徴について述べる．まず，本論文はメタ透かしを用いない順次探索との比較を通して 2 階層電子透かし方式の有効性を評価するため，順次探索型透かし検出モデルを**図 4** のように想定した．また，2 階層電子透かし方式の検出モデルに関しては，メタ透かしの検出結果に対するアプローチが複数想定されるため，**図 5**，**図 6** の 2 つのモデルを考案した．

1．順次探索型（図 4）

メタ透かしを用いずに実透かし検出を行う方法．つまり 2 階層電子透かし方式を用いない場合を想定している．

ケース 1：実透かし情報が検出できるまですべての実透かし方式で順次探索（総当り）を行う．ただし，このケースの場合は元々透かしが埋め込まれてい

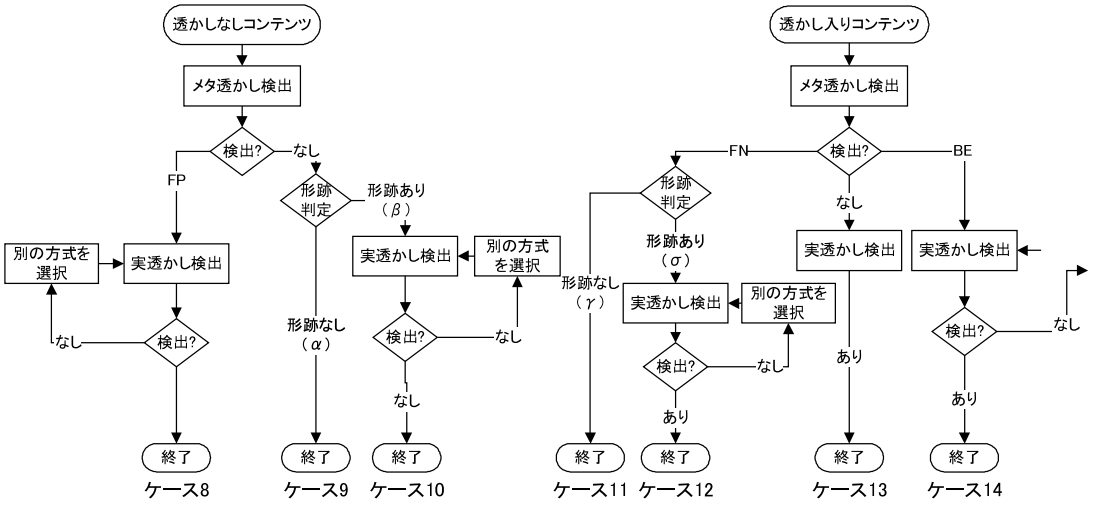


図 6 信頼性重視型
Fig. 6 Reliability serious consideration type.

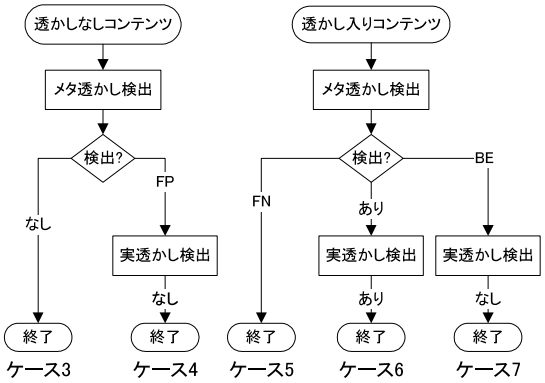


図 5 効率重視型
Fig. 5 Processing efficiency serious consideration type.

ないため，すべての透かし検出処理に失敗する．

ケース 2：実透かし情報が検出できるまですべての実透かし方式で順次探索（総当り）を行う．このケースの場合は透かしが埋め込まれているため，どこかで必ず実透かし情報検出に成功する．

2. 効率重視型（図 5）

メタ透かしの情報を基に，実透かし方式を特定し，実透かし情報の検出を行う．メタ透かし検出情報を信頼し，処理効率を重視したシステム構成をしている．

ケース 3：メタ透かし情報が検出できず処理を終了する．この場合は元々透かしが埋め込まれていないため正常な処理である．

ケース 4：検出したメタ透かし情報を基に実透かし検出を試みる．ただしこの場合は，元々は透かし情報が埋め込まれていないにもかかわらずメタ情報を検出した（FP）ため実透かし情報検出に失敗し処理を終了する．

ケース 5：メタ透かし情報が検出できず処理を終了する．この場合は本来埋め込まれている情報を検出できず（FN）に処理を終了したためエラーである．

ケース 6：検出したメタ透かし情報を基に実透かし検出を試みる．このケースが 2 階層電子透かし方式を利用した場合の理想的動作である．

ケース 7：検出したメタ透かし情報を基に実透かし検出を試みる．ただし，この場合は元々埋め込まれている情報を誤って検出した（BE）ために実透かし情報検出に失敗して処理を終了してしまう．

3. 信頼性重視型（図 6）

メタ透かしの情報を基に，実透かし方式を特定し，実透かし情報の検出を行う．メタ透かし情報検出ミスによる実透かし情報の損失を極力少なくすることに重点をおいたシステム構成をしている．方法として，メタ透かしが検出できなかった場合，元々埋め込まれていないのか，埋め込まれたものが検出できなかったのかを判定し，埋め込んだ形跡があれば順次探索に移行する．判定方法については後述する．

ケース 8：検出したメタ透かし情報を基に実透かし検出を試みる．ただしこの場合は，元々は透かし情報が埋め込まれていないにもかかわらずメタ情報を検出した（FP）ためすべての実透かし情報検出処理に失敗する．

ケース 9：メタ透かし情報が検出できず，かつ埋め込まれた形跡がないと判定されたため検出処理を終了する．この場合は元々透かしが埋め込まれていないため正常な処理である．

ケース 10：メタ透かし情報が検出できなかったが，埋め込まれた形跡があると判定されたため，順次探索に移行して実透かし検出処理を行う．ただし，このケースの場合は元々透かしが埋め込まれていないため，すべての透かし検出処理に失敗する．

ケース 11：メタ透かし情報が検出できず（FN），かつ埋め込まれた形跡がないと判定されたため検出処理を終了する．この場合は本来埋め込まれている情報を検出できずに処理を終了したためエラーである．

ケース 12：メタ透かし情報が検出できなかった（FN）が，埋め込まれた形跡があると判定されたため，順次探索に移行して実透かし検出処理を行う．このケースは，メタ透かしの検出に失敗したが，形跡判定で救済された形となり，処理時間はかかるが実透かし情報の検出には成功する．

ケース 13：検出したメタ透かし情報を基に実透かし検出を試みる．このケースが 2 階層電子透かし方式を利用した場合の理想的動作である．

ケース 14：検出したメタ透かし情報を基に実透かし検出を試みる．ただし，この場合は元々埋め込まれている情報を誤って検出した（BE）ために 1 度目の実透かし情報検出に失敗するが，その後順次探索に移行するため，処理時間はかかるが最終的に実透かし情報の検出には成功する．

表 4 に各モデルで使用する記号について，**表 5** に各ケースの平均処理回数と発生頻度を示す．

5. メタ透かしの仕様およびパラメータの設定

本章では，数値解析を行うためのメタ透かし方式の仕様およびパラメータのデフォルト値を決定する．デフォルト値は，各検出モデルへの影響を見る際に変数として使用しないパラメータに対して用いる値である．

表 3 に示した状況 BE，FP，FN，の値はともに小さい方が望ましい．これらの値は，透かし情報量，電子透かし方式の誤り制御法，および各 bit の冗長 bit の誤り率が大きく関係するため，実質的なメタ透かし方式の仕様を決めるうえでは，これら 3 つに関して検討する必要がある．

まず，透かし情報量については，コンテンツ ID フォーラムで行われたコンテンツ ID の共同検証実験に使用されたメタ透かしの仕様に準拠し 8 bit とした．ただし，将来実透かし方式数が 256 以上となった場合には，使われない実透かし番号の再割当てあるいはメタ透かしの拡張などが必要となるが，これらの方式については，今後の検討課題としたい．

表 4 各モデルで使用する記号
Table 4 The sign used by each model.

記号	内容
S	実透かしの方式数
P_{wm}	透かし普及率
P_{fn}	FN の発生確率
P_{fp}	FP の発生確率
P_{be}	BE の発生確率
α	メタ透かしが埋め込まれておらず“なし”と判定され，かつ透かし埋め込みの形跡がない確率
β	メタ透かしが埋め込まれておらず“なし”と判定されたが，透かし埋め込みの形跡がある確率
γ	メタ透かしが埋め込まれているのに“なし”と判定され（FN），かつ透かし埋め込みの形跡がない確率
σ	メタ透かしが埋め込まれているのに“なし”と判定された（FN）が，透かし埋め込みの形跡がある確率

※ $P_{fn} = \gamma + \sigma$， $\alpha + \beta + P_{fp} = 1$

表 5 各ケースの平均処理回数と発生頻度
Table 5 Average processing times and generating frequency in each case.

ケース	平均処理回数	発生頻度
1	S	$(1-P_{wm})$
2	(S+1)/2	P_{wm}
3	1	$(1-P_{wm})(1-P_{fp})$
4	2	$(1-P_{wm})\times P_{fp}$
5	1	$P_{wm}\times P_{fn}$
6	2	$P_{wm}\times(1-P_{fn}-P_{be})$
7	2	$P_{wm}\times P_{be}$
8	S+1	$(1-P_{wm})\times P_{fp}$
9	1	$(1-P_{wm})\times\alpha$
10	S+1	$(1-P_{wm})\times\beta$
11	1	$P_{wm}\times\gamma$
12	(S+1)/2 + 1	$P_{wm}\times\sigma$
13	2	$P_{wm}\times(1-\gamma-\sigma-P_{be})$
14	S/2 + 2	$P_{wm}\times P_{be}$

次に，誤り制御法については BE，FP，FN の関係が顕著であり，かつ，パラメータにより制御可能である点から，K out of N ($K > N/2$) とした．ここで，K は閾値を指し，N は冗長度，すなわち，メタ透かし情報 1 bit に対応する冗長 bit 数を指す．ここで，N 個中 “0”bit または “1”bit の個数が K を超えた場合は，メタ透かし情報 1 bit の bit 値が確定となり，逆に N 個中 “0”bit または “1”bit の個数が K を超えない場合は，メタ透かし情報 1 bit の bit 値が未確定となる．そして，すべての bit が確定した場合のみ検

出となる．この冗長度 N と閾値 K を決定するにはメタ透かし情報を構成する冗長 bit の誤り率についても考慮する必要がある．

以下，メタ透かしの冗長 bit の誤り率を $r(0 \leqq r \leqq 1)$ として表す．なお，式 (1) の p_{be} はメタ透かし情報 1 bit あたりの Bit Error の発生確率を，式 (2) の p_{nd} はメタ透かし情報 1 bit あたりの正常検出率を指し，式 (3) の P_{be} はメタ透かし情報の Bit Error の発生確率を指す．

$$p_{be} = \sum_{k=K}^{N} {}_N C_k r^k (1-r)^{N-k} \tag{1}$$

$$p_{nd} = \sum_{k=0}^{N-K} {}_N C_k r^k (1-r)^{N-k} \tag{2}$$

$$P_{be} = \sum_{i=1}^{8} {}_8 C_i (p_{be})^i (p_{nd})^{8-i} \tag{3}$$

冗長 bit の誤り率が大きくなると，FN および BE の発生確率が大きくなる．これに対する単純な対策としては，冗長 bit の誤り率そのものの上昇を抑えるために，埋め込み時の強度を上げる方法，そして，ある程度大きな冗長 bit の誤り率でも対処するために，冗長度を大きくする方法がある．今回は，冗長 bit の誤り率そのものをパラメータとして使用するため，冗長 bit の誤り率を抑制するのではなく，ある程度大きな冗長 bit の誤り率に対応できるよう，冗長度 N を 100 とした．

最後に，閾値 K と冗長 bit の誤り率 r を決める．閾値 K の決定には，表 2 示すように，冗長度 $N = 100$ のときの閾値と各状況の発生確率の関係を考慮する必要がある．参考として冗長 bit の誤り率を 0.2 とした場合の閾値と各状況発生確率の計算結果を**図 7** に示す．

図 7 より冗長 bit の誤り率 0.2 の場合，閾値が 55〜65 の間であれば各誤りの状況（FP，FN，BE）の発生確率は非常に低く保つことができることが分かる．

ここで，信頼性重視型システム特有のパラメータ α，β，γ，σ について検討する．α，β，γ，σ はメタ透かしが検出されなかった場合に，メタ透かし埋め込みの形跡がないかどうか判定した結果生じる確率であり，FP，FN とは以下のような関係にある．

$$\alpha + \beta + P_{fp} = 1 \tag{4}$$

$$P_{fn=}\gamma + \sigma \tag{5}$$

メタ透かしの埋め込み形跡判定は，メタ情報 8bit のうち，0 とも 1 とも区別のつかない bit（未確定の bit）が指定した bit 数（以下，判定 bit 数と呼ぶ）以下の場合，埋め込み形跡があると判定する．逆に判定 bit 以下の場合，埋め込み形跡がないと判定し未検出となる．

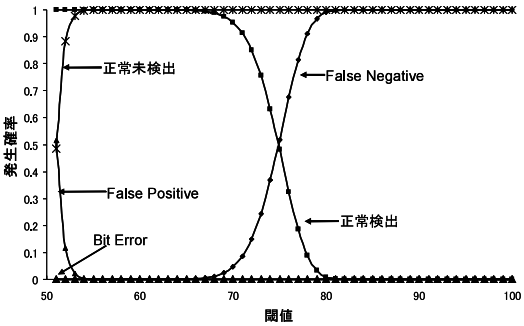


図 7 閾値対各状況発生確率（冗長 bit の誤り率 0.2）
Fig. 7 Each situation occurrence probability by the threshold (Rate 0.2 of an error of a redundant bit).

例）判定 bit 数 6bit の場合（?：未確定の bit）
　　検出メタ情報　?1??1??0　形跡あり
　　検出メタ情報　??0?????　形跡なし

判定 bit 数が大きくなると，メタ透かしの形跡があると判定されやすくなるため，β，σ が大きくなり，式 (4)，(5) より，α，γ は小さくなる．逆に判定 bit 数が小さくなると，メタ透かしの形跡がないと判定されやすくなるため，α，γ が大きくなり，β，σ は小さくなる．判定 bit 数が本システムに与える影響は下記のとおりである．

(1) **判定 bit 数が大きい場合：**
透かし入りコンテンツから正常検出するケース（ケース 12）が多くなるが，透かしなしコンテンツから順次探索を行うケース（ケース 10）も多くなるため，処理効率は低下する．

(2) **判定 bit 数が小さい場合：**
透かし入りコンテンツから本来埋め込まれている情報を検出できないケース（ケース 11）が多くなるが，透かしなしコンテンツから順次探索を行わないケース（ケース 9）も多くなるため，処理効率は向上する．

このように，判定 bit 数の決定にあたっては，検出率と処理効率のトレードオフを考慮する必要があるが，本論文では，一例として，判定 bit 数を 6 bit とし，検出率の向上を優先した．

図 8 に判定 bit 数を 6 bit，冗長 bit の誤り率を 0.2 とした場合の閾値と各状況発生確率の計算結果を示す．

前述したとおり γ が高いと検出率の低下につながり，FP，BE，β，σ が高いと処理効率の低下につながる．ゆえに，これらのパラメータの発生確率ができ

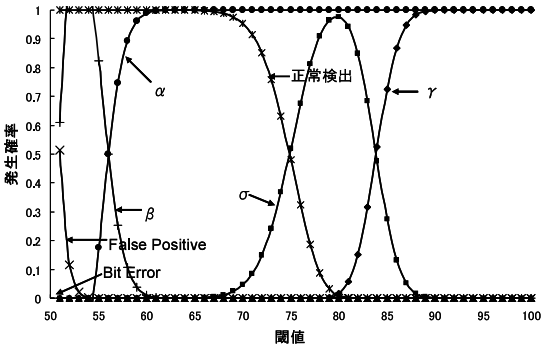


図 8 閾値対各状況発生確率（判定 bit 数 6，冗長 bit の誤り率 0.2）

Fig. 8 Each situation occurrence probability by the threshold (Number 6 of bits for judgement, rate 0.2 of an error of a redundant bit).

表 6 パラメータの値

Table 6 The value of a parameter.

仕様	メタ透かし情報量	8 [bit]
	誤り制御法	K out of N
設定値	普及率 P_{wm}	0.2
	実透かしの方式数 S	40
	冗長 bit の誤り率 r	0.2
	閾値 K	65
計算値	FN の発生確率 P_{fn}	0.001176516
	BE の発生確率 P_{be}	1.50842E−21
	FP の発生確率 P_{fp}	2.3443E−20
	α の発生確率	0.999992927
	β の発生確率	7.07282E−06
	γ の発生確率	1.19441E−26
	σ の発生確率	0.001176516

る限り 0 になるように閾値を設定する必要がある．したがって，図 8 から閾値としては 62〜67 あたりが妥当であるといえる．

以上のような事前調査より，6 章における処理回数の期待値，および 7 章における検出率に関する数値解析を行うためのメタ透かし方式の仕様およびパラメータのデフォルト値を**表 6** のように決定した．普及率 P_{wm} および実透かしの方式数 S のデフォルト値は，電子透かしおよび 2 階層方式の実用化に関する将来予測をともない，厳密に設定することは困難であるため，大学および企業の技術者 5 人から経験に基づく予測を集め，その中央値とした．冗長 bit の誤り率 r については，3 章で評価した実例のエラー率（表 2）を参考とした．閾値 K については，図 7 および図 8 ともに FP，FN，BE および β，γ，σ の発生率が低く保てる範囲から値を設定した．FN，BE，FP，α，β，γ，σ の発生確率は，設定した冗長 bit の誤り率 r，冗長度 N，閾値 K から算出した．

6. 処理効率の評価

本章では，4.4 節で考案した検出システムモデルを基に，処理効率の評価を行う．処理効率の評価基準として，本論文では各モデルの処理回数の期待値を用いることとした．6.1 節で，各モデルの処理回数の期待値の算出方法を示し，6.2 節で，数値解析結果と評価を行い，6.3 節で処理効率の評価結果を述べる．

6.1 処理回数の期待値の算出方法

処理回数とは，4.4 節で考案した図 4〜6 の検出モデルにおける各ケースの透かし情報検出までに要した透かし検出処理（メタ透かし・実透かしの両方）の回数を指す．たとえば，図 4 におけるケース 1 の処理回数 N_1 は $\{S\}$ であり，その発生確率 R_1 は $\{1 - P_{wm}\}$ である．よって，処理回数の期待値 $\overline{N}$ は，検出モデルにおける各ケースの処理回数 N_i と発生確率 R_i を掛けたものの総和で定まり，次式で与えられる．

$$\overline{N} = \sum_i N_i R_i \tag{6}$$

式 (6) を用いて各検出モデルに関する数値解析を行う．

6.2 処理回数の期待値の数値解析結果と評価

本節では，6.1 節で示した式を用いて各検出モデルの数値解析を行った結果を示すとともに，各検出モデルに対する評価を行う．

評価対象として “実透かしの方式数”，“普及率”，“閾値”，“冗長 bit の誤り率” の推移による影響を調べることとした．

以下に，数値解析結果として，**図 9** に実透かし方式数に対する処理回数の期待値を，**図 10** に普及率に対する処理回数の期待値を，**図 11** に閾値に対する処理回数の期待値を，**図 12** に冗長 bit の誤り率に対する処理回数の期待値をそれぞれ示す．

効率重視型に関しては，“実透かしの方式数”（図 9），“普及率”（図 10），“閾値”（図 11），“冗長 bit の誤り率”（図 12）による影響はほとんどなく，ほぼ一定の処理回数の期待値（1 回〜2 回）を保てることが分かった．これは，効率重視型のケースにおいては最大平均処理回数が 2 であることから当然の結果といえる．

一方，信頼性重視型に関しては，“実透かしの方式数”（図 9），“普及率”（図 10）による影響は効率重視型同様にほとんどないが，“閾値”（図 11），“冗長 bit の誤り率”（図 12）では処理回数の増加が見られた．

図 11 の閾値 51〜60 あたりにおける処理回数の増加は，パラメータ FP および β（図 8 参照）の影響で

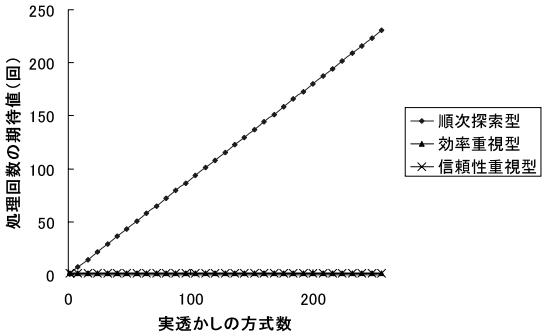


図 9 実透かし方式数に対する処理回数の期待値
Fig. 9 Expected processing times by the number of real watermark systems.

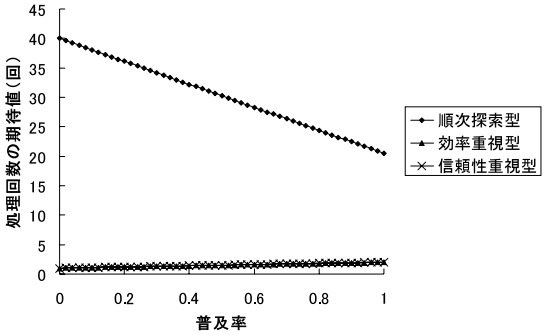


図 10 普及率に対する処理回数の期待値
Fig. 10 Expected processing times by the saturation level.

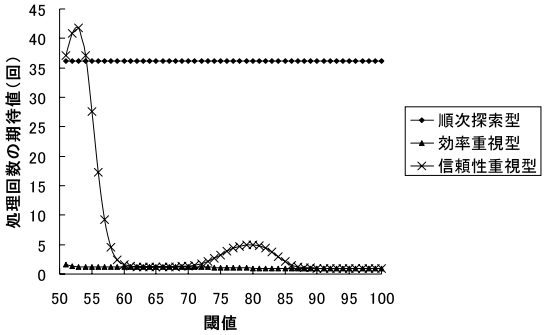


図 11 閾値に対する処理回数の期待値
Fig. 11 Expected processing times by threshold.

ある．FP とは，メタ透かしを埋め込んでいないにもかかわらずメタ透かしを検出する確率であり，β とは，メタ透かしを埋め込んでいないためメタ透かしを検出できないが，メタ透かし埋め込みの形跡があると判定されるエラーの発生確率である．つまり，閾値を低く設定した場合，bit の誤検出が多く発生し，結果としてないはずのメタ透かしを検出したり，埋め込み形跡があると判定されたりするために，存在しない実透かしに対し順次探索を行うという状況が頻繁に起こるために処理回数の増加が起こっていることが分かる．

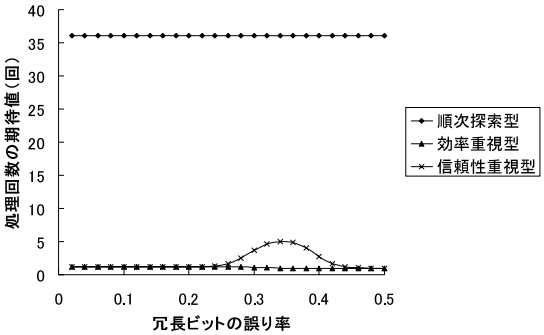


図 12 冗長 bit の誤り率に対する処理回数の期待値
Fig. 12 Expected processing times by the error rate of redundant bit.

また，図 11 および 図 12 に共通して見られる処理回数の一時的増加は，パラメータ σ の影響である．σ とは，メタ透かしが埋め込まれているのに “なし” と判定された（FN）が，透かし埋め込みの形跡があると判定される確率を指す．つまり，メタ情報検出の失敗を順次探索により救済している状態であり，処理効率を犠牲にして検出率を向上させている．この点については次章でもう一度触れることとする．

6.3 処理効率の評価結果

処理効率に関して，以下のようなことが分かった．

(1) 一般的環境下において，順次探索よりも各 2 階層電子透かし方式検出システムモデルの方が効率が良い．
(2) 信頼性重視型は閾値および冗長 bit の誤り率による影響が大きい．
(3) 効率重視型は各パラメータによる影響が小さく，安定している．

ゆえに，処理回数の期待値としては効率重視型が安定していて望ましいが，信頼性重視型も閾値の設定を厳密に行うことで，効率重視型との差は限りなく小さくできる．

以上より，処理回数の期待値の観点からは，効率重視型はどのような状況においても比較的安定しているが，信頼性重視型は閾値の設定が重要であることがわかった．

7. 検出率の評価

本章では，4.4 節で述べた各 2 階層電子透かし検出システムモデルの検出率を比較評価する．7.1 節で，各検出システムモデルの検出率の算出方法を示し，7.2 節で，数値解析結果と評価を行い，7.3 節で検出率の評価結果を述べる．

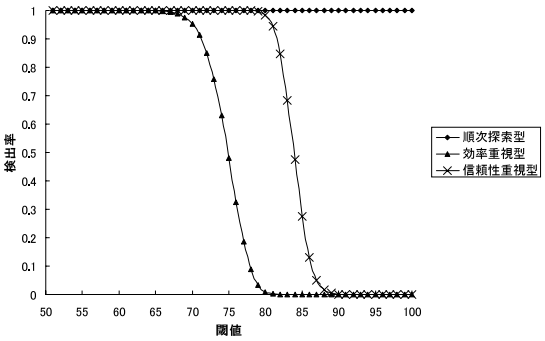


図 13 閾値に対する検出率
Fig. 13 The detection rate by a threshold.

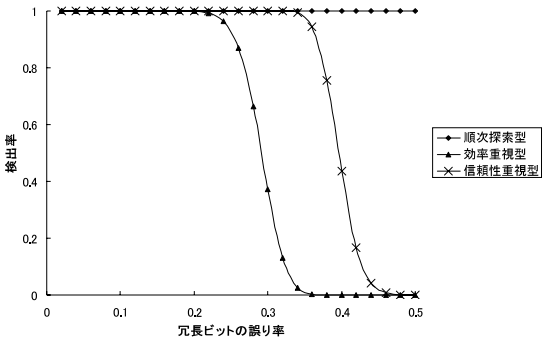


図 14 冗長 bit の誤り率に対する検出率
Fig. 14 The detection rate by the error rate of redundant bit.

7.1 検出率の算出方法

ここで，透かし検出システムモデルの検出率とは，検出システムに透かし入りコンテンツを入力した場合に，最終的に実透かしで埋め込んだ著作権情報を正しく検出する確率を表す．すなわち，検出システムに透かし入りコンテンツが入力される確率は，図 4〜7 より透かしの普及率 P_{wm} になるので，透かし検出モデルの検出率 R_d は，図 4〜6 の各ケースの発生確率 Ri を用いて，次式で与えられる．

$$R_d = \sum_{i \in D} R_i \Big/ P_{wm} \tag{7}$$

ただし，式 (7) の集合 D は，実透かしで埋め込んだ情報を正しく検出したケースの集合を表す．たとえば，図 5 の効率重視型の透かし検出モデルの検出率 R_d は，実透かしで埋め込んだ情報を正しく検出できるケースが，ケース 6 のみのため，$R_d = 1 - P_{fn} - P_{be}$ となる．以下では，この式 (7) により，各透かし検出モデルの検出率を比較評価する．

7.2 検出率の数値解析結果と評価

本節では，7.1 節で示した式を用いて各検出モデルの数値解析を行った結果を示すとともに，各検出モデルに対する評価を行う．

式 (7) より，実透かしの方式数 S および普及率 P_{wm} は変数として現れないため評価対象は，“閾値”，“冗長 bit の誤り率” の推移による影響を調べることとする．

以下に，数値解析結果として，**図 13** に閾値に対する検出率を，**図 14** に冗長 bit の誤り率に対する検出率を示す．

効率重視型，信頼性重視型ともに検出率の低下が見られるが，低下範囲が異なる．閾値においては，効率重視型は閾値 67 あたりから下がり始め 80 あたりでほぼ 0 になるのに対し，信頼性重視型は閾値 80 あたりから下がり始め 88 あたりでほぼ 0 になる．また，冗長 bit の誤り率においては，効率重視型は 0.22 あたりから下がり始め，0.36 あたりでほぼ 0 になるのに対し，信頼性重視型は 0.36 あたりから下がり始め 0.46 あたりでほぼ 0 となる．

検出率低下の原因は FN の発生によるものであるが，このように，効率重視型と信頼性重視型の間で生じる閾値では約 13，冗長度の誤り率では 0.14 程度の差の原因は，メタ透かしの埋め込み形跡判断によって生じるパラメータ σ の影響である．6.2 節の処理回数の期待値でも述べたように，σ とは，メタ透かしが埋め込まれているのに “なし” と判定された（FN）が，透かし埋め込みの形跡があると判定される確率を指す．つまり，効率重視型はメタ情報検出を失敗するとその時点で検出処理を終了するのに対し，信頼性重視型ではメタ情報検出に失敗しても，埋め込んだ形跡があった場合，検出処理を順次探索に移行するため，より広い範囲で検出率の高い状態を維持している．

7.3 検出率の評価結果

検出率に関して，以下のようなことが分かった．

(1) 閾値において信頼性重視型は効率重視型より，より広い範囲で高い検出率を保つことができる．
(2) 冗長 bit の誤り率においても，信頼性重視型は効率重視型より広い範囲で高い検出率を保つことができる．
(3) 検出率の低下の原因は FN の発生であり，FN の発生確率を抑制することが重要であるが，冗長 bit の誤り率は画像処理などによる影響が大きいため，検出側で制御することは困難である．

ゆえに，FN の発生を許容できるシステム構成が重要となる．

以上より，検出率の観点からは信頼性重視型は効率重視型に比べ FN の発生に対する許容量が大きく，より広範囲にわたって安定して高検出率を保てることが

分かった．

8. おわりに

本論文では，2 階層電子透かし方式の有効性を画質，検出率，処理効率の観点から評価を行った．画質評価においては，電子透かしを 2 重に埋め込んでも画質に与える影響は実用上問題ないことを主観評価により示した．検出率に関しては 2 重に埋め込む場合，後に埋め込む透かしに関しては影響が少ないことを示した．そのうえで，メタ透かしを先に埋め込むことにより実透かしに与える影響を最小限にし，メタ透かしの検出についてはシステム構成によって補完することを提案し，その評価を処理効率に関する数値計算で行った．結果，メタ透かしの精度を保証できる場合は，効率重視型が安定しているが，メタ透かしの精度が低くなったとしても，信頼性重視型で閾値を最適化することで処理効率と検出率を両立させることができることを示した．

なお，今回の解析ではメタ透かし導入による実透かしへの影響の分析に焦点を絞り込むため，メタ透かしの影響がない場合の実透かしの検出率を 100%という前提を置いた．しかし，実際の運用に際しては実透かしに対する改変操作などによる検出率の低下が考えられる．そのため，今後は実透かしの検出率低下を考慮した場合の分析を行っていく必要がある．

また，メタ透かしアルゴリズムの独自性確保のための方法についても検討を行う必要がある．

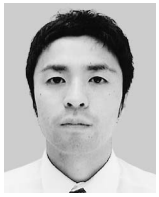
謝辞 2 階層電子透かし方式を検討するにあたり，お世話になりました NTT の中村高雄氏をはじめとするコンテンツ ID フォーラムの方々に感謝を申し上げる．

参考文献

1) 松井甲子雄：電子透かしの基礎—マルチメディアのニュープロテクト技術，森北出版 (1998).
2) 越前　功ほか：輪郭保存に基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 (2000).
3) 中村高雄ほか：ディジタル画像の著作権保護のための周波数領域における電子透かし方式，SCIS'97-26A (1997).
4) 安田　浩，安原隆一：ポイント図解式コンテンツ流通教科書，ASCII (2003).
5) 崔　潤基，相澤清晴：DCT 係数のブロック間相関を利用した電子透かし法，電子情報通信学会論文誌 D-II，Vol.J83-D-II, No.7, pp.1620–1627 (2000).
6) Bender, W., Gruhl, D., 森本典繁，Lu, A.：電子透かしを支えるデータ・ハイディング技術（上），日経エレクトロニクス，No.683（2 月 24 日号），pp.39–44 (1997).
7) 上條浩一，小林誠士，清水周一：近傍ピクセルの性質を用いたデータハイディング，情報処理学会第 56 回全国大会 (1998).
8) 鹿志村浩史，石井真之ほか：2 階層電子透かしの装と評価，CSS2002 論文集，pp.125–129 (2002).
9) テレビジョン学会（編）：テレビジョン画像の評価技術，コロナ社 (1986).
10) 石井真之，鹿志村浩史，佐々木良一，吉浦　裕，越前　功，伊藤信治：2 階層電子透かし方式の有効性の解析，情報処理学会研究報告，2003-CSEC-22, pp.231–236 (2003).

(平成 16 年 11 月 29 日受付)
(平成 17 年 6 月 9 日採録)

石井　真之（正会員）
平成 15 年東京電機大学工学部一部情報通信工学科卒業．平成 17 年同大学大学院工学研究科情報通信工学専攻修士課程修了．同年日本電気株式会社入社．現在，ユビキタスソフトウェア事業部に勤務．



鹿志村浩史
平成 14 年東京電機大学工学部二部情報通信工学科卒業．平成 16 年同大学大学院工学研究科情報通信工学専攻修士課程修了．同年社会福祉法人オークス・ウェルフェア知的障害者更生施設オークスヴィレッヂ入社．

佐々木良一（フェロー）

昭和 46 年 3 月東京大学卒業．同年 4 月日立製作所入所．システム開発研究所にてシステム高信頼化技術，セキュリティ技術，ネットワーク管理システム等の研究開発に従事．同研究所第 4 部長，セキュリティシステム研究センタ長，主管研究長等を経て平成 13 年 4 月より東京電機大学工学部教授．工学博士（東京大学）．平成 10 年電気学会著作賞受賞．平成 14 年情報処理学会論文賞受賞．著書に,『インターネットセキュリティ』（オーム社，1996 年),『情報セキュリティ事典』（代表編，共立出版，2003 年）等．IEEE，電子情報通信学会等の会員．情報処理学会フェロー．日本セキュリティ・マネージメント学会常任理事，IFIP TC11 日本代表．

吉浦　　裕（正会員）

昭和 56 年東京大学理学部情報科学科卒業．同年日立製作所入社．日立研究所，システム開発研究所勤務．平成 15 年より電気通信大学電気通信学部人間コミュニケーション学科助教授．自然言語処理，知識処理の研究を経て，現在，情報セキュリティ，著作権保護の研究に従事．理学博士．電子情報通信学会，システム制御情報学会，人工知能学会，IEEE 各会員．平成 2 年情報処理学会学術奨励賞，平成 16 年度情報処理学会論文賞，平成 17 年システム制御情報学会産業技術賞受賞．

越前　　功（正会員）

平成 7 年東京工業大学理学部応用物理学科卒業．平成 9 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了（応用物理学）．同年株式会社日立製作所システム開発研究所に入所．情報セキュリティ技術，著作権保護技術，および電子透かし技術の研究開発を担当．現在，同研究所第 7 部研究員．博士（工学）．平成 16 年度情報処理学会論文賞受賞．電子情報通信学会，映像情報メディア学会，IEEE 各会員．

伊藤　信治（正会員）

平成 10 年九州大学工学部電気工学科卒業．平成 12 年同大学大学院システム情報科学研究科修了．同年（株）日立製作所入社．現在，システム開発研究所第 7 部に勤務．情報セキュリティ技術の研究に従事．