

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560401

研究課題名 (和文) ベイズ推定に基づくロバストな電子透かし検出システムの開発

研究課題名 (英文) Development of Robust Watermark Detection System Based on Bayesian Estimation

研究代表者

宮崎 明雄 (MIYAZAKI AKIO)

九州産業大学・情報科学部・教授

研究者番号：70192763

研究成果の概要：

本研究では、透かし入り画像に対する画像処理や攻撃に対応して、電子透かしシステムの検出部を補正することにより透かし情報の検出精度を上げるという立場で、ロバストな電子透かしシステムの設計についてベイズ推定手法を用いて検討を行った。このような立場をとることにより、電子透かしシステムが現状で耐性をもたないような画像処理や攻撃を受けた場合、及び、将来新たな画像処理や攻撃を受けた場合でも電子透かしが正確に検出できるようになると期待される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：信号処理、画像処理、情報セキュリティ

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：セキュリティ信号処理、データハイディング、電子透かし、コンテンツ保護、コピー制御、デジタル画像、ベイズ推定、EM アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

近年の半導体・システム LSI 技術の進歩とコンピュータネットワークの普及により、音声・音響・画像情報や文字・図形情報がデジタル化されマルチメディア情報として、CD・DVD や光・磁気ディスクサーバに記録蓄積され、世界中からコンピュータネットワークを通してこれらのマルチメディア情報

に容易にアクセス・コピーできるようになってきている。同時に、そうしたマルチメディア情報を不正に利用する犯罪も目立つようになってきている。電子透かし (デジタルウォーターマーク、Digital Watermark) はそうした不正利用を抑止し、製作者や著作権者がマルチメディア情報を発信しやすくする技術の一つとして関心が高まっている。特にデジタル画像については Web で公開し

たり、アプリケーションソフトウェアによって容易に編集加工が行えるため不正利用される機会が多い。このため画像の著作権保護やコピー制御を目的として数年前から電子透かしが盛んに研究されている。

デジタル画像に対する電子透かしの基本方式は画素利用型と周波数領域利用型に大別される。画素利用型は画素値に処理を施して透かし情報を埋め込む方式である。これに対して、周波数領域利用型は画像データを周波数成分に変換し、特定の周波数成分に埋め込む方式である。後者の方式は前者の方式に比べて多くの透かし情報を埋め込むことはできないが、非可逆圧縮やフィルタリングなどの基本的な画像処理に対してロバストな（耐性をもった）電子透かし(※)を実現できる。通常、画像への電子透かしにはこのようなロバスト性（耐性）が要求されるので、フーリエ変換、離散コサイン変換、ウェーブレット変換などの周波数変換を利用した電子透かしが国内外で数多く提案されている。

(※ 透かし入り画像に対して編集加工処理を施しても電子透かしが壊れない。)

最近では、これらの方式を採用して非可逆圧縮やフィルタリングなどの基本的な画像処理に対して耐性をもった電子透かし埋め込み/検出システム（ソフトウェア）が市場に現れている。しかし、現状考え得るすべての画像処理に対して耐性をもった電子透かしは今のところ現れていない。逆に、画像の中の電子透かしを壊してしまう StirMark という電子透かし攻撃ツールが出現している。このような状況の中で、現状考え得るすべての画像処理や攻撃に対して耐性をもった電子透かしシステムを開発するのは非常に困難であると思われる。もし開発できたとしても、そのシステムは将来の画像処理ツールや電子透かし攻撃ツールのバージョンアップに対しては無効となるであろう。

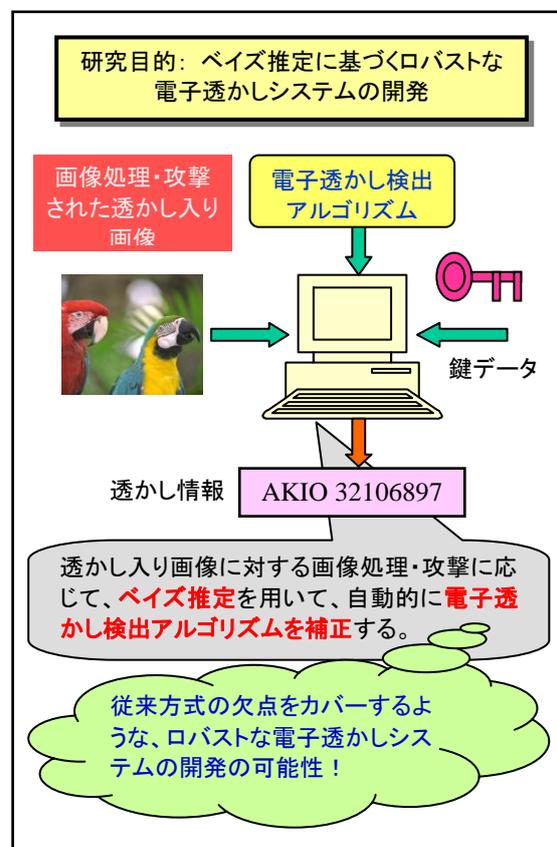
研究代表者は、電子透かし技術の調査や研究集会での議論を通して、電子透かし技術の開発や改良が盛んに行われているにも拘らず、現状あらゆる画像処理や攻撃に対してロバストな電子透かし方式が現れないこと、また、もし現れたとしても、この方式では将来の画像処理ツールや攻撃ツールのバージョンアップに対しては対応できないことに、現在の開発・改良アプローチの限界を痛感している。

2. 研究の目的

本研究では、デジタル画像を対象にし、透かし入り画像に対する編集加工処理に応じて、適応的に電子透かしシステムの検出部を補正することにより透かし情報の検出精

度を上げるという立場で、ロバストな電子透かし検出システムの開発・設計について議論する。このような立場をとることにより、電子透かしシステムが現状で耐性をもたないような画像処理や攻撃を受けた場合、及び、将来新たな画像処理や攻撃を受けた場合でも電子透かしが正確に検出できるようになると期待される。このように本研究のアプローチは上記の従来方式の欠点をカバーするものと考えられる。

本研究では、まず、現状の電子透かし埋め込み/検出システムの調査と解析を行う。次に、電子透かし埋め込み/検出システムのモデルを透かし情報の入出力関係に注目してコンボリューションモデルとして記述し、画像処理や攻撃によって「透かし情報がどのように歪むのか?」、「透かし情報の検出誤りがなぜ起きるのか?」を明確にする。その結果に基づいて、電子透かしの検出問題をブラインド・デコンボリューション問題として定式化し、ベイズ推定を用いてこの問題を解決する。すなわち、透かし入り画像に対する画像処理・攻撃に応じて、ベイズ推定を用いて自動的に電子透かし検出システムを補正するアルゴリズムを開発する。このように、電子透かしの検出問題に確率・統計の分野でよく知られたベイズ推定を用いて問題の解決を試みる点が本研究の特色である。



3. 研究の方法

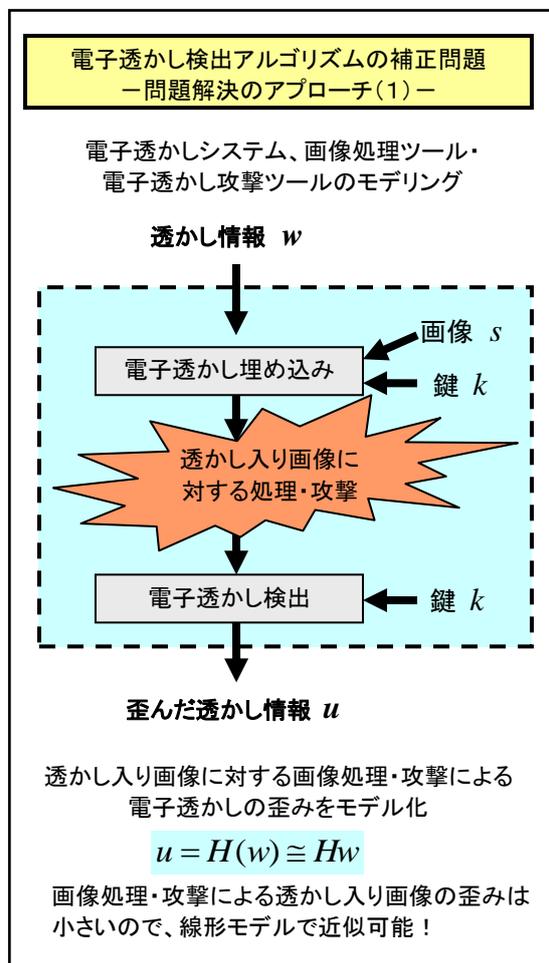
本研究は技術開発面から見ると次の要素研究に分割され、実行される。

- (1) 電子透かしシステム、画像処理ツール及び電子透かし攻撃ツールの調査： 電子透かしシステムの一般的モデルを作るために、電子透かしシステムを調査し分類整理する。また、画像処理ツールや電子透かし攻撃ツールを入手して、画像処理や攻撃のタイプを分類整理する。
- (2) 電子透かしシステム、画像処理及び攻撃のモデリング： 上記の結果に基づいて、電子透かし埋め込み／検出システムの一般的モデルを作る。また、様々な画像処理や攻撃によって透かし情報がどのように歪むか、そのモデル化を行い、電子透かし検出システムの補正問題の定式化を行う。
- (3) デコンボリューション問題の解決方法の調査： これまでの研究成果から、電子透かし検出システムの補正問題がデコンボリューション問題（一般にはブラインド・デコンボリューション問題）になることが予想されるので、デコンボリューション問題の分類整理とその解決方法を調査する。特に、ベイズ推定を用いたブラインド・デコンボリューション問題の解決方法を精査する。
- (4) 上記アルゴリズムの通信や画像処理分野への応用： 通信や画像処理の分野、例えば、伝送路の自動等化や画像復元の分野でもデコンボリューションの問題は現れる。本研究の成果がこれらの分野の諸問題に適用できるかどうか検討する。特に、本研究では、ブラインド・デコンボリューション技法を用いて問題解決を試みるため、そこで開発された新しい技法が、情報伝送や画像処理の分野で現れるブラインド・デコンボリューション問題(※)の解決につながるような成果も期待できる。(※ 例えば、歪んだ受信信号だけを用いて計算により送信信号を推定する問題や劣化した画像に含まれる情報のみから元の画像を復元する問題など。)

4. 研究成果

本研究の成果は次の通り。

- (1) 電子透かしシステムの調査： 電子透かしシステムの一般的モデルを作るために、電子透かしシステムを調査し分類整理した。これに関連して、ウェーブレット変換に基づく電子透かしシステムについて、透かし入り画像の品質と画像処理に対する耐性の観点から、電子透かしで用いられるウェーブレットフィルタバンクの評価を行った（雑誌論文②）。
- (2) 電子透かしシステムのモデリング： 上記(1)の結果に基づいて、電子透かし埋め込み／検出システムの一般的モデルをコンボリューションモデルとして近似した。また、様々な画像処理や攻撃によって透かし情報がどのように歪むか、そのモデル化を行い、電子透かし検出システムの補正問題の定式化を行った。

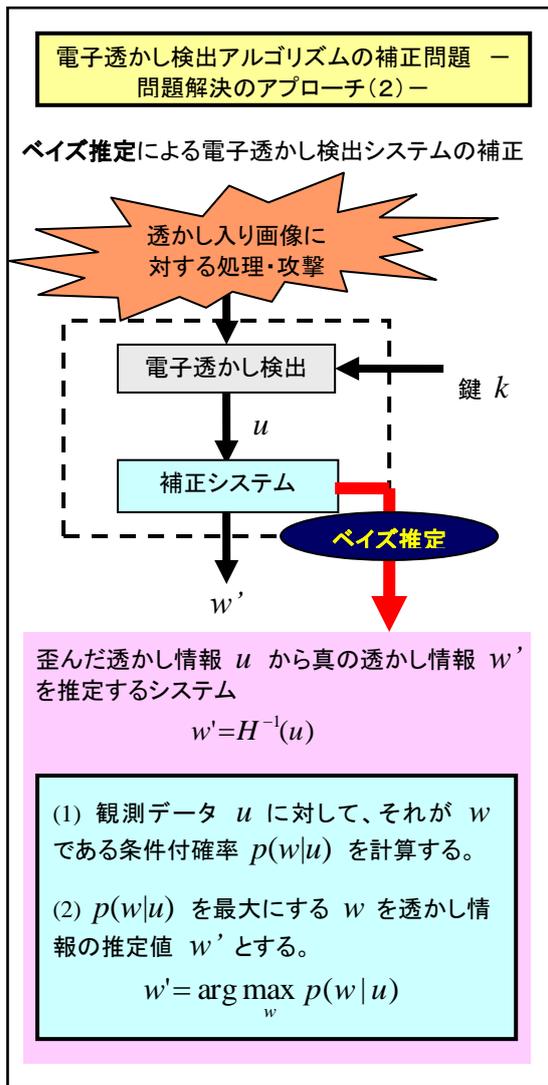


- (3) デコンボリューション問題の解決方法の調査： 上記(2)の結果に基づいて、電子透かし検出システムの補正問題がデコンボリューション問題（一般にはブラインド・デコンボリューション問題）に

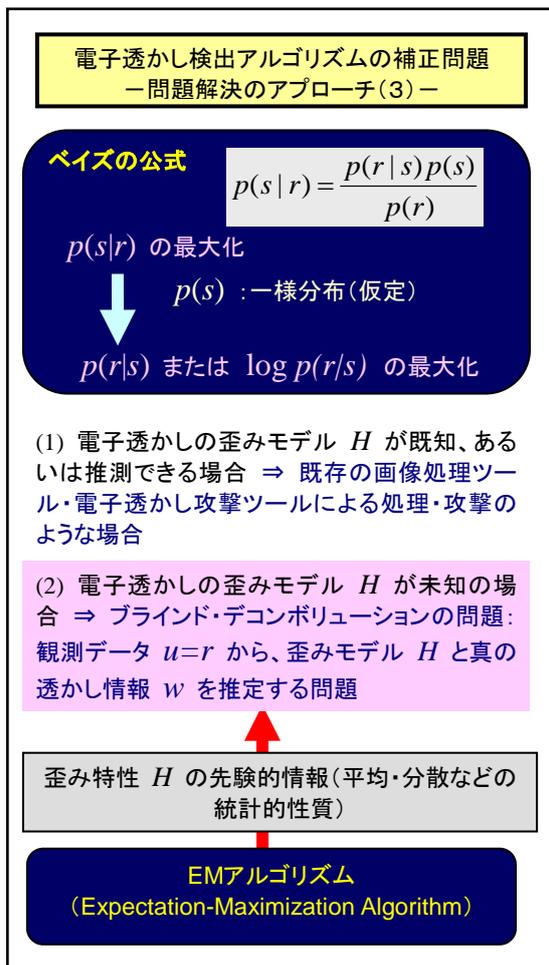
なることを確かめ、その解決方法を調査した。

- (4) 電子透かし検出問題のベイズ推定を用いた解決： 電子透かし検出システムの補正問題はデコンボリューション問題として取り扱うことができるので、この問題を次の3つの場合に分けて、それぞれについてベイズ推定に基づいて問題の定式化を行い、その解法について議論した。

- ① 歪みモデルが既知あるいは何らかの方法で推定可能な場合
- ② 歪みモデルが未知ではあるが、その平均や共分散などの統計的性質が既知あるいは推定可能で、かつ透かし情報の集合に関する情報を利用する場合
- ③ 歪みモデルが未知ではあるが、その平均や共分散などの統計的性質が既知あるいは推定可能な場合



- (5) 電子透かし検出アルゴリズムの提案： 上記①の場合はデコンボリューション問題となる。他方、②と③の場合はブラインド・デコンボリューション問題になる。2007年度は②について重点的に研究を行い、電子透かし検出システムの補正アルゴリズムを与えた(雑誌論文①、学会発表①)。2008年度は制約条件が最も少ない③について重点的に研究を行い、この問題がEMアルゴリズム(Expectation-Maximization Algorithm)を用いて解決できることが分かった。このアプローチにより電子透かし検出システムの補正アルゴリズムを与えた(学会発表②)。



- (6) 電子透かし検出アルゴリズムの評価実験：透かしの耐性評価実験について簡単に記す。詳細については雑誌論文①と学会発表②を参照されたい。
 本研究では、離散ウェーブレット変換に基づく電子透かし方式を用いて画像処理に対する耐性評価実験を行い、提案手法の有効性を評価した。実験の諸元を

表 1 に示す。

テスト画像 Lenna (図 1) を 3 階層にウェーブレット分解し、多重解像度表現成分 HL3 と LH3 のウェーブレット係数に透かし情報を埋め込む (図 2)。透かし情報は 4 ビットの情報ビットと 1 ビットの検査ビットからなる 5 ビットの系列とする。従って、この透かし系列は 16 パターン存在する。電子透かしの埋め込みでは、5 ビットの透かし系列を 5 倍冗長し、25 ビットの系列としてウェーブレット係数に埋め込む。ウェーブレット係数は HL3 と LH3 の帯域から絶対値の小さな係数を 25 個選び、透かし情報に応じて ± 10 に量子化する。このとき、透かし入り画像の画質 (PSNR) は 53.7 [dB] である。

透かし情報の検出では、画像処理を施された透かし入り画像から 25 個の透かし入り係数を抽出し、次の方法で処理をする。

- ① 25 個の透かし入り係数の符号の符号を調べてバイナリデータを検出する。次に、これらを 5 個ずつ区切り、多数決判定により 5 ビットの透かし系列を得る。パリティチェックにより誤りが検出されなければ“検出誤りなし”と判定し、4 ビットの情報ビットを埋め込まれていた透かし情報とする。パリティチェックにより誤りが検出された場合は②の処理を行う。
- ② 25 個の透かし入り係数を 5 個ずつ区切り、透かし入り係数の平均値を求め、情報ビットに対応する 4 ビットを観測データとする。この観測データを用いて提案手法により透かし情報の推定を行う (電子透かし検出システムの補正を行う)。

本実験では画像処理として、平滑化、雑音付加、JPEG 圧縮、幾何学変換を用いた。平滑化、雑音付加、JPEG 圧縮に対する評価実験では、16 パターンの透かし情報の埋め込みと検出を行う。幾何学変換に対する評価実験では、電子透かし攻撃ツール StirMark 中の Random Distortion を用いた画像処理に対する耐性を評価する。Random Distortion という処理は画像をランダムに僅かに歪ませる画像処理である。透かし情報と画像の歪み具合を変えながら透かし情報の埋め込みと検出を行い、従来手法で検出誤りが生じる観測データを 100 パターン用意する。そして、100 パターンの観測データそれぞれについて、提案方式を用いて埋め込まれていた透かし情報を推定する。表 2 に評価実験の結果を示す。

表 2 から提案方式を用いることにより非常に高い確率で歪んだ透かし系列から埋め込まれていた透かし情報を推定できることが確かめられた。

表 1. 評価実験の諸元

テスト画像	LENNA (256×256 画素、8 bit/画素) (図 1)
ウェーブレット変換 (周波数変換)	Daubechies 型 (8 タップ) フィルタバンク、分解段数 3 (サブバンド数 10)
透かし埋め込み領域	サブバンド LH3、HL3 (図 2)
透かし埋め込み方法	量子化制御法：絶対値の小さなウェーブレット係数を N 個選び、透かし情報に応じて $\pm Q$ に量子化する。
埋め込み強度	$Q=10$
透かし埋め込み情報量	$N=25$ bit
透かし入り画像の品質	PSNR=53.7 dB



図 1. テスト画像 Lenna

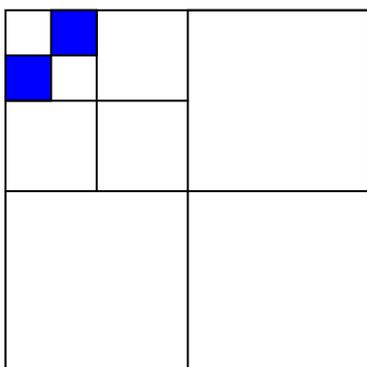


図 2. 透かし埋め込み領域

表 2. 評価実験の結果：透かし入り画像に対する画像処理と画像処理後の画質、透かし情報の検出率

画像処理	画像処理後の透かし入り画像の画質 PSNR(dB)	透かしの検出率(%)	
		検出補正なし	検出補正あり (提案手法)
平滑化	29.8	100	—
雑音付加	28.1	75	100
JPEG 圧縮	31.2	50	100
幾何学変換	25.7	0	99

(7) 本研究で開発したアルゴリズムが通信路等化や画像復元の分野で現れるブラインド・デコンボリューション問題に適用できるための条件を明らかにした (学会発表②)。

(8) 本研究を総括し、報告書等の作成を行った。今後の課題としては、電子透かし歪みモデルの統計的性質の推定法ならびに EM アルゴリズムに基づく電子透かし検出手法におけるパラメータチューニングの問題などが挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 2 件)

- ① Akio Miyazaki, "Improvement of Watermark Detection Process Based on Bayesian Estimation," Proc. of 2007 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD2007) (CD-ROM), pp.408-411, Aug. 2007, 査読有.
- ② Akio Miyazaki, "A Study on the Best Wavelet Filter Bank Problem in the Wavelet-Based Image Watermarking," Proc. of 2007 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD2007) (CD-ROM), pp.184-187, Aug. 2007, 査読有.

〔学会発表〕 (計 2 件)

- ① 宮崎明雄, “電子透かし検出問題のベイズ推定に基づく解法について,” 電子情報通信学会 回路とシステム/信号処理/通信方式研究会, 2009 年 3 月, 長良川国際会議場(岐阜).
- ② 宮崎明雄, “Improvement of Watermark Detection Process Based on Bayesian Estimation,” 電子情報通信学会 回路とシステム/VLSI 設計技術/信号処理研究会, 2007 年 6 月, 北海道東海大学(札幌).

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 宮崎明雄 (分担執筆), 画像電子情報ハンドブック 1.4 情報ハイディング技術 1.4.4 静止画像向け電子透かし, 画像電子学会・東京電機大学出版局, 担当執筆量 6 ページ, 2008 年 2 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 明雄 (MIYAZAKI AKIO)

九州産業大学・情報科学部・教授

研究者番号：70192763